

油汚染地盤の原位置非掘削浄化技術開発に関する室内土槽実験 Laboratory soil tank experiments for the development of in-situ purification on oil polluted ground without excavation

棚橋秀行

大同大学・工学部・tanahasi@daido-it.ac.jp

概要

地盤環境修復のための研究が近年多く行われている。大同大学棚橋研究室では、特に油汚染地盤の非掘削浄化を目的に、界面活性剤を用いて機械油を乳化し回収する方法について継続的に研究を行っている。これまでに、間隙内二液反応発泡法を提案し、いくつかの実験ケースでそれまでの結果を大きく上回る浄化効率を確認している。本研究ではこれに加えて増粘剤 CMC を界面活性剤に添加することによる流れ場の制御も新たに着想した。これらの方法を下敷きに、模擬汚染地盤の均質・不均質、障害物の有無、界面活性剤の投与ポイントと汚染油の回収ポイントの間隔に影響する実験装置の大小（幅 60cm の土槽・幅 2m の土槽）などを比較する浄化実験を行った。これらの実験結果より、浄化の進行の違いに影響を与える要因について考察した。

キーワード：油汚染地盤，環境修復，非掘削浄化，室内実験

1. はじめに

近年、工場などからの油による地盤汚染が問題となっている。粘性が小さく揮発性に富む油に関する浄化の研究は進んでいるが、機械油などの高粘性で揮発しにくい油に対してはあまり進んでいない。大同大学棚橋研究室では、油汚染地盤の非掘削浄化を目的に、界面活性剤を用いて機械油を乳化し回収する技術 (SEAR: Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation) について継続的に研究を行っている。2014 年には酢酸と重曹を添加した界面活性剤の切り替え交互圧入による間隙内二液発泡法を用いた実験を行いその結果を報告¹⁾した。これまでの研究の主なポイントは界面活性剤をどのように浸透させれば少しでも効率よくムラなく浄化ができるのかという「効率性」であった。しかしながら実際には汚染現場ごとに異なる条件が想定される。そこで本研究では、多くの条件下でも適応できる「汎用性」を持った技術の開発、という新たな視点から室内土槽を用いた模擬油汚染地盤の浄化実験を行った。

2. 小型 2 次元土槽を用いた実験

2.1 小型 2 次元土槽を用いた実験 2-1

(切り替え交互圧入による間隙内二液発泡法)

2.1.1 実験の目的と方法

先述のように 2013 年度の研究において、重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤を模擬油汚染盤に交互に圧

入して発泡させる実験で効率の良い浄化を行うことができた。本節の実験 2-1 は、昨年とほぼ同条件で行うことでその性能を確認するために実施した。浄化にはこれまで用いていた HLB10.5 の界面活性剤を用いた。HLB 値は 0 から 20 までの値を取り、0 に近いほど親油性が高く 20 に近いほど親水性が高くなる界面活性剤の物性指標である²⁾。実験の際、撮影画像から画像処理 (2 値化) を用いた方法で、土槽透明アクリル板観察面における油の残留領域の時間的変化を、初期汚染領域を 100% とした汚染領域比 (%) として定量化した。図-1 は実験装置の概略図である。小型 2 次元土槽 (内寸幅 62.0 cm × 高さ 72.0 cm × 奥行 5.0 cm) に下から豊浦砂を高さ 15 cm、質量比 10% の汚染油を混ぜた豊浦砂を高さ 15 cm、覆土として豊浦砂を高さ 20 cm の順で水締め充填した。充填密度は全層共通で、乾燥密度は $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$ である。汚染油は灯油 1 : エンジンオイル 10 の比率で混合しスダン IV にて赤く着色したものである。

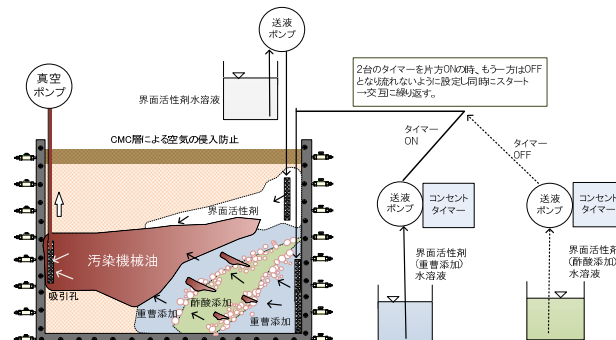


図-1 実験 2-1 の装置概略図

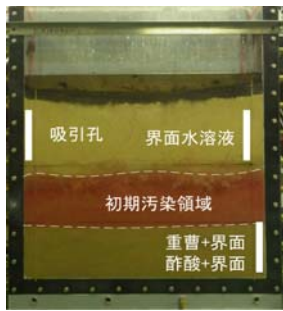


写真-1 実験 2-1
初期状態

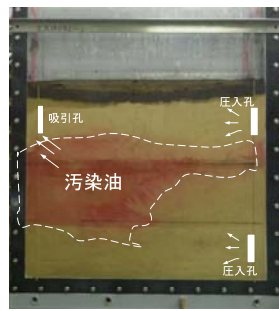


写真-2 4時間後
(0.4PV)

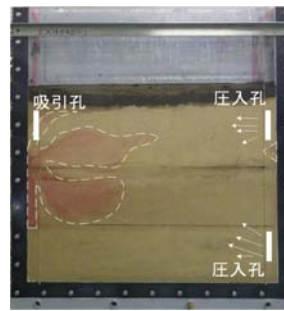


写真-3 8時間後
(0.8PV)

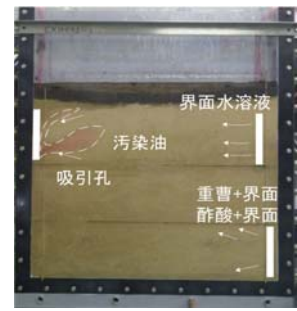


写真-4 12時間後
(1.2PV)

