

機械油汚染地盤の浄化技術開発に関する室内土槽実験

大同工業大学 正会員 棚橋秀行
大同工業大学 国際会員 大東憲二

1. はじめに

工場などの製造過程において大量に使用される機械油は、粘性が高く揮発性に乏しいため、地下へ浸透した場合に非掘削での浄化が困難である¹⁾。2006年3月に油汚染対策ガイドライン²⁾が制定されたが、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、土粒子への粘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。

機械油が地下へ浸透した場合、図-1(a)に示したように揚水を行うだけではその下部を地下水が流れるばかりで効果がない。その原因として機械油が高粘性であるということも挙げられるが、本研究では、水と油で流体としての相（フェーズ）が大きく異なることが原因である、と考えた。

すなわち、地下水を揚水により流動させて副次的に油を動かすのでは効率が悪く、直接油相を流動させるのがもっとも有効な手段ではないかと考えた。そのためには機械油と溶解し、ひとつの油相となるような液体を地中に注入し、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。また、汚染油が回収された後にはこれに置換した形で注入した油が残留することから、人体に無害なものが望ましいと考えた。検討を行ったところ、サラダ油・てんぷら油・ごま油などの植物性の食用油がエンジンオイルなどの鉱物性の機械油ときわめてよく混合し、長期間にわたって分離しないことが見出された。これに基づき図-1(b)のように、てんぷら油などの植物油を機械油の汚染の一端に注入し、汚染油をてんぷら油の流れに乗せて回収する方法を考案した。本報告は、植物油を用いることで、高粘性で揮発性に乏しく浄化が困難であった機械油汚染地盤の非掘削浄化技術を開発するための室内実験を行った結果を報告するものである。

