

〈一般研究課題〉 リサイクル植物性油を利用した機械油で汚染された
地盤の浄化技術の開発

助成研究者 大同大学 棚橋 秀行



リサイクル植物性油を利用した機械油で汚染された 地盤の浄化技術の開発

棚橋 秀行
(大同大学)

The Study on the Development of the Purification Method for Machine Oil Polluted Ground using Recycled Vegetable Oil

Hideyuki Tanahashi
(Daido University)

Abstract

Effective purification method without excavation for the ground polluted by lubricant like sticky and low volatile machine oil is not established yet. Conventional pumping is not effective because groundwater flows under pollutant oil and oil is not removed. In this study, new method that pushing pollutant machine oil away by the vegetable oil within the horizontal continuous oil phase flow was thought. Advantages of vegetable oil are (1) safe for human body and (2) degradable with microbe after the purification process. From the small soil tank experiments, fruitful result was found. But in the large soil tank experiments, vegetable oil's flow was hard to control.

1. はじめに

国内各地で地盤・地下水の汚染が社会的問題となっている。環境問題への関心が高まる中、市民感覚では地中に汚染物質を廃棄する、または漏洩によって浸透させる行為は許されるものではなく、こうした汚染は発覚され次第、汚染行為者にすみやかに除去させることを義務付けるのが当然であるという意識を持っている。これに対し、2003年2月15日に施行された土壤汚染対策法では、敷地面積300m²規模以上の工場・事業所および特定施設¹⁾が土地の使用用途を変更する際、あるいはそ

の土地の汚染より付近住民の健康被害のおそれがあるとき、と規制対象が限られている²⁾。付近住民の健康被害のおそれがあるときは当然として、一般市民の感覚では、事業者に対して土地の転売までの間の汚染の放置を認めている感がある。さらに、操業し続けている限りは調査・対策をしないでよいのか、と素朴な疑問が湧くであろう。しかし実際には操業中の事業所においても汚染地盤の浄化対策工事を行いたいと考える事業者側の需要は大きく、現実には経営が安定し工場を閉鎖する可能性が低いような、一般的に有名企業といわれる企業ほど10億円前後の土壌・地下水汚染に関する調査・対策費を年度単位で支出している³⁾。これには、まず企業イメージの低下を避けたいという心情がある。さらに、土地を転売せざるを得ない段階になってからはじめて調査を行い、ここで汚染が見つかった場合には、この浄化に要する年月の間に土地の値段が大幅に下落してしまうおそれがあり、これを防止したいという考えがある⁴⁾。こういった背景から、汚染された事業所の地盤を操業中に非掘削で浄化する技術は重要になってきている。

汚染物質が油であった場合、特に粘性の高いLNAPLでいったん汚染された土壌は非掘削で浄化することが非常に困難になる⁵⁾。また、水に溶けないことから濃度規制がなじまないこと、また石油製品の中でもっとも単純といわれるガソリンでさえ主要成分が300を超える⁶⁾などのことからその規制基準も長い間明確にされてこなかった。このような背景の中2006年3月に油汚染対策ガイドライン⁷⁾が制定された。これまで水質汚濁防止法による排水基準(生活環境項目)では、ノルマルヘキサン抽出物質含有量のうち鉱油類含有量は許容限度5mg/lと定められていた⁸⁾。これに対しガイドラインのポイントは地盤・土壌汚染としての規制基準を、あえて数値化せず人が感じる「油膜・油臭」とした点である。油汚染問題が生じた場合の対策として、ガイドラインでは一般の工場・事業所では舗装などで地表の油臭を遮断し、井戸水等に油臭や油膜を発生させている部分の拡散防止をするのが基本であるとしている。こうした封じ込めは技術的に可能であるとしても、現実問題として油臭が漂い舗装しない裸地の状態で利用することが不可能であるような土地に魅力を持つ買い手がいるとは考えにくく、操業中に非掘削で浄化に着手しておく意義は大きい。非掘削の浄化法にはいろいろなものがあり、それらの多くは燃料油に対しては効果的である。一方、工場の製造過程において大量に使用される機械油などの潤滑油は、粘性が高く揮発性に乏しいため地下へ浸透した場合、非掘削での浄化が困難である。ガイドラインには機械油などの潤滑油の有効な対策例は提示されておらず、土粒子への吸着性が高く揮発性が低い油による汚染地盤を原位置・非掘削において浄化する技術は確立されているとはいえない。こうした油による土壌汚染は潜在的にかなりの数に上ると予想されるとともに、今後浄化技術の必要性が高まると推測される。本研究は潤滑油のひとつである、機械油で汚染された地盤の非掘削浄化技術開発のための室内実験を行うものである。

