

## 油汚染地盤の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\*

Hideyuki TANAHASHI\*

#### Summary

In this study, laboratory experiments were conducted to develop the purification method without excavation for the ground polluted by sticky and low volatile machine oil. As the method, the surfactant enhanced aquifer remediation (SEAR) was used. From the result of the soil tank experiments with surfactants, results were obtained as below.

- 1) A Surfactant used in the experiments stagnated under the hydraulic gradient flow. The value of Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB) of this surfactant was 10.5. This stagnation problem was solved by adding another surfactant (HLB13.3).
- 2) The vertical surfactant flow from above the machine oil can emulsify and flush it down into the horizontal surfactant flow. Then the horizontal surfactant flow transport the emulsified machine oil to recovery point. Under the hydraulic gradient flow and the suction flow both, this method was effective for purification.

キーワード：地盤汚染、機械油、非掘削浄化、室内実験

Keywords : Ground pollution, Machine oil, Purification without excavation, Laboratory experiments

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の背景

近年、地盤環境の分野で注目されているのは、トンネル工事などで発生する建設発生土に含まれる自然由来の重金属<sup>1)2)3)4)</sup>と災害廃棄物の処理<sup>5)6)7)</sup>である。ともにその規模が大きく、喫緊の課題でもあるため産官学を通じて多くの研究がおこなわれている。一方で工場などからの油による地盤汚染は従来からの地盤環境問題であり、関連する事業所数が多いことからその浄化需要は大きい。油のなかでも、有機塩素化合物のように粘性が小さく揮発性に富む油に関する浄化の研究<sup>8)9)</sup>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。燃料油汚染現場におけるベンゼンに対する微生物分解の成功事例は多く報告されている<sup>10)</sup>。機械油を分解する微生物も製品として市販されているが、地盤内での接触の困難さな

どから非掘削浄化の成功事例はほとんど報告されていない。油汚染土壌の洗浄技術としては気泡連行法<sup>11)</sup>がよく知られている。気泡連行法は、アルカリ溶液中に油汚染土を入れ、過酸化水素の自己分解によって発生する微細気泡により、油分を土粒子から剥離させて、液面まで連行する技術である。しかし非掘削浄化に用いる際には、いったん剥離した油分を再付着させることなく地盤間隙内を輸送し回収するのは困難であると考えられる。

これに対し、界面活性剤を注入する原位置フラッシング SEAR<sup>12)</sup>は油分を乳化させ水に溶解させて輸送・回収する非掘削浄化技術である。界面活性剤を用いた非掘削浄化技術は海外(特に米国)では研究例が多く、実フィールドでの実証結果<sup>13)</sup>が多く紹介されている。これに対して、国内での報告例は非常に少ない。その原因の一つとして、国土が狭い日本では浄化対象となる事業所が市街地にあり住居が近接しているケースが

\*工学部建築学科 土木・環境専攻

多いため、界面活性剤を用いることで可動性が大きくなった汚染油の区域外流出に対する懸念があると思われる。また、ゼロリスクを求める市民のリスク認知が、掘削除去以外の浄化を受け入れにくいいため、そもそも界面活性剤に限らず非掘削浄化法が選択されにくいという状況がある<sup>14)</sup>。こういった中で、岡田ら<sup>15)</sup>は界面活性剤を用いたカラムおよび土槽での油汚染土壌の非掘削浄化実験を継続的に実施しており、土槽実験の結果から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することを指摘している。

## 1.2 本研究の目的

大同大学・棚橋研究室では、工場を稼働させたまま、界面活性剤を用いて機械油を乳化し、これを回収することで油汚染地盤を浄化する研究を継続的に行っている。先述のように、揮発性有機化合物や燃料油のような粘性が小さく揮発性に富む油に関する非掘削浄化は進んでいるが、主に製造工場で使用される機械油のような高粘性で揮発しにくい油種に対する非掘削浄化はあまり進んでいない。これに対し、本研究室では、図-1.1のように浄化範囲を①②③の3つのエリアに分け、実験を行なっている。

浄化範囲①：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。油分量が多いうえに地中埋設物があり、その隙間に入り込んだ油を回収するのは難しく、課題Aとして「みずみち」による油の浄化ムラが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②：浄化範囲①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、その下の帯水層を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③：浄化範囲②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。ここでは注入井戸と揚水井戸の水頭差（動水勾配）による界面活性剤の浸透浄化が主に行われる。

本報告で、着目するのは浄化範囲②と③である。浄化範囲②に関しての棚橋研究室のこれまでの室内土槽実験の多くで、上述した課題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」状況が生じている。本研究の目的の一つ目はこの課題Bを解決するための方法を検討することである。浄化範囲③に関して行った2017年度の室内土槽実験における動水勾配流での浄化において、新たに課題C「界面活性剤の地盤間隙内の濃縮・停滞」が発生した。これは上述した岡田ら<sup>15)</sup>の報告にも述べられている。岡田らは、水を注入する

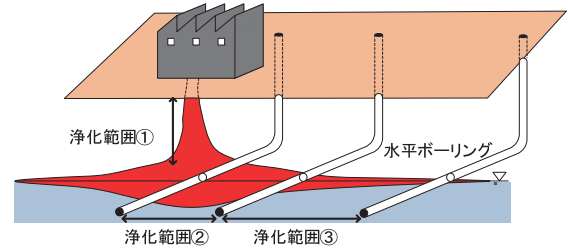


図-1.1 機械油汚染地盤の  
非掘削浄化範囲①②③について

リンスングでこれを解決した実験結果を報告しているが、実地盤においては投入量や回収処理量が過大になることが懸念される。本研究の目的の二つ目は、この課題Cを、水によるリンスングではなくHLB値の異なる界面活性剤（HLB 10.5と13.3）の配合により解決する方法を検討することである。

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<sup>16)</sup>。本研究では汚染機械油として自動車用のエンジンオイルを使用した。室内土槽実験の際、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。この際、油の濃度が濃い部分と薄い部分が生じるが、清浄土でないところは全て油汚染土とし、残油量ではなく油が存在する領域がどれだけ小さくなったかを評価した。

## 2. 浄化範囲②に関する実験

### 2.1 浄化範囲②に関するこれまでの実験結果

過去の棚橋らの実験<sup>17)</sup>では、界面活性剤の投与ポイントや汚染油の回収ポイントの位置関係（水平流・上昇流・下降流）、界面活性剤の投与パターン（間欠圧入・常時圧入）といった実験ケースにより、浄化の進行状況・浄化完了までの時間・界面活性剤使用量が大きく異なることが分かった。その例として表-2.1および写真-2.1～2.4に示した4つのケースを紹介する。すべての実験において、充填土試料は豊浦砂（土粒子密度2.65g/cm<sup>3</sup>、平均粒径0.2mm）を用いた。3つの層で構成されているが、乾燥充填密度は全層とも $\rho_a = 1.55\text{g/cm}^3$ である。写真-2.1～2.4に示したように、圧入ノズルは土槽右側に①上部・②下部の2つが埋設されている。油汚染領域の間隙体積は7.9Lであり、これを1PV(=Pore Volume)とした。右側の圧入ノズルから界面活性剤や水を圧入し、左側の吸引ノズル③から乳化された油を回収した。実験Case1と2は、3%界面活性剤を圧入するノズルとは上下逆のノズルから水の圧入を行なったものである。Case3は上下とも3%界面活性剤を圧入した。Case4は上部ノズル①だけを30分毎

表-2.1 これまでの研究<sup>17)</sup>における実験と結果

実験名	地表面の被覆	吸引ノズルの汚染領域より上/下	吸引ノズルの地表からの深さ	圧入ノズルの地表からの深さ	種類	圧入方法	圧入速度 (ml/min)	圧入量 (PV)	(a) 合計圧入量 (PV)	(b) 実験装置稼働時間(H)	(c) 残留汚染領域比(%)	(a)×(b)×(c) 総合評価 (PV・H・%)					
Case1	有	上	70cm	上部 35cm	界面活性剤水溶液	常時圧入	5	5.8	11.6	144.0	73	121,939					
				下部 70cm	水のみ			5.8									
上部 35cm				水のみ	12.5			40	82,250								
下部 70cm				界面活性剤水溶液							6.3						
Case3				上部 35cm	下部 70cm			界面活性剤水溶液	30分停止/圧入		10		5.6	11.1	159.0	42	74,126