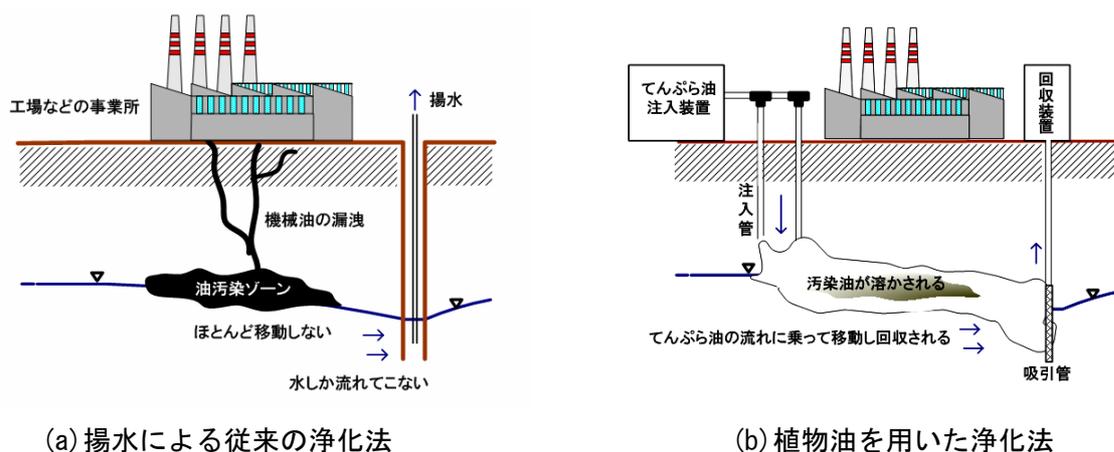


図-1 植物油を用いた油汚染地盤の非掘削浄化工法と揚水の比較

2. カラムを用いた機械油汚染土の植物油による浄化性能確認実験

植物油の重力浸透のみによる機械油の浄化効果を、内径6cmの亚克力カラムを用いて実験した。初期状態を作成する目的で、豊浦砂をエンジンオイルでスラリー状にした状態から図-2(a)のように重力排出した。重力排出後の試料高さは約25cmとなった。このカラムを解体し8つの位置からサンプルを取り出して分析を行った初期残留油分重量比の分布が図-2(c)の(●)である。図-2(c)の数値は表-1に示したとおりである。この初期状態に(厳密には解体しないで同時平行で重力排出を別途行っていた2つのカラムに対して)、図-2(b)のように地表面から使用済みてんぷら油を重力浸透させた。この浸透による浄化開始から3.5時間後に解体して分析した際の、残留油分重量比の分布が図-2(c)の(□)である。3.5時間後には、てんぷら油がまだカラムの上半分程度しか浸透していなかったが、上方のエンジンオイルの残留油分重量比はすでに0.3%しかなく、てんぷら油によって下方へとほとんど押し流されていることが確認できた。14時間後の残留油分重量比の分布は図-2(c)の(○)でありエンジンオイルがほとんど検出されないという浄化結果を得ることができた。

3. 土槽を用いた機械油汚染土の植物油による非掘削浄化観察

次に図-3に示した土槽(幅63cm×高さ80cm×奥行き13cm)を用いた浄化実験を行った。図-3に示した土槽の両サイドにステンレスメッシュ(目の開き42μm)をアルミパンチングプレートで挟んだ模擬井戸(幅9cm)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のように作成した。使用済みてんぷら油を重力投与するため、土槽左側上部に下部に穴を設けた容器(約2リットル)を埋設した。左井戸へのてんぷら油のショートカット的流出を防ぐために、排水バルブの下部2段目の位置(充填部底面から約14cm)に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。水位は左側を排水バルブ3段目(充填部底面から約24cm)、右側を2段目(充填部底面から約14cm)とし動水勾配をつけた。前節のカラム実験から一定量以上の植物油を流せば機械油の残留油分重量比をかなり低減できることが確認されたので、この土槽実験では、浄化の完全な終了や実験後の解体・残留分析は計画せず、まず植物油の流れを理解するための挙動観察を主な目的とした。

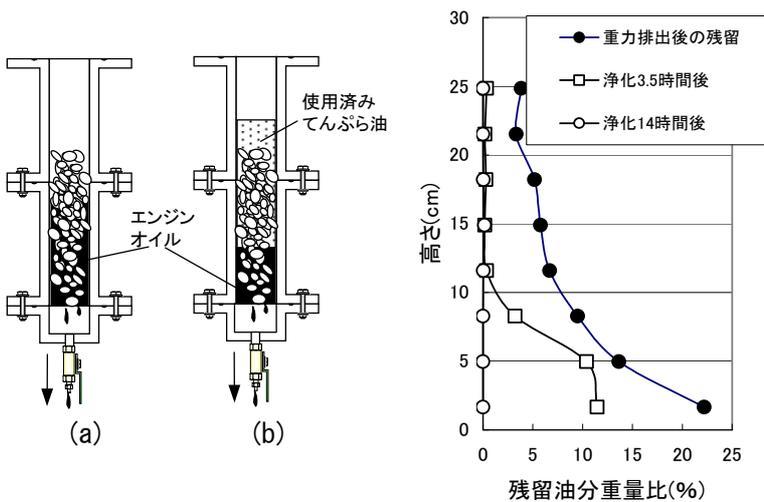


表-1 カラム実験における残留油分重量比の分析結果

サンプル採取高さ (cm)	残留油分重量比 (%)		
	重力排出後 (%)	浄化3.5時間後 (%)	浄化14時間後 (%)
24.8	3.8	0.4	0.0
21.5	3.3	0.2	0.0
18.2	5.2	0.3	0.1
14.9	5.8	0.2	0.2
11.6	6.7	0.4	0.1
8.3	9.5	3.2	0.0
5.0	13.6	10.4	0.0
1.7	22.2	11.4	0.0

