親油性の高いプラスチックボード・ドレーンを用いた地中流出油の回収技術

鹿島建設(株)　正会員　○河合 達司　田中 真弓
鹿島建設(株)　正会員　鈴木 祐麻　河野 麻衣子
鹿島建設(株)　荒崎 拓也　松原 武志
鹿島建設(株)　上島 裕　錦城護謨(株)　正会員　三成 昌也

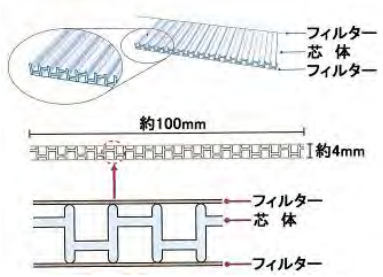
１．はじめに

製油所や油槽所などにおいて，多量の油を貯留するタンクが地震などにより被災し，地盤に油が漏洩した事例がある．油が不飽和層を浸透して地下水面まで達した場合，帯水層上部に滞留した油層が地下水流動により拡散し，施設周囲の公共用水域に油膜を生じさせることは，水質汚濁防止の観点から問題となる．この対策として，遮水壁や揚水対策などの拡散防止を講じることが一般的である．これに対して，積極的に油を地盤から回収除去する原位置浄化技術を適用した事例は多くはない．筆者らは，豊洲新市場工事での土壌地下水汚染対策に適用されたプラスチックボード・ドレーン（以下, ドレーン材）を用いた原位置浄化技術（ポンピング・ドレーン®工法）[1)] に着目し，この技術を用いた油回収技術（以下, 本技術）を開発した．本稿では，油回収に適したドレーン材素材を検討し, これを用いた油回収技術が従来の揚水対策に比べて効果的であることを土槽試験と実証試験により検討した結果を報告する．

２．油回収に用いるドレーン素材の選定と耐久性評価

ドレーン材は, 軟弱地盤改良工法のひとつである圧密促進工法において排水に使用される厚さ 4 mm, 幅 100 mm の薄い形状をした土木資材である．ドレーン材は，**図−1** のように溝切された芯体の両面にフィルター材を貼り合わせた構造を有している[1)]．ドレーン材の上端は吸引ホースに接続されたキャップで密閉され，下端の溝も閉じられている．このホースを介して吸引することにより, 油や地下水, 空気は, フィルター材を透過し，芯体の溝を通って地上に回収される．

ドレーン材を用いた油の回収の効率を高めるため，撥水性を有し親油性の高いフィルター素材を選定した．フィルター素材として，ポリエステル(PEs)，ポリ乳酸（PLA），ポリプロピレン（PP），ポリエチレンテレフタレート（PET）を候補として，協和界面科学㈱製の単繊維接触角計 CA-S ミクロ 2 型を用いて，水および流動パラフィンの接触角を測定した．流動パラフィンは安全で化学的に安定した油であり，油の接触角を評価する際に良く用いられる．**表−1** に示すように，いずれの素材も水の接触角が 90°を超え，高い撥水性を示した．一方，流動パラフィンはフィルター材に染み込み，液滴が形成されなかったため，接触角として親油性を定量的に評価できなかった．そこで，フィルター材の親油性と油に浸漬した際にフィルター材に生じる毛管力との関係に着目し，フィルター材が油を毛管力で吸い上げる油の高さを用いて素材の親油性を評価した．



図−1　ドレーン材の構造

表−1　フィルター素材の接触角と毛管上昇量

素材	接触角（°）		毛管上昇量 (mm)
	水	流動パラフィン	
PEs	129.4	計測不能	8
PLA	131.0	計測不能	10
PP	134.2	計測不能	40
PET	124.8	計測不能	140

PEs：ポリエステル，PLA：ポリ乳酸，PP：ポリプロピレン，
PET：ポリエチレンテレフタレート

キーワード　LNAPL，multi-phase extraction，油膜，多孔質媒体，多相流，毛管力
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設(株)技術研究所　TEL042-485-1111