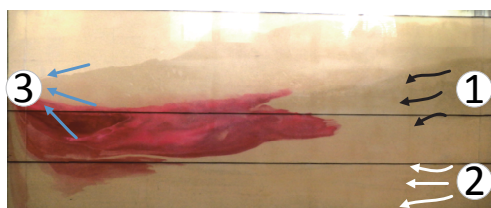


写真-2.1 実験 Case1 終了時  
(11.6PV 残留 73%)

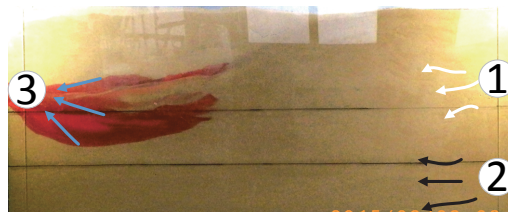


写真-2.2 実験 Case2 終了時  
(12.5PV 残留 40%)

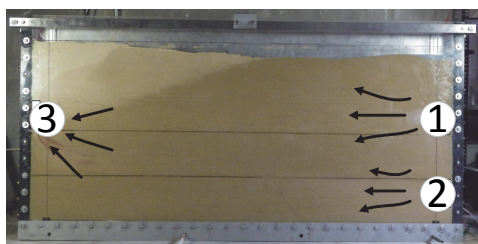


写真-2.3 実験 Case3 終了時  
(12.8PV 残留 1%)

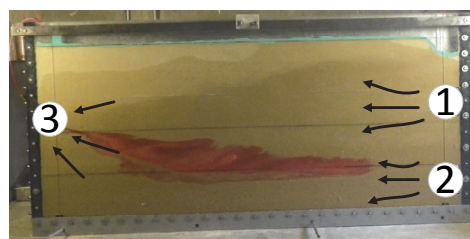


写真-2.4 実験 Case4 終了時  
(11.1PV 残留 42%)

の間欠圧入としたものである。写真-2.1～2.4 は、これら 4 つの実験ケースの実験終了の時様子である。土槽に圧入した液体の合計体積が 12PV 前後でほぼ同じであるにもかかわらず、油の残留汚染領域比が最小の Case3 の 1% から最大の Case1 の 73% からまで大きく異なる結果となっている。界面活性剤のみの使用 PV で見ても Case1 (5.8PV) と Case2 (6.3PV) は 0.5PV しか変わらないにもかかわらず油の残留汚染領域比は Case1 (73%) と Case2 (40%) のように大きく異なる。また、Case3 と Case4 も界面活性剤のみの使用 PV に大きな違いがないにもかかわらず、上部ノズル①を間欠圧入にするか否かだけで、油の残留汚染領域比が 1% と 42% で大きく異なっている。

このように過去の実験から、界面活性剤の投与パターンなどの実験条件の違いにより、浄化の進行状況が大きく異なることが分かっている。この要因として最も大きいのが、本研究で着目する「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」現象である。この現象が発生しやすい実験ケース (Case3 以外) ・しにくい実

験ケース (Case3) の違いは何かを理解し、どのようにすれば図-1.1 における浄化範囲②を効率よく浄化できるのかを明らかにするため、次に紹介する 4 つの実験を新たに実施した。

## 2.2 本研究で実施する実験

これまでの実験では浄化対策地盤の直上に工場がある区域を想定し、地表面を被覆した状態での実験を行ってきた。本報告では表-2.2 の 4 つの実験のうち、工場を想定し地表面を被覆したケースを 2 つ (実験 2.1 と 2.2) 行うのに加えて、工場が無い区域を新たに想定し、地表面を被覆しない実験ケースを 2 つ (実験 2.3 と 2.4) 行った。実験 2.1 から 2.4 で使用した実験装置は図-2.1 の大型二次元土槽実験装置である。充填幅 191cm×高さ 91cm×奥行き 5cm の土槽に、深さ 80cm の模擬地盤を作成した。地盤は 3 つの層になっており、上層 40cm が清浄土、中層 20cm が油汚染土、そして下層 40cm が清浄土である。充填密度は 3 層とも乾燥充填密度  $\rho_d = 1.36\text{g/cm}^3$  である。充填土試料として、清浄土層には珪砂 6 号 (土粒子密度  $2.64\text{g/cm}^3$ 、平均粒径

表-2.2 本研究における実験条件と結果

実験名	地表面の被覆	吸引ノズル汚染領域より上/下	吸引ノズルの地表からの深さ	圧入ノズルの地表からの深さ		種類	圧入速度 (ml/min)	圧入量 (PV)	(a) 合計圧入量 (PV)	(b) 実験装置稼働時間 (H)	(c) 残留汚染領域比 (%)	(a)×(b)×(c) 総合評価 (PV・H・%)
				上部	下部							
2.1	有	下	70cm	上部 15cm	—	水	100	15.4	21.3	28.0	5	2,982
				下部 50cm	界面活性剤	35	5.9					
2.2	有	上	35cm	上部 15cm	—	水	105	21.6	30.1	37.0	13	14,478
				下部 50cm	界面活性剤	35	8.5					
2.3	無	下	70cm	無	—	—	—	—	11.4	35.0	9	3,591
				下部 50cm	界面活性剤	50	11.4					
2.4	無	上	35cm	上部 35cm	—	界面活性剤	前半50 後半100	12.5	12.5	27.5	1	344
				無	—	—	—					

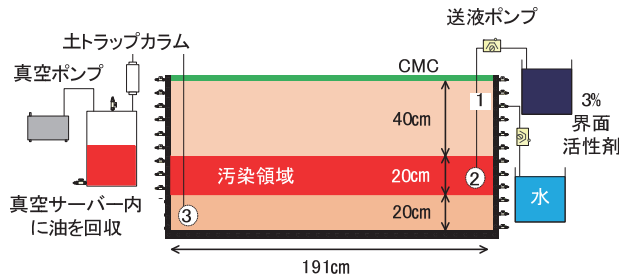


図-2.1 実験 2.1 の装置図

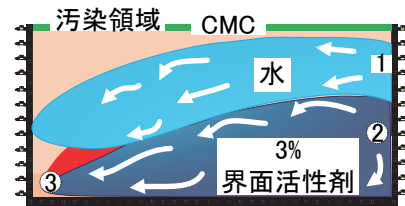


図-2.2 実験 2.1 の挙動予想図

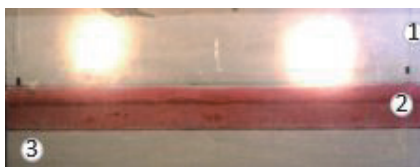


写真-2.5 実験 2.1 の初期状態



写真-2.6 水圧入開始時 (5.5 時間後)



写真-2.7 11.5 時間後

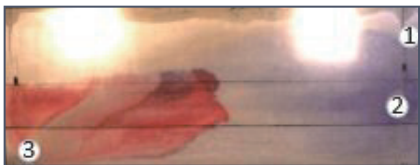


写真-2.8 17 時間後

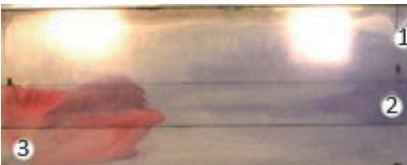


写真-2.9 20.5 時間後

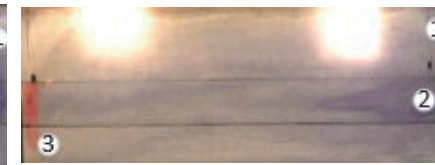


写真-2.10 実験終了時  
(28 時間後 合計 21.3PV 残留 5%)

0.3mm) を使用した。油汚染土層には、スダンⅣによって赤く着色した灯油とエンジンオイルを混ぜた汚染油で汚染させた珪砂 6 号を使用した。油汚染土における汚染濃度は質量比 10%とした。写真-2.5 が充填終了後の初期状態である。珪砂 6 号を用いた実験 2.1 から 2.4 では、油汚染土層の間隙体積 9.3L を 1PV (Pore Volume) と定義する。今回の実験 2.1 と実験 2.2 は、直上に工場がある浄化対象区域を想定し CMC(カルボキシルメチルセルローズ)を水に溶いたもので地表面を被覆した。棚橋ら<sup>17)</sup>のこれまでの大型二次元土槽実験での成功例では HLB10.5 の界面活性剤 3%水溶液の累積圧入量が 12PV 以内で浄化を完了しているため、実験 2.1 から 2.4 でもこれを目標として実験を行った。これまでの研究<sup>17)</sup>の豊浦砂と本研究で用いる珪砂 6 号は同一の土試料ではないため、厳密には比較できない。しかし、平均粒径が豊浦砂は 0.20mm なのに対して珪

