

浸透発泡乳化法と毛管ウェルポイントによる大型土槽油汚染浄化実験

Purification experiment in oil polluted large soil tank with seepage /sparkle/emulsification method and wellpoint in capillary zone

佐野豊生¹, 窪田豪人², 林 雅人³, 棚橋秀行⁴

- 1 大同大学・工学部都市環境デザイン学科
- 2 大同大学・大学院工学研究科都市環境デザイン学専攻
- 3 大同大学・大学院工学研究科都市環境デザイン学専攻
- 4 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。揮発性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油に対してはあまり進んでいない。本研究では、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。油汚染ゾーンの下部より化学反応により発泡する重曹と酢酸を添加した界面活性剤を浸透させることにより乳化を促進する方法を提案した。これに加え下部から空気を圧入することにより、浄化液が油汚染ゾーン深くに浸透したのちに発泡するように工夫した。これらにより乳化した汚染油を、上部から別途界面活性剤を浸透させることによってできた流れに乗せて流動させ下流の適切なポイントで吸引・回収する実験を行った。

実験の結果、発泡により油の乳化が促進され、その回収に成功した。空気圧入により汚染ゾーンの下部に空気のエリアが広がり、地下水の揚水を抑えつつ、乳化液を効率よく吸引できる好ましい結果も得られた。

キーワード：油汚染地盤，浄化，非掘削，界面活性剤，浸透発泡乳化法

1. はじめに

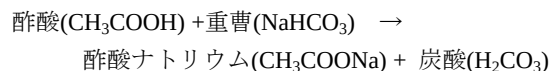
油による地盤汚染が問題となっている。このうちトリクロロエチレンなどの有機塩素化合物，あるいは燃料といった揮発性に富み粘性の小さな油に対する浄化は進んでいるが，機械油などの揮発性に乏しい高粘性油に対しての浄化技術開発はあまり進んでいない。多くの機械工場で用いられるこうした機械油の地盤汚染が今後問題になるといわれており，我が国の中小の事業所数から考えても，浄化需要は非常に大規模である。機械油は潤滑油として対象物に膜状に付着することを目的に作られているため，土粒子に対する付着性が高く，かつ揮発性にも乏しいため，非掘削で除去する有効な技術は現在までのところ確立されていない。そのため，機械油で汚染された地盤は，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くなるうえ，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

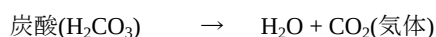
した，地盤に浸透した重曹・界面活性剤・酢酸水溶液の反応による発泡で機械油を乳化させる浄化技術「浸透発泡乳化法」に毛管上昇帯でのウェルポイント回収を組み合わせることで，機械油汚染地盤の効率のよい非掘削浄化技術の確立を目指すことである。

「浸透発泡乳化法」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「浸透発泡乳化法」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，CO₂を発生させることで界面活性剤を発泡させるのである。従来より，

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、泡状の界面活性剤は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⁾。「浸透発泡乳化法」は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 幅広薄型二次元土槽を用いた実験（1）

2.1.1 実験方法

実験装置は写真-1に示した幅 190cm、高さ 90cm、奥行き 5cmの幅広薄型二次元土槽を用いた。豊浦砂および初期汚染土（写真中の白点線で囲まれた領域）を土槽に写真-1の様に充填し、吸引孔と注入孔を埋設した。吸引孔上部をCMCで被覆し、空気の流入を防いだ。地下水位は破線の位置で一定に保つ様にした。吸引孔、注入孔共に 2 番・3 番を用い、その他のものは状況の推移に応じて使用することにした。注入孔 2 番・3 番からの浄化溶液の投与は酢酸添加界面活性剤 500ml、界面活性剤 500ml、重曹添加界面活性剤 500ml、界面活性剤 500mlの順に行った。

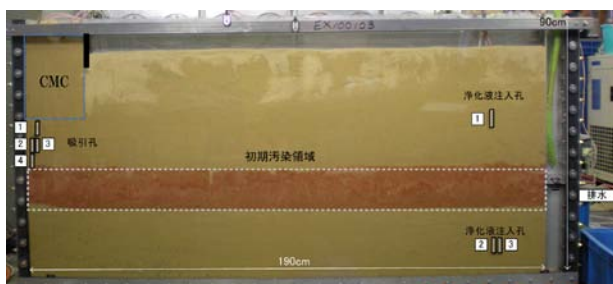


写真-1 幅広薄型二次元土槽を用いた実験 初期状態

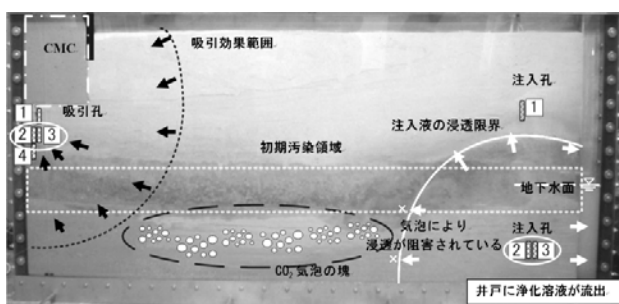


写真-2 幅広薄型二次元土槽を用いた実験
開始から 9 時間 30 分後

2.1.2 実験状況

写真-2 は、実験開始 9 時間 30 分後の様子である。写真に示した初期汚染領域と比較して、土槽の左端では吸引によって汚染油が吸引孔に向かって若干上昇している様子が分かる。土槽右端では、注入した浄化溶液の発泡によって乳化した油が、上方向に移動している様子が分かる。

