

原位置浄化のためのダイレクトセンシング技術による事前評価

○田中 智（エンバイオ・エンジニアリング）、和知 剛（同）

1. はじめに

揮発性有機化合物による土壌汚染の浄化工法として、現状では、掘削除去による場外処分を選択されることが多い。揮発性有機化合物による汚染であれば、化学酸化や微生物分解等による原位置浄化を選択することも、工法的には可能であり、浄化コストも掘削除去と比較すると安くなるケースが多い。弊社では、創業時より米国からフェントン剤注入による原位置浄化を導入し実績を重ねてきた。その後、微生物分解促進剤によるバイオレメディエーションやオンサイト土壌洗浄等の技術も取り入れてきた。しかし、原位置浄化は、掘削除去と比較すると、確実性は低く、工期も長くなることから、実際のところ薬剤を計画以上の回数を注入することで、浄化完了となることもある。

原位置浄化において、浄化目標に到達しない理由としては、既存調査よりも実際には高濃度の汚染物質が存在することにより、分解に必要な薬剤が不足する場合が最も多いと考えられる。掘削除去であれば、実際に既存調査結果よりも高濃度汚染が存在しても物理的に取り除かれてしまうので問題はない。しかし、原位置浄化は汚染濃度に応じた薬剤量を処方しないと目標濃度まで低下しないため、事前に高密度に汚染分布を把握しておく必要となる。薬剤注入による原位置浄化の場合、薬剤注入井戸から汚染のある場所まで薬剤が到達できるか、薬剤の拡散性を地層の透水性という観点から評価しておくことが、浄化を成功させる上での重要な要因となる。

各種センサーを地中に打ち込むことで、土壌汚染および透水性を迅速に評価できるダイレクトセンシング手法について紹介する。

2. 土壌・地下水汚染の3次元的な評価

(1) 必要とされる評価条件

薬剤注入による原位置浄化では、事前に詳細な3次元的な汚染分布を把握する必要がある。既存調査により汚染物質の種類や到達深度の情報が存在する場合、浄化の事前調査においては、必ずしも採取した土壌を全て公定法で分析し汚染の分布を求めることが必須ではない。既存調査で把握されていない局所的な高濃度汚染が浄化対象範囲に存在するかどうかを明らかにすることが重要である。そのためには、単点での分解生成物を含めた高精度の汚染濃度情報よりも、多地点での鉛直方向に連続的に土壌汚染の概略濃度を把握し、原位置浄化が困難な高濃度汚染の位置を明確にする方が、原位置浄化を成功に導く上では重要であると考えている。

土壌・地下水汚染の詳細分布の作成には、センサーを打ち込みながら、揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds、以下 VOCs）の汚染濃度を、連続的に、かつ、リアルタイムに測定できる Membrane Interface Probe^{注3)}（以下、MIP）を用いる。また、揮発成分が乏しい油の詳細分布を把握するためには、近年開発された Optical Image Profiler（以下、OIP）を用いる方が効率的である。

(2) MIPによる調査

MIP システムは、ボーリングロッドの先端のプローブのヒーターで土を熱し、VOCs をガス化させ（図 1）、メンブレン膜を介してプローブ内に取り込み、地上の検出器で分析する（図 2）。検出器は PID（光イオン化検出器）を用いるが、対象とする汚染物質の種類により適切なものを選択する。

メンブレン膜には、水を通さずガスのみ通過させる性質があるため、不飽和帯だけでなく、飽和帯中の VOCs についてもプローブ内部に取り込むことができる。ただし、このシステムでは存在する VOCs の総量を電圧強度にて測定するしくみであるため、個々の汚染物質の濃度を定量する訳ではない。