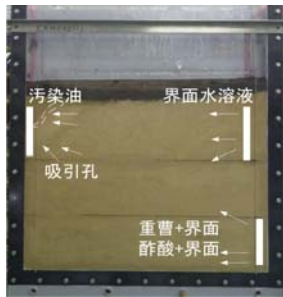


写真-5 18時間後
(1.8PV)

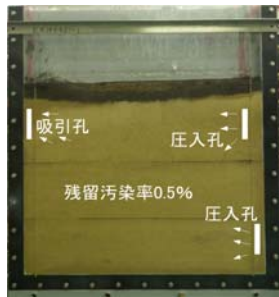


写真-6 21時間 10分後
停止 (2.1PV)

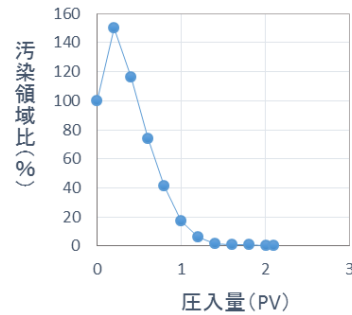


図-2 実験 2-1 の浄化の進行

地表面には、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被覆を施し吸引回収の際の空気の進入を防いだ。図-1の土槽内の右の圧入ノズルを用い、上からは HLB10.5 の界面活性剤 3% 水溶液 10 L、下からは同界面活性剤 3% に重曹を 8% 添加した水溶液 5 L と、同界面活性剤 3% に酢酸を 5% 添加した水溶液 5 L とともに 6 ml/min の速度でタイマーにより 30 分毎交互に圧入していく。この 3 つの水溶液の合計 20 L は 3 PV（Pore volume）に相当する。同時に図左側のように吸引孔を通じて真空ポンプで汚染油を吸い上げ真空サーバーの中へと回収する。

2.1.2 実験経過

写真-1 は実験開始時の初期状態である。写真-2～写真-4 のように発泡によって右下から順調に汚染油が押し上げられ乳化し、これが上方のノズルからの界面活性剤水溶液によってすすがれて左へ移動し、吸引孔から回収されていくことが分かる。写真-6 は 21 時間 10 分が経過した状態の写真である。この時点で視認できる汚染油が殆ど除去されたので実験を停止した。この実験の浄化の進行を図-2 に示す。写真-1 の初期汚染領域が汚染領域比 100% である。界面活性剤水溶液総計 3 PV を圧入する予定であったが、1.5 PV でほぼ浄化が完了した。

2.2 小型 2 次元土槽を用いた実験 2-2

(下部より増粘剤添加液圧入)

2.2.1 実験の目的と方法

これまでの小型 2 次元土槽を用いた実験では汚染機械油が土槽底面に残留し、吸引回収が難しくなる状況がよく見られた。そこで本節の実験 2-2 では図-3 のように先に上の洗浄液を流し汚染領域まで浸透させてある程度まで浄

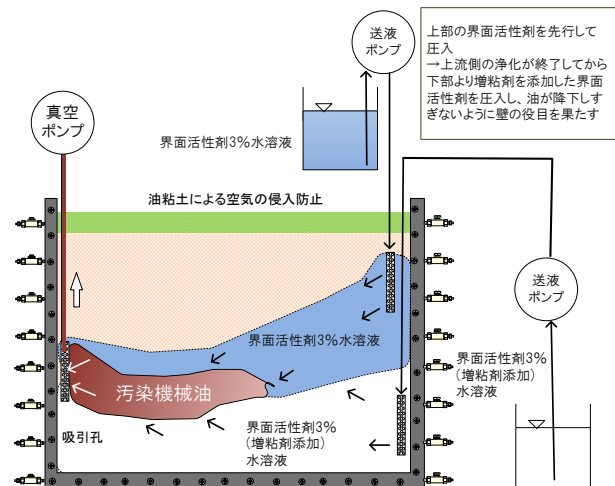


図-3 実験 2-2 の挙動予想図

化した後、増粘剤として以前被覆に用いた CMC を添加し粘性を高めた界面活性剤水溶液を下から圧入することで、汚染油が下方へ降下しないようになり残留なく浄化が進むのではないかと考えた。実験装置および汚染地盤の作成に関しては実験 2-1 と同じである。上からは界面活性剤 3% 水溶液を 13.3 L、下からはこれに、CMC 粉末を 0.5% (33.5 g) 添加したものを 6.7 L、計 20 L (=3 PV) 用意した。今回は地表面に油粘土を被覆し空気の進入を防いだ。圧入流速は上から 10.0 ml/min、下からは 5.0 ml/min とした。

2.2.2 実験経過

写真-7 は初期状態であり、中層の色の濃い部分が初期汚染領域である。写真-8 は 5 時間後 (0.64 PV) の写真である。上からの洗浄液が汚染領域に浸透し、汚染油を乳化し左へ押し流している。この時点では下の洗浄液はまだ流れ始めた段階のため、汚染油が下方へ少し降下してしまっている。写真-9、10 は 10 時間後 (1.28 PV)、15 時間後 (1.91



写真-7 実験 2-2 初期状態

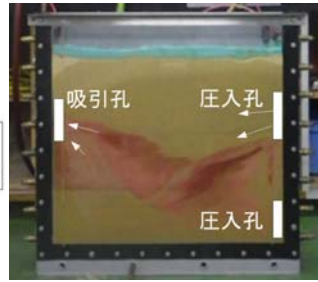


写真-8 5時間後 (0.64PV)