しかし、土槽中央部の汚染油はあまり移動していない。右井戸に浄化溶液が流出しており、土槽中央下部の豊浦砂が乾燥していたことから、ここでCO₂の気泡が停滞して塊となり、後続の浄化溶液の流れを阻害していると考えられた。酢酸添加界面活性剤と重曹添加界面活性剤を投与する合間に界面活性剤を投与する事により注入孔近傍で反応を起こさない様に工夫したことで、実際に注入孔から離れた汚染領域の付近で反応を起こす事ができたのだが、吸引効果が黒点線部あたりまでしか及んでいない為、回収されない気泡が蓄積してしまったものと思われる。これ以上の進展が見られないと判断した為、この時点で実験を終了した。この実験から、CO₂の気泡塊上部に吸引孔を設置し、それを用いてCO₂の気泡塊を吸引回収する事ができれば、浸透阻害を取り除くと共に油汚染部位をCO₂の気泡が通過することで乳化が促進され浄化が進行するのではないかと考えられたため、次のような実験を行うことにした。

2.2 薄型二次元土槽を用いた実験（1）

2.2.1 実験方法

実験には前出の薄型二次元土槽(内寸幅 60cm、高さ 60cm、奥行き 5cm)を用いた。充填土試料と汚染土も同様のものを用いた。写真-3の白線に示すように汚染ゾーンを設けた。

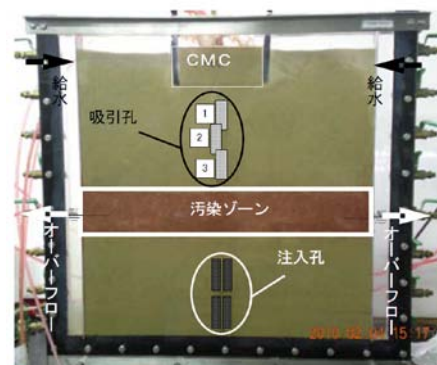


写真-3 薄型二次元土槽を用いた実験の初期状態

汚染ゾーンの中央下部に圧入孔を上下二対合計 4 つ、上部に吸引孔を 3 つ埋設した。吸引孔は目詰まり時のバックアップとして複数埋設したもので、平常時は 2 番を用いて吸引することにした。また、吸引孔の上部にはゴム板を用いて仕切りを設け、CMCを混合した充填を施し、被覆効果を持たせた。

土槽の両側に井戸を設け、井戸上部より水を給水しつつ、下から四段目のバルブを開放しオーバーフローさせ水位を固定した。4 つの注入孔のうち下部の 2 つから空気を供給し、空気の流路によって井戸からの地下水の流入を遮断し余剰な吸引を抑制するとともに、逆に井戸へ浄化液が流れ出す事を防ぐバリア効果を期待した。注入孔の上部の 2 つからは重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤を投与する。このとき発生した気泡を空気が押し上げることによる浄化効率の向上も期待して実験を行った。

2.2.2 実験状況

写真-4 は実験開始 2 時間後の様子である。圧入孔から吸引孔まで一直線に浄化されていることが目視できる。また、下部の圧入孔より空気層が形成されて、地下水の吸い上げを抑制することに成功している。さらに空気による押し上げ効果と吸引により、問題であった気泡の停滞が抑えられ、順調に浄化が進んでいる。

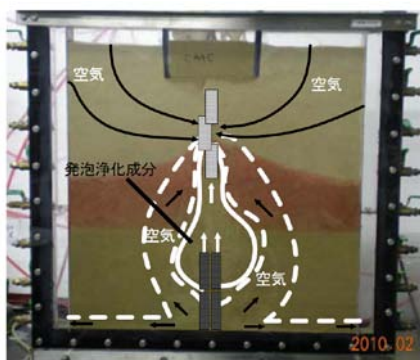


写真-4 実験開始 2 時間後

写真-5 は実験開始 4 時間後の様子である。中央の初期汚染ゾーンの浄化がほぼ完了している。また、実験前の予想では圧入孔から吸引孔へ一直線上の狭い範囲しか浄化できないのではないかと考えていたが予想よりも広範囲で浄化されている。写真-8 を見てもわかるように、吸引孔と圧入孔から離れた部分の汚染もまだらになっており乳化が進んでいることが見てとれる。井戸に近い部分にも乳化が広がり全面的に浄化が進行するのではないかと期待し観察を継続した。

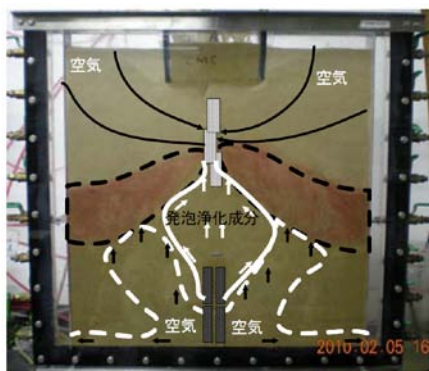


写真-5 実験開始 4 時間後

実験開始から 10 時間後（写真なし）、全面的に乳化が進み初期汚染ゾーンの浄化がほぼ完了したが、予想よりも浄化液が広範囲に拡散してしまい井戸に浄化液が流れ出てしまった。また、乳化液が毛管上昇してしまい、吸引圧の掛からない部分に移動し油が残留してしまった。この後、数時間継続したが大きな変化が見られなかったため実験を終了した。

