

機械油汚染地盤の非掘削浄化効率に関する研究 Purification efficiency without excavation for the ground polluted by machine oil

清宮崇寛¹, 佐野豊生¹, 棚橋秀行²

1 大同大学・大学院工学研究科都市環境デザイン学専攻

2 大同大学・工学部都市環境デザイン学科・tanahasi@daido-it.ac.jp

概 要

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。本研究室では、界面活性剤で機械油を乳化させ非掘削浄化する技術について研究を行っている。

これまでに、「間隙内二液反応発泡」を提案し、室内土槽実験において油汚染土壌の浄化が可能であるということがわかっている。そこで、この方法を利用する上で最も浄化性能のよい方法を算定するために、浄化に使用した界面活性剤の原液量を V_{su} (L), 初期汚染油の量を V_{oi} (L), 回収された汚染油を V_{or} (L), 浄化完了までの時間を t (hour), 回収した汚染油 V_{or} を含めた総回収排液体積を V_d (L) からなる浄化効率 E_f ($1/(\text{hour} \cdot \text{L}^2)$) を定義した。室内土槽実験において浄化効率 E_f が優れ、経済的で環境負荷の低い汚染地盤浄化技術の開発経過を紹介する。

キーワード：油汚染地盤，浄化，非掘削，界面活性剤，間隙内二液反応発泡

1. はじめに

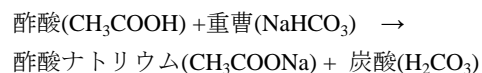
油による地盤汚染が問題となっている。このうちトリクロロエチレンなどの有機塩素化合物，あるいは燃料といった揮発性に富み粘性の小さな油に対する浄化は進んでいるが，機械油などの揮発性に乏しい高粘性油に対する浄化技術開発はあまり進んでいない。多くの機械工場で行われるこうした機械油の地盤汚染が今後問題になるといわれており，我が国の中小の事業所数から考えても，浄化需要は非常に大規模である。機械油は潤滑油として対象物に膜状に付着することを目的に作られているため，土粒子に対する付着性が高く，かつ揮発性にも乏しいため，非掘削で除去する有効な技術は現在までのところ確立されていない。そのため，機械油で汚染された地盤は，汚染土壌を掘削して運搬し産廃処理するしかないが，埋め戻すための土も別途必要であるから，運搬費は汚染土壌の単純に約2倍必要であり膨大な額となる。また，埋め戻し土を採取するには場合によると貴重な自然を破壊しなければならないうえ，産廃処理が適正に行われず新たな汚染問題を引き起こしてしまうケースも懸念されている¹⁾。非掘削浄化が可能になればこういったリスクを回避できるだけでなく工場を操業したまま行うことが可能になり，社会的な貢献度は高いものと考えられる。

本研究の目的は大同大学・棚橋研究室がこれまでに開発した，地盤に浸透した重曹・界面活性剤・酢酸水溶液の反応による発泡で機械油を乳化させる浄化技術「間隙内二液反応発泡」を用いることで，機械油汚染地盤の効率のよい

非掘削浄化技術の確立を目指すことである。

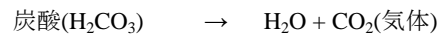
「間隙内二液反応発泡」における二酸化炭素の発生の化学反応を以下に説明する。

酢酸と炭酸水素ナトリウム（以下，重曹）を混合すると以下の反応により酢酸ナトリウムと炭酸が発生する。



この反応は酢酸の濃度が大きいときは進行せず，濃度が約5%以下で起こることが実験からわかっている。

実際には，炭酸はすぐに分解して，以下のように水と二酸化炭素の気体が発生する。



本研究では，この現象を利用した「間隙内二液反応発泡」を考案した。酢酸を添加した界面活性剤と，重曹を添加した界面活性剤の両者を汚染地盤中で接触させ， CO_2 を発生させることで界面活性剤を発泡させるのである。

これまでの室内実験から，実験の進行に伴い下流に油が濃縮されて写真-1のように三角州が形成され吸引をかけても取り除くことが難しくなる傾向が見られた。この濃縮された油を濃縮三角州と呼ぶことにする。濃縮三角州とは図-1 (a) にあるように初期汚染油が移動し濃縮された油の塊である。圧入孔付近では界面活性剤が汚染油に混合し

乳化が起こる程度浸透すると、界面活性剤が密度差によって油の下を流れるため汚染油に接触することなく井戸に流れて行ってしまいます。そして濃縮三角州に吸引孔を埋設しても図-1 (b) のように界面活性剤ばかりが吸引され汚染油はほとんど吸引されない。本研究ではこれを解決するための方法を検討する。