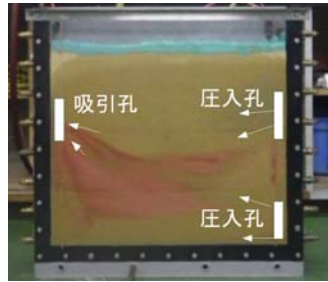


写真-9 10時間後 (1.28PV)

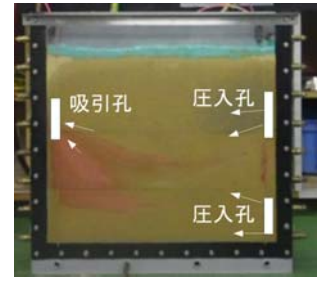


写真-10 15時間後 (1.91PV)

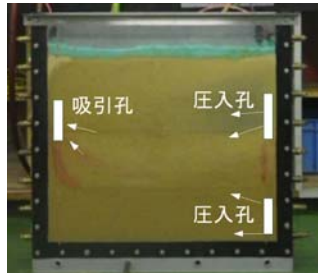


写真-11 20時間後 (2.55PV)

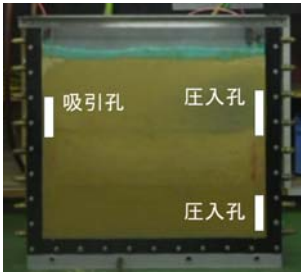


写真-12 終了時 (3.0PV)

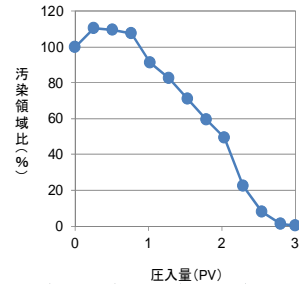


図-4 実験 2-2 の浄化の進行

PV) の写真である。下層に粘性の高い液体が流れているので、油が下方に残留することなく、ほぼ水平に押し流されていることが確認できる。写真-11 は 20 時間後(2.55 PV) の写真である。若干細く線状に汚染油が残っているが、ほとんど浄化できている。写真-12 は実験終了時の写真である。この時点で洗浄液 (3.0 PV) を全て流し切ったので実験を終了した。図-4 に今回の実験の浄化の進行を示す。実験の序盤での汚染油の乳化により汚染領域比がいったん上昇したが、その後は順調に低下し、最終的には 3.0 PV 時に 0.2%まで下げることができた。

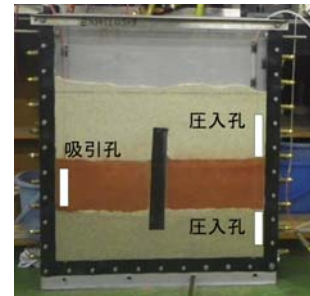


写真-13 実験 2-3 初期状態

2.3 小型 2 次元土槽を用いた実験 2-3 (複数地層・障害物実験)

2.3.1 実験の目的と方法

実際の地盤では複数の地層が存在し、特に工場の地下には各種埋設物が存在し浄化の障害となる。本節の実験 2-3 では、より実地盤での汎用性を高めるため、複数地層からなる模擬汚染地盤内に障害物を設置し、浄化実験を行うこととした。実験で用いた障害物の材質は弾力性に富んだゴムであり、土槽の奥行 5cm に対して 6cm の厚みを持つ角材状のものを土槽上部より鉛直になるように留意しながら挿入し設置した。写真-13 が今回の実験の初期状態である。実験装置にはこれまでと同じく小型 2 次元土槽を使用した。下層と上層には粒径約 1 mm の焼砂を使用し、中央の油汚染層は豊浦砂を使用した。充填密度・初期汚染濃度はこれまでと同様である。上部の圧入孔からは界面活性剤 3%水溶液を常に流し続け、下部の圧入孔からは界面活性剤 3%水溶液を 2 時間停止、1 時間圧入を交互に行なう。この間欠圧入は流れの固定化を避けることを狙うものである。流速は上下共に 10 ml/min とした。図-5 の挙動予想図のように、まず上流側の汚染油を障害物の下をくぐらせ、その後下流側で上下から挟み撃ちにする事で汚染油を

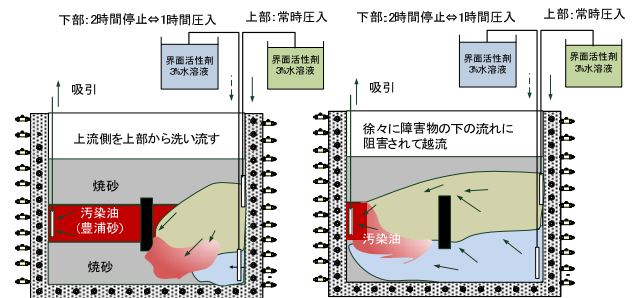


図-5 実験 2-3 挙動予想図

回収する、という浄化の進行に期待し実験を開始した。

2.3.2 実験経過

写真-14 は 12 時間後 (1.5 PV) の写真である。期待した通り下をくぐるように障害物の上流 (右) 側の汚染油が移動している。写真-15 は 24 時間後 (3.0 PV) の写真である。障害物の上流が完全に浄化され、洗浄液が障害物を超えて下流 (左) 側に達しているのが確認できる。これまでの実験ではこの 3.0 PV 圧入時で実験を終了していたが、今回の実験は設定条件が厳しいため、特に上限を設けずに浄化にめどが立つまで圧入～回収を継続することとした。写真-16 は 36 時間後 (4.5 PV) の写真である。障害物の下流側の浄化が徐々に進んでいる。写真-17 は 6.0 PV 圧入時の写