流動パラフィンをズダンIVで赤く染色し，フィルター材下部を流動パラフィンに浸漬させ，油の上昇状況を観察した．毛管現象による油の上昇（毛管上昇量）が平衡となった試験開始 2 日後に毛管上昇量を測定した．その結果，素材の中で最も毛管上昇量が大きい PET を，親油性の高いフィルター素材として選定した．

油回収に用いるドレーン材の素材は，フィルター材は PET であり，芯体はポリエチレン（PE）である．これらの素材のベンゼンに対する耐溶剤性の評価は，使用に問題のない「優」や「良」ではなく，「可」である[2)]．従って，原位置での油の吸引回収が数年～十数年にわたる場合，溶剤成分により素材が劣化し油を吸引・回収する機能が損なわれる可能性が考えられる．そこで，溶剤としてガソリン，ベンゼン，灯油を用いた浸漬試験を 1 年間実施し，各溶剤に対する耐溶剤性を評価した．浸漬後の素材の強度劣化を耐溶剤性の指標として，芯体の引張強さ（強力(MPa)）を JIS K 7161-1B により，フィルター材の引張強さ（強度(kN/m)）を JIS L 1908 により測定した．また油回収の機能低下を評価するため，浸漬後のドレーンによる油の吸引回収量を測定し，浸漬前の回収量との相対比率（油吸引保持率）として評価した．浸漬温度は，ガソリンのみ安全性の観点から 15℃とし，ベンゼンと灯油は 15℃，40℃，65℃とした[3)]．**図-2** にベンゼン浸漬後の引張強さの結果を，**図-3** に各溶剤浸漬後の油の吸引保持率の結果を示す．1 年間の溶剤浸漬後もこれらの素材の強度低下や吸引保持率の低下は認められなかった．ベンゼンと灯油に関しては，地下水温 15℃の環境で 16 年以上に相当する耐久性を有すると推定された．