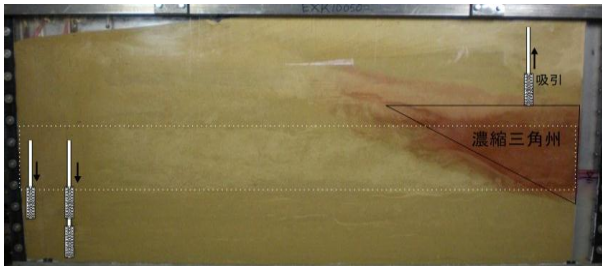


写真-1 濃縮三角州

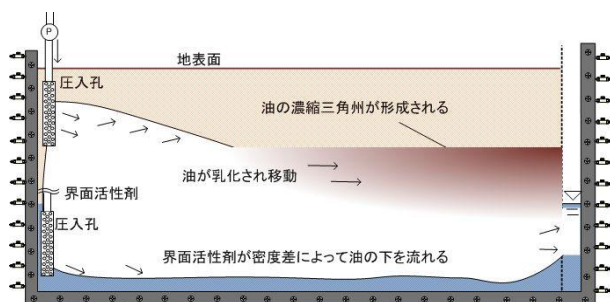


図-1 (a) 油の濃縮三角州の形成

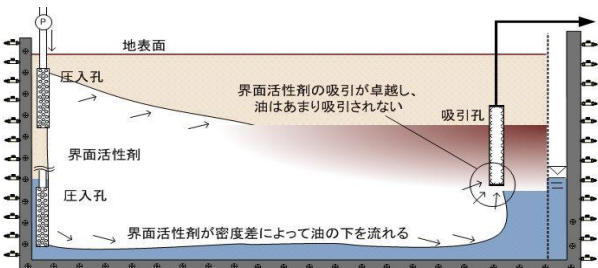
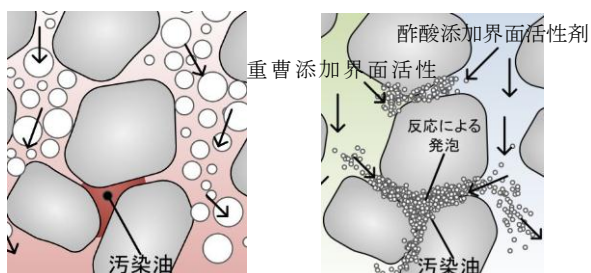


図-1 (b) 吸引回収時の様子



(a) 気泡を圧入した場合 (b) 間隙内二液反応発泡

図-2 油汚染地盤の間隙の様子

従来、地上であらかじめ気泡させた界面活性剤を汚染地盤に圧入する方法は行われているが、図-2(a)のように泡状の界面活性剤は小間隙にトラップされた油汚染部位内部には入って行かず、これを避けて流れてしまうことがわかっている²⁾。「間隙内二液反応発泡」は図-2(b)のように、界面活性剤が油汚染部位内部に十分浸透したのちに内部か

ら発泡することにより、高粘性の機械油と効率よく混合され、従来法よりも油に対する界面活性剤の乳化力が向上することを狙うものである。

2. 非掘削浄化実験

2.1 薄型二次元土槽を用いた実験(1)

2.1.1 実験目的

今までの実験では、エンジンオイルが下流で「濃縮三角州」を作り浄化効率が低下する事が多かった。理由として考えられることの一つは吸引孔が小さいということである。吸引孔が小さいと界面活性剤に押し寄せ集まってきた油が間隙を閉鎖して吸引しにくくなってしまい「濃縮三角州」が形成されてしまうのではないかと考えた。このことから吸引孔を大きくし広範囲で吸引することで集まってきた油を分散させつつ回収すれば「濃縮三角州」の形成を防げるのではないかと考えた。また、今までは二液反応を吸引孔より離れた位置で行っていたが、今回は反応させる位置を吸引孔に近づけ、泡の停滞を抑えることを期待した。

2.1.2 実験方法

実験装置には薄型二次元土槽を用いた。充填試料は豊浦標準砂を使用し、ズタンIVで赤く着色したエンジンオイルと豊浦標準砂を混ぜ合わせ汚染土とした。写真-2に示すように充填を行い、右側に圧入孔(約30cm)を1つと中央下部に1つ(約5cm)、左側に吸引孔(約30cm)を1つ埋設した。上記した通り一部のノズルを大きくした。また、地表面には、CMC(カルボキシメチルセルロース)により被覆を施し空気の侵入を防いで吸引圧の低下を抑えた。右井戸上部より給水しつつ、水面位置のバルブを開放しオーバーフローさせ水位がこれを越えないようにした。浄化液は機械油を乳化するための主剤としての「ペレスフト205(ミヨシ油脂製)3%と家庭用洗剤1%の水溶液」に重曹を8%添加した重曹添加界面活性剤を中央下部の圧入孔2から、酢酸を18%添加した酢酸添加界面活性剤右側の圧入孔3から圧入した。

2.1.3 実験状況

写真-3は実験開始2時間後の様子である。圧入孔付近の汚染範囲が小さくなっており、この時点でこれまでの実験よりも広範囲に界面活性剤が浸透していることが目視できる。ノズルを大きくしたことで浄化が進んでいると考えられ、ノズルを大きくした効果が表れているといえる。写真-4は実験開始4時間後の様子である。土槽中央部までの浄化がほぼ完了した。しかし汚染土下部から重曹添加界面活性剤を圧入しているせいか、汚染領域が上部に溜まってきた。下の方から確実に乳化して浄化を行っているが、この油が濃縮三角になるのではないかと懸念された。写真-5は実験開始5時間後の様子である。この時点で汚染がほとんど目視できなくなったため実験を終了した。

2.1.4 考察

ノズルを大きくした事で、以前まで吸引孔付近で見られていた汚染領域が膨らんでいくように間隙を閉鎖する現

象が見られず、効率よく浄化が行え、濃縮三角州を残さず浄化が行えた。今回は、圧入孔 2 から重曹添加界面活性剤、圧入孔 3 から酢酸添加界面活性剤を投与したが、次回は圧入孔 2 を吸引孔と圧入孔を結ぶラインよりも上部に設け、2 より酢酸添加界面活性剤、3 より重曹添加界面活性剤を投与する事にした。理由としては、重曹添加界面の方が、酢酸添加界面活性剤よりも浄化効果が高くこれを浄化のメインとなる圧入孔 3 から浸透させることにより、さらに浄化速度が上がるためである。また、今まで下流に行くにつれ界面活性剤が下部に潜り込んでしまい、吸引孔付近の上部まで到達しておらず、浄化効率が落ちていたのではないかと考え、圧入孔 2 を上部に持つことで効率向上する事を期待した。