2. 研究の目的

2.1 従来の研究の問題点

これまで、著者は界面活性剤水溶液によって地盤内の機械油を乳化させて水溶性物質に変え、地下水とともにくみ上げる技術についての室内実験を行ってきた。この技術自体は従来から存在するものであるが、重曹と酢酸を混合して発泡を起こすことで油分の乳化を促進するなどの付帯技術を考案してきた⁹⁾。この乳化反応は、ビーカーでの攪拌土壌洗浄、カラムでの一次元鉛直流れ場での通液土壌洗浄では非常に効果的である。

しかし、流れ場に水平成分が多くなる土槽実験では透過性の小さい土中の機械油汚染部分を避けて界面活性剤水溶液が流れることになり、期待した浄化性能を発揮できないことがわかってきた。たとえば、図-2.1のように揚水を行っただけでは機械油の下部を地下水が流れるばかりで効果がない。機械油が高粘性であるために動きにくい、ということに加えて水・あるいは水溶性物質と油では流体としての相（フェーズ）が異なるために、水平方向の流れ場では油相へのアプローチが困難になるという基本的な現象が問題点として認識された。

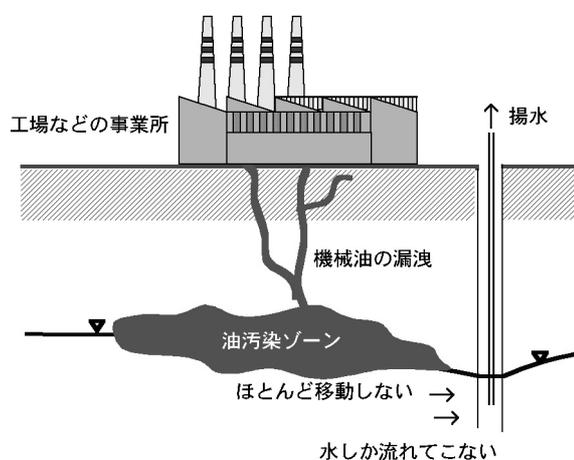
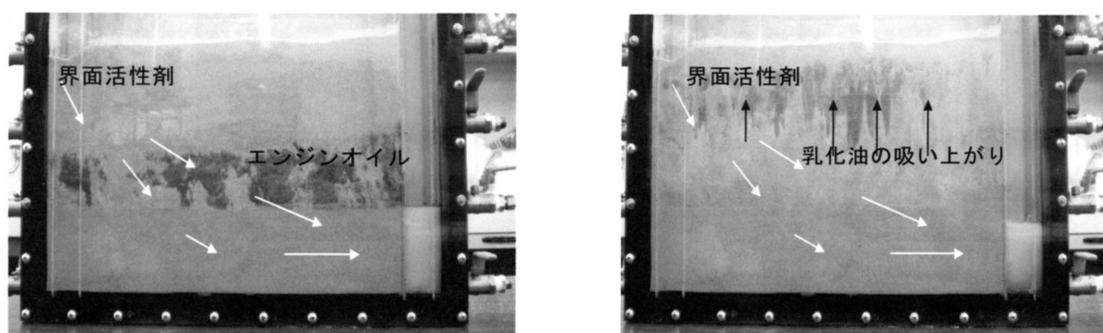


図-2.1 揚水による浄化法

また、これまでに行った界面活性剤を用いた非掘削浄化実験からは、機械油を非掘削で乳化できたものの毛管上昇帯への吸い上がりという問題点が残された。この毛管上昇帯への吸い上がりについて、写真-2.1の実験で説明する。



(a) 3時間後

(b) 2日後

写真-2.1 乳化した汚染油の毛管上昇帯への吸い上がり

小型卓上2次元土槽に、中央部分をエンジンオイルで汚染されたゾーンをもつ豊浦砂の模擬地盤を作成した。左上方より生分解性の界面活性剤に重曹を添加した水溶液を投与し、右に設けた井戸から流出させることにより、エンジンオイルがどのように変化するかを観察した。写真-2.1(a)は3時間後の様子で、界面活性剤が通過した部分のエンジンオイルが乳化し井戸へと流れているが、2日後の写真-2.1(b)になると界面活性剤との長時間の接触によって乳化されたエンジンオイルが毛管上昇帯への吸い上がりを起こしている。この現象は、実地盤で界面活性剤注入ポイントから回収位置まで乳化状態の油を移動させる際に、問題となることが懸念される。