図-2 植物油の重力浸透による機械油の浄化カラム実験

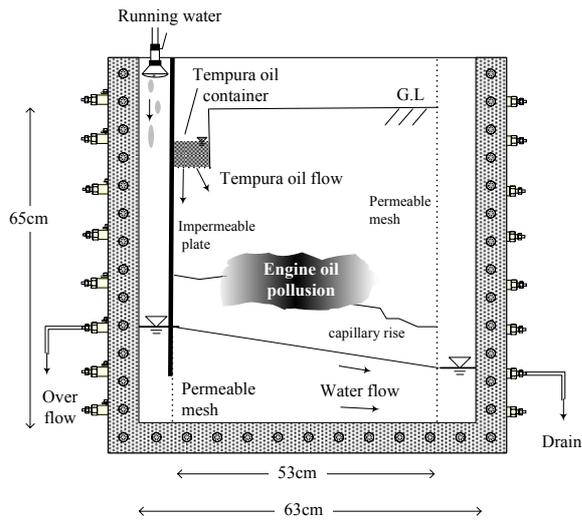


図-3 地下水流のある状態での浄化土槽実験

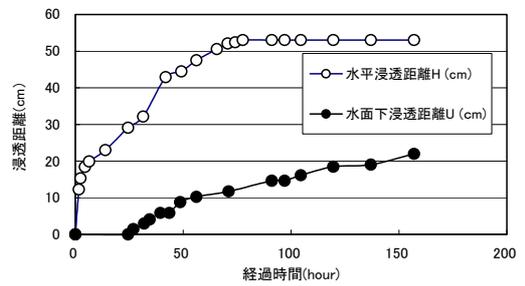
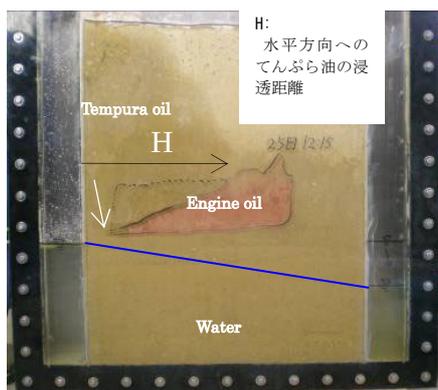
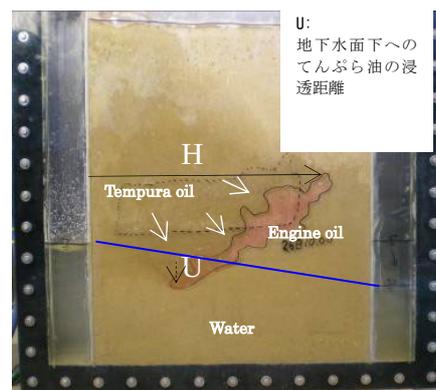


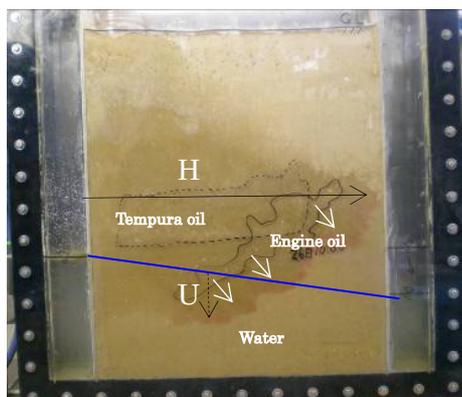
図-4 植物油の浸透範囲 (写真-1 を参照)