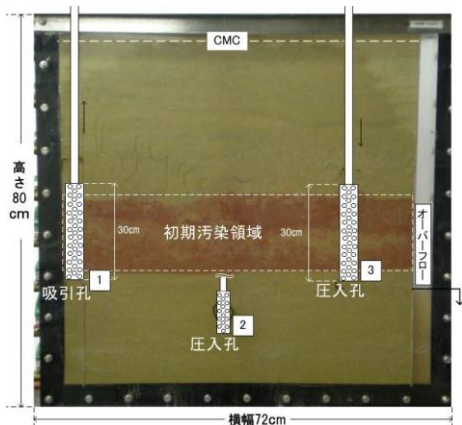


写真-2 実験の初期状態

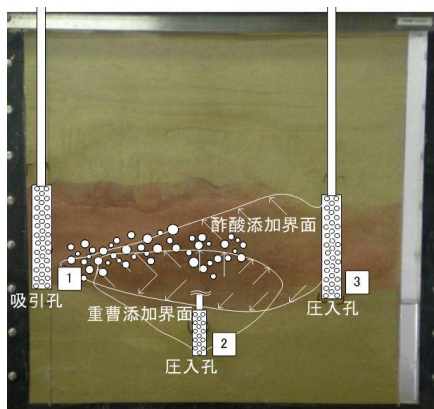


写真-3 実験開始 2 時間後

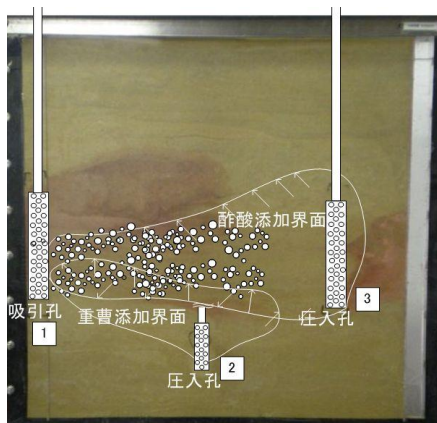


写真-4 実験開始 4 時間後

2.2 薄型二次元土槽を用いた実験(2)

2.2.1 実験方法

充填試料は豊浦砂に砂利を加えたものを用い、ズダンIVにより赤く着色したエンジンオイルを混ぜ汚染土とした。初期汚染領域を写真-6 の中央の点線に示す。写真-6 に示すように右側に圧入孔 (約 30cm) を1つと中央やや左の上部に1つ (約 5 cm) ,左側に吸引孔 (約 30cm) を1つ埋設した。また、地表面には CMC により被覆を施し空気の侵入を防いで吸引圧の低下を抑えた。右井戸上部より給水し、写真-6 の水面位置のバルブを開放しオーバーフローさせ水位がこれを越えないようにした。浄化液は、重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤を用いた。どちらの溶液も先ほどの実験と同じ濃度のものを使用して実験を行った。

今回の実験では、図-3 のように初期油汚染領域の側面より重曹を添加した界面活性剤を浸透させ油汚染領域の上部から酢酸を添加した界面活性剤を浸透させる。これにより油汚染領域内で二酸化炭素が発生することで界面活性剤が発泡し油の乳化を促進する。この乳化した油を吸引回収することによって下流に濃縮三角州を作ることなく浄化することができるのではないかと考えた。下流に濃縮三角州を作らずに浄化する方法を V-H Flow 法 (Vertical-Horizontal Flow) と呼ぶことにする。

