

特集

最新の土壌・地下水浄化技術

最新の原位置調査技術とその応用

原位置浄化対策におけるダイレクトセンシング技術の応用

(株)アイ・エス・ソリューション 小林 裕一・安原 雅子
(株)ランドコンシェルジュ 佐藤 秀之

はじめに

(株)アイ・エス・ソリューション(以下、ISS)では、土壌・地下水汚染の浄化対策において、これまでにフェントン原位置化学酸化技術(Fenton In-situ Chemical Oxidation)を主力技術とし、多くのサイトで土壌・地下水の原位置浄化対策を実施してきた。原位置浄化とは、土壌を掘削することなく対象物質を浄化する工法である。ISSでは、各種の浄化剤を目的の土壌・地下水に確実に到達させるため、浄化対象物質の種類や拡散状況、またはそれぞれの土地の現況に対応すべく、様々な工法を保有している⁽¹⁾。

それらの工法の中でも井戸注入工法やロッド注入工法と呼ばれる工法は、浄化剤を地上からポンプ等を用いて注入する工法で、注入井戸の設置後は小型のプラントで薬剤注入が可能である。そのため、敷地内の事業所の営業等を妨げることなく施工できることから、これまでに多くのサイトにおいて適用されてきた。

これらの工法を用いて原位置浄化の目標を達成するために重要なのは、事前の土壌調査において汚染の原因や拡散状況を正確に把握することである。例えば、ISSでもこれまでに多く浄化対策を手がけてきたガソリンスタンドの敷地では、埋設配管や地下タンクからの油の漏洩が汚染の原因になることがあった。その漏洩した油は、敷地内の地質の影響を受けて透水性の高い地層を水平方向に伝わる場合や、埋設構造物

に沿って深部に浸透している場合などがあり、汚染の広がりには必ずしも均一ではない。

そこでISSでは、土壌・地下水汚染の状況を的確に把握し、最適の浄化設計・施工をするための手法として、ダイレクトセンシング技術を活用してきた。ダイレクトセンシング技術とは、様々なセンサーを搭載したプローブを土壌へ押し込み、土壌中の汚染物質の濃度や物理的な情報を取得する技術である。従来から実施されているボーリングによるサンプリングが数十cmから1m程度の間隔で行われるのに対し、ダイレクトセンシング技術はデータを連続的に取得し、測定結果をその場ですぐに確認できることが最大の特徴である。

これらの技術は原位置浄化対策において有力な手法となると期待される。本稿では、ダイレクトセンシング技術の概要と、ISSの原位置浄化技術における本技術の活用の取り組みを紹介する。

1 ダイレクトセンシング技術

1-1 ダイレクトセンシング技術とは

ダイレクトセンシング技術とは、ダイレクトプッシュテクノロジー(表層調査において押し込み、打撃、またはバイブレーションを用いてロッドを土中に押し込む技術の総称)のひとつである。ロッドの先端に特殊なプローブを取り付けることによって、原位置において土質や汚

染物質の分布などのデータを取得することができる技術であり、我が国でもいくつかの使用例が報告されている^{(2)~(4)}。ダイレクトセンシング技術は1990年代から米国を中心に広がり、土壌・地下水の汚染状況を把握するための調査が積極的に行われてきた。以下にダイレクトセンシング技術に用いられる特殊プローブシステムの例を示す⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

(1) MIP (Membrane Interface Probe)

膜界面サンプリング・測定システム。ポリマー膜を介して地盤中の揮発性物質をセンサープローブ内に拡散させ、キャリアーガスに取り込んで地上の検出器まで運搬し、揮発性成分の濃度を測定する。

(2) FFD (Fuel Fluorescence Detector)

水銀ランプ誘導蛍光センサー。水銀ランプを励起源として、地盤中の燃料油中に含まれる多環芳香族炭化水素(PAHs)に誘導される紫外光(波長10~400nm)の蛍光反応を測定する。

(3) EC (Soil Electrical Conductivity)

電気伝導度/比抵抗コーン。コーン側面に電極を設置し、地盤の形状による電気伝導度または比抵抗特性の変化を測定して地盤の特性を測定する。また、間隙水の化学組成による違いにより塩水等の存在や濃度変化を把握する。

(4) HPT (Hydraulic Profiling Tool)