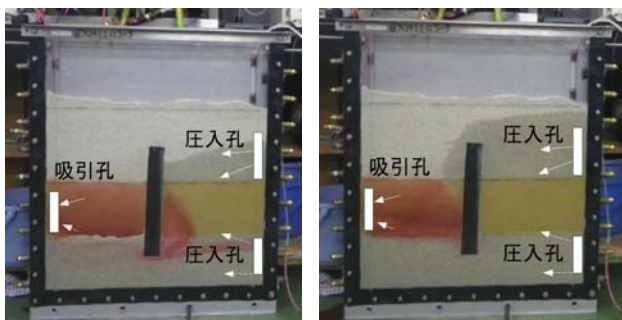


写真-14 12時間後 (1.5PV)

写真-15 24時間後 (3.0PV)

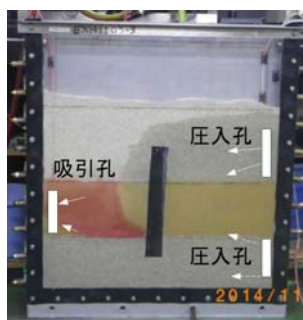


写真-16 36時間後 (4.5PV)

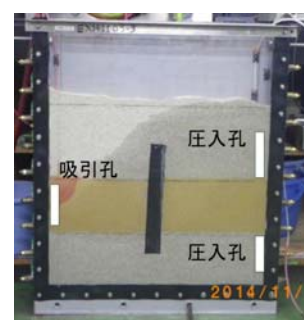


写真-17 圧入終了時 (6.0PV)

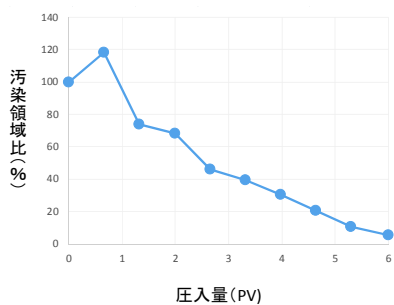


図-6 実験 2-3 の浄化の進行

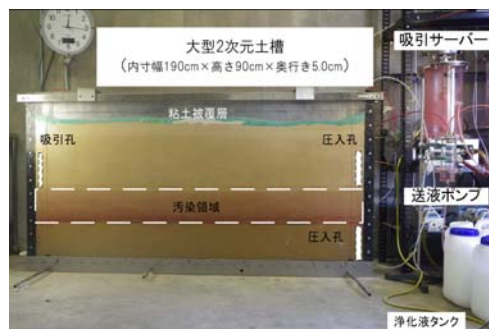


写真-18 大型 2 次元土槽と周辺装置 (実験 3-1 と 3-2 で共通)

真で、ここで実験終了とした。図-6に今回の実験の浄化の進行を示す。終了時までには 6 PV を使用したが、最終汚染領域比 5.5%にいたるまで停滞なく順調に浄化が進行した。困難な条件であったが発泡反応も増粘剤も使用せず、洗浄液の送液・停止というシンプルな方法で浄化に成功したことは今後の汎用性に期待できる結果となった。

ここまでの小型 2 次元土槽を用いた実験で確認された浄化性能を、次章では大型 2 次元土槽を用いて確認する。

3. 大型 2 次元土槽を用いた実験

3.1 大型 2 次元土槽を用いた実験 3-1

(切り替え交互圧入・間隙内二液発泡法)

3.1.1 実験の目的と方法

実験 2-1 において交互圧入発泡による浄化性能が再確認された。今回は大型の土槽において実験を行いその浄化性能を確認する。写真-18 は実験装置の概略である。実験装置の構成は基本的に小型 2 次元土槽と同じである。大型 2 次元土槽(内寸幅 190 cm×高さ 90 cm×奥行き 5.0 cm)に下から豊浦砂を高さ 20cm、10%の汚染油を混ぜた豊浦砂を高さ 20 cm、覆土として豊浦砂を高さ 40 cm の順で水締め充填した。充填乾燥密度は $\rho_d=1.55 \text{ g/cm}^3$ である。地表面は油粘土で被覆し空気の進入を防いだ。

右の上の圧入孔から界面活性剤 3%水溶液 50 L、下からは界面活性剤 3%+重曹 8%水溶液 25 L と界面活性剤 3%+酢酸 5%水溶液 25 L とをそれぞれ 30 分毎交互に圧入していく。この水溶液の合計 100 L が大型 2 次元土槽実験における 3 PV である。今回は上下共に流速を 5 ml/min の速度で圧入した。

3.1.2 実験経過

写真-19は初期状態である。写真-20の24時間後(0.4 PV)には下から圧入している水溶液が作用し始め、汚染領域の右下部分が浄化されている。しかし、この時に上から圧入している水溶液が地表面付近にまで来てしまっていることもわかる。写真-21は48時間後の状態の写真である。地表面と被覆油粘土との隙間に、圧入している水溶液が溢れ出す現象が確認された。写真-23は72時間後の状態の写真である。被覆油粘土をすり抜けて水溶液が噴き出してしまった。このまま実験を続けると水溶液が溢れてしまう恐れがあるため写真-24の73時間後に実験を停止した。

前章の小型土槽では発泡により生じた二酸化炭素が溶液とともに右から左へと吸引されていた。しかし、大型土槽では吸引圧力が右のほうまで作用せず、気体が左へ移動せずこれにより上部からの水溶液が噴き出してしまったと考えられる。この間、浄化も進んでいない。理由は通底しており、発生した気泡が油汚染ゾーンの間隙に封入されてしまい、上部からの界面活性剤が浸透せず、期待したすすぎの働きをしなかった。発泡による浄化のコントロールには工夫が必要になることがわかった。

3.2 大型 2 次元土槽を用いた実験 3-2

(下部より増粘剤添加液圧入)

3.2.1 実験目的と方法

実験 2-2 と同様に、上の圧入孔からの界面活性剤の圧入に加えて、下の圧入孔から増粘剤として被覆と同じ CMC を添加し粘性を高めた界面活性剤水溶液を圧入することで、大型 2 次元土槽においても油汚染域を下から支えつつ挟み込むようにすることで汚染油が吸引孔へほぼ水平に