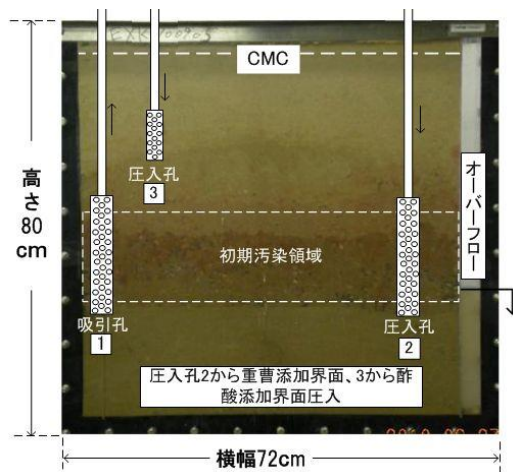


写真-6 実験の初期状態

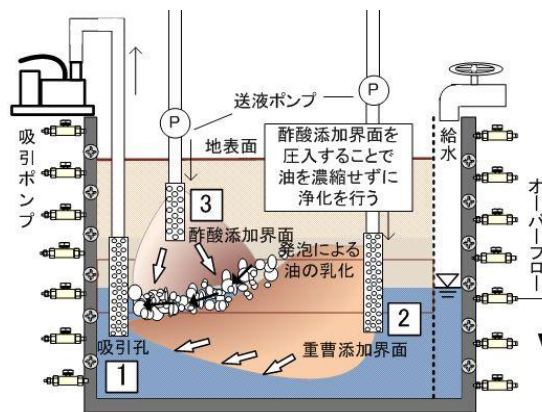


図-3 V-H Flow 法の挙動予想図

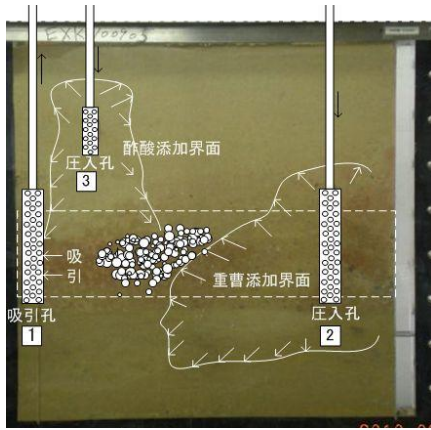


写真-7 実験開始 1 時間後

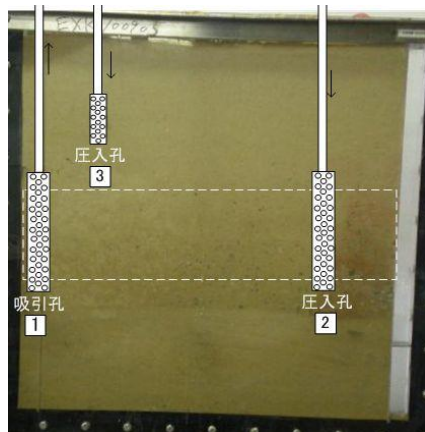


写真-8 実験開始 2 時間後

2.2.2 実験状況

実験を開始して 1 時間後の様子が写真-7 である。図-3 で予想した挙動に近い状態が見られる。圧入孔 2 から圧入した重曹添加界面活性剤だけで汚染油が 3 分の 1 ほど左に移動している。ここに圧入孔 3 より酢酸添加界面活性剤を圧入することで重曹添加界面活性剤と反応し発泡することで油の乳化とその回収が促進されている状況である。このまま実験を継続したところ、実験開始から 2 時間後には写真-8 のように汚染油が目視できなくなるまで回収することができた。

2.2.3 考察

先ほどの実験と比べても短時間で浄化が完了した。先ほどの実験より早く浄化できた要因として挙げられるのはノズルの配置と溶液の圧入場所である。ノズルの位置を左上部にすることで、下流に形成される濃縮三角州内で発泡を起こすことができた。浄化効果が大きい重曹添加界面活性剤をメインに圧入し酢酸添加界面活性剤をサブとして圧入したことも、浄化スピードの向上につながったと思われる。この実験結果から V-H Flow 法で油の乳化回収を効率よく行うことが可能であることが確認できた

2.3 幅広薄型二次元土槽を用いた実験(1)

2.3.1 実験目的

幅広薄型二次元土槽(高さ 100cm×横 200cm×奥行き 5cm)

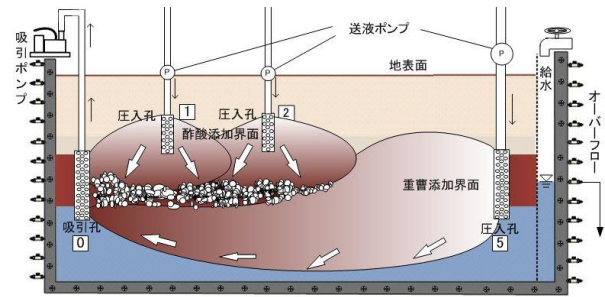


図-4 V-H Flow 法挙動予想図

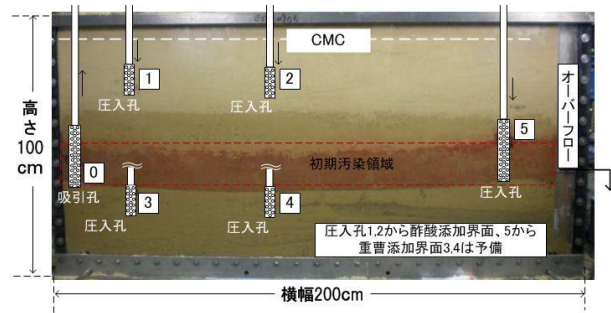


写真-9 実験の初期状態

は薄型二次元土槽に比べ横幅が約 3 倍で濃縮三角州が形成されやすい。図-4 のような配置で V-H Flow 法により濃縮三角州を形成せずに浄化できるか実験を行った。

2.3.2 実験方法

充填試料と汚染土は前回と同様のものを用いた。写真-9 の中央の点線に示すように汚染領域を設けた。写真-9 に示すように右側に圧入孔 5 を埋設し、汚染領域を挟んで上下に圧入孔の 1 から 4 を埋設した。そして左端に埋設した吸引孔 0 から吸引を行う。前回と同様に地表面には、CMC で被覆を施した。今回も右井戸上部より給水しつつ、写真-9 の水面位置のバルブを開放しオーバーフローさせ水位が一定になるようにした。圧入孔 5 から継続的に重曹添加界面活性剤、浄化がある程度進行したタイミングで圧入孔 1 から 4 より酢酸添加界面活性剤の圧入を行う。重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤は前回と同じ濃度とした。

2.3.3 実験状況

重曹添加界面活性剤のみでも十分浄化効果が期待できるので、様子を見るため実験開始 20 時間後まで重曹添加界面活性剤のみを圧入し、ある程度浸透させ乳化させることにした。これは、同時に重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤を圧入すると汚染領域の中央付近で発泡し、壁になってしまい吸引しづらくなってしまいうので先に重曹添加界面活性剤のみを浸透させることがよいのではないかと考えたためである。実験開始 25 時間後の時点で圧入孔 3 と圧入孔 4 から酢酸添加界面活性剤を圧入孔 5 から重曹添加界面活性剤を圧入した。先ほど重曹添加界面活性剤を全体的に浸透させたので二液反応が起こり発泡も行われていることが目視できた。圧入孔 3 と圧入孔 4 付近もかなり浄化が進行している。