プローブ側面から土壌に注入される水の注入圧の変化を測定し、地層の水利特性による違いを評価するシステム。

(5) CPT (Cone Penetration Test)

電気式静的コーン貫入試験。先端抵抗、間隙水圧、周辺摩擦抵抗の三つの成分を検出し、地盤強度に関する情報から、土質分類、支持力、液状化、圧密沈下の検証が可能。

1-2 土壌・地下水汚染の調査におけるダイレクトセンシング技術の活用

ボーリングによって得られる土壌調査を補完し、鉛直方向により細かい間隔で対象物質の分布を把握することにより、汚染状況や地質構造

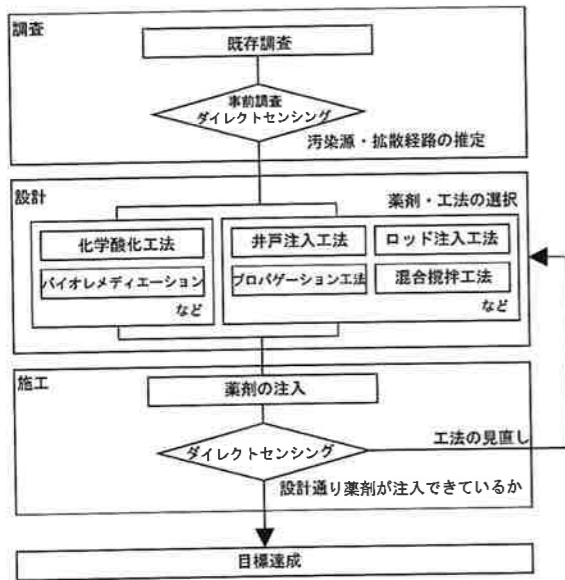
の読み間違いによる浄化対策の失敗や、施工着手後の設計変更を防ぐために、MIP、HPT、ECプローブのようなダイレクトセンシング技術を用いたサイトの特性評価を実施する流れがある。浄化対策の実施前には、対象とする土地の細かな透水性の違い、吸着や溶解の状態、油相(フリーフェーズ)や気相の状態等を評価することがプロジェクトの成功に重要な意味を持つといえる。また、透水性の詳細な把握については、汚染物質の移動が帯水層の透水性構造によって大部分がコントロールされるという認識に基づいている。さらに、効果的な浄化を進めるためには、浄化適用前に加えて、浄化中の汚染物質の減少や薬剤等の注入による汚染物質の移動の把握、浄化後の適切なモニタリングが必要であるといえる。これらを踏まえ、サイトの特性評価を実施するために、ダイレクトセンシング技術が積極的に活用されている。

2 原位置浄化対策におけるダイレクトセンシング技術の応用事例

2-1 ダイレクトセンシング技術の位置づけ

原位置浄化対策の実施にあたっては、それに先立ち事前調査を実施する。これにより汚染源や汚染物質の拡散経路を推定し、対象地の状況(裸地か、事業所が営業中かなど)を考慮して最適な施工方法を選択する。ISSでは、この事前調査においてダイレクトセンシング技術を活用し、浄化対策の設計に役立てている。

事前調査では、従来から実施されている土壌調査に加え、MIPを用いて調査を行い、ボーリングにおけるサンプリングよりもさらに細かい間隔で深度方向の対象物質の濃度を測定し、汚染源や拡散経路の推定に反映させている。さらに、ダイレクトセンシング技術を応用し、浄化工事施工中においてフェントン反応剤が目的とする地層に確実に浸透しているかをモニタリングする方法を試みている。ISSでは、これらの



第1図 調査から浄化におけるダイレクトセンシング技術の位置づけ

方法によって対象地ごとに最適な浄化設計を行い、きめ細かい施工管理によって確実な浄化達成につなげている(第1図)。

2-2 ガソリンスタンド跡地でのMIP調査と対策の設計

ガソリンスタンドにおける調査ならびに浄化においては、ガソリンに含まれているベンゼンが対象となることが多い。先にも述べたとおり、ガソリンスタンドにおける汚染の原因は、埋設配管や地下タンク、計量器付近に認められる場合が多いが、その拡散経路は透水性の高い地層や地下構造物の周囲など、様々である。原位置浄化対策を設計するにあたっては、汚染源を特定し、どの範囲に高濃度の対象物質が拡散しているかを正確に把握することがとても重要である。それらの汚染状況を把握するための方法として実施した、MIPによる調査事例を紹介する。