2.2 本研究の目的

本研究では、この問題の解決策として、水・あるいは水溶性物質を流動させて副次的に油を動かす発想を切り替え、直接油相を流動させることができないかと考えた。図-2.2に示したように、機械油に溶解し、一つの油相となるような油を地中に注入し、回収ポイントまで油相の連続した流れを形成すればよいのではないかと発想した。

ただしこの方法では、汚染油が回収された後にこれに置換した形で新たに注入した油が残留する。このことから、人体に無害な油が望ましいと考え、サラダ油・てんぷら油・ごま油などの植物性の食用油をエンジンオイル・コンプレッサーオイルなどの鉱物性の機械油と混合させる実験を行ったところ、きわめてよく溶けあい、時間がたっても分離しないことが見出された。

さらに植物油が機械油を図-2.2のように流せるのかを、写真-2.2のような簡単な予備実験で確認

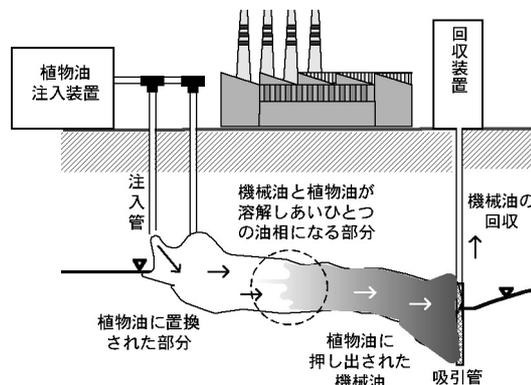
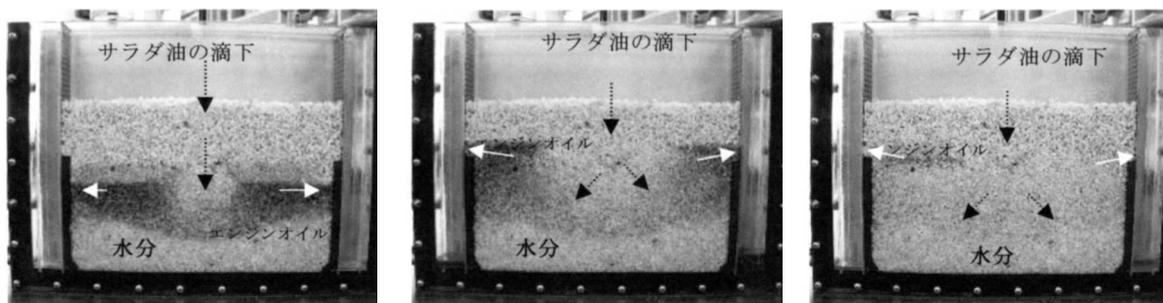


図-2.2 植物油を用いた浄化法アイデア

した。写真-2.2(a)における赤い部分は自動車用エンジンオイルを油溶性のズダンⅣによって赤く着色したものであり、その下は地下水である。充填土試料は粒径5mm前後の白色の砂利である。写真-2.2 (a)において中央部分に丸く色の薄い部分があるが、ここは植物油としてサラダ油を滴下し続けている場所であり、写真-2.2(a)は50分後の様子である。その後10分で大きく中心部分が拡大し、滴下1時間後の写真-2.2(b)ではエンジンオイルが中心部分から排除されている。このとき、両サイドの模擬回収井戸の上部スリット部分から井戸にエンジンオイルが流入している様子も観察できる。さらに1時間が経過した滴下2時間後の写真-2.2(c)ではエンジンオイルが土槽からほとんど押し出されていることが確認できた。この新たな技術について、後述する室内実験を行い、得られた結果よりその応用性についての検討を行うことが本研究の目的である。



(a) サラダ油滴下50分後

(b) 1時間後

(c) 2時間後

写真-2.2 植物油を用いた機械油の浄化予備実験 (小型卓上土槽)

3. 植物油を地表面から重力浸透させる実験の観察 (2次元土槽)

図-3.1のように、2次元土槽実験装置の両サイドのように井戸を設けた。充填試料には豊浦砂と砂利 (粒径数ミリ~1cm) の混合土を使用し、高さ65cmまでおよそ乾燥充填密度 $\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$ となるように充填した。充填の途中に土槽中央付近に赤く着色したエンジンオイル (約2リットル) を散布し汚染部分を図-3.1のように作成した。リサイクル天ぷら油を重力浸透させるため、土槽左側上部に下部に穴を設けた容器 (約2リットル) を設置した。左井戸への天ぷら油のショートカット的流出を防ぐために、土槽上部から充填部底面の約14cm上まで遮水板を設置した。左井戸に絶えず水を投与することで水位を保ち、右井戸から排水・回収を行った。水位は左側を充填部底面から約24cm、右側を充填部底面から約14cmとした。この動水勾配は左右の排出バルブ1段分の間隔