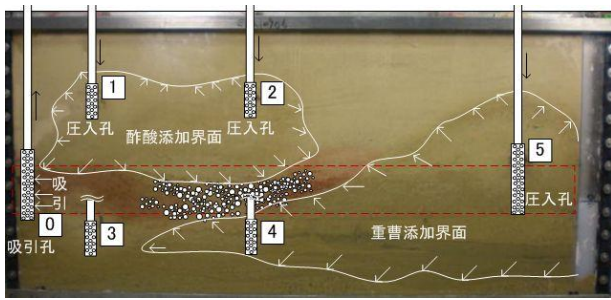


写真-10 実験開始 72 時間後

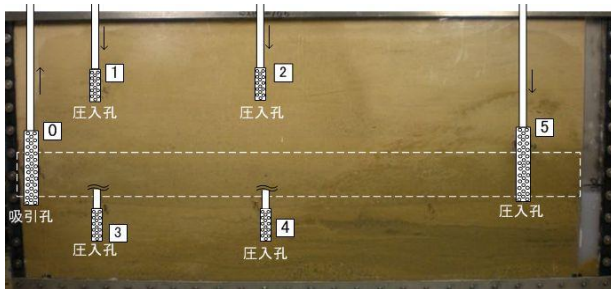


写真-11 実験開始 142 時間後

実験開始 39 時間後に圧入孔 5 からの重曹添加界面を止め圧入孔 1 と圧入孔 2 から酢酸添加界面のみを圧入したが、圧入孔 1 と圧入孔 2 の付近はあまり変化が確認できなかった。上部の酢酸添加界面のみでは浄化が確認できなかった。原因としては、酸性の酢酸添加界面はアルカリ性の重曹添加界面に比べ酸性の油に対する浄化効果が少ないためと考えられる。また、ペレソフト 205 のアルカリ性を酸性側にしてしまうことも考えられる。この時点で圧入孔 5 から再度重曹添加界面活性剤を圧入した。写真-10 はこの時点（実験開始 72 時間後）の様子である。この状態を維持し、再度重曹添加界面活性剤での浄化に期待した。

実験開始 112 時間後に飛び地的な残留油分が確認され、圧入孔 2 から酢酸添加界面と圧入孔 5 から重曹添加界面を圧入した。しかし重曹添加界面が油の下へ流れ込んでしまい、酢酸添加界面は吸引に引っ張られそこまで届かないためか浄化が難しいことが懸念された。そこで圧入孔 2 から酢酸添加界面を止めて代わりに界面活性剤を圧入することにした。圧入孔 2 から界面活性剤を圧入する事で、吸引孔付近へ乳化油を押しきれいに浄化されはじめたのでこのまま継続することにした。その結果 142 時間後には写真-11 に示すように汚染が目視できないレベルまで浄化する事が出来たので、実験を終了することにした。

2.3.4 考察

薄型二次元土槽よりも大きい装置である幅広二次元土槽においても滞りなく汚染土壌の浄化をすることができた。また、縦方向と横方向から浄化液を流す V-H Flow 法と「間隙内二液反応発泡」を用いて写真-1 のような濃縮三角州を形成することなく浄化が可能だということがわかった。この実験結果から「間隙内二液反応発泡」は汚染土壌の浄化に対して非常に有効であるということがわかったが、より浄化効率を追求した場合、V-H Flow 法が「間隙内二

液反応発泡」を用いる上で最適の実験方法であるのかという疑問が生じた。

そこで、「間隙内二液反応発泡」を利用する上で最も浄化性能のよい方法を算定するために、浄化効率を式 (1) のように定量的に評価し、最も効率のよい実験方法を比較検証することにした。

$$E_f = \sqrt[3]{V_{su} \times t \times V_d} \times \frac{V_{or}}{V_{oi}} \quad (1)$$

式 (1) の左辺 E_f は浄化効率 ($1/(\text{hour} \cdot \text{L}^2)$) である。浄化に使用した界面活性剤の原液量を V_{su} (L)、初期汚染油の量を V_{oi} (L)、回収された汚染油を V_{or} (L)、浄化完了までの時間を t (hour)、回収した汚染油 V_{or} を含めた総回収排液体積を V_d (L) とする。この計算により E_f が大きいほど浄化効率が高いものとして評価することで、「間隙内二液反応発泡」を用いる上で最適の実験方法を検証する。

2.4 薄型二次元土槽を用いた浄化効率比較実験

2.4.1 実験条件

薄型二次元土槽（高さ 60 cm、幅 60 cm、厚さ 5 cm）を用いて Case1~7 の実験を行った。各実験の共通条件は、土試料：豊浦標準砂を乾燥充填密度 $\rho_d=1.55$ (g/cm^3) で充填、汚染土：ズタンIVで赤く着色したエンジンオイル (646 ml) と豊浦標準砂を混合（含油比 12.5 %）、浄化液：機械油を乳化するための主剤としてペレソフト 205（ミヨシ油脂製）3 %、汚染帯の厚さ： $D=10.0$ (cm) である。各実験の浄化方法は下記に示した通りである。

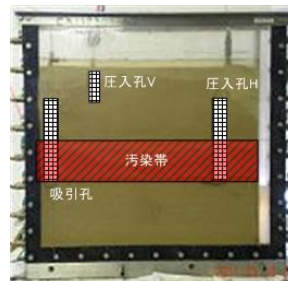


写真-12 初期状態 Case1・2

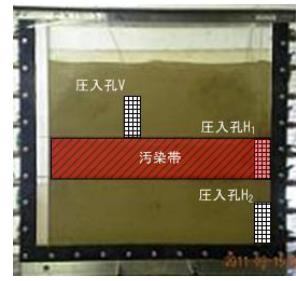


写真-13 初期状態 Case3・4

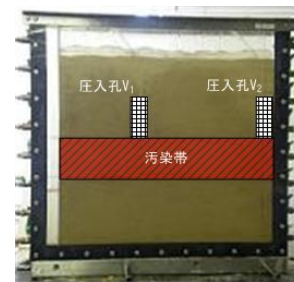


写真-14 初期状態 Case5・6・7

Case1：写真-12 は初期状態で、真空ポンプにより吸引を行ないながら H 方向から送液ポンプにより浄化液を圧入し、一定時間後に V 方向からも浄化液を圧入する。Case2 はこの手順を逆にしたものである。Case3：写真-13 は初期状態で、H₁ から浄化液、H₂ から重曹水（5 %）を圧入し、一定時間後に V 方向からも浄化液を圧入する。Case4 はこの手