砂 6 号は 0.3mm と近く、模擬地盤の汚染領域の 1PV に相当する間隙体積は豊浦砂 7.9L、珪砂 6 号 9.3L と 1.18 倍程度の違いなのに対し、実験の浄化効率の差はこれを大きく上回るものであったため、定性的ではあるが比較・考察に用いることとした。

### 2.3 界面活性剤のガイドを作成したのち、水によるすすぎを行う浄化実験 2.1 (吸引ノズル位置：汚染領域より下、地表被覆：有)

今回の実験 2.1 の装置は先述の図-2.1 である。図-2.2 は挙動予想図である。界面活性剤の浸透域が下、水の浸透域が上という点では過去の実験 case2 と同じであるが、今回の実験 2.1 では、

- 1) 界面活性剤のみを先行浸透させ浄化エリアを形成すること
- 2) これをガイドとしてその上を流れる水の圧入速度

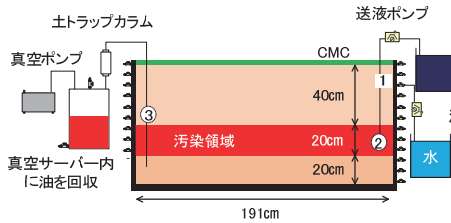


図-2.3 実験 2.2 の装置図

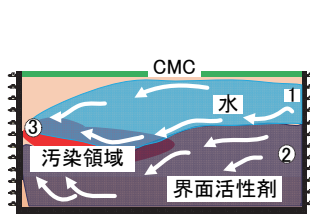


図-2.4 実験 2.2 の挙動予想図



写真-2.11 実験 2.2 の初期状態



写真-2.12 5.5 時間後

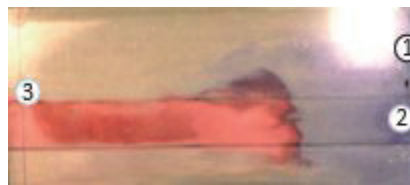


写真-2.13 10.5 時間後



写真-2.14 15 時間後



写真-2.15 20 時間後

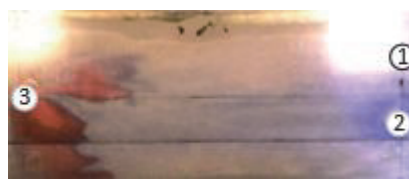


写真-2.16 25 時間後



写真-2.17 実験終了時  
(37 時間後 合計 30.1PV 残留 13%)

を界面活性剤の約 3 倍とし乳化した油を速やかに吸引ノズルまで輸送すること  
の 2 つを新たに試みた。写真-2.5 の初期状態から、ノズル②からの送液ポンプによる界面活性剤 3%の圧入と、③のノズルからの真空ポンプによる吸引を開始した。5.5 時間経過した写真-2.6 の時点で浄化が 3 分の 1 ほど進んだため界面活性剤の圧入が十分だと考え、ノズル①から送液ポンプによる水の圧入を開始した。17 時間が経過した時点で写真-2.8 のように汚染領域の中央に通り道ができてしまい、浄化ムラが出来てしまうことを懸念したが継続して実験を行ったところ、写真-2.9 のように通り道がなくなり、順調に浄化が進んだ。26 時間後から 2 時間は界面活性剤の圧入を停止し、水のみを圧入した。28 時間後、汚染油が吸引ノズルの左側にわずかに残っていた(残留汚染領域比 5%)が実験を終了した。実験終了時の状態が写真-2.10 である。水の圧入量を含めた合計圧入量では 21.3PV かかったが、界面活性剤の使用量は 5.9PV で、目標としていた 12PV を大幅に下回ることになった。

#### 2.4 界面活性剤のガイドを作成したのち、水によるすすぎを行う浄化実験 2.2 (吸引ノズル位置: 汚染領域より上、地表被覆: 有)

図 2.3 が実験 2.2 の実験装置図、図 2.4 は挙動予想図である。前回の実験 2.1 は実験 case2 より良い結果が得られたが、case2 では吸引ノズルが汚染領域より上にあったのに対し実験 2.1 では下に設置されていた。そこで、今回の実験 2.2 は case2 のように吸引ノズル③を上

置し、実験 2.1 で良い結果が得られた 1)2)の試みについて再度実験を行なった。写真-2.11 の初期状態において、ノズル②からの界面活性剤 3%の圧入、ノズル③からの真空吸引を開始した。写真-2.12 は実験開始から 5.5 時間後の写真である。実験 2.1 では下に吸引ノズル③があったことにより界面活性剤 3%は下に広がっていたが、今回は上にあるために上に広がっている。この時点で界面活性剤のガイドが出来上がったと判断したため前回の実験 2.1 と同じく、実験開始 5.5 時間に水の圧入を開始した。写真-2.13 は実験開始 10.5 時間後の写真である。前回の実験 2.1 のほぼ同時刻の写真-2.7 (11.5 時間後)と同様に浄化が進んでいることがわかる。写真-2.14 は実験開始から 15 時間後の写真である。水をノズル①から圧入したことにより、上に広がっていた界面活性剤ガイドが下に広がっていく様子が確認できた。写真-2.15 は 20 時間後の様子である。この時点の合計圧入量は 14.5PV であり、残留汚染領域比 75.8%であった。これは過去の実験 case2 の実験終了時の合計圧入量 12.5PV で残留汚染領域比 40%であったのと比べるとむしろ浄化の進行は遅い。写真-2.16 から、汚染領域を貫通して界面活性剤が吸引されていることがわかる。写真-2.17 は実験終了時である。界面活性剤が汚染油を巻き込んで流れなくなってしまったため、実験開始から 37 時間後に終了した。残留汚染領域比は 13%まで削減できたが、合計圧入量 30.1PV、界面活性剤使用量 8.5PV と case2 よりも多くの量を使用した。これは case2 よりも、界面活性剤・水とも圧入速度が大きかったため、無駄に流れた量が過大であったた

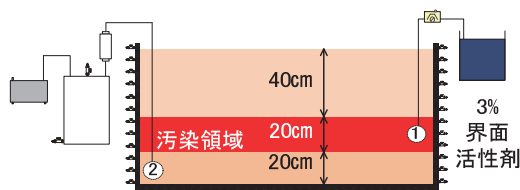


図-2.5 実験 2.3 の装置図

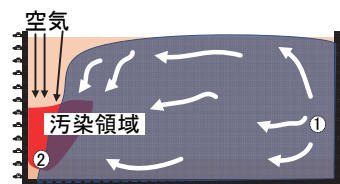


図-2.6 実験 2.3 の挙動予想図



写真-2.18 実験 2.3 の初期状態



写真-2.19 9 時間後



写真-2.20 13 時間後



写真-2.21 17 時間後

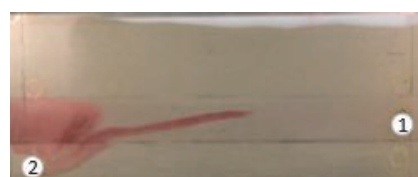


写真-2.22 23 時間後

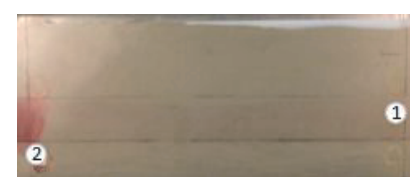


写真-2.23 実験終了時  
(35 時間後 合計 11.4PV 残留 9%)

めではないかと考えられる。しかし、前回の実験 2.1 も case2 と比べると、界面活性剤・水とも圧入速度はかなり大きかったが、表-2.2 における総合評価（値が小さいほど高効率評価）で見ると実験 2.1 は 2982 で、今回の実験 2.2 の 14478 よりもかなり浄化効率が良い。実験 2.2 は、吸引ノズルの位置を上にして行ったが、これにより界面活性剤が油の下を流れるようになってしまった。このことから吸引ノズル位置は実験 2.1 のように下の方が、油の上から界面活性剤が当たると考え、続く実験 2.3 では吸引ノズルを下に設置して行った。