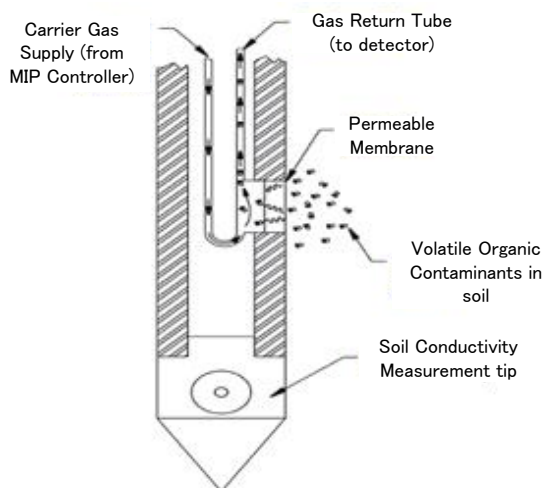


図 1 MIP プローブの構造

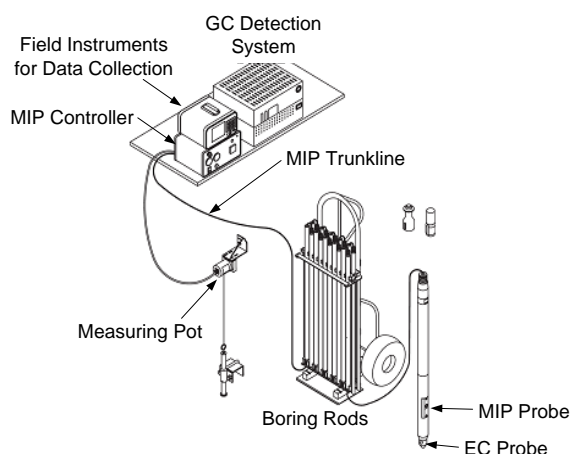


図 2 MIP システム

（3）OIP による調査

OIP 装置は、紫外線を燃料油に当てると蛍光を発する現象を利用した検出装置である。石油業界では古くから探鉱の場面で用いられてきた技術であり、ボーリングコア、カッティングスライムおよびボーリング孔内で油の有無を把握するために、対象物に紫外線を照射し蛍光反応をみるものである。

OIP のプローブの外観をみると、土壌の電気伝導度を測定するためのダイポール型の電極が先端付近に付属し、その上に直径約 13mm の窓にサファイヤガラスが装着されている（図 3）。プローブには、波長が 275nm の紫外線および可視光を照射する発光ダイオードならびに小型カメラが内蔵されている。紫外線により蛍光反応を生じた場合や可視光での地層の反射光を確認する場合、小型 CMOS センサーを内蔵したカメラで蛍光や可視光の反射光を電気信号に変換する。

蛍光反応が確認された場合、蛍光発光の面積（%AF）を OIP 専用のソフトウェアにより計算し、記録される（図 4）。画像は毎秒 30 フレームの速度でカメラに取り込まれ、それらの平均値を深度 15mm 毎に蛍光面積（%AF）として記録する。また、EC プローブにて測定された土壌の電気伝導度の測定結果も別途記録される。