写真-19 実験 3-1 初期状態

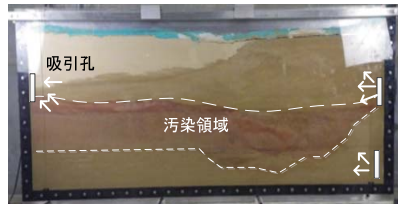


写真-20 24 時間後 (0.4PV)

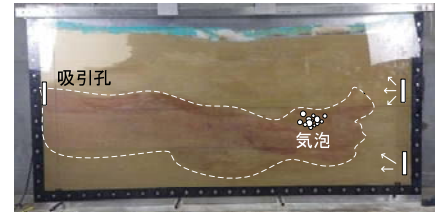


写真-21 48 時間後 (0.8PV)

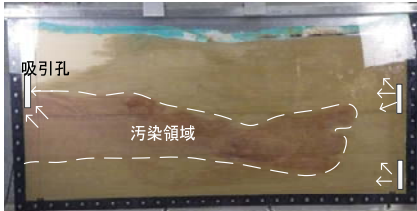


写真-22 60 時間後 (1.3PV)

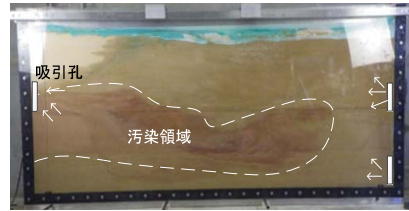


写真-23 72 時間後 (1.3PV)

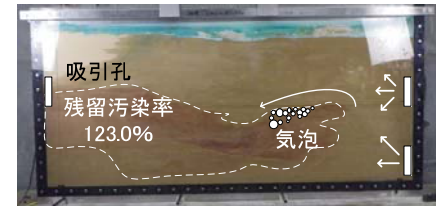


写真-24 73 時間後停止 (1.5PV)

移動するように浄化できるか実験を行う。汚染地盤の作成に関しては実験 3-1 (写真-18) と同じである。粘性を測定したところ、上から圧入する界面活性剤 3%水溶液は粘性 $3.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、下からの界面活性剤 3%+ CMC0.5%水溶液の粘性は $50.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ であった。これらを上下とも流速 5 ml/min で圧入した。

3.2.2 実験経過

写真-25 は初期状態である。写真-26~27 は 30~45 時間後の状況である。下から圧入された粘性の高い界面活性剤の流れに支えられて、汚染油が降下することなく左に移動している。写真-28~30 は 75~105 時間後の写真である。上層部に広がった汚染域も徐々に小さくなっている。その後も浄化が順調に進行し、写真-32 の 135 時間後 (2.8 PV) には浄化がほぼ完了している。浄化液 3 PV を流し終えたので写真-33 の 143.5 時間後に実験を停止した。油汚染領域の下部に粘性の高い流れを作成することで、汚染油をほぼ水平に移動させて回収する良い結果を得られた。

3.3 大型 2 次元土槽を用いた実験 3-4

(複数地層・障害物実験)

3.3.1 実験目的

第 2 章の実験 2-3 では、2 つの圧入孔からの界面活性剤の時間差圧入や、圧入・停止を繰り返す投与パターンにより浄化に成功した。今回は、実験装置を小型 2 次元土槽から大型 2 次元土槽へと変更し、障害物の個数を 1 本から 4 本へと増やして実験を行う。

3.3.2 実験方法

写真-34 に実験装置の概略を示す。下層と上層には粒径約 1 mm の焼砂を使用し、中央の汚染された層は豊浦砂を使用した。油の汚染濃度はこれまで同様 10% である。障害物に見立て角棒状のゴム素材を、4 本入れた。写真には実験経過の説明のために①~④の番号を振ってある。圧入流速は上下共に 10 ml/min とした。まず、上部に設置した圧入孔から先行して 3% 界面活性剤水溶液を圧入することから実験を開始する。実験開始から 2 時間後に下の圧入孔から同じく 3% 界面活性剤水溶液を圧入する。圧入を 1 時

間行った後は再び 2 時間停止、1 時間圧入の繰り返しで実験を行っていく。上部孔に関してはこの間欠操作は行わず 3% 界面活性剤水溶液を継続して圧入する。

3.3.3 実験経過

写真-35 は初期状態である。写真-36 は 100 時間後 (1.89 PV) である。②番と③番の障害物の間の汚染油が少し浄化されている。写真-37 は 140 時間後 (2.65 PV) である。全体的に汚染油の色が薄くなっており、乳化しているのがわかる。また、①番の障害物の右側がほとんど浄化されているのが確認できる。写真-38 は 160 時間後 (3.03 PV) である。写真-37 から 20 時間経過したがほとんど変化がない。写真-39 は 161.5 時間後 (3.05 PV) である。やはり、140 時間後 (2.65 PV) からほとんど変化がない。小型 2 次元土槽で成功した実験では障害物の下をくぐらせて汚染油を左に流していたのだが、写真をよく見ると油は上に行こうとしているが上の圧入孔からの界面活性剤に押さえつけられて停滞しているようである。そこで、次のように圧入パターンを変更した。