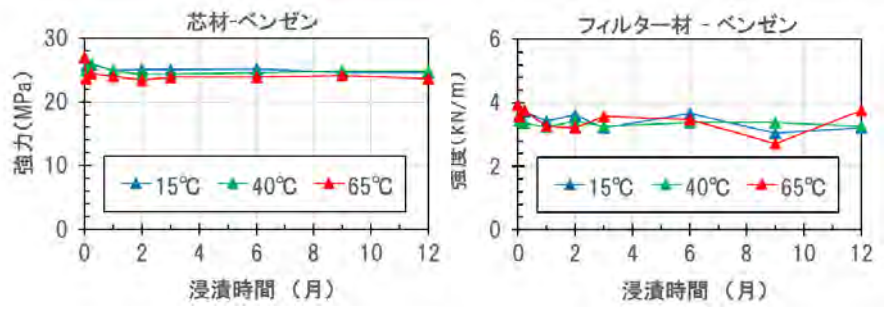


図-2　ベンゼン浸漬後の芯材とフィルター素材の引張強さの経時変化

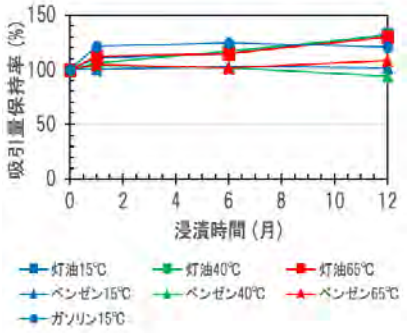


図-3　各溶媒に浸漬後の油吸引保持率の経時変化

３．土槽試験による油吸引効果の定量評価

本技術の油回収性能を定量的に評価するため，**図-4** に示す土槽試験装置を用いて油の吸引試験を行い，試験後の油のマテリアルバランスを評価した[4)]．土槽（容量：0.9 m^3）内に模擬土としてフラタリーサンド（50%粒径 D_{50}：0.23 mm）を充填し，水 83 L とズダンIVで赤く染色した灯油 52 L を加え，模擬帯水層を作製した．灯油は水より密度が小さい軽質非水相流体（LNAPL：Light Non-Aqueous Phase Liquids）であるため，帯水層上部に油層として留まり，油と水の界面が生じた．長さ 30cm のドレーン材の中央がこの界面に位置するようにドレーン材を設置した．なお，GL -8 m に油層が存在している状況を模擬し，土槽を地上に，真空ポンプと気液分離槽を 8 m高さの建物の上層階に設置した．油の吸引試験では，吸引圧 0.085 MPa で 35 分間吸引し，気液分離槽に回収された油と水の量を計測した．また，土槽内の残存油と揚水中の油を計測するため，油汚染対策ガイドライン[5)] に準拠し，土壌および水の油含有量試験（TPH 試験）を実施した．また，気化した油の量を評価するため，排気ガスの流量と共にガス中の油の濃度をガス測定装置 Ecoprobe5 により計測した．なお，吸引時は底部砕石層より水を供給することで水と油の界面の高さを一定に維持した．

表-2 に試験後の油のマテリアルバランスの結果を示す．本技術の効果は油種や土質，油量により異なるが，今回検討した条件では 35 分間という短時間で 71.4%の油を地盤から回収でき，積極的な油回収技術としての本技術の有効性を示す結果が得られた．なお，差分は，配管内などに残集したロス分と推測される．

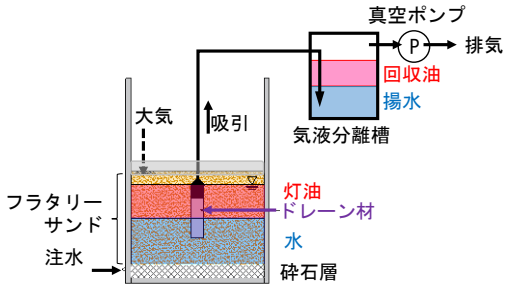


図-4　土槽試験装置の概念図

表-2　土槽試験後の油のマテリアルバランス

油内訳		油量（L）	初期量に対する割合	
回収油	排気中油	5.14	9.9%	71.4%
	回収油	31.90	61.3%	
	揚水中油	0.1	0.2%	
残存油	フラタリー サンド	13.64	26.2%	27.4%
	砕石層	0.6	1.2%	
総計				98.8%

4．実証試験による適用性評価

(1) ドレーンの打設深度の決定

油汚染土壌の範囲を特定するための調査は，環境省による「油汚染対策ガイドライン」[5]に示されているように，現地踏査における人の感覚と，それを補完する土壌ボーリング試料の TPH 試験によって概括的に把握するのが一般的である．しかしながら，この調査は，本技術の対象である地盤中の油層の位置の把握を目的とした方法ではないこと，また，調査開始地点を人の感覚で決定することやボーリングでの土壌の採取深度が地表から 15 cm および 50 cm と地層境界以外は 1 m 間隔を基本としていることから，地盤内の数 cm～数 10 cm の油層を見落とす可能性がある．このため，土壌汚染対策法の第一種特定有害物質の調査に用いられる土壌ガス調査法[6]と土壌を地上に採取せず原位置で油を検知するダイレクトセンシングを用い，地盤内の油層位置の把握を行った[7]．

土壌ガス調査では，地表から 80 cm の深度まで 1 m ピッチで削孔し，ガス採取管を設置した．設置後数時間経過した後に，土壌ガス採取装置を用いてテドラーバッグに土壌ガスを採取し，ガス測定装置 Ecoprobe 5 を用いて土壌ガス中の石油系炭化水素の濃度を赤外吸収法により測定した．図-5 に石油系炭化水素濃度のコンタ図を示す．ほぼ一日の作業で，油が存在する可能性のある全体の領域と油の存在量が多いと推定される領域が判明し，ダイレクトセンシングを実施する地点として濃度の高い領域を絞り込んだ．