## 2.5 界面活性剤のみで行った浄化実験 2.3（吸引ノズル位置：汚染領域より下、地表被覆：無）

図-2.5 が実験 2.3 の実験装置図、図-2.6 が挙動予想図である。実験 2.3 と実験 2.4 は地表面を被覆せず、吸引により地表面からの空気も浄化対象地盤を通過する状態での実験を行なった。また、実験 2.1 と実験 2.2 より、油の上から界面活性剤を当てると効率が良いことがわかってきたので、現実的ではないが、圧入ノズル①直上でいったん地表面に界面活性剤を溢れ出させ、これが吸引ノズル②から吸引され再度地盤に浸透し、油の上から当たる状況で実験を行なうことにした。初期状態を示したのが写真-2.18 である。実験開始 9 時間後、写真-2.19 に示すように界面活性剤が地表面に溢れた。実験開始 13～17 時間後には写真-2.20～21 に示すように土槽中央部にあった汚染油が土槽下部に押し流され

ている様子がわかる。写真-2.22 に示すように 23 時間後には汚染油が一本の線のように残った。この部分の汚染油が残留してしまうかと懸念されたが徐々に細くなっていたので、実験を継続した。その後、実験開始 35 時間後にこれ以上の浄化は厳しいと判断し実験を終了した。使用した界面活性剤は 11.4PV であった。その時の様子が写真-2.23 である。地表面を被覆していないため、吸引ノズル②が空気を吸ってしまい、空気の通り道にある土槽左上には界面活性剤が浸透しにくかったため、この部分の汚染油を浄化することができなかったが、それ以外部分の浄化は非常にスムーズに進行した。

## 2.6 界面活性剤のみで行った浄化実験 2.4（吸引ノズル位置：汚染領域より上、地表被覆：無）

今回の実験 2.4 では、図-2.7 の実験装置図のように、吸引ノズルを汚染領域の上部に設置した。図-2.8 は挙動予想図である。地表面を被覆しないので空気は流れるが、空気の流れる領域に汚染油が無ければうまくゆくのではないかと考えた。初めにノズル 1 から界面活性剤 3%を流速 50ml/min で圧入する。そして、土槽の地表面に界面活性剤を到達させノズル 2 から汚染油と界面活性剤による乳化液を吸引する。

写真-2.24 は初期状態である。写真-2.25 は実験開始から 5.5 時間後の様子である。圧入ノズル①の下から徐々に浄化していることが分かる。写真-2.26 は実験開

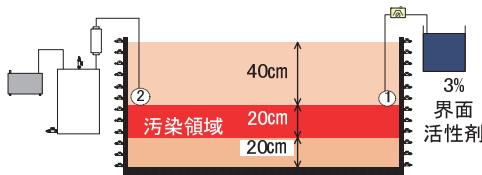


図-2.7 実験 2.4 の装置図

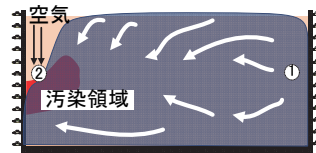


図-2.8 実験 2.4 の挙動予想図



写真-2.24 実験 2.4 の初期状態



写真-2.25 5.5 時間後



写真-2.26 11 時間後



写真-2.27 16.5 時間後



写真-2.28 22 時間後



写真-2.29 24 時間後



写真-2.30 実験終了時  
(27.5 時間後 合計 12.5PV 残留 1%)

始から 11 時間後の様子である。吸引ノズル②を土槽の左下に設置した実験 2.3 では界面活性剤 3%を流速 50ml/min で圧入した場合実験開始から 9 時間ほどで地表面に溢れてきたが、この実験では 11 時間経過しても地表面に界面活性剤が溢れることはなかった。写真-2.27 は実験開始 16.5 時間後の写真である。浄化が順調に進み土槽の半分ほどが浄化されていることがわかる。しかし、16.5 時間経過した時点でもまだ地表面に界面活性剤が溢れることはなかった。これは吸引ノズルを地表に近づけたことで実験 2.3 よりも減圧されず、空気の流れが弱まったために界面活性剤が回収されやすくなったためと考えた。そこで、ここからは流速 100ml/min に上げ実験を再開した。流速を 100ml/min にしたことにより地表面に界面活性剤が到達し、上から油を押しえつける力による浄化が進み、24 時間後には写真-2.29 のように大部分の浄化が完了した。その後も順調に浄化が進み、実験開始から 27.5 時間後には写真-2.30 のようにほぼ目視できなくなるまでに油が回収できた（残留汚染領域比 1%）ため実験を終了した。使用した 3%界面活性剤は 12.5PV であった。

### 3. 浄化範囲②に関する実験の考察とまとめ

第 2 章では、界面活性剤を用いた機械油汚染地盤の非掘削浄化の際に問題となる、「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」に着目し、この解決策について室内土槽実験を行なった。第 2 章で行なっ

た 4 つの実験 2.1～2.4 と、これまでに行われた 4 つの実験 case1～case4 の結果の比較・検討から、一つの定性的な傾向が見いだされた。上記の問題を解決し、終盤に浄化効率を低下させないひとつのテクニックとして、「界面活性剤を上から汚染油に当てて乳化・降下させ、これを横方向の界面活性剤の流れに合流させて回収する方法」が有効であることである。これについては第 2 章でも何度か述べてはいるが、本章では、あらためてこの視点ですべての実験を考察してみる。

#### 3.1 これまでの実験 case1～4 についての考察

これまでに行われた case1～case4 の 4 つ実験は全体的に実験結果が芳しくなく、case3 以外は残留汚染領域比が 40%以上である。その大きな要因は、吸引ノズルの位置が上にあり、「界面活性剤を上から汚染油に当てて乳化・降下させ、これを横方向の界面活性剤の流れに合流させて回収する」状況になりにくくなっていたものと考えられる。その中で、case3 だけが浄化をほぼ完了するに至ったのは、圧入側の 2 つのノズル両方から界面活性剤を継続的に圧入した唯一のケースであったためと思われる。case4 も上下とも界面活性剤であるが、上からの圧入が間欠であったことで油が単純に降下せず、下の横方向の流れとの間で浮き沈みを繰り返す効率が悪くなったものと考えられる。case1 は界面活性剤で上から押しえつけてはいるが、下の流れが水なので乳化が破壊されてしまい輸送されなかったと思われる。また、case2 は上から水であったため、油の乳化・降下が起こらなかったものと思われる。

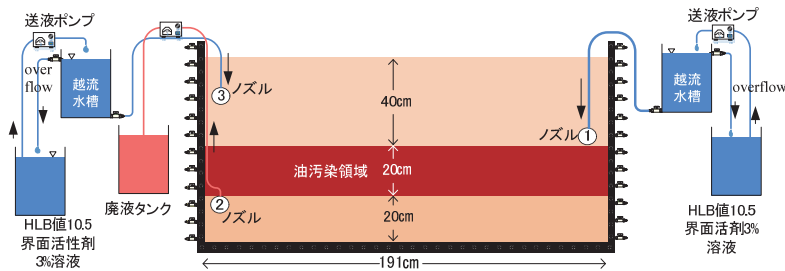


図-4.1 大型二次元土槽実験装置



写真-4.1 界面活性剤が停滞した様子  
(2017年度の実験)

### 3.2 本研究での実験 2.1~2.4 についての考察

地表面に被覆があるケースの実験 2.1 と実験 2.2 を比較すると、吸引ノズルを下に設置した実験 2.1 のほうが、界面活性剤が上から当たるので浄化効率が高かった。地表面に被覆がないケースの実験 2.3 と実験 2.4 を比較すると、逆に吸引ノズルを上を設置した実験 2.4 のほうが、吸引ノズル直上からの空気の流れが弱まったことで油の上から界面活性剤が当たりやすくなったため、浄化効率が高かった。case2 と実験 2.1 は、ともに上のノズルから水、下のノズルから界面活性剤を圧入した点では共通しているが、吸引ノズルを下に設置した実験 2.1 のほうが、浄化効率が高かった。また、実験 2.1 の水の圧入速度を非常に大きくしたことでガイドにした界面活性剤の上縁部を希釈し、低濃度の界面活性剤として油の上から接触したことも成功の要因と思われる。実験 2.4 は全体を通じて、表-2.1、表-2.2 の総合評価 (値が小さいほど高効率) が最も良い結果となった。