これまでの実験では上の圧入孔は常時洗浄液を流し、下の圧入孔は 2 時間停止、1 時間圧入の繰り返しで行ってきたが、下の圧入孔の役割を 2 時間圧入、1 時間停止に変更した。これにより上への流れの時間が増え、油が障害物の上側を通過するようにならないかと期待した。下からの圧入をあくまで間欠にしたのは、上下の圧入流速を固定してしまうと浸透領域が固定化し障害物の背面によどみ領域ができやすいと考えたことによるものである。写真-40 の 162.5 時間後 (3.07 PV) から下の圧入孔の圧入パターンを変更して洗浄液を圧入した。写真-41 は 182.5 時間後 (3.45 PV) である。下の圧入孔からの洗浄液の圧入時間が増えたことで、汚染油がこれまで以上に押し上げられ浄化が進んだと考えられる。写真-42 は 202.5 時間後 (3.83 PV) である。①番と②番の障害物の間の汚染油がほぼ浄化されているのが確認できる。②番と③番、③番と④番の障害物の間も同様にかなり浄化が進んでいる。写真-43 は 222.5 時間後 (4.21 PV) である。この時点で全体的に汚染油を浄化することに成功した。実験はその後もしばらく継続し

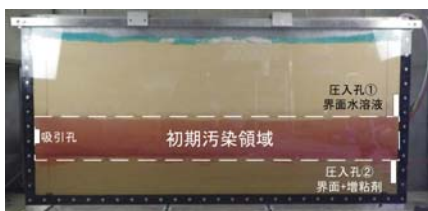


写真-25 実験 3-3 初期状態

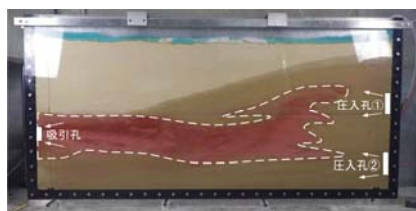


写真-26 30 時間後 (0.6PV)



写真-27 45 時間後 (0.9PV)



写真-28 75 時間後 (1.6PV)



写真-29 90 時間後 (1.9PV)



写真-30 105 時間後 (2.2PV)



写真-31 120 時間後 (2.5PV)



写真-32 135 時間後(2.8PV)



写真-33 143.5 時間後停止 (3PV)

275 時間後で圧入を終了した。

使用した洗浄液の量は合計 185 L (5.2 PV) であった。今回の実験も小型 2 次元土槽実験 2-3 に引き続き困難な条件であったが、発泡反応も増粘剤も使用せず、洗浄液の送液・停止というシンプルな方法で浄化に成功した。均質で障害物の無い汚染地盤の浄化に要した 3 PV とさほどかわらない 4.21 PV で浄化を終了できており、今後の浄化対策における汎用的な方法として期待できる結果を得ることができた。

4. 考察

4.1 ここまでの実験結果について

大型 2 次元土槽実験の浄化の進行をまとめた図-7 にそって、ここまでの実験結果について考察する。

実験 3-1 (●) : 図-7 より、初期汚染領域よりも汚染領域を界面活性剤で拡散させただけで終わってしまった。この実験が途中で中断となったのは地表への界面活性剤水溶液の噴き出しによるものであったが、間隙内発泡法の浄化方法としての失敗は、発生した気泡が油汚染領域の間に入り込んだまま封入されてしまったため上部からの界面活性剤が汚染ゾーンに浸透できず、小型 2 次元土槽実験 2-1 のようなすすぎの働きをしなかったことにあった。発泡による浄化を広範囲で行うために、更なる工夫が必要であることがわかった。

実験 3-2 (■) : 3 PV の時点での汚染領域比をほぼゼロにすることができた。下から圧入する界面活性剤に CMC を添加し粘性を増したこの方法は、油汚染領域の下部に粘性の高い流れを作成することで、汚染油をほぼ水平に移動

させて回収する良い結果を得られた。この方法は効率のみならず、実地盤では地下水の 2 次汚染を防止することができる可能性の高い方法とも考えられる。

実験 3-3 (□) : 複数地層に障害物が埋設された難条件での実験であったが、4.2 PV でほぼ浄化され良い結果が得られた。2 PV から 3 PV のあたりにかけ、浄化が若干停滞しているのが見受けられる。当初は上部圧入孔からの洗浄液で押し下げた油を下部圧入孔からの洗浄液で障害物の下をくぐらせる形で左へ流すことを考えていた。実際、圧入孔付近の障害物は我々の予想通りの結果となったが奥へ進むにつれ実際の挙動は我々の予想とは違い油が押し上げられ浮上する状況となった。

これまでの小型 2 次元土槽で今回の圧入方法を行った際には、土槽の横幅が小さいため、吸引が強くなり洗浄液を過剰に吸引して水位を下げてしまい、これに引きずられて汚染油下層に降下したのに対し、大型 2 次元土槽は横幅が大きいため、吸引が左端下流付近にしかかからず水位があまり下がらなかったため、汚染油がむしろ浮上した状態で障害物上部に引っかかっている様子になったことがわかった。これは土槽のサイズを変えたことによる挙動の大きな相違点であった。

その後、下部からの圧入パターンを 2 時間停止 / 1 時間圧入から、1 時間停止 / 2 時間圧入に変更した結果、3 PV を超えたあたりから浄化は飛躍的に進み、最終的には残留汚染油が 0.2% になるまで浄化することに成功した。

これは今後、継続的に研究してゆきたい方法であるが、特殊な条件下のみでの実験であったので、プレーンな条件、すなわち均質地盤で障害物のない状態で実施した場合にどの程度の浄化性能の上乗せとなるのを検討すべく、次

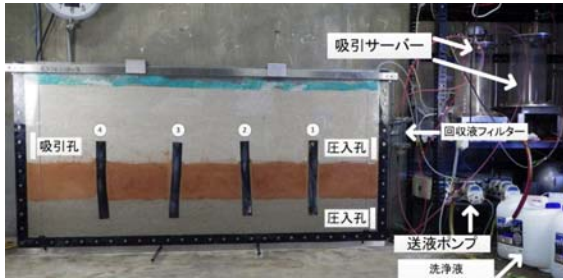


写真-34 大型 2 次元土槽と周辺装置 (実験 3-4)