2.3 薄型二次元土槽を用いた実験（2）

2.3.1 実験方法

写真 6 のように薄型二次元土槽(縦 80cm×横 72cm×奥行き 5cm)を用い、充填試料と汚染土も同様のものを用いた。写真 6 の白い点線が初期の汚染土の位置である。1, 2 から重層と酢酸を発泡させて上部から水を散布し、3 から吸引を行った。

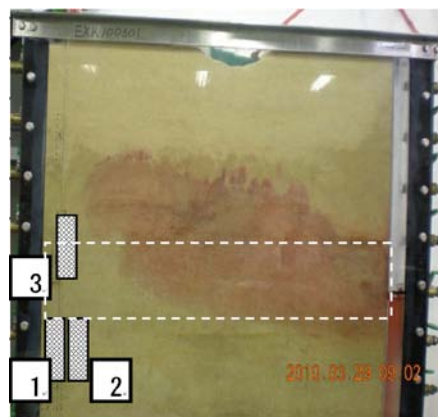


写真-6 発泡を用いた浄化実験

2.3.2 実験状況

1, 2 から重層と酢酸を圧入し発泡させたところ、写真-6 のように順調に乳化していったので、3 から吸引を行ったが吸引孔の回りしか浄化できず大半が残ってしまった。なぜこのようになったか考察したところ、発泡の流れと吸引の流れが反対だからではないかと考えられた。発泡と吸引の流れを同じ方向にすればより効率よく浄化できるのではないかと考え、発泡し乳化した先に吸引口の設置位置を変更したのが写真-7 である。

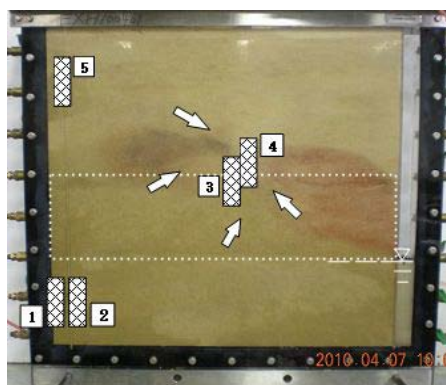


写真-7 発泡と界面活性剤を用いた浄化実験

写真-7 のように吸引孔の位置を変えたことにより、効率よく浄化が進行するようになった。ただし油の浄化が進むと徐々に地下水を吸引するようになり、あまり右のほうに吸引口を設置してしまうとさらに地下水ばかりを吸うことも確認できた。写真-7 で行った実験を終了したのち、土槽を解体して土試料を 9 つのブロックに分けてノルマルヘキサン抽出による残留油分の分析を行った。結果的

に数値としては 9 つ全てのブロックで残留油分質量比は 1%未満であったが、局部的に汚染土が見つかったところがあり、この部分はやはり周りより残留油分質量比は高かった。

2.3.3 追加実験

追加実験として、発泡をより深く浸透させるため重曹と酢酸を圧入する下から空気を圧入し、より深くまで届くように試みたのが写真-8 の実験である。

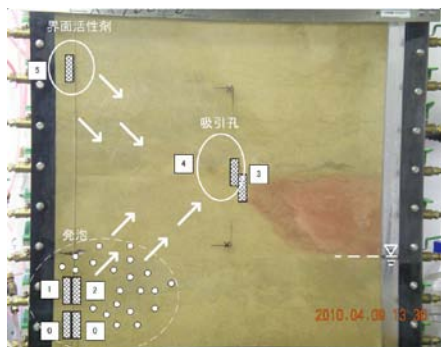


写真-8 浸透発泡乳化法を用いた浄化実験

重曹と酢酸を圧入する下から空気を圧入したことで、これに押し上げられた発泡界面活性剤の油汚染部分への浸透が促された。さらに地下水に空気が溜ったことで界面活性剤が下流の地下水に無駄に流出しにくくなった。空気を圧入したことで吸引孔から過剰に揚水してしまう地下水量も減らせた。

目視で土の中に汚染油が見受けられなくなったのち、ノルマルヘキサン分析を行ったところ、9 つのすべてのブロックが 1%未満であった。

2.4 幅広薄型二次元土槽を用いた実験 (2)

2.4.1 実験方法

2.3 の追加実験において良い成果が得られた写真-8 のような配置で幅広薄型二次元土槽を用いて実験を行うことにした。今回の実験では写真-9 の初期状態のような位置関係で吸引孔と圧入孔を埋設した。