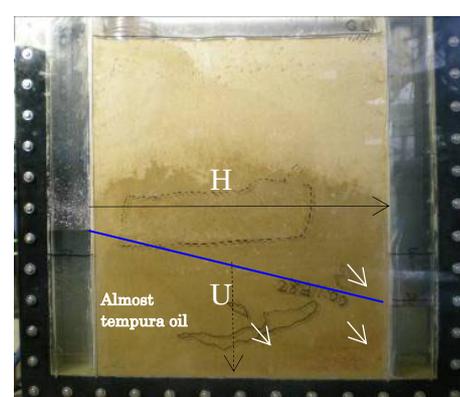
(a) 23.5 時間後



(b) 44.5 時間後



(c) 69.0 時間後



(d) 10 日後

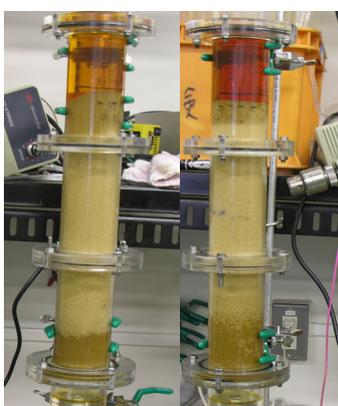
写真-1 観察されたてんぷら油とエンジンオイルの挙動

実験はてんぷら油の重力浸透容器への投入により開始された。写真-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とその左からのてんぷら油の浸透によって、右へ通し動かされている様子が観察できた。写真-1(a)の中のHという文字は、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H(cm)の値を時間軸(hour)で整理して図-4にプロットした。写真-1(b)は44.5時間後の様子である。エンジンオイルで汚染された部分はあまり右のほうへ動かず、むしろてんぷら油の浸透によって地下水面かに押し下げられていることが観察された。写真-1(b)の中のUという文字は、てんぷら油の地下水面下への鉛直浸透範囲を示すものである。このU(cm)の値を時間軸(hour)で整理して図-4にプロットした。図-4より、およそ70時間経過した以降はてんぷら油の水平方向への浸透範囲が53cmとなり右側の井戸に継続して流出しているが、その後も地下水面下への鉛直浸透が進行していることがわかる。写真-1(c)は69.0時間後の様子である。エンジンオイルで汚染された部分はあまり動いているようには見えず、写真-1(b)と比較するとてんぷら油とともに流動してきたことによって混合され、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-1(d)は10日後の様子である。見た目では汚染部分は見受けられないものの、69.0時間後の写真-1(c)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ものと推定するのが妥当である。前節のカラム実験の結果から類推して、このままてんぷら油を大量に流せば、いずれはエンジンオイルが右の井戸からすべて流出すると思われた。しかし、先述のようにこの実験では浄化の完全な終了や実験後の解体・残留分析は計画しておらず、当初の目的であった植物油の流れを理解することはできたので、10日間で実験を終了し、次の実験に向けて以下のような検討を行った。

4. オレンジ成分リモネンの配合による浸透性向上実験

(1) カラム実験

前節の土槽実験では、根本的な問題は生じなかったものの、てんぷら油を重力浸透させるだけでは、幅50cmの砂地盤の浄化に少なくとも10日間以上を要する状況が観察された。これはてんぷら油の粘性が高いことに起因する。著者らは、以前、オレンジの皮に含まれる精油リモネンの原液を用いて同様な実験を行ったことがあるが、粘性が低いリモネンは油汚染ゾーンを避けるように浸透してしまい、浄化効率の面では好ましくなかった。そこで、使用済みてんぷら油にリモネンを混合した液体(リモネン混合液)を用いれば、浸透性と浄化の両方に適した結果が得られるのではないかと考え、写真-2(a)~(c)のようなカラム実験において、リモネン混合液と使用済みてんぷら油の浸透性と浄化性能について定量的に比較した。



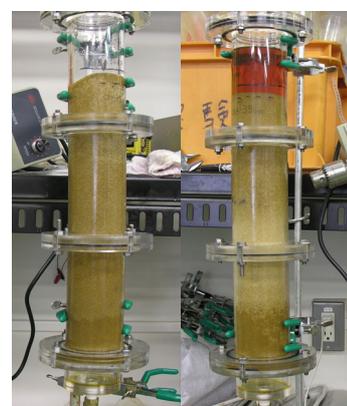
Case A Case B

(a) 投与から10分経過時



Case A Case B

(b) 1時間55分経過時



Case A Case B

(c) 4時間15分経過時(解体分析)