## 4. 浄化範囲③に関する実験

### 4.1 2017 年度の大型二次元土槽実験

浄化範囲③を対象に、2017 年度に行われた実験を紹介する。動水勾配を用いて界面活性剤を送液し乳化した汚染油を回収する方法である。装置は図-4.1 の大型二次元土槽を使用した。この土槽の内寸は横幅 191cm、奥行き 5cm である。試料土として珪砂 6 号を用い、全層とも乾燥充填密度  $1.36\text{g/cm}^3$  となるようにした。まず一番下の 20cm の清浄土層を水締め充填したのち、中層に汚染土を 20cm 充填する。汚染土は土の質量の 10% の汚染油 (自動車用エンジンオイル) を混ぜたものを使用する。最後に水で湿らせた清浄土を 20cm 充填する。その後図-4.1 のノズル 1 から HLB 値 10.5 の界面活性剤 3% 溶液を送液するが、この際、送液側水位が一定になるように越流水槽を設け、ここに界面活性剤をタンクから常時送液し、溢れたものは元のタンクに戻るようにした。ノズル 2 から滲出してきたものを送液ポンプで汲み上げて回収した。またノズル 2 上部は界面活性剤が当たりにくいと思われるため、適

宜ノズル 3 からノズル 1 と同じ方法で界面活性剤を送液することとし、実験を開始した。

実験開始からしばらくは順調に浄化が進んだが、徐々にノズル 2 から廃液の回収が出来なくなった。同時にノズル 1 から界面活性剤が送液されなくなった。最終的には土壌内で界面活性剤が斜めに停滞してしまった。その時の様子が写真-4.1 である。こうなった原因として、当初は「ノズル 2 付近の汚染油が土粒子間隙を塞ぎ、回収が出来なくなったため」ではないかと考えた。しかし、それが原因だとしたらノズル 1 からの送液は続くため、界面活性剤の水位は徐々に越流水槽内の液面と同じところまで水平になるように上昇するはずだが、この後も土槽内の界面活性剤は斜めに停滞したままであった。

### 4.2 カラム通液実験

上述のように、動水勾配を用いた 2017 年度の大型二次元土槽実験では、実験終盤に界面活性剤が停滞した。この原因を調べるとともに、どうしたら停滞せずに浄化を完了させることが出来るかについて、カラム実験を行った。実験装置は図-4.2 を用いた。越流水槽を用いて上流側水位を作成し、下流側との水頭差  $\Delta H$  を 50cm とした。越流水槽内の水位を固定するためにタンクから界面活性剤を常時送液し、溢れたものはタンクに戻る仕組みである。円筒カラム (高さ 60cm、内径 6cm) に珪砂 6 号を充填密度  $1.36\text{g/cm}^3$  で充填した。通液開始後から、1 時間おきに単位時間流量 (ml/min) を計測し、その変化を調べた。

#### 4.2.1 汚染土・清浄土に対する HLB 値 10.5 の界面活性剤 (3%) の通液比較実験

本実験は、カラムに土槽実験と同じ油汚染土 (10%) を充填したケースと、清浄土を充填したケースの比較を行った。両方に、HLB 値 10.5 の界面活性剤を 3% に希釈した水溶液を通液し、汚染油の有無による界面活性剤の停滞の状況を比較した。油汚染土における実験経過の写真が写真-4.2 である。清浄土のケースは目視では変化が無かったので割愛する。写真-4.2 における



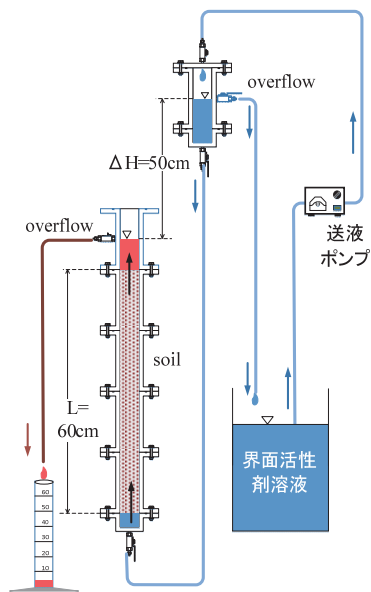


図-4.2 カラム実験装置図

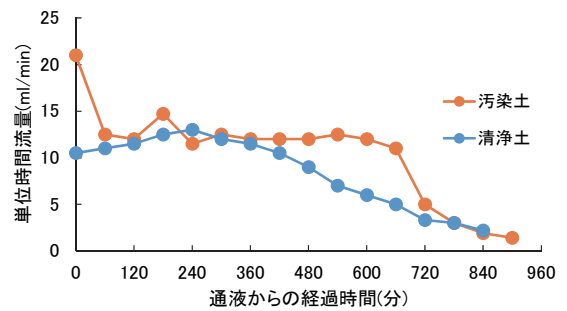


図-4.3 流量変化のグラフ

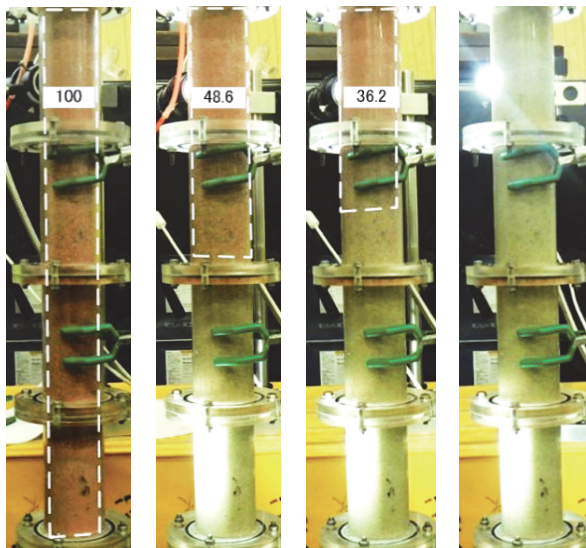


写真-4.2 浄化経過写真と汚染領域比 (%)

白い点線で囲まれた長方形よりも下は浄化が完了している。この長方形の中には浄化されたところと油が残留している部分がある。撮影画像から画像処理(2値化)を用いた方法で、この油の残留領域を、カラム全体の初期汚染領域を100%としたときの汚染領域比(%)として定量化したものが写真-4.2の中の数値である。油汚染土の実験ケースでは写真-4.2の一番右のように420分で汚染土をほとんど浄化する事が出来た。しかし、その後も継続して界面活性剤を送液し続けたところ図-4.3の様に汚染土のケースでは600分を越えたあたりから急激に流量が低下した。図-4.3の清浄土への通液はもっと早く240分を越えたあたりからなだらかな流量低下がみられた。最終的に両ケースとも通液困難なほどにまで流量が低下してしまった。この結果より、

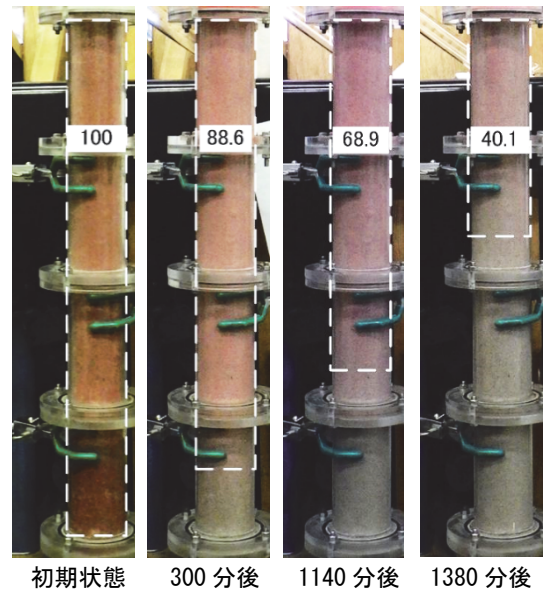


写真-4.3 浄化経過写真と汚染領域比 (%)

流量の低下には汚染油は関係がないことが確認できた。すなわち、2017年度の大型二次元土槽実験の停滞は、界面活性剤自身が原因で引き起こされたと考えられる。

#### 4.2.2 HLB値13.3の界面活性剤(3%)の通液実験

先述の実験4.2.1から、HLB値10.5の界面活性剤のみを使用した水溶液の清浄土中での停滞が観察された。仮説として、「間隙中を界面活性剤水溶液が通過する際、土粒子によってろ過のような作用を受けるのではないか。長時間の通液によりろ過された界面活性剤の成分が濃縮されて間隙を塞ぎ、停滞が生じるのではないか。」と考えた。これを解決する方法として、HLB値が20に近い(親水性側)の界面活性剤ならば土中でろ過・分離されにくく停滞せずに浄化をすることが出来るのかを試すこととした。界面活性剤をこれまでのHLB値10.5のものから、HLB値13.3(親水性側)のものに変更して3%水溶液を作成し、先述の実験4.2.1同様にして油汚染土(10%)の浄化カラム実験を行なった。実験経過写真が写真-4.3である。実験4.2.1では420分で浄化したが、本実験では浄化の進行が遅く、1380分後にもまだ40.1%の汚染残留域が見られた。一