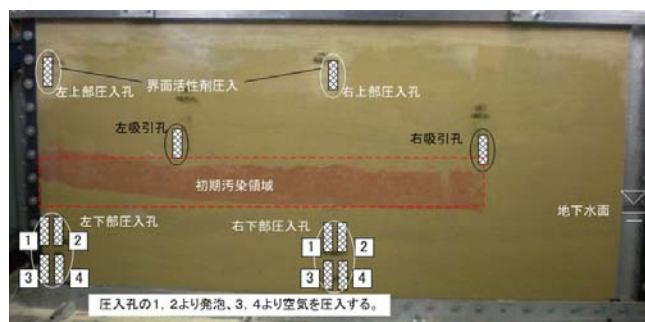


写真-9 幅広薄型二次元土槽を用いた実験の初期状態

この配置により、汚染油は下からの発泡と上からそれを抑える液体状の界面活性剤の降下により挟み撃ちになり

両サイドへと追いやられ、これを待ち構えるように側方にオフセットした吸引孔で回収する、という図-1 のような挙動を想定した。

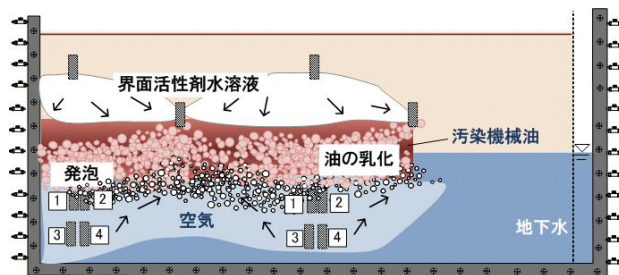


図-1 挙動予想図

写真-9 の初期状態において右吸引孔より右側に初期汚染土が充填されていないのは、右吸引孔でキャッチできずに流れて行ってしまう油がどの程度かを観察するためである。注入・吸引は左右で独立しており進行や状況によって片方ずつ制御できるようになっている。

界面活性剤には、ペレソフト 205 を 3%に希釈した水溶液を用いた。左右の上部圧入孔からは界面活性剤、左右の下部圧入孔の 1 からは重曹添加界面活性剤、2 からは酢酸添加界面活性剤を圧入し発泡をさせ 3・4 からは空気を圧入する。この操作で汚染油が乳化するにはある程度の時間を要することから、上部からの界面活性剤の圧入と吸引の操作は、汚染油がある程度乳化しているのが確認できた際にのみ行うことにした。

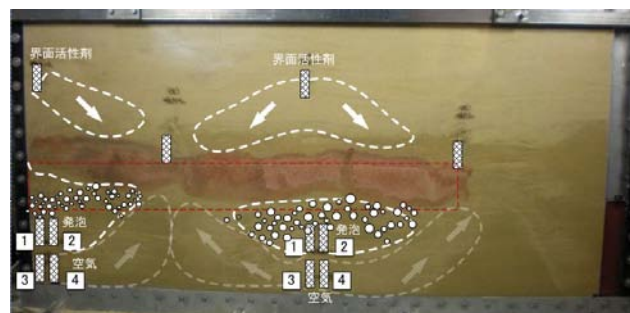


写真-10 実験開始から 6 時間後

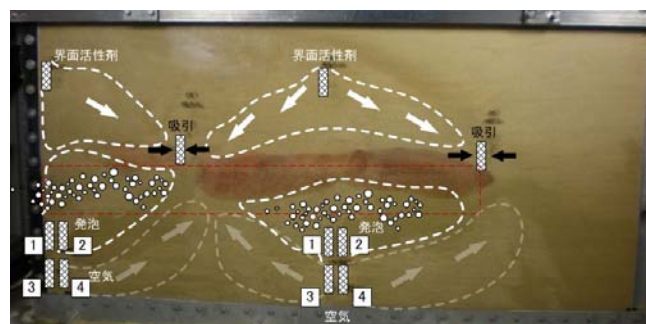


写真-11 実験開始から 10 時間後

2.4.2 実験状況

写真-10 が実験開始から 6 時間後の写真である。下部圧入孔 1・2 の上の汚染油が左右とも押し上げられているのが目視できる。写真-11 は 10 時間後の写真である。右側に比べ左側は壁になっているので明らかに浄化が先行しており、上下の圧入孔の間に存在した汚染油が浄化されたことにより、汚染ゾーンの側方からも乳化していくことができ浄化のスピードアップが期待される。

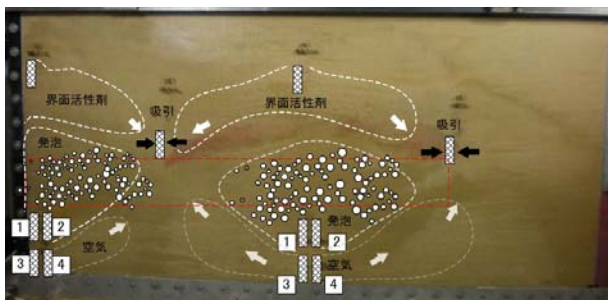


写真-12 実験開始から 16 時間後

写真-12 は 16 時間後の写真である。初期油汚染部分の左のほうは目視できないくらいまで浄化できている。ここで左の圧入孔からはこれ以上界面活性剤を圧入する必要はないと判断し、すすぎのための水に切り替えた。右側は左に比べると浄化は遅れているが、上下圧入孔の線上に存在した汚染油が浄化されたことにより左側同様に浄化のスピードアップが期待できる。