写真-2 リモネン混合液(写真左 Case A)の浸透性の向上の観察

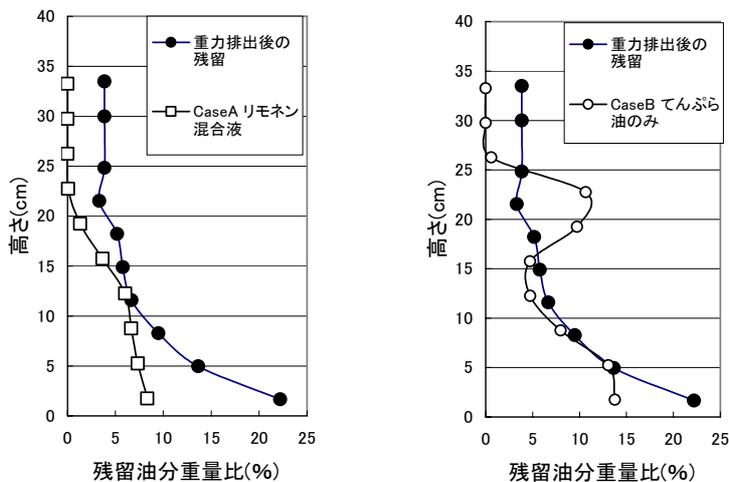
内径 6cm のアクリルカラムに豊浦砂 1484 g を充填密度 1.50g/cm^3 、高さ 35cm になるように充填したものを 2 セット作成した。この充填は水ではなくエンジンオイルを用いて飽和させつつ行った。充填後に重力排出を 2 セットともに 24 時間行い、これを浄化前の初期状態とした。実験は 2 ケースを同時に行った。写真-2(a) の左が Case A、右が Case B である。Case A はリモネン 160g と天ぷら油 160ml を混合したリモネン混合液を 320ml 投与し、Case B は天ぷら油のみを 320ml 投与した。写真-2(a) はそれぞれ投与開始から 10 分経過したときの様子で、Case A の浸透が若干早いように見受けられる。投与から 1 時間 55 分経過時の様子が写真-2(b) である。Case A は充填高さの 8 割程度まで浸透しているのに対して Case B は 3 割程度までしか到達していない。写真-2(c) は 4 時間 15 分経過時の様子であり、この時点で豊浦砂表面に投与した Case A のリモネン混合液はすべて浸透したが、Case B はまだ半分ほどが浸透せずに残っていた。

写真-2(c) の状態のカラムを解体し、10 層に分けサンプルを取り出して残留エンジンオイルの分析を行った結果が図-5(a) (b) である。図-5(a) (b) の (●) は初期状態としてプロットした重力排出後のエンジンオイルの残留油分重量比である。この初期状態に対して、浄化開始から 4 時間 15 分後に解体して分析した Case A の残留油分重量比の分布が図-5(a)、Case B の残留油分重量比の分布が図-5(b) である。図-5 の数値は表-2 に示したとおりである。図-5(b) の (○) の特徴的な分布は、上層にあったエンジンオイルがてんぷら油によって押し下げられ停滞したものである。同様な分布が Case A の図-5(a) の (□) で見られないのは、リモネンの混合による浸透性の向上によってカラム解体以前にカラム下端よりエンジンオイルが排出されたためである。

このように、リモネン混合液の浸透効率の良さとそれに伴う浄化の迅速化が確認できた。

(2) 小型卓上 2 次元土槽実験

幅 42cm×高さ 30cm×奥行き 3.5cm の小型卓上 2 次元土槽実験にて、リモネン混合液の横移動浄化の挙動を観察することにした。充填試料には粒径 1.0mm のガラスビーズを使用した。土槽右側にのみ井戸を設置し、左側上部には浸透液の投与部を作成した。油汚染ゾーンは土槽中央付近にエンジンオイルにて作成し、2 ケースの実験を同時に行い比較した。リモネンと使用済み天ぷら油をこれまでと同じく 1 : 1 で混合したリモネン混合液を投与したものを Case A (写真-3(a)～(d)の左側)、使用済み天ぷら油のみを Case B (写真-3(a)～(d)の右側) とした。投与量は両ケース共に 1 リットルとした。写真-3(a) は投与開始直後の様子である。Case A はすでに汚染ゾーンにリモネン混合液が接していることが確認できる。



(a) CaseA (リモネン混合液) (b) CaseB (てんぷら油のみ)

表-2 カラム実験における
残留油分重量比の分析結果

サンプル 採取 高さ (cm)	残留油分重量比 (浄化後)	
	CaseA リモネン混合 (%)	CaseB てんぷら油のみ (%)
33.3	0.0	0.0
29.8	0.0	0.0
26.3	0.0	0.6
22.8	0.1	10.7
19.3	1.3	9.7
15.8	3.7	4.7
12.3	6.0	4.8
8.8	6.7	8.0
5.3	7.3	13.1
1.8	8.3	13.8