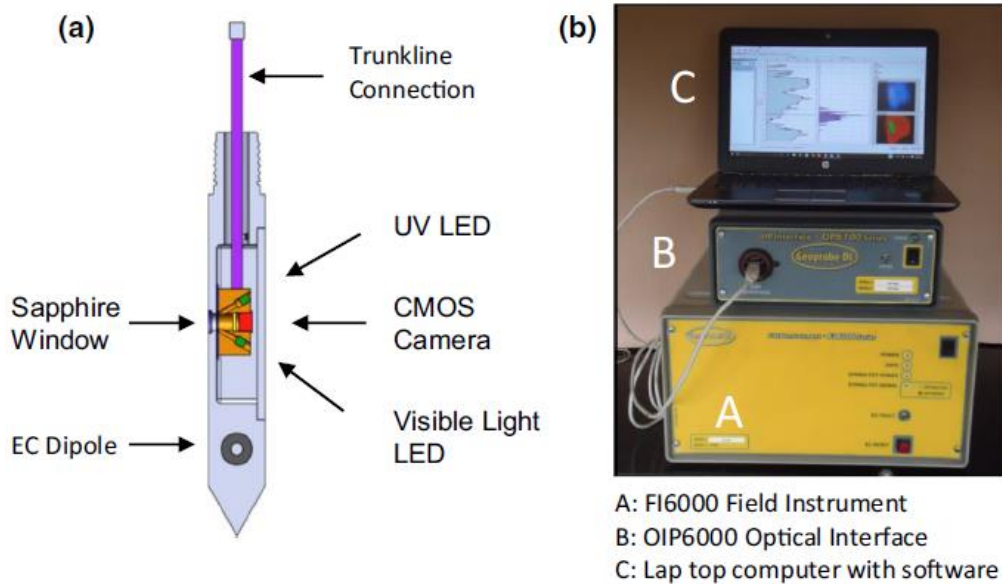


図3 OIPシステム構成

(a) OIPプローブの基本構造、(b) OIPの現場測定機材

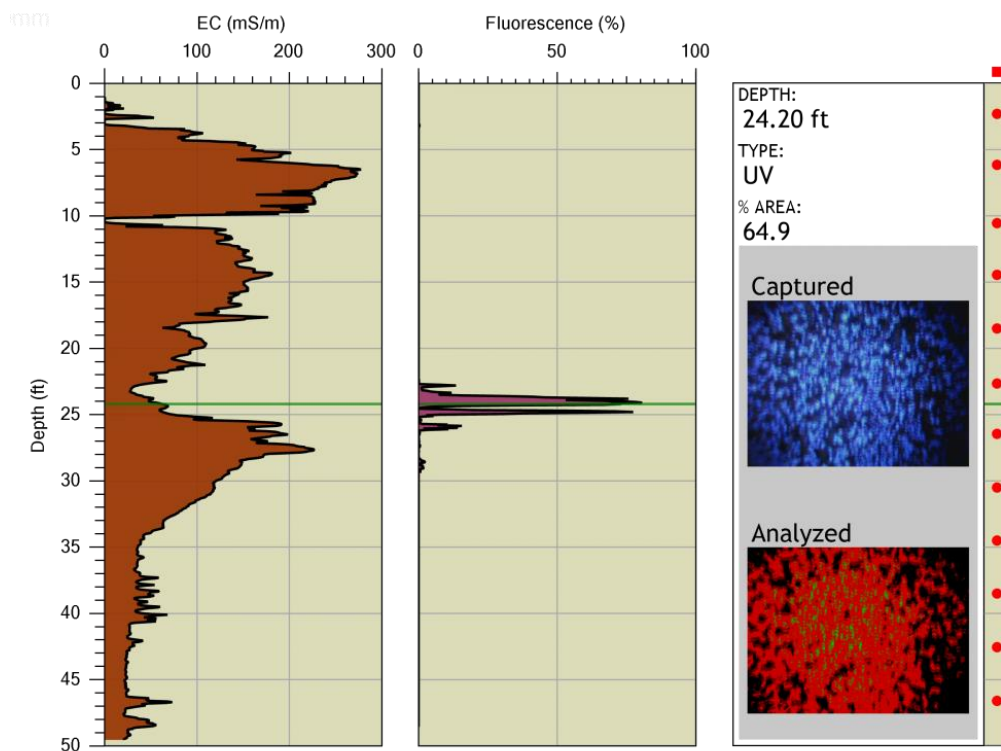


図4 現場測定記録用ソフトウェア表示

(左) 電気伝導度 (中)、蛍光面積率、(右) 測定深度 24.2 フィートでの蛍光面積率 64.9%と取り込み・解析画像

3. 透水性の連続簡易試験

(1) 測定手順

装置は、ダイレクトセンシング技術のひとつである Hydraulic Profiling Tools (以下、HPT) を使

用した。装置の概要を図 5 に示す。

装置は、水を吐出する孔および 4 つの電極を備えたプローブ、ボーリングロッド、水タンク、ポンプおよび流量計を内蔵したコントローラー、データの表示記録装置および自走式ボーリングマシンから構成される。