MIPはプローブの先端に特殊な膜(メンブレン)と電極が設置されており、地中の揮発性有機化合物(VOCs)の総量および電気伝導度(EC)を同時に測定することができる。MIPの主な特徴を以下に示す。また、写真1、写真2



写真1

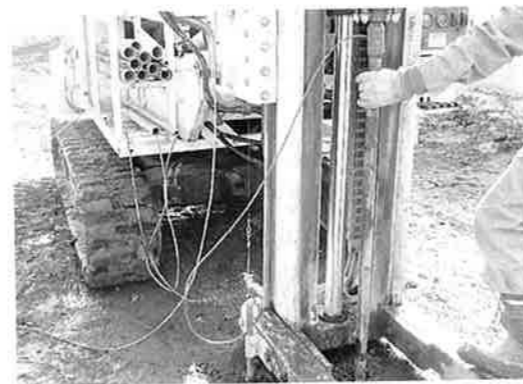
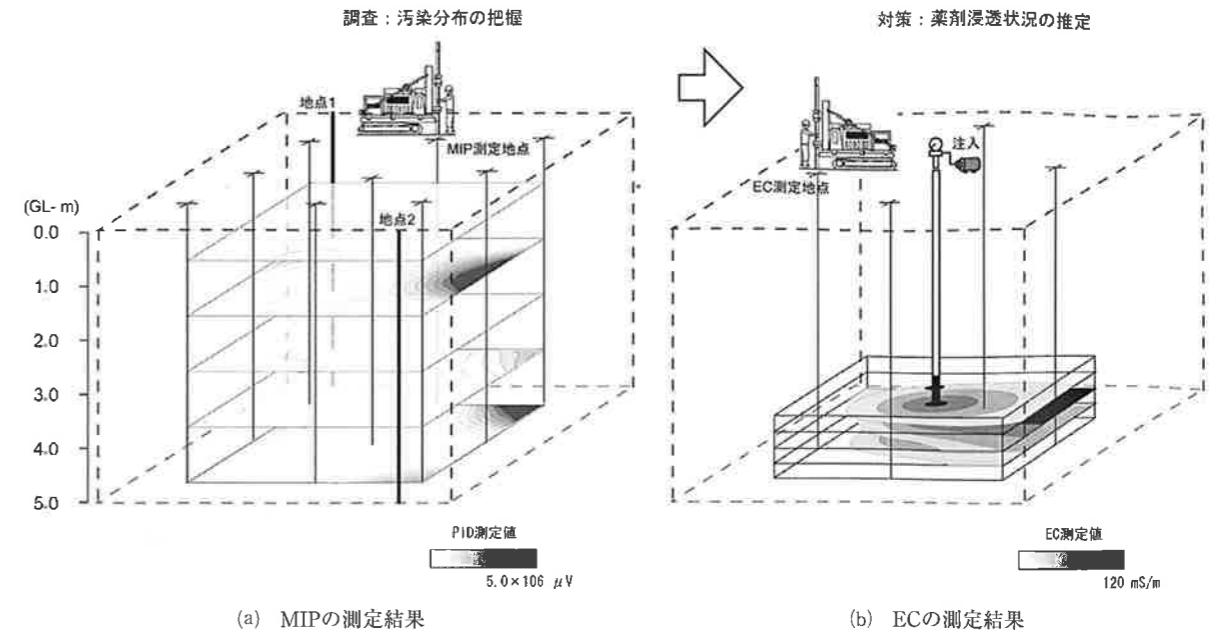


写真2

にMIPの測定値表示部とプローブの打設状況をそれぞれ示す。

- ① 鉛直方向の地質特性や汚染状況を連続的に取得することができる → 汚染の見逃しなくなる。
- ② 測定結果はリアルタイムで確認ことができ、その結果に基づき随時測定地点を変更することが可能である → 効率的に調査を実施することができる。
- ③ 得られるデジタルデータからサイト状況をグラフ、二次元、三次元画像などで解析することができる → 汚染状況を速やかに、より正確に把握できる。