ダイレクトセンシングは，貫入式ボーリングロッドの先端に油を検知するプローブを取付け，ロッドの貫入と共に連続的に油の存在する深さを検出する技術である．プローブには，OIP(optical image profiler)と MIP(membrane interface probe)があり，OIP は紫外線照射により油が発する蛍光量を画像で感知して油の存在量を定量する．MIP は選択的分離膜を通して地盤内の揮発性の油分を加熱導入し，地上でガスクロマトグラフ法により定量する．また，電気伝導度（EC）を同時に測定し，地下水位の深度や地層境界を推定した．**図-6** に，潤滑油成分の油を OIP で連続測定した結果と土壌ボーリングにより油の鉛直分布を把握した結果を示す．

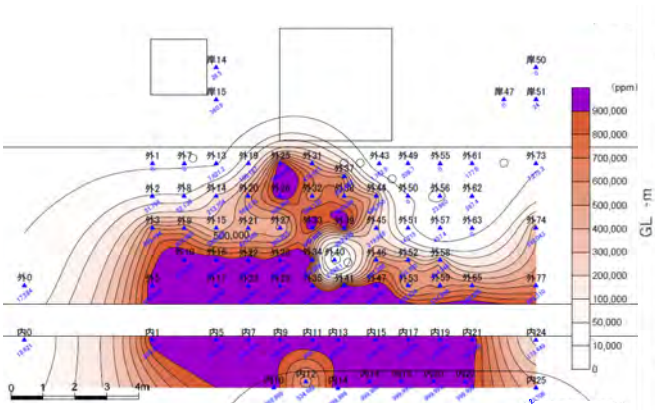


図-5　土壌ガス調査による地盤内の油の水平分布

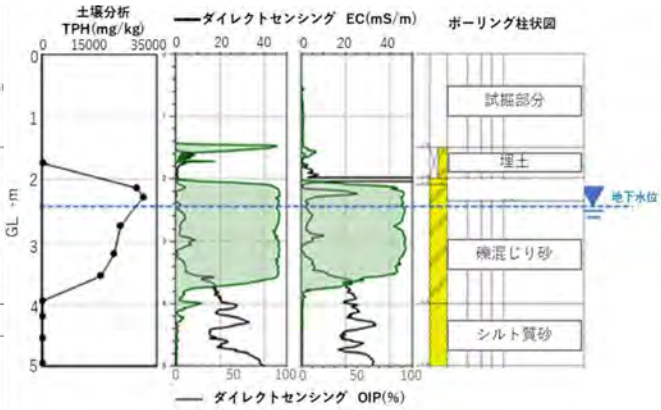


図-6　ダイレクトセンシングと土壌ボーリング調査による油層位置の特定

⑵ 砂礫層地盤を対象とした施工方法の開発

ドレーン工法は，軟弱地盤の対策工法のひとつである圧密促進工法として多数の施工実績を有する．既設の建物等がなく，施工に制限が少ない軟弱地盤を施工する場合，専用の大型打設機械とケーシングにより，迅速に多量のドレーン材を打設することが可能である．しかしながら，N 値が大きな砂礫層に対しては，従来の打設方法の適用は難しく，先行ボーリングにより掘削孔を設け，そこにドレーンを打設する方法が考えられるが，二回施工となるため工期や経済性の面で現実的ではない．一回施工を実現するため，クレーンとバイブロハンマーによる方法とアースオーガーによる方法に着目し，**表-3** に示した試験ケースによりケーシングやアンカーなどの形状の検討を行い，N 値の大きな砂礫層への打設法の確立を試みた[8]．