順を逆にしたものである。Case5: 写真-14 は初期状態で、 V_1 と V_2 から同時に浄化液を圧入する。Case6 は V_1 から浄化液を圧入し、一定時間後に V_2 から浄化液を圧入する。Case7 は V_2 から浄化液を圧入し、一定時間後 V_2 は水に変更し V_1 から浄化液を圧入する。

2.4.2 実験結果

表-1 より浄化効率 E_f を見てみると Case4 が最も高く、回収油体積 V_{or} (530 ml) が初期汚染油体積 V_{oil} (646 ml) の 82.1 % に達している。一方、回収油体積 V_{or} が 608 ml と最も多くなった Case7 では 94.1 % の回収率にも関わらず浄化効率 E_f は三番目であった。

2.5 幅広薄型二次元土槽を用いた実験(2)

2.5.1 実験目的

表-1 の結果を踏まえ、「間隙内二液反応発泡」を用いて幅広薄型二次元土槽の浄化実験を行う。

2.5.2 実験方法

実験装置に幅広薄型二次元土槽を用いた。充填試料は豊浦標準砂を使用し、ズタンIVで赤く着色したエンジンオイルと豊浦標準砂を混ぜ合わせ汚染土とし写真-15 に示すように充填を行った。右側に圧入孔 5 (約 30 cm) を 1 つと上部に 2・3・4 の 3 つ (約 10 cm) を埋設した。地表面には、CMC により被覆を施し空気侵入を防いで吸引圧の低下を抑えた。図-6 に示したように、右井戸上部より給水しつつ、水面位置のバルブを開放しオーバーフローさせ水位がこれを越えないようにした。5 % 重曹水を圧入孔 5 から 26ml/min で圧入し、ペレソフト 205 (ミヨシ油脂製) 4 % を圧入孔 3 と 4 から 14ml/min ずつ圧入、ペレソフト 205 を 3 % に希釈したものに酢酸を 5 % 添加した酢酸添加界面活性剤右側の圧入孔 2 から 14ml/min で圧入する。まず吸引 1 孔から吸引を行い初期汚染油が地下水面に押し流されたのが確認できたら、吸引 0 から吸引を行い地下水面の油を回収することとした。

2.5.3 実験結果

写真-16 は圧入・吸引を 8 時間行った後の様子である。実験操作を停止している夜間も含めた総実験時間は 23 時間である。上部から圧入した界面活性剤と酢酸添加界面活性剤により乳化し始めていることが確認できる。吸引孔付近は重曹水と酢酸添加界面活性剤が反応して発泡していることが確認できた。

十分に発泡しているため、吸引開始 11 時間行ったところで圧入孔 2 からの酢酸添加界面活性剤の圧入を停止し、圧入孔 3,4 からの界面活性剤のみで押し流すことにした。実験を継続したところ写真-17 (吸引 16 時間・総実験 101 時間) のようになった。この写真よりほとんどの乳化油が地下水面に押し流されていることが確認できる。その後、吸引 18 時間後 (写真なし) に、吸引孔 1 からの吸引を止めて吸引孔 0 からの吸引へ変更した。

この時点で、吸引孔付近の油が初期汚染油にズタンIVで着色した赤色よりも黒ずんでいることが観察された。

表-1 実験結果と浄化効率

	結果						浄化効率	
	送液流量 Q (ml/min)	界面活性剤原液 使用体積 V_m (L)	総実験時間 t (hour)	積算吸引時間 t_s (hour)	回収排液総体積 V_d (L)	回収油体積 V_{or} (L)	回収率 Vor/Voi (%)	浄化効率 E_f
Case1	11.0	0.138	27.50	5.3	64.0	0.205	31.7	0.0509
Case2	11.0	0.311	29.50	7.5	24.0	0.240	37.2	0.0615
Case3	5.0	0.600	47.58	0.0	32.5	0.325	50.3	0.0516
Case4	5.0	0.600	46.75	0.0	26.5	0.530	82.1	0.0906
Case5	5.0	0.420	23.08	0.0	14.0	0.224	34.7	0.0675
Case6	5.0	0.600	47.00	0.0	21.6	0.470	72.8	0.0859
Case7	5.0	0.600	83.50	0.0	38.0	0.608	94.1	0.0760