調査対象としたガソリンスタンド跡地の土壌は、地表～深度1.5mは礫を含む砂～シルト質の埋土、深度1.5～3.0mは黒ぼく土または凝灰質シルト、3.0～6.0mは砂礫から構成されてい



(a) MIPの測定結果

(b) ECの測定結果

第2図

る。地下水位は深度約3.6mに認められた。既存調査において2地点でベンゼンが検出された。既存調査地点とMIPの調査結果を第2図(a)に示す。地点1においては深度4.0mの土壌から基準を超えるベンゼンが、地点2においては地下水から基準を超えるベンゼンが検出されていた。MIPによる調査は、既存調査が実施されている2地点(地点1および地点2)に挟まれた範囲の中において、2mピッチで9地点実施した。MIPの地中への挿入は打撃式ボーリングマシンを使用した。

調査の結果、既存調査ではベンゼンが検出されていなかった、深度2.0mと3.0mの間、また4.0mから深度5.0mの間にもベンゼンが存在していることが分かった。このことから、2.0mよりも浅い深度で漏洩した油分が、透水性の低いシルト層の上部を伝わるとともに、地下構造物等を伝わって下位の砂礫層に浸透し、地下水を介してさらに水平方向に拡散していると推定することができた。

この結果をもとに、当該ガソリンスタンドの跡地では、飽和土および地下水のベンゼンを対

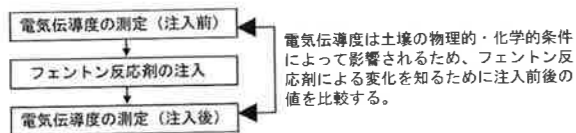
象とした原位置浄化対策として、フェントン反応剤のロッド注入を実施することとした。ロッド注入では、ボーリングロッドを深度5.0mまで打ち込み、1mずつ引き上げながらフェントン反応剤を地上に設置したポンプにより注入した。

2-3 ECプローブによるフェントン反応剤注入の施工管理

原位置におけるフェントン反応剤の注入では、薬剤の浸透を目で確かめることはできない。もし土壌中における薬剤の浸透に偏りがあれば、設計通りに浄化が進まず、汚染の残留や、浄化達成までの工期延長なども予想される。そこで、ISSでは原位置浄化対策の施工中において、フェントン反応剤の土壌中への浸透状況を把握し、その結果を速やかに施工にフィードバックするために、ダイレクトセンシング技術の応用を試みている。

フェントン反応剤の浸透状況は、フェントン反応剤の浸透した土壌が、浸透前と比較して高い電気伝導度を示すことを利用し、ECプローブを利用して土壌の電気伝導度を測定することにより推定している。

土壌の電気伝導率度に影響を与える要因としては、フェントン反応剤の他にも土壌の粒度組成や含水量などがあると考えられる。そのため、電気伝導度はフェントン反応剤の注入前に対象とする範囲において測定しておく必要がある(第3図)。



第3図 電気伝導度測定の手順

使用するECプローブのセンサー部には4つの電極が配置されており、外側の2つの電極間に交流電流を流し、中央部に配置された2つの電極間の電圧を測定することにより地中の電気伝導度を求める。この装置は、深度5m程度であれば1地点当たり10分ほどで測定を完了することができ、2.5m間隔で測定したと仮定すると、およそ200m² (1,000m³) の測定が1日で可能である(写真3)。



写真3 ECプローブ

第2図(b)は、前述のガソリンスタンド跡地において、飽和帯の土壌・地下水を対象として実施した、フェントン反応剤のロッド注入の開始後にECプローブによって測定された電気伝導度の測定結果である。深度4.0~5.0mの注入範囲における注入前の電気伝導度はおよそ10~20 mS/mの間で、大きな変化はなかった。フェントン反応剤の注入開始後まもなく電気伝導度の測定を開始したところ、測定値の明らかな上昇が認められた。フェントン反応剤が土壌へ浸透

した影響であると考えられ、MIPの測定において、地下水を介してベンゼンが拡散していると考えられた深度4~5mの範囲にフェントン反応剤が浸透していることが確認できた。