図-5 エンジンオイルの残留分析結果

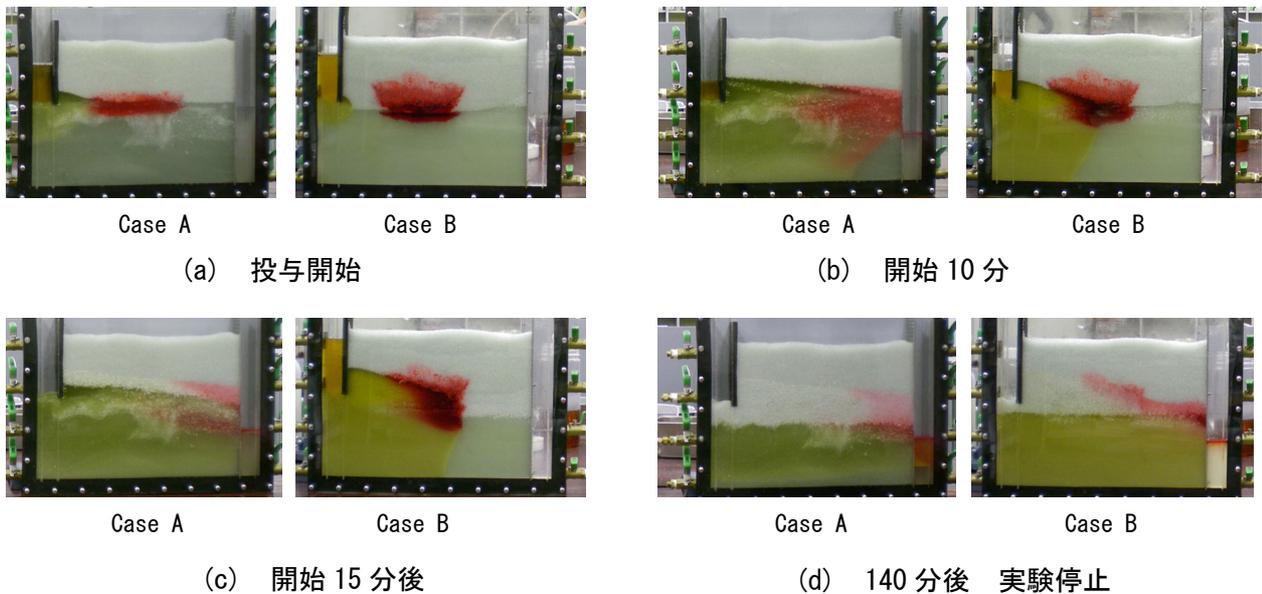


写真-3 小型卓上2次元土槽によるリモネン混合液（写真左 Case A）の横移動浄化の観察

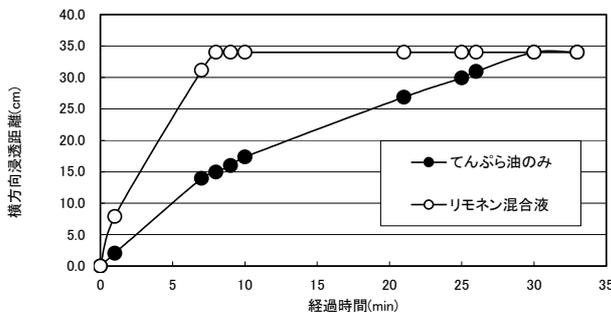


図-6 横方向への浸透距離と時間

表-3 本研究で用いた液体の粘性係数

液体 (20℃)	粘性係数 ×10 ⁻³ (Pa・s)
水	1.06
リモネン	0.81
てんぷら油	17.20
リモネン混合液	1.76
エンジンオイル	31.52