という実験装置の形状によるもので実地盤を考えると過大になってしまうが、この動水勾配でもてんぷら油・機械油の側方移動が促進されなければ、動水勾配・地下水流動の影響の有無が明確になると考えて実験を行うことにした。リサイクルてんぷら油の重力浸透容器への投入により実験を開始した。写真-3.1(a)は23.5時間後の様子である。エンジンオイルで汚染された部分が左からのてんぷら油の浸透によって、右へ動かされている様子が観察できた。

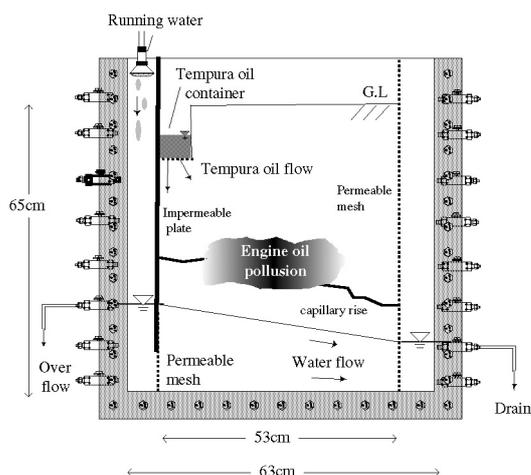


図-3.1 地表面から重力浸透させる実験
(二次元土槽実験装置)

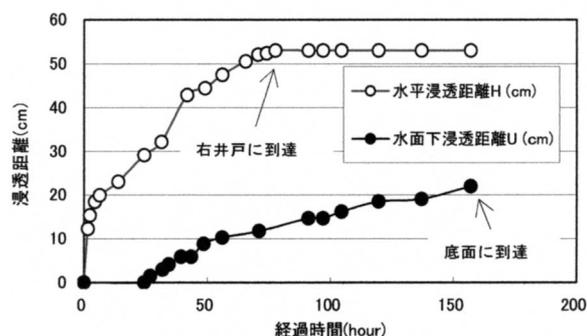
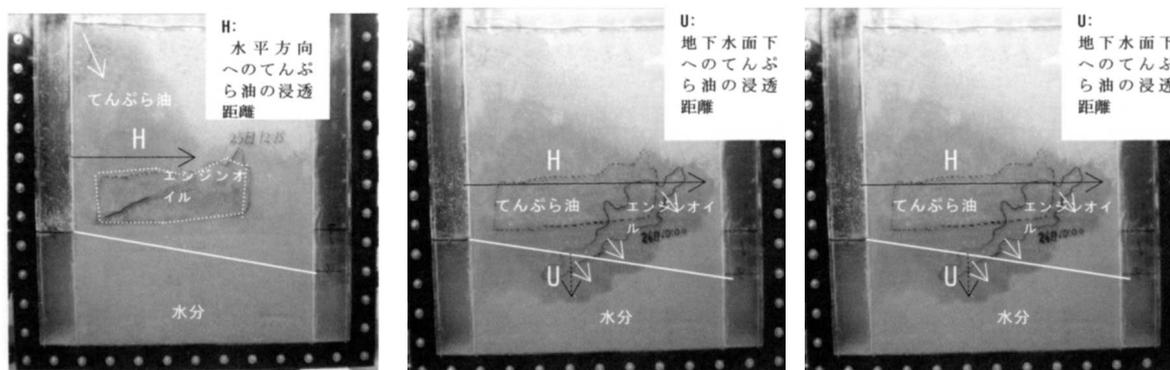