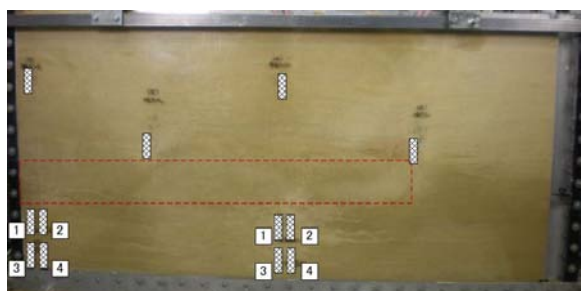


写真-13 実験開始から 24 時間後

写真-13 は 24 時間後の写真である。全体的に汚染はほぼ目視できない程度にまで浄化されたため、ここで実験を終了した。その後、写真-14 に示すように 27 ブロックに分けてサンプルを取り出し、ノルマルヘキサン抽出法で残留油分質量比（乾燥土の質量を 100% としたときの残留油分質量のパーセント）を測定した。

0.04	0.09	0.08	0.11	0.10	0.15	0.38	0.55	0.49
0.04	0.07	0.23	0.17	0.16	0.26	0.59	1.05	0.06
0.11	0.07	0.00	0.18	0.17	0.17	0.14	0.11	0.05

写真-14 分析結果（残留油分質量比%）

その結果、右吸引孔の左側の 1 つのブロック以外はすべて 1 パーセント以下になっていることがわかった。右吸引孔の周りは左に比べると若干高い数値となっているが、これは左のほうの浄化が先行していたためであり、あと数時間実験を継続してから分析を行っていたら差はさほどではなかったと考えられ、おおよそ今回の実験の浄化方法・配置は成功であったといえる。

2.5 幅広薄型二次元土槽を用いた実験（3）

2.5.1 実験方法

前節の実験 2.4 では好ましい結果が得られたが、実際の地盤に応用するには埋設ピッチが約 50cm では狭すぎることが懸念された。一方、装置の全幅（190cm）について浄化を試みた以前の実験 2.1 において写真-2 のようになってしまったのは、確かに CO₂ の気泡が停滞して後続の浄化溶液の流れを阻害した面もあるが、それよりも圧入孔のすぐそばに井戸があったためにここに流出してしまい正確に実験が行えていなかったのではないかと、という省察もある。そこで、埋設物の配置を見直し、あらためてどこまでの水平距離の汚染油を浄化できるのかを検証する実験を行うことを考えた。図-2 の(a)(b)に今回の幅広薄型二次元土槽を用いた実験（3）において期待する挙動をイラストで示した。

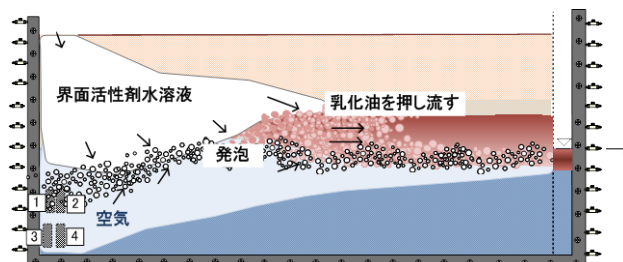


図-2(a) 挙動予想 下からの発泡と空気の圧入より油を乳化

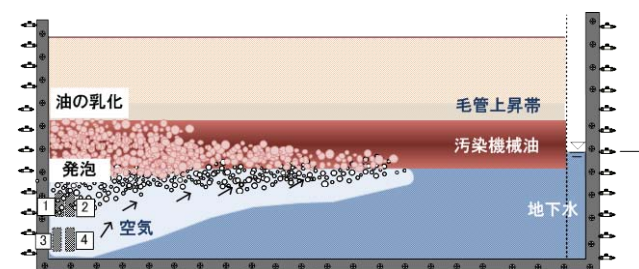


図-2(b) 挙動予想 上から界面活性剤で乳化油を押し流す

今回は左端に圧入孔を集め、圧入孔の 1 からは重曹添加界面活性剤、2 からは酢酸添加界面活性剤を圧入して発泡させ、3・4 からは空気を圧入する。この実験では、発泡と空気圧入のみの圧入孔からどこまで遠くまでの油を乳化できるかを見たいので、吸引は行わないこととした。図-2 の(a)のように地下水面へと空気が浮上する力によって発泡した界面活性剤が汚染油下面に押しつけられ、油を乳化させながら右の井戸のほうへと移動していく挙動を期待する。これがどの範囲まで到達できるのかを観察する。

その後、タイムラグを置いて図-2 の(b)のように土槽左端の地表面から界面活性剤水溶液（重曹・酢酸無添加）を投与することによって、乳化油を効率よく井戸まで押し流してゆくことができるのではないかと考えた。

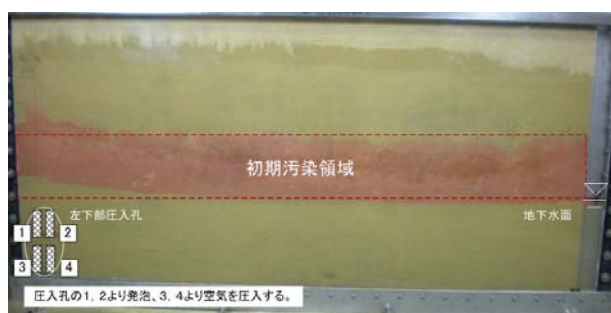


写真-15 幅広薄型二次元土槽を用いた実験（3）初期状態

実験土試料はこれまでと同様に豊浦砂を使用し、エンジンオイルをズダン IV で赤く着色し土試料に混ぜた汚染土を写真-15 のように充填して初期汚染領域を作成した。実験の後半で上部から投与する界面活性剤水溶液はペレソフト 205 を3%に希釈した水溶液とした。左下部圧入孔の1 からはこの界面活性剤水溶液に重曹を添加したもの、2 からは酢酸を添加したものを圧入して発泡をさせ、圧入孔3・4 からは空気を圧入した。