HPT プローブには、透水性を測るための水の吐出口以外に、土壌の電気伝導度（以下、EC）も連続的に測定するために、ウエナナー配置（4 ピン）の電極が配置されている（図 6）。このため、HPT プローブの打ち込み時は、直接吐出する水の圧力および電気伝導度の両方のデータがリアルタイムに測定できることから、地層の透水性を水の吐出圧力と電気伝導度から推定される地質の 2 つのパラメータから多面的に評価することが可能となる。

一般的に、土壌の電気伝導度の測定では、粘土やシルトは、砂や礫に比べて電気伝導度が高い。一方、吐出圧に着目すると、粘土やシルトは、砂や礫と比較すると吐出圧が高い。このように、電気伝導度と吐出圧には正の相関が認められる。しかしながら、地層の間隙を飽和している液体が淡水の地下水でなく、塩水の場合や過去に電気伝導度の高い液体を注入した場合等、必ずしも前述の電気伝導度と吐出圧の関係は成り立たなくなることから、両者の測定結果を比較して、透水性を評価する必要がある。

HPT による測定のながれについて説明する。まず、タンクの水をポンプで吸い上げ、ボーリングロッド内部の送水管を通して先端の HPT プローブ側面の孔から外部に向けて水を噴射する。プローブ内部に設置されている水圧計により、吐出圧は常時モニタリングされ、粘土やシルトのような難透水性の地盤では吐出圧が高まり、粗粒な砂などの透水性が高い地盤では相対的に吐出圧が低下する。打撃式ボーリングマシンで HPT プローブを打ち込むことにより、15mm 打ち込む毎に 1 回の頻度で吐出圧と送水流量が連続的に記録される。

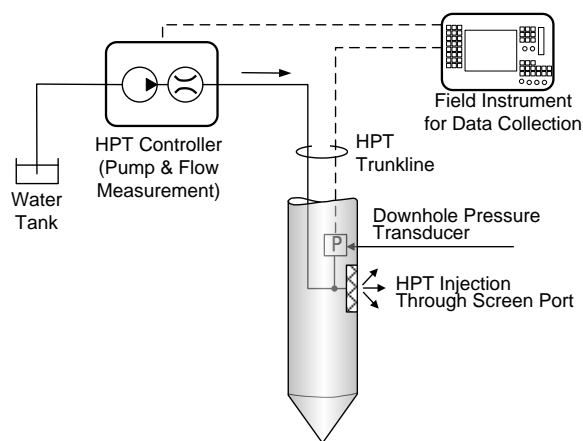


図 5 HPT システム装置概要

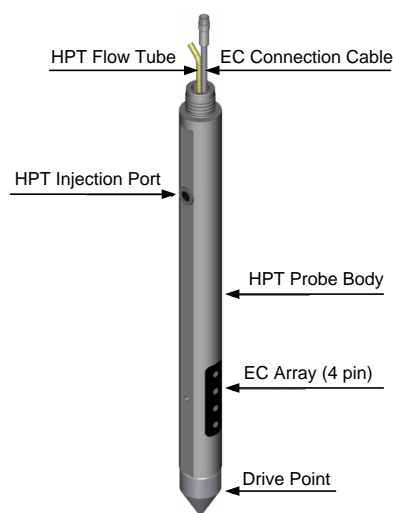


図 6 HPT プローブの概要

(2) 長所および制限

HPT プローブは、水圧計のような精密部品を内蔵しているものの、打撃により打ち込むことができるため、測定時間の短縮を図ることができる。加えて、図 5 に示すデータ記録装置、ポンプやコントローラーはコンパクトにまとめられ軽量であるため、台車などを用いて狭い通路でも移動しやすい。