図-3.2 植物油の浸透距離



(a) 23.5時間後 (点線が初期汚染分布) (b) 69.0時間後 (c) 10日後

写真-3.1 地表面から重力浸透させる実験で観察された挙動

写真-3.1(a)の中のHは、てんぷら油の水平方向への浸透範囲を示すものである。この値を時間軸で整理して図-3.2にプロットした。写真-3.1(b)は69.0時間後の様子で、図-3.2において右井戸にてんぷら油の浸透範囲が到達した際の様子である。エンジンオイルはあまり右のほうへ動かず、地下水面に押し下げられている。詳細に見ると、てんぷら油とともに流下してきたことによって混合・希釈され、もとの赤い色の部分が右下の輪郭だけになっていることが観察された。写真-3.1(b)の中のUは、てんぷら油の水面下への浸透範囲を示すものである。この値も図-3.2にプロットした。図-3.2より、てんぷら油が右側の井戸に到達し、継続して流出するようになった後も地下水面下への浸透が進行し、150時間を過ぎたころには土槽の底面まで到達していることがわかる。写真-3.1(c)は10日後の様子であり、見た目では汚染部分は見受けられない。ここまで約18L (1斗缶) のてんぷら油を圧入した。69.0時間後の写真-3.1(b)の様子から考えて、ある程度のエンジンオイルがてんぷら油に溶けた状態で残留していると思われる。

施工の容易性から考えてこのように植物油を重力浸透させる方法が現実的であると想像される。しかし写真-3.1で観察された挙動から、てんぷら油が3日間で井戸に到達しているにもかかわらず、てんぷら油の下面のエンジンオイルが井戸に到達するまでにさらに7日間を要し、これが浄化の長期化を招いた。実地盤では図-3.3のようになり植物油の下面の機械油が回収されにくくなる懸念される。

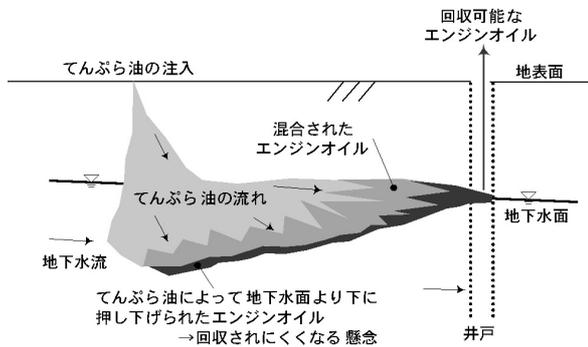


図-3.3 実地盤で懸念される汚染油の押し下げ

重力浸透実験において機械油が混合残留した要因は、図-3.3のようにてんぷら油の井戸に向かうフローの下に押し下げられてしまったためであると推測される。てんぷら油と機械油の混合相となった油を井戸に押し流すには、てんぷら油を大量に流すか、非常に時間をかけるかのいずれしかないということになり、何か別の発想が必要ではないかと考えられた。

4. 植物油と界面活性剤を併用した浄化法の実験

4.1 併用法のねらい

図-4.1に示す植物油と界面活性剤の併用法を考案した。まず、上方より植物油を投与する。その後、地下水面下より界面活性剤を流すことで、図-3.3で懸念された植物油の下面の機械油を乳化させて井戸まで運ぶのである。この方法のポイントは、植物油の先行投入により空気～水の毛管上昇帯が存在しなくなるため、従来問題であった毛管上昇帯への吸い上がりがないことである。この方法について、小型卓上2次元土槽で実験を行った結果が写真-4.1である。3種類の液体の挙動を色の違いから観察することを目的に、粒径1.0mmのガラスビーズのみを充填した土槽の下から3分の1をエンジンオイルで汚染した初期状態に、上方から植物油を先行投与し、土槽の左下端から生分解性の界面活性剤を送液した。写真-6.2は実験開始から1時間後の様子である。図-4.1に近い浄化の進行状況が確認できた。

4.2 2次元土槽を用いた併用法の実験

実験装置には、3章の2次元土槽よりも約40cm深いものを用いた。図-4.2のように、土槽の両側に井戸を作った。豊浦砂を高さ99cmまで充填し、土槽中央にエンジンオイルを用いて汚染土

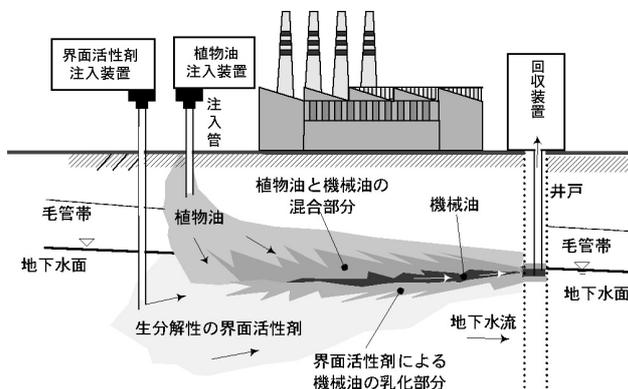


図-4.1 植物油と界面活性剤を併用した浄化法



写真-4.1 併用浄化法に関する簡易実験

壤を幅16cm×高さ77cmで作った。地下水面を作るために下から4段目の排水バルブを開いて一日放置し、排水が終わった状態を初期状態とした。左側の井戸に界面活性剤を投与するとともに、円筒容器に網を取り付けたものを左上方の土表面に埋め込みそこに天ぷら油を投与し、上と下から汚染油をはさみうちし、右側へ排出できるようにした。また、右側の井戸は全面フィルターになっており土中の油はどこからでも排出できるようになっている。