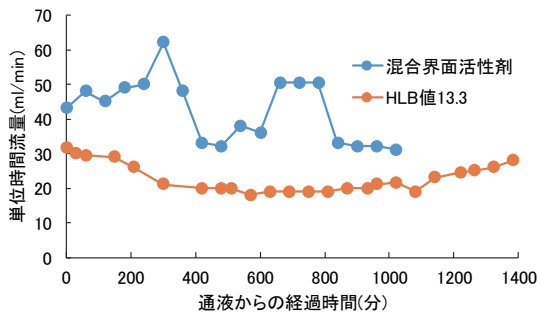


図-4.4 流量変化のグラフ

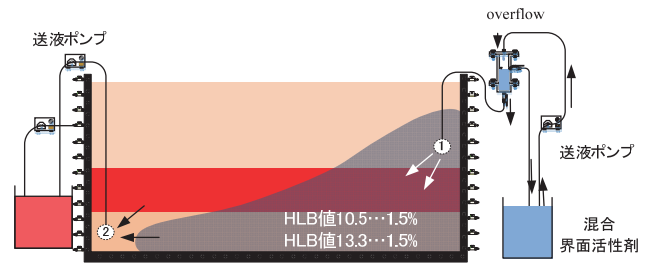
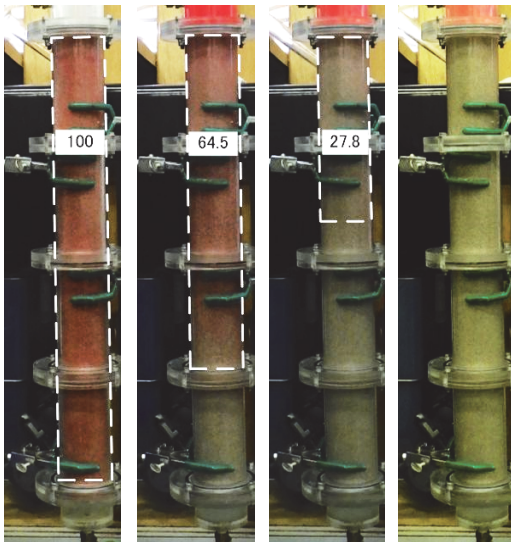


図-4.5 実験装置図と挙動予想図 (実験 4.3.1)



初期状態 120分後 240分後 300分後

写真-4.4 浄化経過写真と汚染領域比 (%)

方で、図-4.4の HLB 値 13.3 のように、単位時間流量は 20~30ml/min と大きく、実験 4.2.1 の HLB 値 10.5 の界面活性剤では図-4.3 のように最終的に単位時間流量が 5ml/min を下回ったのと比べると、浸透性は大きく向上していることが確認できた。

#### 4.2.3 HLB 値 10.5 の界面活性剤(1.5%)と HLB 値 13.3 の界面活性剤(1.5%)の混合界面活性剤の通液実験

ここまでのカラム実験から、油の乳化性に富む HLB 値 10.5 の界面活性剤は浄化能力が高い一方で後半になると停滞が発生し浸透性が低くなること、親水性側の HLB 値 13.3 の界面活性剤は浸透性が高い一方で浄化能力が低いことが分かった。今回の実験 4.2.3 では、両者のバランスをとることを狙い、HLB 値 10.5 の界面活性剤(1.5%)と HLB 値 13.3 の界面活性剤(1.5%)の混合界面活性剤を作成し、実験を行った。

実験経過写真が写真-4.4 である。実験開始 300 分後には目視で浄化の完了を確認することができた。240 分経過した時点での残留領域は 27.8% で、HLB 値 10.5 の界面活性剤 (3%) で行った写真-4.2 の 240 分での残留領域が 48.6% であったのと比べ、浄化スピードが速いことが分かった。また、HLB 値 13.3 の界面活性剤

(3%) で行った実験の写真-4.3 では残留領域が 40.1% になるのに 1380 分を要したことからも、今回の混合界面活性剤での浄化スピードが速いことが分かった。浄化中の混合界面活性剤の単位時間流量は図-4.4 より 40~60ml/min である。HLB 値 13.3 の界面活性剤よりも、油を浄化する力が付加されたことで、単位時間流量が大きくなることがわかった。

このような結果が得られた理由は以下のように考えられる。

- 1) HLB 値 10.5 の界面活性剤により、浸透フロント部分で機械油が乳化され、下流へと輸送されてゆく。
- 2) それにより清浄土となった部分へ浸透する HLB 値 10.5 の界面活性剤は、単体では長時間通液すると間隙内でろ過・濃縮され停滞してしまう。
- 3) しかし共存する HLB 値 13.3 の界面活性剤が、間隙中の HLB 値 10.5 の濃縮成分を常に下流へ洗い流す役割を果たす。

これら 1)2)3)により、浄化性能を保ちつつ、停滞せずに浄化できたものとする。次節では、この混合界面活性剤を用いた大型二次元土槽実験を実施し、2017 年度に問題になった停滞が解決できるのかを確認することにした。

### 4.3 2018 年度の大型二次元土槽実験

#### 4.3.1 HLB 値 10.5 の界面活性剤(1.5%)と HLB 値 13.3 の界面活性剤(1.5%)の混合界面活性剤による大型二次元土槽実験 4.3.1

2018 年度の実験に用いた大型二次元土槽装置を、図-4.5 に示す。装置のサイズおよび試料土の充填方法・汚染油などは、第 2 章で紹介した実験と同様である。ノズル 1 から、越流水槽内の HLB 値 10.5(1.5%)と 13.3(1.5%)を用いた混合界面活性剤を動水勾配により送液し、ノズル 2 に滲出してきた乳化油を送液ポンプで回収する方法で行った。また当初の計画にはなかったが、実験途中から土槽左横についているバルブを開放して廃液を回収した。この理由については後で述べる。実験の経過写真が写真-4.5~4.10 である。初期状態と比較して、10 時間後の写真-4.6 ではノズル 1 の周りから浄化域が拡大している様子が見られる。その後も界