測定する地質状況と水圧計の能力により HPT システムの適否が決まる。適用できる地質は、固結していない粘土、シルト、砂や礫に限定される。プローブ内蔵の水圧計は、およそ 700kPa が限界であるため、実質的には、地層の水理特性にもよるが、地下水面下 36m が限界とされる。

4. 調査事例

(1) 対象地の概要

調査を実施したのは、トリクロロエチレンを取り扱う電子機器工場の跡地であり、既存ボーリング調査で土壌・地下水汚染が存在していることが判明しているサイトである。しかし、既存調査時には、建屋および基礎構造物が残っていたことから、汚染源の正確な位置、汚染の詳細な分布および拡散のメカニズムが十分に把握できていなかった。また、土壌汚染が深度 20m 付近まで認められていることから、ホットスポットの掘削除去等の割合を極力減らすとともに、原位置薬剤注入を主とした浄化計画を策定するために、MIP および HPT による詳細調査を実施した。

(2) 調査結果

代表的な断面を図 7 に示す。不圧地下水が深度 8m 付近に存在し、地下水はおよそ A1 から A4 方向に流れている。

MIP の結果から、汚染物質は深度 16m 付近の砂質シルトと上位のシルト質砂との境界付近に存在していることが確認された。

一方、HPT の結果から、いずれの地点でも水圧は 15m 以深で極端に高くなり、測定限界の 700kPa を超えていることから、この深度以深に透水性が極端に低い地層が存在していることが確認できた。

(3) 評価

MIP と HPT を用いたダイレクトセンシングにより、図 7 に示したように、汚染物質の詳細な濃度ばかりでなく、地層の透水性についても詳細な分布を把握することができた。これまで地層の透水性については、ボーリングコア観察結果に基づいた推定により評価していた。しかし、HPT を用いたダイレクトセンシングにより、実際に水で測定した透水性の連続した鉛直分布を把握できた。

今回は検出されなかったが、原液を伴うような高濃度汚染が検出された場合には、その周辺で高密度に MIP 調査を行い、詳細な濃度分布を明らかにし、高濃度汚染を効率的に安価に除去する方法を検討することが必要となる。

今回の調査では、HPT 調査はおよそ深度 18m の測定を 1 日あたり 5~6 地点、MIP 調査は同深度で 1 日あたり 2~3 地点を施工することができた。