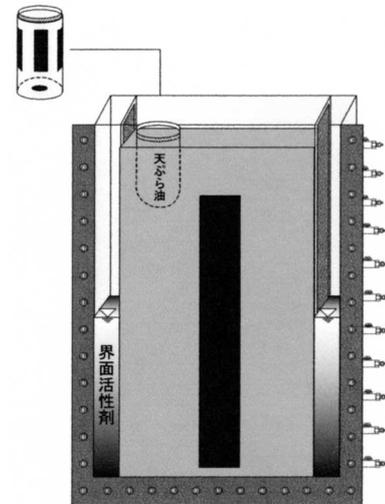


図-4.2 併用法による二次元土槽実験の初期状態

写真-4.2は実験開始直後の様子である。写真-4.3は重力投与で天ぷら油が浸透していく様子である。写真-4.4は天ぷら油の浸透が進み汚染ゾーンを覆っていて右下側へ押し出している事がわかる。ここで、界面活性剤の変化が見られないため投与する量を増やして経過を見てみた。

写真-4.5は実験開始36時間後の様子である。さらに天ぷら油の浸透が進み、徐々にではあるが井戸の方へと押し出している。また、井戸に浸してあった界面活性剤も徐々にではあるが、浸透しているのがわかる。写真-4.6は実験開始48時間後の様子である。この時点でエンジンオイルは

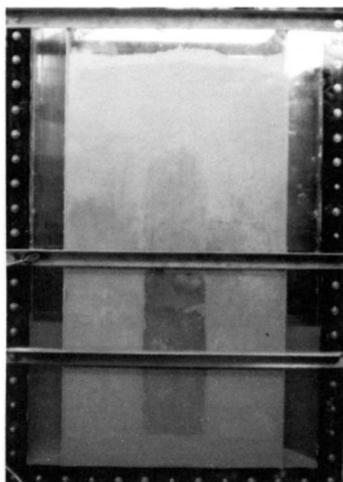


写真-4.2 初期状態

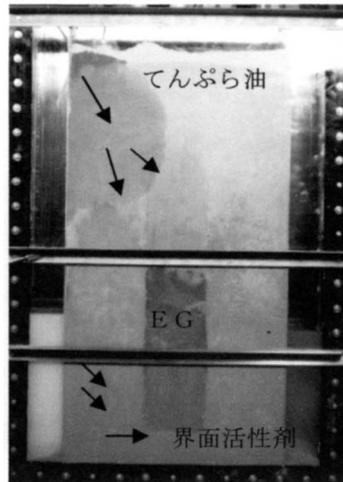


写真-4.3 12時間後

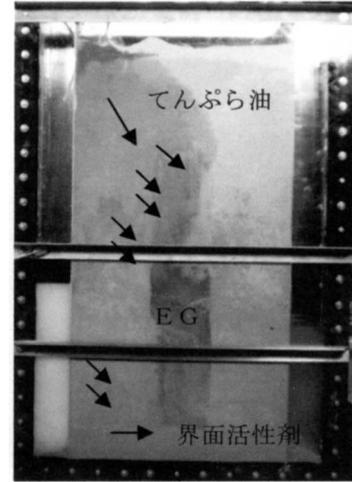


写真-4.4 24時間後

重力浸透によって井戸の方へと押し出されて、汚染ゾーンの形が崩れ、半分くらいは浄化されているように見える。この後、実験開始から120時間後までエンジン油の浄化のスピードは遅くなり、よくみるとEGオイルの下方へてんぷら油が流れてしまい、界面活性剤も天ぷら油の下に潜ってしまい、エンジン油を浄化するのではなくただ右側の井戸に移動してただけである事がわかった。

写真-4.10は実験開始から132時間後実験の様子である。ここで、界面活性剤と天ぷら油を今まで投与していた量の2倍を入れてみたところ、今までてんぷら油がエンジン油の下に潜り込んでいて、汚染ゾーンの下だけ浄化していたのがたくさん投与する事で残りの汚染ゾーンを井戸の方へと押し出しているのがわかる。また、汚染ゾーンの下が残っているため界面活性剤の量を増やし、浸透する箇所を増やした。