最大 N 値が 20 を超える砂礫層を含む地盤において，GL -6m まで打設試験を行い，GL- 4m および GL -6m への到達時間を計測し評価した．**図-7** に示すように，ケース 6 のアースオーガーによる方法の打設時間は，ケース 1～5 のバイブロハンマーによる方法よりも短く，施工性に優れていた．しかしながら，アースオーガーによる回転により，ドレーンの吸引ホースのねじりが生じ，ねじりを解消する打設方法の開発課題が残った．バイブロハンマーを用いた方法では，ケーシングをシートパイル（III型）としたケース 4 および 5 の打設時間が短かった．しかしながら，ケーシングの引き抜き時にシートパイルと共にドレーン材の上りが確認され，適用には事前の確認が必要であった．ケーシングを正方形としたケース 1～3 では五角形のアンカー形状のケース 3 の打設時間が最も短かった．ケーシングを引き抜く際にシートパイルではドレーン材の共上りが懸念される場合は，共上りの懸念が少ないケース 3 の仕様が有効であるとの結論を得た．

表-3　ドレーン打設方法の試験ケース

ケース	打設機械	ケーシング仕様	アンカー仕様
ｹｰｽ1	クレーン+バイブロハンマー	正方形（120mm）	長方形型
ｹｰｽ2			三角柱型
ｹｰｽ3			五角形型
ｹｰｽ4		シートパイル（Ⅲ型）	長方形型
ｹｰｽ5			三角柱型
ｹｰｽ6	アースオーガー	丸形（φ220mm）	三角柱型

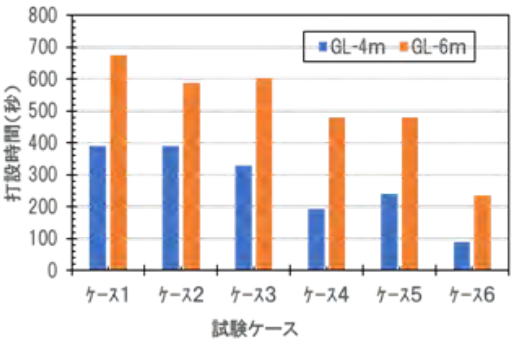


図-7　打設試験結果

⑶ 実証試験による油回収効果の評価

油の種類は多様であり，動粘度や揮発性などの特性は各々異なる．このため，地盤内の油の移動特性は，地盤条件だけでなく，油種によっても大きく異なる．従って，本技術の適用性を評価するためには，油種や土質の異なるサイトで実証試験を行うことが望ましい．今回の開発では，**表-4** に示す油種と土質の異なる 3 つのサイトで本技術の油回収効果を評価する実証試験を実施した[9]．

実証試験では，**図-8** に示す装置を用いて，地盤中の油を吸引回収した．ドレーン材は，地盤中に油層が確認された深さに約 l m の間隔で打設した．数本のドレーンを 1 本のヘッダーパイプに接続し，ヘッダーパイプを吸引槽に接続した．吸引槽に真空ポンプを接続し，その間に必要に応じて液体トラップと活性炭槽を設けた．また，圧力計をヘッダーパイプや吸引槽，真空ポンプに設置し，吸引圧を計測した．吸引槽に回収した油水は一旦回収槽に移送し，その後油水分離槽で油と水に分離した．吸引槽の手前にバイパス配管を介してサンプリング槽を接続し，経時的に油と水の単位時間当たりの回収量を計測した．得られた結果から，油と水の回収量の合計を「揚液量」とし，「揚液中の油比率」を算出した．3 サイトで実施した実証試験での揚液中の油比率を**表-5** に，各サイトの油の動粘度と共に示す．

地盤内の油の流れはダルシー則を適用でき，油の比流量（ダルシー流速）は油動水勾配 J_n (NAPL hydraulic gradient)と油透水係数 K_n (NAPL hydraulic conductivity）の積に比例する[10]．K_n は多孔体と流体の特性だけでなく，多相流であるため間隙中の油と水の飽和度にも依存する．K_n は油と水の飽和度で決まる NAPL 相対透過