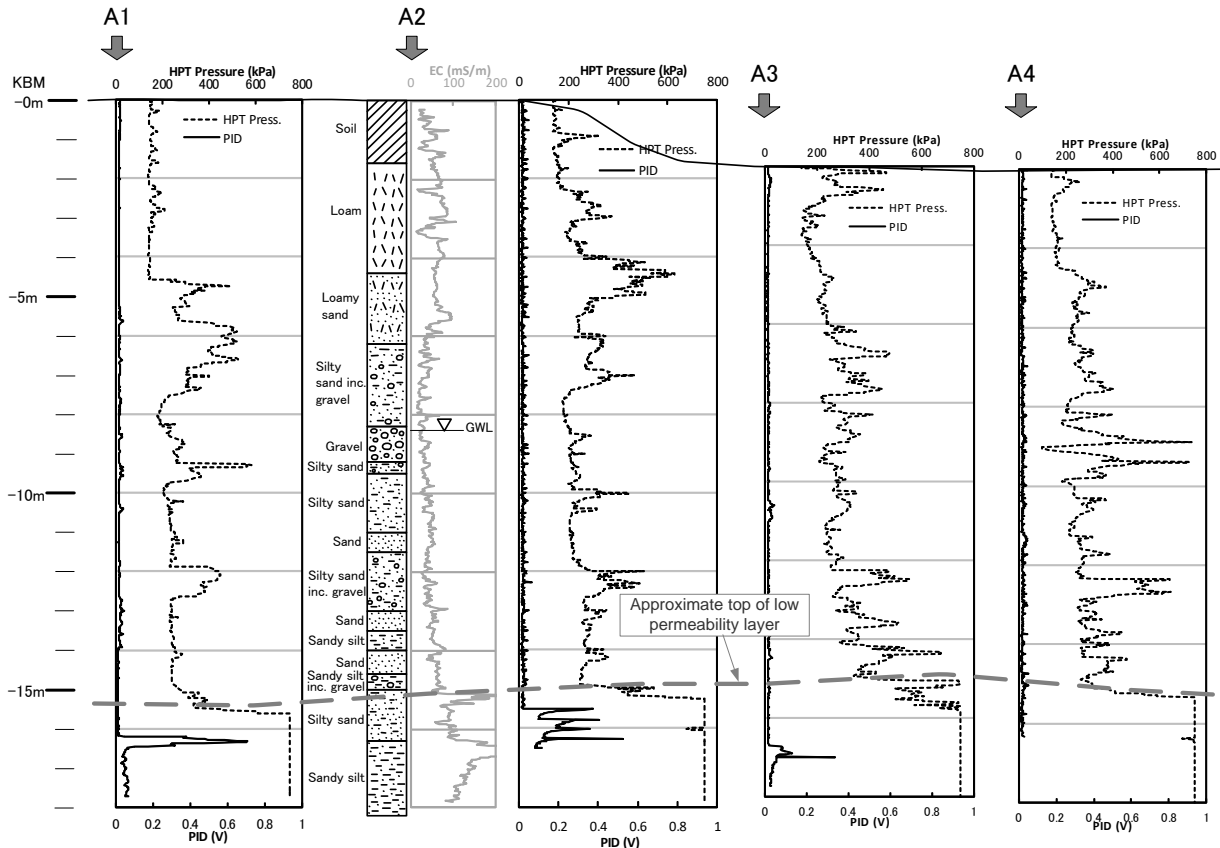


図7 HPT調査の水圧分布とMIP調査のPID検出状況の断面評価

5. おわりに

ダイレクトセンシング技術であるMIPおよびHPTを組み合わせた調査結果を用いることにより、詳細な汚染位置と地層の透水性を分かりやすく表現できることが可能となった。これらの調査結果がリアルタイムに表示されることで、現場技術者がこれらの測定をしながら、汚染の詳細分布や薬剤注入時の拡散性をイメージすることが可能となったことで、より高度な次元で浄化の設計を行うことができると思う。

最近では、MIPとHPTがひとつになったMIHPTプローブも開発されている。紹介した事例では、塩素化VOCsの調査であったが、揮発しにくい機械油が対象である場合には、OIPを用いることで汚染の詳細な三次元分布を迅速に把握することが可能となる。

今後、様々なサイトでダイレクトセンシング技術を活用し、原位置浄化対策の精度向上に活かしていきたい。

参考文献

- 1) 佐藤秀之・吉村雅仁 (2007) : 地下水浄化設計における注入量算出手法の検討～原位置水理地質特性評価、日本地下水学会2007年秋季講演会予稿集。
- 2) Steve Knobbe (2006) : Hydrostratigraphic Characterization using the Hydraulic Profiling Tool (HPT). Geoprobe Systems Technical Bulletin: MK3099.
- 3) 和知剛・小林裕一・清水祐也・北詰昌義・川元勇治 (2012) : 電気伝導度測定による地層判定、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、第18回講演集. p257～260.
- 4) 小林ほか (2013) : ダイレクトプッシュテクノロジーによる3次元汚染の把握と浄化設計への活用、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、第19回講演集. p554～555.
- 5) 和知剛・小川えみ (2015) : 連続式簡易透水試験を用いた汚染の評価および浄化設計、日本地下水学会、2015年春季講演会。