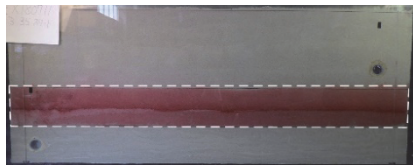


写真-4.5 初期状態

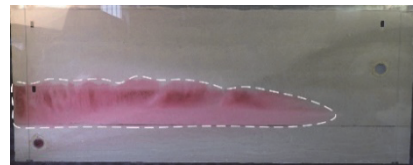


写真-4.6 10時間後

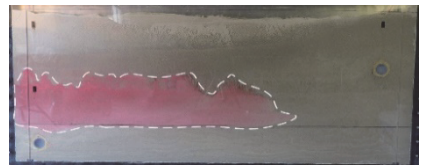


写真-4.7 20時間後

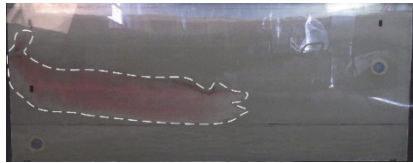


写真-4.8 50時間後



写真-4.9 80時間後

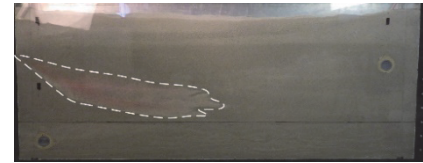


写真-4.10 88時間後

界面活性剤の送液は順調に進み、停滞は発生しなかったものの、徐々に油の汚染領域の形がほとんど変わらなくなってしまう。

今回の界面活性剤は HLB 値 10.5 の界面活性剤が 1.5% であるので、浸透性は良くなったものの、3%のものよりは乳化力としては若干劣るため、いったん汚染油領域の下を流れることができるようになると、あまり汚染油を乳化しなくなってしまうと考えられた。そのためノズル 2 からの回収を停止し、15 時間から以降は土槽左横についているバルブのうち、底面から 55cm の位置のものを開放して、界面活性剤の流れが油汚染領域内を通過する位置から回収することにした。その後 5 時間が経過した際の様子写真-4.7 (20 時間後) である。界面活性剤の流れが変わったことで 10 時間後と比べると汚染領域が上のほうに広がっていることが確認できるが、期待するほど回収されなかった。50 時間後になると汚染領域の色が初期状態と比べ薄くなっている (写真-4.8)。これまでの HLB 値 10.5 の 3% 水溶液を用いた土槽実験では、汚染油を押しよけるように明確な輪郭をもった浄化域が拡大する様子が見られたが、今回の混合界面活性剤はシミを抜くように徐々に浄化が進むため、時間がかかると同時に界面活性剤の使用量も多くかかるようである。80 時間後 (写真-4.9) では、50 時間後と比べると汚染領域の下部分が浄化されているのだが、回収位置の下部に清浄土領域が出来たことで、界面活性剤がここを流れてしまい、油とあまり接触しなくなってしまうため 88 時間後 (写真-4.10) に実験を終了した。実験終了時点での混合界面活性剤使用量は初期汚染領域の間隙体積 9260cm<sup>3</sup> の 25.32 倍 (=25.32PoreVolume、以下 PV と略記) で、残留汚染領域比は 27.3% であった。今回使用した混合界面活性剤は、前節 4.2 のカラム実験では油汚染土層を必ず通過するので浄化が進行した。しかし、大型二次元土槽実験で使用すると、油に対する親油性が不足しており、油汚染領域を迂回して流れてしまうこと、乳化性能が小さいことで使用量がかかり多くなってしまうことが分かった。だが今回の大型二次

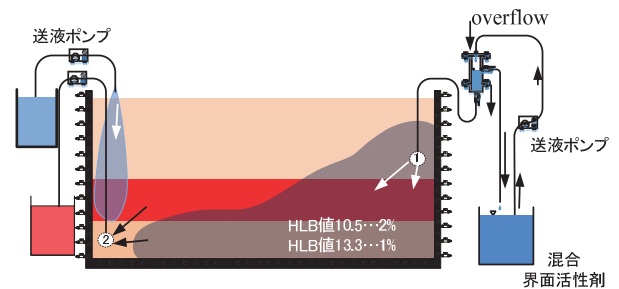


図-4.6 実験装置と挙動予想図 (実験 4.3.2)

元土槽実験は、動水勾配流でも停滞せずに送液・回収が継続できた、という点では成果が得られた。そこで次の実験は、浄化性能に関する HLB 値 10.5 の界面活性剤の配合率を若干高めた混合界面活性剤を用いて行うこととした。

#### 4.3.2 HLB 値 10.5 の界面活性剤 (2.0%) と HLB 値 13.3 の界面活性剤 (1.0%) の混合界面活性剤による大型二次元土槽実験 4.3.2

今回の大型二次元土槽実験では、HLB 値 10.5 の界面活性剤 (2.0%) と HLB 値 13.3 の界面活性剤 (1.0%) の混合界面活性剤を用いることにした。前回の 1.5% から 2% へと HLB 値 10.5 の界面活性剤を多く配合することで実験 4.3.2 よりも油になじみやすくしつつ、HLB 値 13.3 の界面活性剤は 1.5% から 1% とするものの、これによる HLB 値 10.5 の界面活性剤の洗い流し効果は残すのが狙いである。

今回用いた実験装置は図-4.6 である。左下のノズル 2 の上の汚染領域は、実験 4.3.1 において界面活性剤があたりにくく浄化が進まなかったため、図-4.6 の装置左上のように地表面から界面活性剤を流量 50ml/min で滴下し、浄化を行うこととした。

実験の経過写真が写真-4.11~16 である。写真-4.12 (10 時間後) から 5 時間経過した 15 時間後より地表面から界面活性剤を滴下したところ、20 時間後の写真-4.13 においてノズル 2 上部の領域が垂直に浄化されて

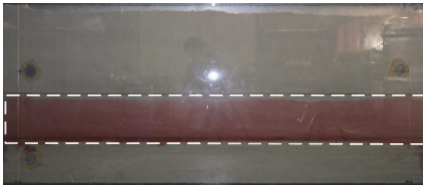


写真 4.11 初期状態

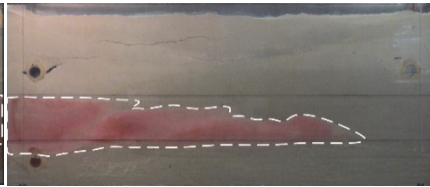


写真 4.12 10 時間後

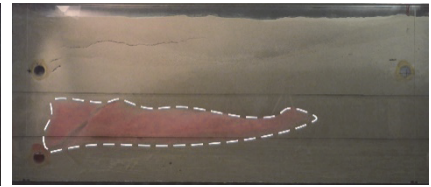


写真 4.13 20 時間後

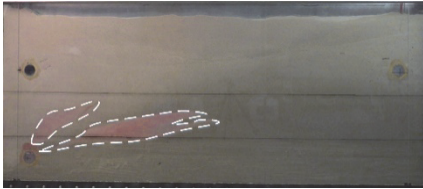


写真 4.14 40 時間後

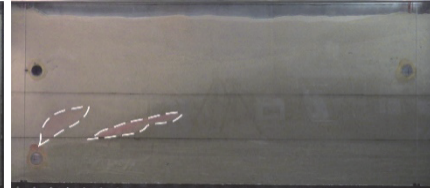


写真 4.15 50 時間後



写真 4.16 64 時間後

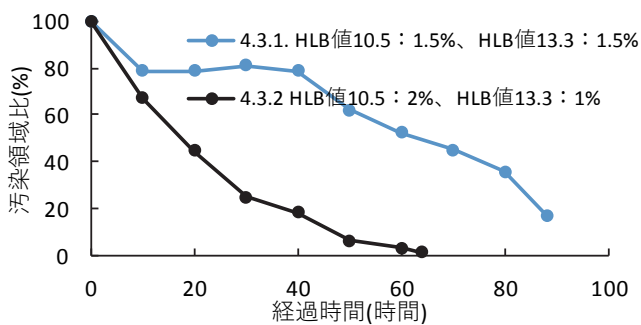


図-4.7 汚染領域比と経過時間の関係

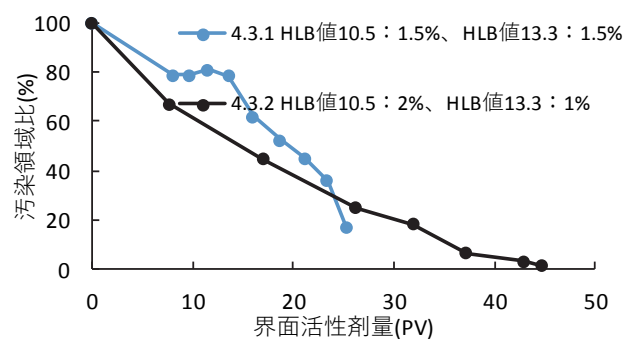


図-4.8 汚染領域比と界面活性剤量の関係

いることがわかる。実験開始後 22 時間後、この領域の浄化はほぼ終了したと判断し、界面活性剤の滴下を停止した。その後浄化は進み、40 時間後の写真-4.14 のように汚染領域を界面活性剤が包むように流れたことで浄化が進んだと思われる。しかし 50 時間後の写真-4.15 を見ると 40 時間後に二つに分かれていた汚染領域のうち右側の汚染領域は浄化が進んでいるが、左側はあまり浄化が進まなかった。そのため、当初の計画にはなかったが、60 時間以降、ノズル 2 からの回収法を送液ポンプによるくみ上げ方法ではなく真空ポンプによる吸引回収へと変更した。その結果、64 時間後の写真-4.16 のように浄化がほぼ完了したため実験を終了した。本実験に要した混合界面活性剤は 44.78PV であった。

図-4.7 は、経過時間を横軸に、初期汚染領域を 100% とした汚染領域比 (%) を縦軸にとり、実験 4.3.1 と実験 4.3.2 の結果を整理・比較したものである。実験 4.3.2 で浄化完了までに要した時間は約 64 時間で、実験 4.3.1 の 88 時間 (浄化は未完了) よりも大幅に短縮されたことがわかる。一方、図-4.8 は、界面活性剤使用量 (PV) を横軸に、汚染領域比 (%) を縦軸にとり、実験 4.3.1 と実験 4.3.2 の結果を整理・比較したものである。実験 4.3.2 の界面活性剤の使用量は 44.78PV で、先ほどの実験 4.3.1 はまだ浄化途中 (27.3%残留) であったとはいえ 25.32PV であったのと比べると大幅に増加してしま