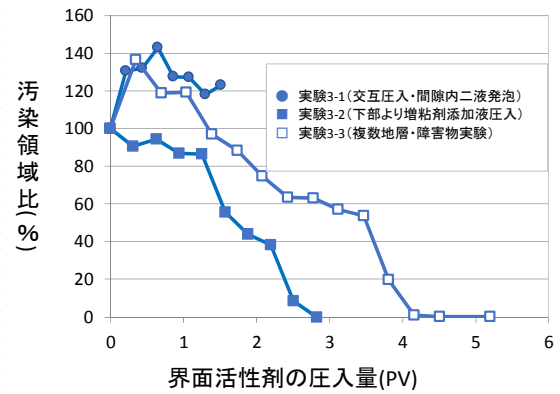


図-7 大型 2 次元土槽を用いた実験の浄化の進行の比較

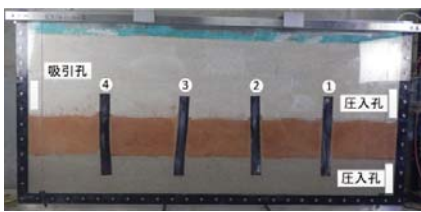


写真-35 実験 3-4 初期状態

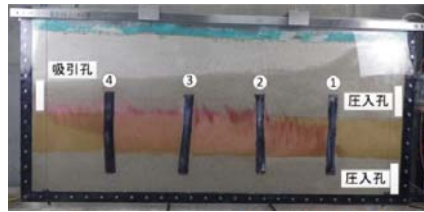


写真-36 100 時間後 (1.89PV)

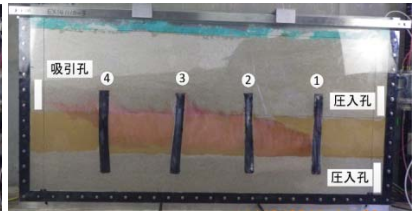


写真-37 140 時間後 (2.65PV)

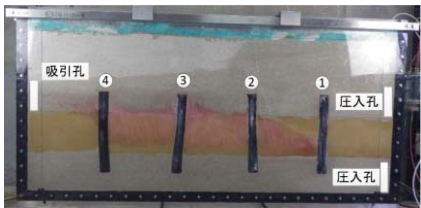


写真-38 160 時間後 (3.03PV)

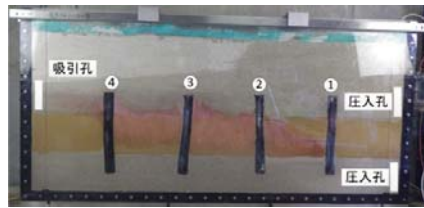


写真-39 161.5 時間後 (3.05PV)

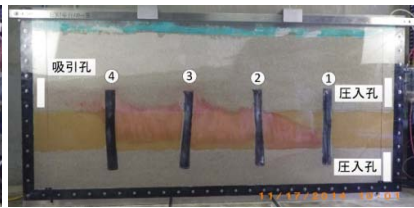


写真-40 162.5 時間後 (3.07PV)

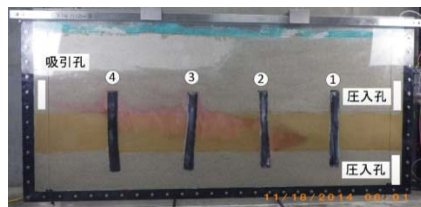


写真-41 182.5 時間後 (3.45PV)

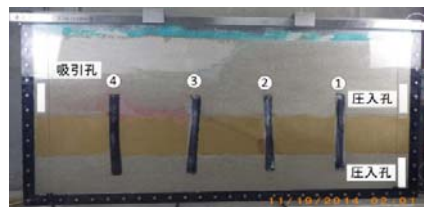


写真-42 202.5 時間後 (3.83PV)

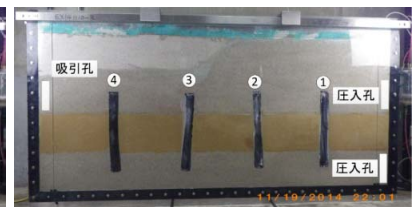


写真-43 222.5 時間後 (4.21PV)

節の追加実験 2 ケースを実施した。

4.2 小型 2 次元土槽を用いた追加実験-1 と 2

4.2.1 実験の目的と方法

追加実験-1 と 2 の 2 つの実験を行った。目的は先述の通りで、障害物のない均質地盤において、界面活性剤を連続投与するケース (追加実験-1) に対して間欠投与するケース (追加実験-2) がどの程度浄化性能が上乘せとなるのを比較することである。

前出の小型 2 次元土槽を 2 つ用意し、第 2 章の実験 2.1 と同様に汚染地盤を作成した。地表面には被覆を行わず、これまでの小型 2 次元土槽のように吸引圧がかかりすぎて地下水が過度に低下しないよう、変更した。コストのことも考え、今回の追加実験では 1、2 と下の圧入孔からは界面活性剤 (3%) を投与するが、上からは水のみを投与することにした。これにより使用する界面活

性剤の減量に期待する。

追加実験-1 では、上部圧入孔からは水を 5.0ml/min で、下部圧入孔からは界面活性剤を 5.0ml/min でともに連続投与した。

追加実験-2 では、30 分おきに、上部圧入孔からは水を 4.5ml/min で、下部圧入孔からは界面活性剤を 4.1ml/min で、間欠的に投与した。

4.2.2 実験経過と考察

追加実験-1 (連続投与) の実験経過が写真-44 の (a)~(e)、追加実験-2 (間欠投与) の実験経過が写真-45 の (a)~(c) である。写真の下の PV は水と界面活性剤の合計 PV で表記してある。追加実験-1 (連続投与) では 7.0PV 投与時でも汚染油がすじ状に残留しているが、追加実験-2 (間欠投与) では 4.0PV で浄化がすでに終了している、といった違いがみられた。