おわりに

ダイレクトセンシング技術は、土壌・地下水汚染の調査および対策において、浄化を確実に達成させるためのとても有力な手法になると期待している。しかしながら、MIPなどのダイレクトセンシング技術による土壌調査は国内ではまだなじみ深いとはいえ、今後さらに施工事例を積み重ねることで信頼性の向上を図ってゆきたい。また、ダイレクトセンシング技術を応用した原位置浄化対策におけるフェントン反応剤注入の施工管理では、対象となる土地の地質構造や土壌の物理的、化学的状況が多様であり、あらゆるサイトにおいて当技術を活用すべく、さらに施工事例を増やし、調査精度の向上を図っていききたい。

<参考文献>

- (1) 大澤武彦：“第三世代の原位置化学酸化技術”、環境浄化技術、Vol.9、No.9、pp.33-37 (2010.9)
- (2) 高木一成・深田園子：“ダイレクトセンシング技術を使用した油汚染の分布調査”、土と基礎、Vol.54、No.5、pp.19-21 (2006)
- (3) 安原雅子・山内仁・中間哲志・今村幸則・田中正利・佐藤秀：“膜界面サンプリング分析法によるベンゼン・油汚染地の評価と原位置浄化設計への適用”、第12回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、S1-7 pp.32-35 (2006)
- (4) 吉村雅仁・菊地達也・山野賢一：“原位置センシング技術を用いた浄化確認精度の向上”、第12回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、S5-5、pp.630-633 (2006)
- (5) 中島誠：“CPTの地盤環境分野への展開”、特集 最新のCPTテクノロジー、地盤工学会誌、Vol.57、No.8、Ser.No.619、pp.12-15 (2009)
- (6) John H.Sohl III., 2011. High-Resolution/3D Site Characterization Approaches and Technologies: Conference Platform Paper, The 2011 North American Environmental Field Conference & Exposition.

(筆者紹介はp.124参照)

特集

最新の土壌・地下水浄化技術

VOC対策のための微生物活性型浄化剤

ADEKA総合設備(株) 富岡 英和

はじめに

当社は、揮発性有機塩素系化合物による土壌・地下水汚染に対し、薬剤注入を中心とした原位置浄化工法を実施している。具体的には、在来微生物の活性剤の注入による微生物分解、酸化剤注入による化学的酸化法、また、それらの組み合わせにより土壌と地下水の浄化を実施している。このうち、在来微生物の活性剤の注入による微生物分解は、環境負荷が比較的小さいため今日、注目が集まっている。

1 微生物浄化の実際

微生物浄化は理想的な条件下で実施されるビーカーテストとは異なり、対象となる地層や地質、地下水の流動(薬剤の拡散)、汚染の存在状況、そして在来微生物の生息状況に大きく左右される。

ビーカーテストで安易に設定した浄化期間をそのままに、微生物の活性剤の選定を行うと、浄化期間に大幅な乖離が生じ、微生物活性剤の効果切れと、それに伴うリバウンド、浄化対象物質の脱塩素反応が途中で止まってしまうなどの状況が生じるため、当社では以下点に注意して微生物活性剤の選定を行っている。

特に微生物の存在は最も重要なため、当社では事前に微生物の生息状況について、分析を実施している。その後、ビーカーテストで微生物

第1表 微生物活性剤選定の目安

浄化される速さ	速い ⇄ 遅い
薬剤の拡散(地質)	砂層均一 ⇄ 粘土、シルト混じり
汚染の存在状況	土壌吸着ない ⇄ 土壌吸着あり
微生物の存在状況	微生物多い ⇄ 微生物少ない

分解が最終段階まで進むことを確認してから適用している。

第1表より浄化される早さが速いと推定される場合は、粉末や液体を水溶液として注入する活性剤を使用する。それ以外の場合は粘稠液の原液注入タイプの薬剤を使用し、長期間の効果持続をねらう。

2 水溶液タイプ微生物活性剤適用例

水溶液タイプ微生物活性剤の適用例を示す。当現場は、地層は砂層であり、地下水汚染のみが存在する個所であった、このため浄化期間が短いと予想され水溶液タイプの土壌浄化剤を使用した。

地層が砂層で理想的だったこともあり、土壌吸着汚染もないため、再溶出によるリバウンドも無く約180日で浄化が完了した。

3 粘稠液タイプ微生物活性剤適用例

粘稠液タイプ微生物活性剤の適用例を示す。