度（k_{rn}）を用いた**式 1** で表記でき，K_n は NAPL の動粘度（粘性/比重）に反比例し，k_{rn} に比例する．

$$K_n = K_W \cdot k_{rn} \cdot \frac{\rho_r}{\mu_r} \qquad \cdots \text{(式 1)}$$

K_W：地盤の透水係数，ρ_r：NAPL の比重/水の比重，μ_r：NAPL の粘性/水の粘性，ρ/μ：動粘度の逆数

サイト A と C に関しては，式 1 で示すように油の動粘度と油の回収率との間に反比例の関係が認められたが，サイト B はこの関係から大きく外れた．k_{rn} は油の飽和度，すなわち油の存在量が多いほど値が大きくなる．サイト B での油層厚が 0～20 cm に対して，サイト A および C は油層厚が 50～100 cm であり，油の存在量に大きな違いがあったことが影響したものと考えている．

表-4　実証試験サイトの油種，土質，油層厚

	油種	土質，地盤	油層厚
サイト A	揮発性油	砂，シルト主体の埋立地盤	50~100 cm
サイト B	軽質油	N 値の高い砂礫地盤	0~20 cm
サイト C	潤滑油	砂，シルト主体の埋立地盤	50~100 cm

表-5　回収した揚液の油比率と対象油の動粘度

	揚液中の油比率	油の動粘度(mm²/s)
サイト A	80～99%	0.81
サイト B	0.04～1.6%	1.76
サイト C	3～18%	36.2

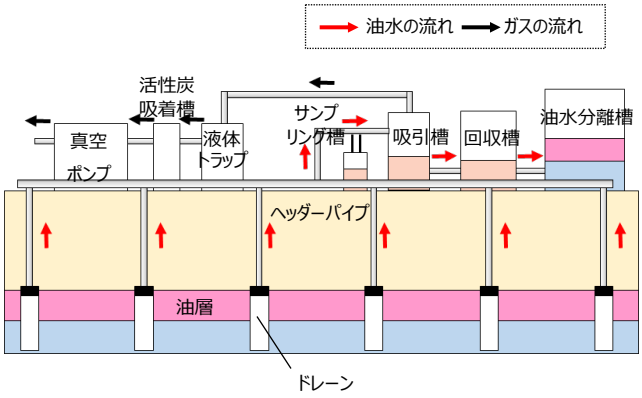


図-8　実証試験装置の概念図

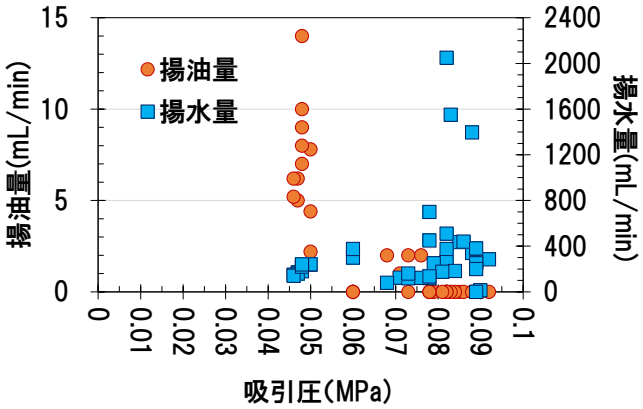


図-9　吸引圧と揚油量/揚水量との関係

実際の地盤で油の吸引回収を行う際に，吸引圧と揚油量が必ずしも正の相関を持たず，最適な吸引圧が存在する場合がある．サイト B で得られた吸引圧と揚油量の関係を**図-9** に示す．吸引圧 0.04～0.05 MPa で揚油量が最大となり，0.05 MPa を超えて吸引圧が増加するに従い揚油量が減少し，0.08 MPa 以上では揚油量はゼロとなった．一方，揚水量は吸引圧の増加と共に増加傾向を示した．

このような傾向は，油の地盤内での移動が同じ土壌間隙に存在する水や空気の影響を受け，

①水は油よりも土粒子表面への親和性（濡れ性）が高いこと

②油の粘性は水よりも大きく移動速度が遅いこと

③油の相対透過度は土壌間隙中の油の飽和度に依存し，油の量が少なくなるに従って油の動く速さが遅くなること

に起因すると考えられる．このように多孔質媒体内の多相流の特性を理解し，最適な吸引圧を検討する等の運転条件の最適化を行うことにより油回収の効率化をさらに高め，このことが，工期の短縮とコスト低減につながるものと考えている．