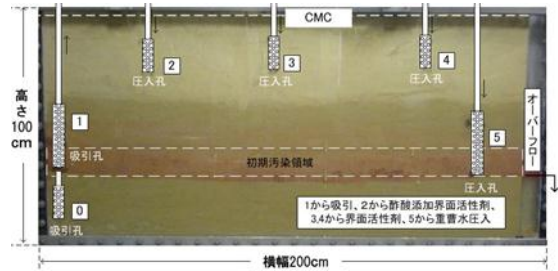


写真-15 初期状態

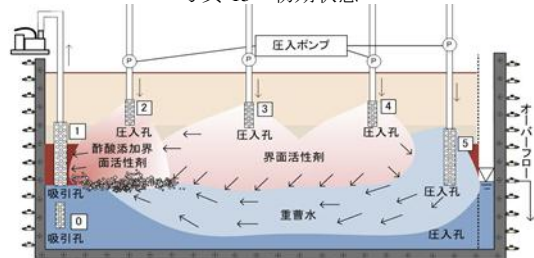


図-6 挙動予想図

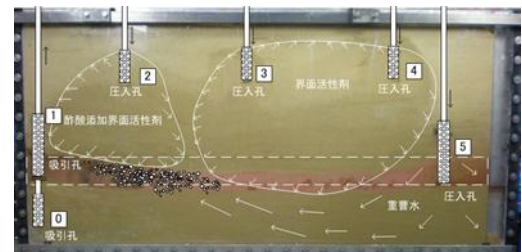


写真-16 吸引8時間 総実験23時間

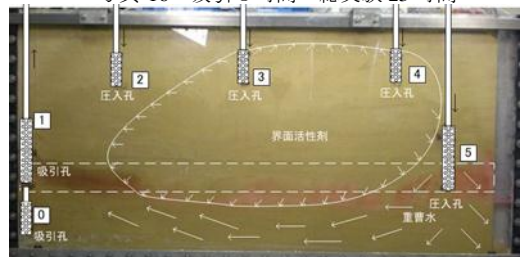


写真-17 吸引16時間 総実験101時間

これは、これまでに行った実験でも時折みられた現象で、エンジン油汚染土に酢酸を含む水溶液が浸透してゆく際、定量的な閾値は不明であるが油汚染土中の酢酸の存在量がある一定以上になると起こる傾向にある。おそらく極端に pH が酸性になると何か関係があると思われるが、黒ずんだ領域がいったん形成されてしまうと酢酸添加界面活性剤ではなかなか浄化できなくなることもこれまでの実験からわかっているので、圧入孔 2 からの圧入をこれ以降はペレソフト 205 の 4 % 水溶液へと切り替えた。

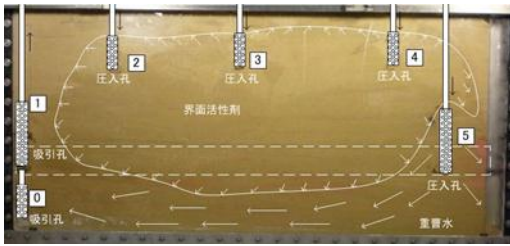


写真-18 吸引 25 時間 総実験 149 時間

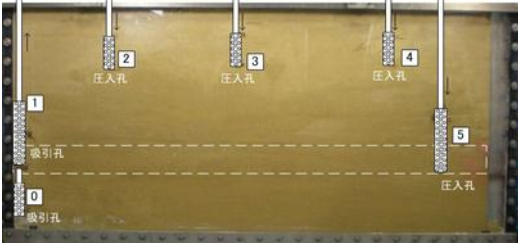


写真-19 吸引 35 時間 総実験 195 時間

このまま実験を継続したところ写真-18（吸引 25 時間・総実験 149 時間）の状態になった。圧入孔 5 の右側の汚染油が乳化していることがこの写真から確認できた。これは夜間の吸引停止中に地盤内の界面活性剤が右側にしみ出たためである。中央にまだ少し帯状に乳化油が確認できたので浄化を継続したところ、吸引 35 時間（総実験 195 時間）後には、写真-19 のように中央の汚染油が目視できなくなったので実験を終了した。

2.5.4 考察と課題

今回の実験において圧入した、3 種類の液体の累積量に関してグラフ化したものが図-7 である。総圧入量 136.92L のうち、重曹 54.60L、界面活性剤 4% 水溶液が 73.08L、酢酸添加の界面活性剤が 9.24L であった。グラフが横ばいになっているのは装置や施設利用の関係で実験ができなかった夜間・休日の時間帯であり、総実験時間の 82% がこれにあたる。予想した浄化挙動になるための状態での実験時間は 18% にすぎなかった。これは、実際の現場においても夜間の騒音など様々な制約で、一定の工程が長期間継続できるとは限らない場合のほうが多いと予想される。今後の実験では、圧入や吸引といった操作を停止している際の挙動変化まで考慮したうえでの実験方法を計画する必要があると思われる。

また、今回の実験において吸引によって回収された液体の総量は約 150 L であった。実験開始時点点をゼロとして、これに含まれる汚染油分の累積量を図-8 に示す。最終的に 2590 mL の油が回収された結果となっているが、実際に汚染土作成に使用したエンジンオイルは 2200 mL であった。この誤差は、油分量の分析のための乳化液に対するエマルジョンブレイク操作時に形成された、写真-20 の綿状の懸濁物に関係があると思われるが、これまでこの事象は起きなかったため、今回なぜこれが形成されたのか、どうすれば解決できるのか現時点ではわかっていない。

また、今回の実験後の地盤の解体から、奥行きわずか 5cm であるにもかかわらず、奥行き方向に浄化ムラが散見された。実際の地盤ではパネルに囲まれた室内土槽よりも流れ