リモネン混合液投与開始 10 分後の写真-3(b)でも、Case A はすでに汚染油の井戸への滲出が見られる、写真-3(c)は 15 分後の様子である。Case A では汚染油の半分以上が井戸に滲出したことが確認できる。投与にも違いがみられ、15 分経過時には Case A では混合液の 1 リットルが全て土槽内へ浸透している。図-6 に実験の経過時間と横方向浸透距離の関係を示した。てんぷら油のみと比較して、3 分の 1 以下の時間でリモネン混合液は右の井戸に到達したことがわかる。140 分経過時には両ケースとも全ての液が土槽内に浸透したので、実験を停止した。写真-3(d)はその様子である。ここで気がついた点は、Case B ではてんぷら油が土槽底部までを占めているのに対し、Case A では一旦井戸に押し流された地下水が逆流して混合液の下方へと浸透したことである。今回は地下水流のない状況での実験であったが、リモネン油混合液は、てんぷら油で行った写真-1 の一連の実験よりも地下水面下に浸透せず、横方向へと浸透して汚染油を効率よく井戸まで押し流すことが期待される。

5. 考察と今後の展開

表-3 は、この研究で用いた液体の 20℃での粘性係数を、細いガラス管を通過する際の抵抗から求める実験方法³⁾により測定した結果である。これより、リモネン原液の粘性が水よりも小さいことがわかる。このリモネンを 50%混合することで、てんぷら油の粘性係数がほぼ 10 分の 1 になることが測定された。これによる浄化時間の短縮が期待されるが、現実的には高価なリモネンを大量に混合し使用することは難しいと思われる。

また実際の地盤では地下水位の上下動により、地下水面下にもトラップされた汚染油が存在しているが、



(a) 界面活性剤投与 20 分後

(b) 3 時間後

(c) 2 日後

写真-4 界面活性剤の投与により乳化液となったエンジンオイルの毛管上昇帯への吸い上がり

比重が水より小さいリモネン混合液では到達できない深度の汚染油の浄化は、他の方法に頼らざるを得ない。

著者らはこれまでに界面活性剤を用いた非掘削浄化技術開発のため、種々の実験を継続的に行ってきた。研究当初の課題は、どんな界面活性剤でもビーカー内で機械油汚染土と攪拌すれば乳化反応が起こり浄化可能であるのに対し、地盤内へ浸透させるとほとんどその性能を発揮しないという問題であった。検討の結果、攪拌を行わずとも地盤に浸透させておけば土粒子に付着していたエンジンオイルなどの機械油を乳化することができる生分解性の界面活性剤の種類と、それに重曹（炭酸水素ナトリウム）を添加することによる乳化の目覚ましい促進性能を見出すにいたった^{4,5)}。しかし、界面活性剤を用いる方法には、その特性ゆえの避けがたい問題点が残されたため、今回の植物油での浄化へと至った経緯がある。この問題点について、写真-4の実験で説明する。

写真-4(a)に示したように、先述した小型卓上 2 次元土槽の中央部分に、着色したエンジンオイルで汚染されたゾーンを持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。この写真-4(a)は投与開始から 20 分後の様子で、まだ顕著な変化は生じていない。写真-4(b)は 3 時間後の様子である。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行く望ましい状況である。問題は 2 日後の様子である。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地盤の毛管上昇帯に吸い上げられ、地表付近まで上昇してしまっている。これが先に述べた界面活性剤を用いた方法の避けがたい問題点である。これまでの実験から、地下水面下の汚染油が乳化されると、横方向へ流れながら徐々に地下水水面付近に上昇してゆくことが観察されている。ゆえに、現場では乳化された汚染油が長距離を移動する間に写真-4(c)のようになり、浄化が困難になることが懸念される。

そこで、今回の研究の主眼であった植物油での方法と従来の界面活性剤での方法を併用した浄化方法を考案した。その狙いを図-7 に示す。まず、上方より植物油を投与し、回収井戸までの連続した流れを形成する。この際、植物油の流れの下部には機械油との混合部分、あるいは機械油の原液部分が形成される。これは写真-1(c)で確認された状況である。一方、地下水面下のトラップ機械油は界面活性剤で乳化させ、地下水水面付近へ押し上げる。この方法のポイントとなるのが、植物油の先行投入により写真-4(c)のような水分の毛管上昇帯が存在しないため、乳化液の吸い上がりがないことである。これまでの土槽実験では間隙水によって乳化液が希釈されて、乳化状態であった機械油が原液に戻ってしまい回収できなくなってしまうこともあった。これについても、その状況が生じるのが、植物油が押し流しつつある機械油の原液部分の直下であるので、解決できる可能性がある。