浄化の進行をグラフ化し、比較したものが図-8 である。

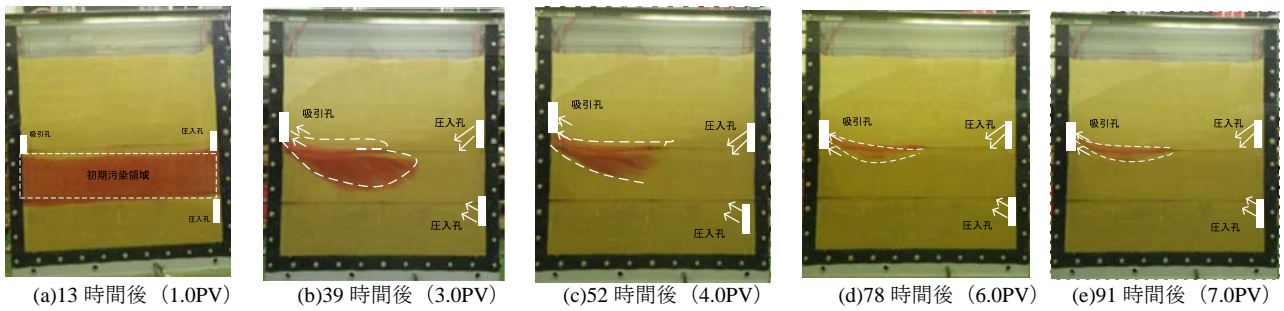


写真-44 追加実験-1 連続投与のケース（上部圧入孔：水のみ、下部圧入孔：界面活性剤を連続投与）

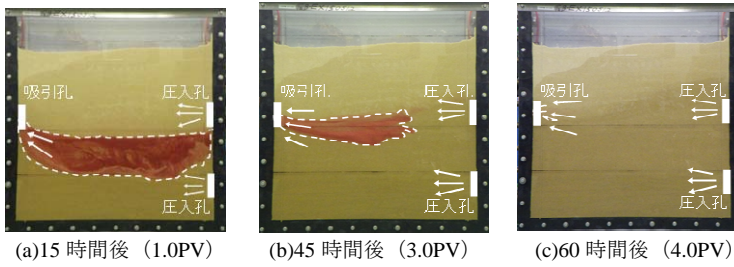


写真-45 追加実験-2 間欠投与のケース

(30分おきに上部圧入孔：水のみ、下部圧入孔：界面活性剤を交互に投与)

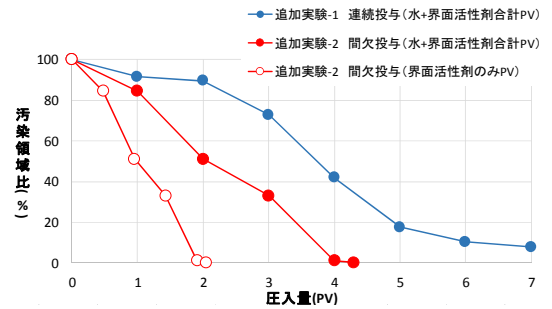


図-8 追加実験-1 と 2 の浄化の進行の比較

追加実験-1（連続投与）では5.0PVあたりから浄化効率が低下するのに対し、追加実験-2（間欠投与）ではほぼ一直線上に浄化完了（4.0PV）まで進行する様子が分かる。およそ半分のPVでほぼ同等の汚染油が回収できている。また、今回の実験では水も圧入しており、界面活性剤の実際の使用量はこれまでの実験よりさらに少ない。図-8の白丸（○）は、追加実験-2（間欠投与）における界面活性剤（3%）の圧入量である。2.0PVでほぼ浄化が完了している。小型2次元土槽を用いた実験で最も少ない圧入量で浄化できたのは実験2.1（切り替え交互圧入による間隙内二液発泡法）の1.5PVであった。圧入量だけみると追加実験-2（間欠投与）は確かに0.5PV多いが、実験2.1では発泡反応のために重曹を8%、酢酸を5%とかなりの高濃度で添加しており、コスト的には間欠投与のほうが安いと思われる。

また、追加実験-2（間欠投与）では地表面に被覆をしておらず、比較的低吸引圧の状態でも油分を移動・回収できたことは浄化作業工程の簡略化、ひいてはコストの削減にもつながるものと期待される。

5. まとめ

本研究では、多くの条件下でも適応できる「汎用性」を持った技術の開発という視点から室内土槽を用いた模擬油汚染地盤の浄化実験を行った。これらのことより、以下のような点が抽出された。

- 1) 間隙内反応発泡法を広く行う際の気泡の封入によるその後の浄化液浸透阻害をいかにして解決するか。
- 2) 増粘剤を添加した界面活性剤により汚染油の下面を固定し浄化する方法の更なる高効率化とその応用。
- 3) 界面活性剤を間欠投与する方法の更なる高効率化。

このうち、3)については追加実験を行いその性能を確認したところ、間欠投与は従来の連続投与よりおよそ半分の圧入量で浄化が完了できることが確認できた。

この間欠投与による浄化方法は比較的汎用性が高いものと思われるため、今後の研究の中心としてとり組んでゆきたいと考えている。

謝辞：この研究には著者の所属する油汚染土壌の修復技術研究会（大同大学・株式会社エステム・応用地質株式会社・三信建設工業・財団法人東海技術センター・株式会社フジミックス・ミヨシ油脂株式会社）のご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 棚橋秀行：間隙内二液反応発泡を用いた切替交互圧入による油汚染地盤浄化ムラの低減、(社)地盤工学会ほか、第20回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会概要集、pp.301～306, 2014.
- 2) 例えば、中西茂子：洗剤と洗浄の科学、新コロナシリーズ33、コロナ社、p.43, 1995.