った。すなわち、実験 4.3.1 のほうが「長時間・少使用量 (未完了)」、実験 4.3.2 のほうが「短時間・多使用量」という結果となった。しかし、実験 4.3.1 では途中から流出ポイントを左上にして動水勾配を変更し、実験 4.3.2 では実験 4.3.1 になかった下流側の地表面からの界面活性剤の滴下が行われたので、この 2 つの実験結果を単純に比較することはできない。

それよりも興味深いのは、本研究室における従来の実験との違いである。HLB 値 10.5 の界面活性剤 3% の加圧送液・真空吸引による浄化範囲②を対象にした大型二次元土槽実験<sup>17)</sup>では、わずか 8PV~10PV の界面活性剤の使用量で浄化が終了している。本報告の混合界面活性剤の動水勾配流では、25~45PV も界面活性剤を使用した。また HLB 値 10.5 の界面活性剤 3% の加圧送液・真空吸引による大型二次元土槽実験<sup>18)</sup>では、おおよそ 20~30 時間で浄化を完了していたが、本報告の混合界面活性剤の動水勾配流では 60~90 時間程度と、倍以上の時間を要した。動水勾配流のほうが界面活性剤はゆっくりと流れて油と反応する時間が十分あるため「少使用量・長時間」になると想定していたのであるが、「多使用量・長時間」という傾向となった。これは HLB 値 10.5 の界面活性剤の濃度を 3% より小さくしたことが主な原因と考えられる。

## 5. 浄化範囲③に関する実験の考察とまとめ

第4章では界面活性剤が停滞する問題について着目し、カラムによる通液実験と室内土槽を用いた浄化実験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

### 5.1 カラム実験に関する考察

HLB値10.5の界面活性剤を用いた浄化・通液実験では、2017年度の大型二次元土槽実験と同様に、通液時間が経過すると流量が低下していき、最終的に通液困難になることが判明した。原因として界面活性剤のHLB値が関係していると考えた。HLB値10.5のものは油寄りであるため、原液成分が間隙内で徐々に水と分離し長期間に渡りそれが続くことで間隙を塞ぎ、停滞を起こしたのだと考えられた。これに対し、HLB値が13.3のものは親水側であるため10.5のものよりも流れやすく、間隙中で成分が分離しにくいものの、油の乳化性能は低いいため浄化が遅かった。そこで、両者を1.5%ずつ混合した界面活性剤によるカラム実験を行なったところ、停滞を起こすことなく浄化を完了することができた。HLB値13.3の界面活性剤が、間隙中のHLB値10.5の濃縮成分を常に下流へ洗い流す役割を果たしたものと考えられた。

### 5.2 大型二次元土槽実験に関する考察

カラム試験で良い結果が得られた、HLB値10.5の界面活性剤(1.5%)とHLB値13.3の界面活性剤(1.5%)の混合界面活性剤による大型二次元土槽実験(実験4.3.1)を行なった。動水勾配流でも停滞せずに送液・回収が継続できたという点では成果が得られたものの、油汚染領域を迂回して流れてしまうことが分かった。そこで、HLB値10.5の界面活性剤(2.0%)とHLB値13.3の界面活性剤(1.0%)の混合界面活性剤による大型二次元土槽実験(実験4.3.2)を行った結果、実験4.3.1よりも浄化時間を短縮することができた。この2つの実験において、初期の課題であった「動水勾配流でも界面活性剤が停滞しないようにして浄化する」ことに成功した。

## 6 今後の研究の予定

浄化範囲②に関する実験2.3と実験2.4では地表面に界面活性剤をあふれさせていたが、実際の現場では土被りが大きいと界面活性剤は地表面には到達しない。2019年度より新たに写真-5.1の内寸深さ140cmの大型二次元土槽を導入した。

これまでの土槽では油汚染領域の上の清浄土の土被り厚は40cmであったが、今後は新装置を用いて土被りを80cmにした実験を行い、この土被り部分を界面活性剤が浸透して油の上から当たる実験を実施したいと考えている。

また、これまで油汚染領域の下の帯水層にあたる清



写真-5.1 新たに導入した  
新型土槽 (内寸高さ140cm)

浄土の層厚は常に20cmで行ってきたが、新土槽ではこの帯水層の厚みを40cmに変更した場合に、界面活性剤の浸透や浄化の進行がどのようになるのかについて、これまでの実験と比較・検討したいと考えている。

また、本研究室における従来のHLB値10.5の界面活性剤3%の加圧送液・真空吸引による大型二次元土槽実験<sup>17)18)</sup>と比較すると、浄化範囲③に関する本報告の混合界面活性剤の動水勾配流は、「多使用量・長時間」という傾向となった。現時点では、まだ混合界面活性剤の動水勾配流による実験ケースが少ないため、今後も実験を継続し検討してゆく予定である。

### 謝辞

本研究は2018～2022年度科学研究費(基盤研究B 課題番号18H01535)により実施された。

### 参考文献

- 1) 加藤欣也, 城まゆみ, 板橋秀治, 佐高 裕之: シート被覆による掘削土(ズリ)置場の浸出水量の低減, およびホウ素・窒素濃度低減, 土木学会第67回年次学術講演会講演集, pp.323～324, 名古屋(2012) .
- 2) 宮本 裕二, 木佐貫 浄治, 梶 秀作, 北村 良介, 中川 浩一, 鈴木 雅文, 大山 洋一: 自然由来重金属を含むトンネル湧水の減水対策について, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 385～390, 福島(2015) .
- 3) 細野哲, 門間聖子, 久木原峯隆, 佐保亮輔, 船水義一, 佐藤貴之: 安山岩及び粗粒玄武岩における自然由来重金属等の溶出事例, 第17回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.7～9, 川崎(2011) .
- 4) 井上千弘: 地盤工学と地質学における最近のかかわり 6. 自然的要因における微生物の役割と対策, 地盤工学会誌, vol.65, No.2, Ser.No.709, pp.36～43, 2017.
- 5) 東日本大震災対応調査研究委員会地盤環境研究委員会: (委員会活動報告) 東日本大震災における地盤環境課題への取り組み, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.1～11, 福島(2015) .
- 6) 肴倉宏史, 勝見武, 野口真一, 中村吉男: 災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用に資するための地盤工学会

- からの提言とガイドラインについて,第21回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集,pp.42~47,福岡(2015)。
- 7) 山根華織, 勝見 武, 高井敦史, 乾 徹, 森田康平:地震・津波で発生した災害廃棄物処理物の物性に及ぼす再ふるいの影響,第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集,pp.371~376,東京(2013)。
- 8) 岩崎広江, 根岸昌範, 樋口雄一:浄化用鉄粉の脱塩素反応持続性評価及び反応性回復手法の検討,第19回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集,pp.362~365,京都(2013)。
- 9) 秦 浩司:揮発性有機化合物(VOCs)および塩化ビニル・1,4-ジオキサンに対する化学的分解法の適用性に関する研究,第21回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集,pp.62~67,福岡(2015)。
- 10) 西川直仁, 桐山 久, 藤井治彦, 石川洋二:バイオスパーキング工法によるベンゼン汚染土壌の原位置浄化,土木学会第67回年次学術講演会講演集,pp.311~312,名古屋(2012)。
- 11) 今立文雄, 川端淳一:微細気泡を用いた油汚染土の浄化技術,土木学会論文集, No.776/VII-33, pp.39~48, 2004.
- 12) 地盤工学会:地盤工学・実務シリーズ25, 続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学会, pp.89~90, 2008.
- 13) Stephanie Fiorena, Clarence A.Miller, Carroll L.Oubre and C.Herb Ward:NAPL Removal Surfactants, Foams, and Microemulsions, Lewis publishers, 2000.
- 14) 佐藤克春:市街地土壌汚染問題の政治経済学, p.221, 旬報社, 2015.
- 15) 岡田正明, 仲沢武志, 磯村 渉, 近藤敏仁, 野口俊太郎: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), フジタ技術研究報告,第45号, pp.13~18, 2009.
- 16) 中西茂子:洗剤と洗浄の科学, 新型コロナシリーズ33, コロナ社, p.43, 1995.
- 17) 棚橋秀行:機械油汚染地盤に対する非掘削SEARの浄化効率に関する室内土槽実験, Kansai Geo-Symposium 2017 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム, 地盤工学会関西支部, pp.28~33, 大阪(2017)。
- 18) 古田淳士, 野村凌平, 棚橋秀行: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, 土木学会中部支部研究発表会, pp.255~256, 豊田市(2019)。