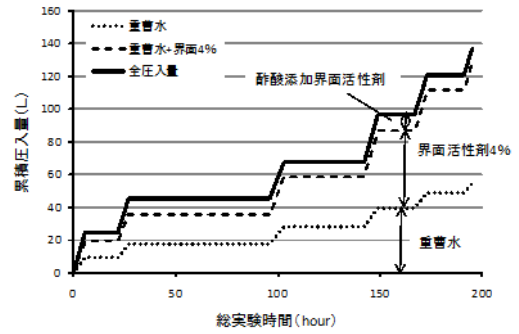


図-7 圧入液の時間と累積量の関係

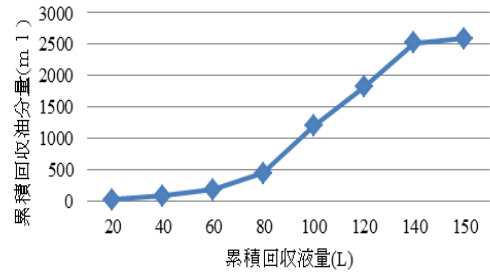


図-8 回収液中の汚染油分の累積量



写真-20 分析時に生成された懸濁物

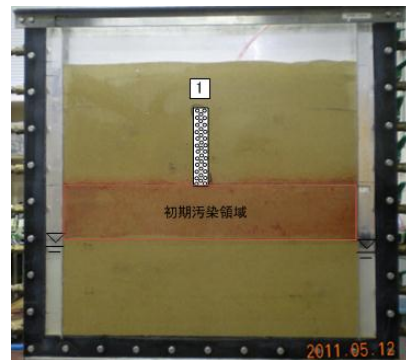


写真-21 浄化ムラ確認実験 1 初期状態

の境界条件が弱いので、さらにムラができやすくなると考えられ、この浄化ムラの発生状況を調べるべく以下の追加実験を行った。

写真-21 は浄化ムラ確認実験 1 の初期状態で、圧入孔 1 から界面活性剤 2% に一般家庭用洗剤 1% を添加したものを圧入し浄化実験を行った。写真-22 は浄化実験終了後の土槽内残留油の様子であり、観察面だけでなく、土槽中央付近にも多くの残留油が確認できる。

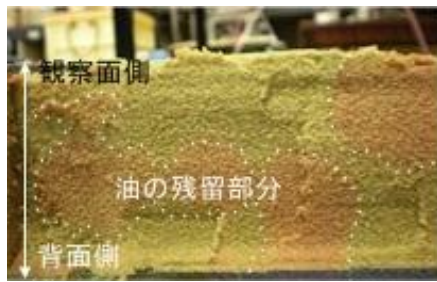


写真-22 確認実験1の土槽内残留油

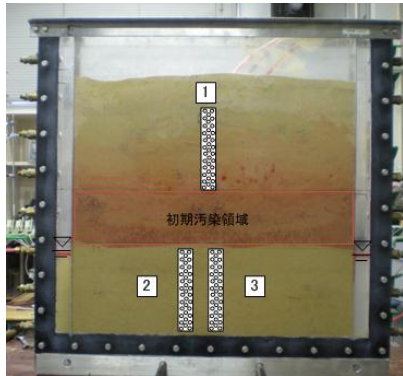


写真-23 浄化ムラ確認実験2・3 初期状態

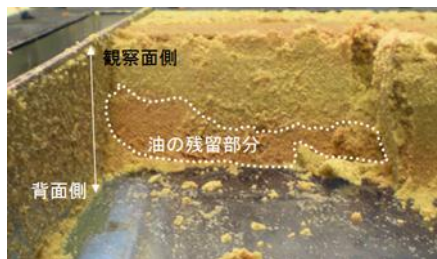


写真-24 確認実験2の土槽内残留油



写真-25 確認実験3の土槽内残留油

写真-23は浄化ムラ確認実験2・3の初期状態である。確認実験2は圧入孔1から界面活性剤3%を圧入し、圧入孔2からは酢酸添加界面活性剤を、圧入孔3からは重層添加界面活性剤を圧入した。確認実験3は、最初の1時間だけは圧入孔1～3の全ての圧入孔から界面活性剤3%を圧入し、1時間経過後には確認実験2と同様の圧入手順で浄化実験を行った。

写真-24は確認実験2の実験終了後の土槽内残留油の様子であり、観察面側は浄化されているが土槽中央部や背面には残留油が確認される。写真-25は確認実験3の実験終了後の土槽内残留油の様子であり、残留油が目視されず、土槽内部まで浄化されていることが確認できる。

以上のことから、単に浄化液を土槽内に圧入する場合は大きく浄化ムラを発生させているが、「間隙内二液反応発

泡」を用いる場合は浄化ムラの発生を低減していることがわかる。ただ、写真-24にもあるように、「間隙内二液反応発泡」を用いた場合でも浄化ムラを残す場合もあり、浄化ムラの解消には更に検討を重ねる必要があると考えられる。

3. まとめ

「間隙内二液反応発泡」を用いることで、これまで問題となっていた「濃縮三角州」を形成することなく汚染土壌の浄化が可能であるということが本研究よりわかった。高粘性の機械油が小間隙にトラップされている場合であっても、浄化効率を落とさずに汚染油の乳化を促進、浄化する「間隙内二液反応発泡」をこれからの本研究室の柱として、より発展させて行きたいと考える。

しかし、現行の問題として回収された汚染油の回収量の測定方法にも問題があることがわかっており、この問題を解消すべく新たな測定方法を模索する必要がある。また、「間隙内二液反応発泡」を用いる場合でも浄化ムラが発生するという問題を抱えており、これより先は、細かい視点で浄化技術の改善を目指していく必要があると考えられる。

それと並行して、本研究室は高粘性の機械油を主として汚染土壌の浄化に取り組んでいるが、今後、「間隙内二液反応発泡」で灯油等の機械油よりも粘性の低い油に対していかにすれば浄化ムラを低減しつつ浄化が可能か室内土槽実験を通じて検証していく予定である。

参考文献

- 1) 環境省水・大気環境局土壌環境課：改正土壌汚染対策法の概要と留意点，第16回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会・特別講演-1，資料p. 1，2010.
- 2) Stephanie Fiorenza et.al：NAPL Removal: Surfactants, Foams, and Microemulsions, Lewis Publishers, 2000.