2.5.2 実験状況

写真-16 は実験開始から6 時間後の写真である。空気と発泡で乳化が進行し、圧入孔付近の汚染油が激しく押し上げられているのが確認できる。

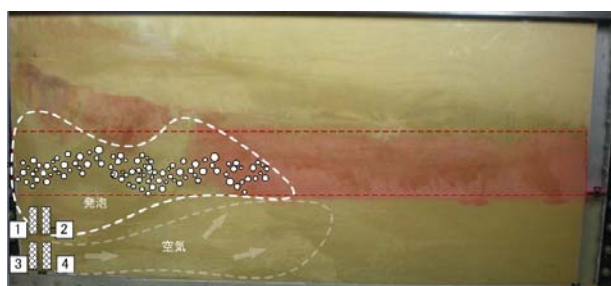


写真-16 実験開始から6 時間後

予想では図-2 の(a)のように発泡した界面活性剤が右の方向に流れていくと考えていたが、上に流れていく成分のほうが多く見られた。発泡だけでも上に流れるがさらに空気まで圧入しているので上に流れやすくなっている。空気は地下水面下に領域を広げつつあり、これを乗り越えるかたちで発泡した界面活性剤がちょうど油汚染ゾーンを通過しつつ右へ移動してゆくことが期待される。気になったのは汚染ゾーンの中央やや左で油の汚染が分断されるように浄化されつつあることであつた。この浄化ルートから左側の汚染域はこのあと流れの無い領域となり浄化されにくくなってしまわないかという懸念も浮かんだが、実験を継続した。

写真-17 は実験開始から13 時間後の写真である。先ほどの写真-16 でいったん浄化されたルートに乳化したエンジンオイルが流れ込み結局これを塞いでしまった。左上部にせり上がっていた乳化油が全体的に右へと移動したためにいったん浄化できたところに流れ込んだことが観察された。

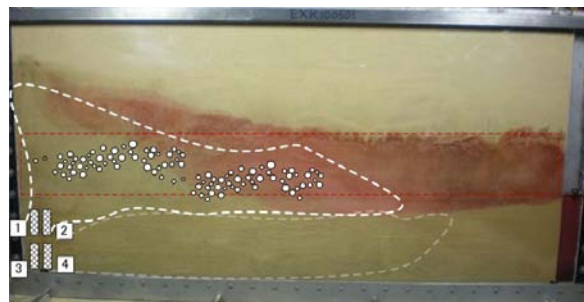


写真-17 実験開始から13 時間後

同じように上昇してきた発泡界面活性剤もこの乳化液の流れに飲まれる形でともに右下へと進む流れが形成されつつある。その流れの下には写真-17 よりも右のほうまで空気による低透水性の領域が待ちかまえるように展開されてきており、これによって下方への浸透を阻まれることで行き場をなくした乳化油が右のほうへと徐々に移動してゆく、という図-2 の(a)のような状況になりつつある。しかし、この数時間後から圧入した空気と発泡界面活性剤に押し上げられすぎて、徐々に地表面にエンジンオイルがにじみ出てきてしまった。これは想定していなかったシナリオであつたが、当初の計画で後半行うことにしていた界面活性剤水溶液を投与する工程へと移ったところ、さらに予想していなかった問題が生じた。その様子が実験開始から21 時間後の写真-18 である。

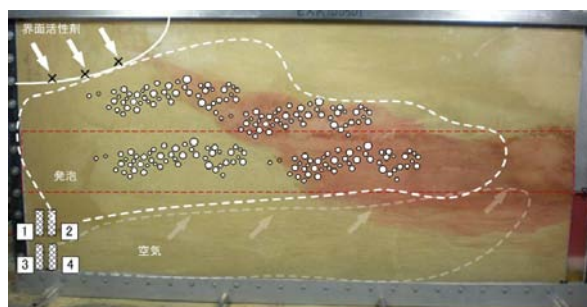


写真-18 実験開始から21 時間後

地下水面上の不飽和帯に界面活性剤の気泡が存在する領域が広がったため、これに阻害されて地表面から投与した界面活性剤がほとんど浸透して行かない状況になり、計画した実験が進行できなくなりました。こののち、下方からの発泡と空気の圧入を停止して様子を見たが封入された界面活性剤の気泡と置換して上方投与の界面活性剤水溶液が浸透し始める気配が見られなかったため実験を終了した。

2.6 幅広薄型二次元土槽を用いた実験 (4)