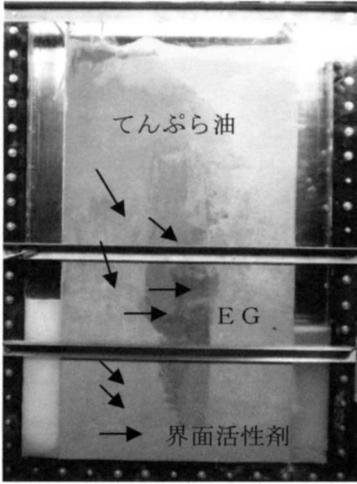


写真-4.5 36時間後

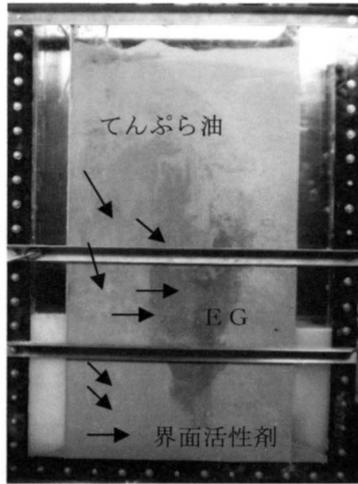


写真-4.6 48時間後

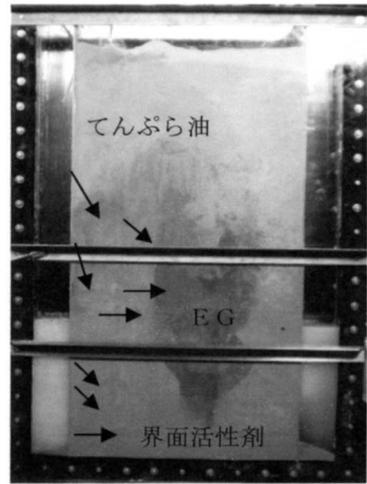


写真-4.7 60時間後

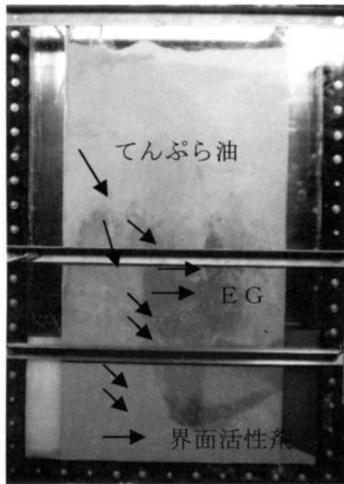


写真-4.8 108時間後

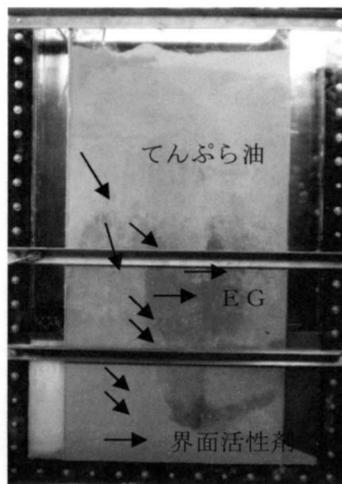


写真-4.9 120時間後

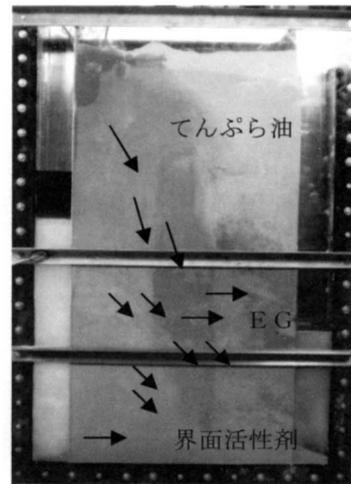


写真-4.10 132時間後

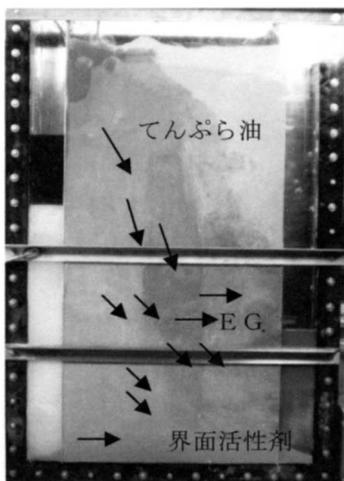


写真-4.11 144時間後

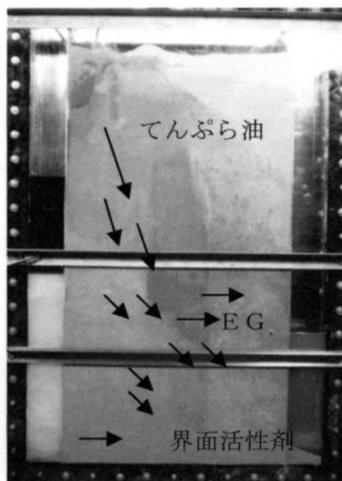


写真-4.12 156時間後

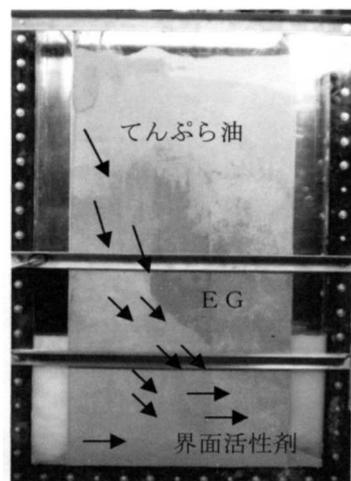


写真-4.13 160時間後

写真-4.11の144時間前後には界面活性剤の量を増やして地下水面上昇させたが、この下まで天ぷら油が浸透してしまい、これ以降の変化が見られなかった。写真-4.12の156時間後には初期の汚染ゾーン部分は浄化された、よく見ると井戸付近にまだ浄化しきれしていない部分が残ってしまった。この後、変化が見られなかったので実験開始から160時間後に実験を終了した。

5. まとめ

本研究では、リサイクル植物油によって地盤内の機械油を押し流すという浄化アイデアについて実験を行った。2次元土槽を用いた植物油を地表面から重力浸透させる実験の観察から、大半の機械油は井戸へ押し流せたものの、植物油が下方に浸透することで機械油が浄化されにくくなることが実地盤で懸念される点として浮かび上がってきた。これに対して、植物油と界面活性剤を併用した浄化法を考案した。上方より植物油を投与後、地下水面上より界面活性剤を流すことで、植物油の下面の機械油を乳化させて井戸まで運ぶ。ポイントは、植物油の投入により空気～水の毛管上昇帯が存在しなくなるため、従来問題であった毛管上昇帯への吸い上がりがないことである。この方法は小型卓上2次元土槽では成功を収めた。