５．おわりに

本技術は，土槽試験による油の回収効果の定量的な評価と，様々な油種や土質条件の複数のサイトでの実証試験により，本技術の有効性を確認することができた．

本技術の特徴の一つとして，親油性の高いフィルター素材を使用していることが挙げられる．親油性が高い

ため，毛管現象により油をより高い位置まで吸い上げることができ，自然地下水位よりも上にフィルターが長く突き出た状態になっても油を吸引できるメリットを有する．実証試験では油層上端よりもドレーンの上端が 20 cm 以上突き出ていても油の吸引回収が可能であった．実際のサイトでは地下水位が，潮汐や季節変動の影響により 50 cm 程度変動することは少なくないため，このように実際の地下水変動に追従して油を吸引できる点は，実用上の大きなメリットと考える．

地盤に漏洩した油の原位置回収技術として揚水対策が一般的であるが，対策に数十年を要する事例は少なくない．一方，本技術は，揚水と共にガス吸引を同時に行う multi-phase extraction と呼ばれる技術であり，揚水により生じた動水勾配を利用して油を回収するとともに，ガス吸引により不飽和層に吸引圧をかけることで地下水面上の油を直接吸引回収する．このように，本技術は，揚水対策と比較して短時間で油を効率よく回収することを期待できる技術である．しかしながら，油の存在量の低下と共に油の回収効率も大きく低下することから，わずかに残った油も回収し，地盤内のすべての油を除去するために本技術を適用するのは効率的ではない．わずかに残った油を対策するには，化学的な抽出や微生物や酸化剤による分解などを併用し，経済合理性の高い技術の開発が必要である．

参考文献

1）瀬尾昭治，川端淳一，河合達司，永井文男，樋江井夕紀夫，小沢明正，牧内崇志，小林茂生；プラスチックボードドレーンを用いた揚水・注水と酸化分解を併用したシアン含有地下水の原位置浄化工法 ―豊洲新市場土壌汚染対策工事への適用―，土木建設技術発表会概要集，pp.140-147，2014.

2）ポリマー辞典編集委員会編；ポリマー辞典，大成社出版部，p.592，1970.

3）河合達司，福井久智，青山和史，三成昌也，小柳勇也；地中漏洩油の長期吸引回収のためのドレーン材の耐溶剤性評価，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol.77，p.VII-81，2022.

4）大塚誠治，河合達司，関弘，石神大輔，川端淳一，三成昌也，小柳勇也；ドレーン工法を用いた油回収に関する検討(その 2)，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol.73，p.VII-089，2018.

5）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報告書；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・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方－，平成 18 年 3 月.

6）環境省；土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第 3.1 版），Appendix-5. 土壌ガス調査に係る採取及び測定の方法，pp.Appendix5_1～11，令和 4 年 8 月.

7）青山和史，上野洋右，太田圭祐，河合達司，河野麻衣子，大塚誠治，瀬尾昭治；ドレーン材を用いた地盤中の油回収技術の開発～効果的な事前調査手法の確立～，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol.75，p.VII-70，2020.

8）川端淳一，福井久智，太田圭祐，河合達司，河野麻衣子，瀬尾昭治，大塚誠治，三成昌也，小柳勇也；油回収ドレーン工法のためのドレーン打設方法の検討，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol.75，p.VII-71，2020.

9）太田圭祐，河合達司，河野麻衣子，大塚誠治，瀬尾昭治，三成昌也，小柳勇也；実サイトにおけるドレーン材を用いた地盤中の油回収実績，土木学会全国大会年次学術講演会，Vol.75，p.VII-72，2020.

10）藤縄克之；環境地下水学，共立出版㈱，p.101，2010.