2.6.1 実験方法

前回の実験は浄化としては失敗であったが、吸引・界面活性剤水溶液の上方投与がない状態で、下方からの浸透発泡と空気の圧入だけを継続した場合には不飽和帯に界面活性剤の気泡が大量に封入されその後の浄化工程が困難になるという有益な知見が得られた。このことから、浸透発泡乳化法を成功させるには、上方からの界面活性剤の投与を先行させ、汚染油上部に界面活性剤の流れ領域を形成させた後に下方からの浸透発泡を行う手順とすべきことがわかった。一方、前回の実験状況を観察する中で、浸透発泡を行わず下部からの空気の圧入だけではどうなるのか、という興味が生れてきた。もし、空気の地下水面へと浮上しようとする力で界面活性剤および乳化した油を側方移動させることができるのであれば、前回の実験で問題になった、不飽和帯に界面活性剤の気泡が大量に封入されてしまうというリスクがなくなる。

そこで、一度浸透発泡乳化法から離れ、重曹・酢酸による発泡は行わず界面活性剤と空気のみで実験を行った。実験装置、実験試料そして界面活性剤も前回と同じペレスフト 205(ミヨシ油脂製)を 3%に希釈したものを使用し写真-19 のように充填を行った。

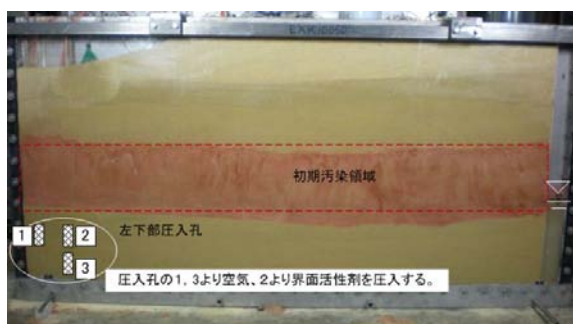


写真-19 幅広薄型二次元土槽を用いた実験 (4) 初期状態

今回は先に左上部から界面活性剤を散布したのちに左下部圧入孔 2 から界面活性剤を、圧入孔 1, 3 から空気の圧入を行う。図-3(a)のように先に左上部より界面活性剤を先行して散布することで、前回問題になった地表面に汚染油がにじみ出るのを防止するとともに、先に毛管上昇帯に界面活性剤の浸透流を形成することで後で空気の気泡が浮上してもこれを抑えて透水性が低下しないようにすることができないかと考えた。

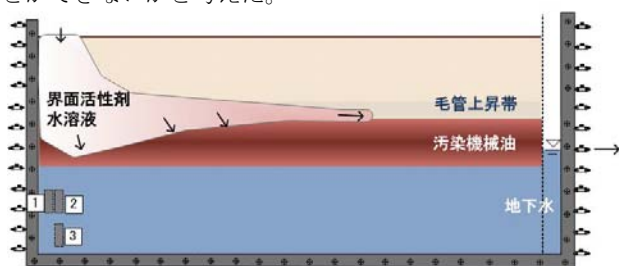


図-3 (a) 挙動予想 上から界面活性剤を先行散布

図-3(a)で示すように先に上部から界面活性剤を散布した後、タイムラグを置いて図-3(b)のように下部から界面活性剤と空気を圧入する。圧入された界面活性剤は、空気の浮力により汚染油の下面に常に押しつけられ、油の下面を乳化させながら側方に流れ、地下水面付近にある汚染ゾーンを浄化していくものと予想した。

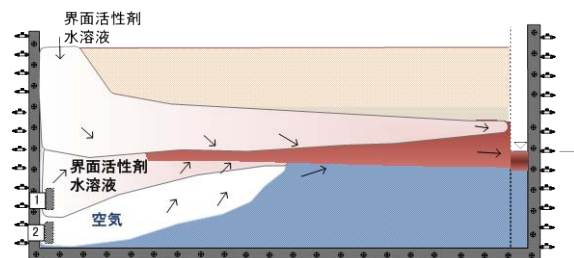


図-3 (b) 下からの空気と界面活性剤の圧入による挙動予想

2.6.2 実験状況

写真-20 は実験開始から 14 時間後で、すでに「挟み撃ち」の状況になりつつある。上部から散布した界面活性剤により汚染ゾーンが左上部から少しずつ乳化してきていると同時に、下部から圧入された界面活性剤が空気の浮力により汚染油の下面に常に押しつけられ、油の下面を乳化させながら側方に流れ、地下水面付近にある汚染ゾーンを浄化していくものと予想した図-3(b)のようになりつつある。

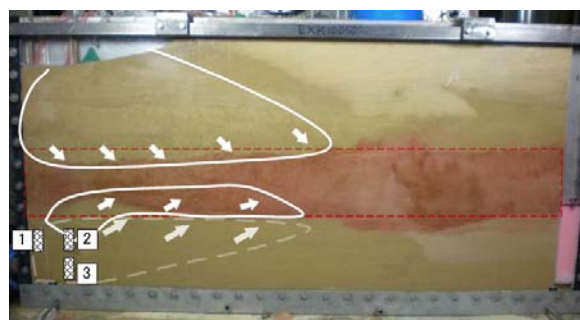


写真-20 実験開始から 14 時間後

写真-21 は実験開始から 30 時間後の様子である。写真からわかるように、下部の圧入孔のすぐ上が顕著に浄化されている。空気の領域が地下水の上部に広がり始め、下部から圧入した界面活性剤がこれに乗り上げた格好で広域に広がり、効率よく汚染油を乳化し続けている様子が観察される。