図-7 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-5 である。粒径 1.0mm のガラスビーズ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、図-7 のように上方から植物

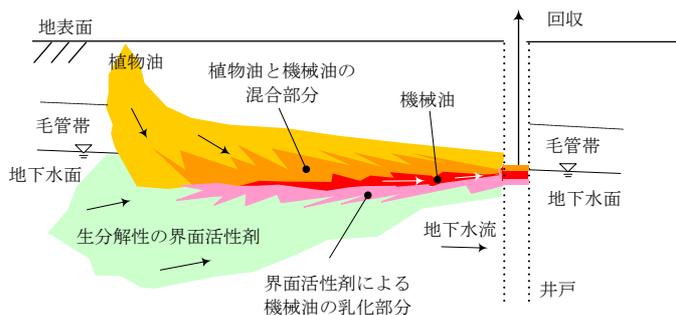


図-7 植物油と界面活性剤を併用した浄化法の狙い

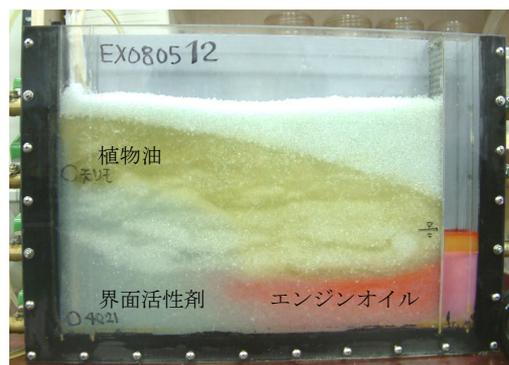


写真-5 図-7の浄化法に関する土槽実験

油（リモネン混合液）を投与するとともに、土槽の左下端から生分解性の界面活性剤(重曹添加)を送液した。両液の投与は毎分 4ml とした。写真-5 は実験開始から 1 時間後の様子である。簡易的な実験であるのでまだ完全に成功であるとは言いがたいものの、植物油と界面活性剤の併用により図-7 のイメージにかなり近い浄化の進行状況が確認できた。今後はこの「併用法」を用いることによる、植物油の浸透に関する時間やコストなどの問題解決の可能性について、検討する予定である。

6. 結論

土粒子への粘着性が高く揮発性が低い機械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として、てんぷら油などの植物油を機械油の汚染の一端に注入し、植物油の流れに乗せて回収する方法を考案した。本研究で行われた室内実験より、主に 4 つの知見が得られた。1) 一定量以上の植物油を流せば機械油の残留油分重量比をかなり低減できることが確認された。カラムを用いた実験では、14 時間後の残留油分がほとんど検出されないという浄化結果を得ることができた。2) 土槽実験において、てんぷら油を重力浸透させるだけでは、幅 50cm の砂地盤の浄化でも少なくとも 10 日間以上を要することがわかった。3) リモネンを 50% 混合することで、てんぷら油の粘性係数がほぼ 10 分の 1 になり、浄化に要する時間が 3 分の 1 以下になることがわかった。4) 植物油と生分解性の界面活性剤の併用により、地下水面下のトラップ油の回収・乳化された汚染油の毛管上昇帯への吸い上がりといった問題が解決できる可能性が示された。

謝辞 この研究には著者らの所属する油汚染土壌の修復技術研究会（大同工業大学・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）の多大なる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。なお、本研究は平成19・20年度科学研究費（基盤研究B）により実施されたものである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 中央環境審議会土壌農薬部会・土壌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.
- 3) 東京都立産業技術高等専門学校・吉田研究室ホームページより:
(http://www.ky.metro-cit.ac.jp/kyouzai_pdf/1nensei.pdf)
- 4) 小穴明生・棚橋秀行・大東憲二・梶田真一:界面活性剤と重曹による油汚染地盤の室内実験, 第 40 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2655~2656, 2005.
- 5) 小穴明生・梶田真一・棚橋秀行・大東憲二:重曹を添加した界面活性剤水溶液による油汚染地盤浄化技術の開発, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, pp.751~752, 2005.