しかし、2次元土槽を用いた併用法の実験では、植物油と界面活性剤がはち合わせるポイントが機械油の下に来てしまい、期待した流れ場が形成されなかった。これは注入ポイント付近でいったん同心円状になった植物油がいったん地下水面上を突き破って降下し、そこからバウンドして側方に移動するという挙動をとったことに加えて、植物油の比重がエンジンオイルより若干重かったことがこれを促進したことが原因と考えられた。今回の研究から、植物油を用いる方法は境界条件が強く流れの制御しやすい小さい土槽では成功の確率が高いものの装置が大きくなると流れ場の制御が難しくなる傾向が浮き彫りになった。今後は、界面活性剤により乳化された油の毛管上昇現象を利用した回収方法についての検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 太田秀夫・板橋加奈：土壤汚染対策法なるほどQ&A、pp.37-38、中央経済社、2003.
- 2) 小澤英明：土壤汚染対策法、pp.116-117、白揚社、2003.
- 3) 汚染不動産リスク研究会：汚染不動産の基礎知識「リスク管理・浄化・会計・情報開示の方法」、東洋経済新報社、pp.110-111、2003.
- 4) 三菱総合研究所土壤汚染対策研究チーム：土壤汚染ビジネス大研究—関連ビジネスの今後と課題—、pp. 228-229、同友館、2003.
- 5) 地盤工学会：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策、地盤工学・実務シリーズ15、pp.156-157、2002.
- 6) 地盤環境技術研究会：土壤汚染対策技術「実務者が書いた土壤汚染対策法と実用技術から最新技術まで」、pp. 259-260、日科技連出版社、2003.
- 7) 中央環境審議会土壌農薬部会・土壤汚染技術基準等専門委員会：油汚染対策ガイドライン—鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地使用者等による対応の考え方—、2006.
- 8) 木暮敬二：法に基づく土壤汚染の管理技術、p. 17、技報堂出版、2004.
- 9) 梶田真一・棚橋秀行・大東憲二：乳化・微発泡作用を用いた油汚染浄化法の開発、土木学会第59回年次学術講演会概要集、pp. 523-524、2004.