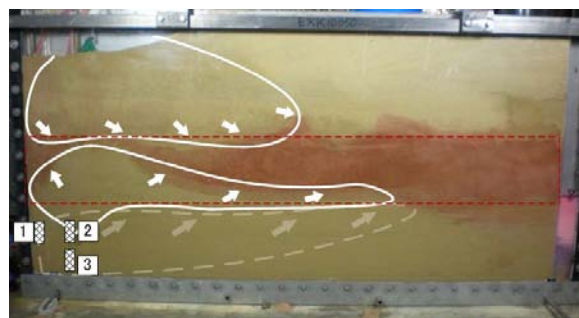


写真-21 実験開始から 30 時間後

もう数時間もすれば圧入孔の上部が完全浄化され、油汚染領域が寸断されて側方からの界面活性剤の浸透が始まると思われる。今までに行った他の実験の観察から、この側方からの界面活性剤の浸透が始まると浄化のスピードが上がる傾向が強い。圧入孔1の左上部にまだ汚染油が若干残っているが、これも時間とともに浄化されて行くのではないかと予想し観察を継続した。

写真-22は実験開始から47時間後の様子である。前節の実験では下からの圧入だけだったために汚染油をめぐりあげたような状況になり、初期に汚染されていない部分の土に汚染油を移動させてしまい、浄化しているのか汚染しているのか分からなかったが、今回は初期の油汚染領域からあまり汚染油を広げずに浄化が進行している。写真-21で残っていた左の汚染油もかなり浄化されており、圧入孔付近の浄化がほぼ完了しつつあるので、徐々に土槽の右半分の浄化が進行するのを期待し観察を継続した。

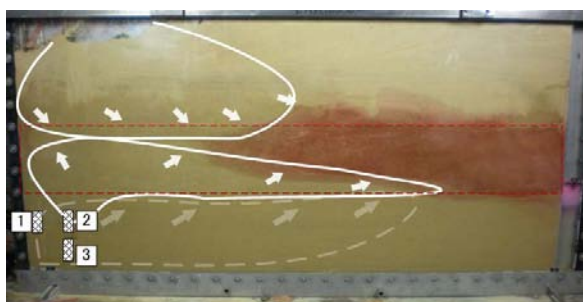


写真-22 実験開始から47時間後

写真-23は実験開始から67時間後の様子である。写真-21に比べるとかなり浄化が進んでいるが、写真-22に比べると汚染されていない上部の土に影響が出ている。上部から散布している界面活性剤がおそらくここに届いておらず、下部から圧入している界面活性剤が汚染油を上へ押し流しているのではないかと考えられる。



写真-23 実験開始から67時間後

写真-24は実験開始から87時間後の様子である。初期汚染領域の下の方はかなり浄化が進んでいるが、上の方は浄化の進行が遅い。汚染油が汚染されていない土に移動し乳化油が滞りつつある程度は写真-23のときよりあまり変化が見られず、このまま浄化が進行することが望ましい。

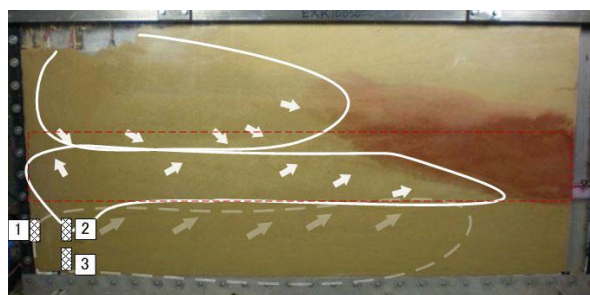


写真-24 実験開始から87時間後

この実験は現在も進行中であるが、今までの経過を見ると「挟み撃ち」の状況が安定して継続しており、挙動予想図に近い方向に進んでいるといえる。ここまで、界面活性剤と空気圧入のみで挙動を観察したが、本来本研究では毛管上昇帯にウェルポイントを埋設することを考えていたので、土槽右端の毛管上昇帯にウェルポイントを埋設して吸引をかけることで、ここに若干滞りつつある乳化された油が効率よく回収でき、浄化が終了できるものとする。

3. まとめ

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「浸透発泡乳化法」に毛管上昇帯でのウェルポイント回収を組み合わせることで、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った。

実験の結果、油汚染部位の下部から発泡を行って乳化を促進し、上部からの界面活性剤水溶液でこれを押し流すのが成功パターンの一つであることがわかった。ただし、下方からの浸透発泡と空気の圧入だけを継続した場合には不飽和帯に界面活性剤の気泡が大量に封入されその後の浄化工程が困難になるという知見が得られた。そこで、上方からの界面活性剤の投与を先行させ、少し遅れて汚染油の下方からの界面活性剤（発泡せず）の圧入とさらにそれを押し上げる空気の圧入を行う実験を行ったところ、浸透発泡乳化法よりも「挟み撃ち」の状態が安定して継続することがわかった。現在進行中の実験では若干乳化油が滞る部分が形成されつつあるが、今後は毛管上昇帯のウェルポイントによるその回収実験を行い、その結果を浸透発泡乳化法と比較検討してさらなる効率のよい非掘削浄化技術を開発したいと考えている。

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.