

マルチプローブ(水分・電気伝導度・温度)を用いた地盤への汚染物質の浸透過程におけるモニタリング-プロファイリング

日大・理工

下辺 悟

日大・理工

齊藤 準平

日大・理工(院)

小野 亮

日大・理工(学部)

○土橋 由弥

日大・理工(学部)

中村 正太郎

1 はじめに

地盤環境汚染問題において、地盤内の汚染状況を的確に把握することは重要である。本研究は汚染状況のモニタリング-プロファイリングの開発を目指して、Hydra Probe II マルチプローブ(水分・電気伝導度・温度)(以下、HP II とする)を用いたキャリブレーション試験により、NAPL(非水溶性液体)量測定等への適用性を検討した。さらに、HP II を用いた大型土壌カラム試験を行い、汚染物質の浸透に伴う汚染の経時変化におけるモニタリング-プロファイリングの適用性を検討した。

本研究では、含水(油)量(体積含水(油)率等)を推定するために従来から用いている誘電率 ϵ に加えて、電気伝導度 EC を導入した。これは、汚染の評価に利用できるのではないかと着目したからである。

なお、本稿では NAPL での検討を行う前にあらかじめ、蒸留水を液相として採用し基礎的な検討を行った。

2 試験方法

ここでは、HP II のキャリブレーション試験および大型土壌カラム試験の試験方法について述べる。

(1) HP II のキャリブレーション試験

HP II は、センサロッドを土中に挿入することにより誘電率 ϵ 、電気伝導度 EC および土中温度を求めることができるセンサである(図1参照)。

センサの出力値から含水(油)量を求めるためにはこれらの関係性を明らかにする必要があり、その手段がキャリブレーション試験である。キャリブレーション試験は、下辺(2004)¹⁾の方法を参考にした。



図1 HP II (金属部分がセンサロッド)

キャリブレーション試験は、まず、供試体作製用モールド(内径約 7cm、深さ約 9cm)に1層につき 90N の力で5回押込み、それを9回(1層=1cm)行った。なお、供試体の表面は平滑に成形した。

Monitoring - Profiling in Infiltration Process of Pollutant to Ground Using the Multiprobe (Water Content, Electrical Conductivity, Temperature)

Satoru SHIMOBÉ, Junpei SAITO, Toru ONO, Yuya DOBASHI and Shotaro NAKAMURA

次に、供試体の表面 3 か所に HP II のセンサロッドを根元まで注意深く挿入し、出力されるパラメータの平均値を測定した。その後、JIS 炉乾燥法により含水量の実測値を求めた。今回の試験に用いた試料は、砂質土である山砂（千葉県東金産）および火山灰質粘性土である関東ローム（千葉県船橋産）と火山灰質有機質土である黒ぼく（栃木県鹿沼産）の 3 種類である。

(2) 大型土壌カラム試験

大型土壌カラム試験は、汚染物質の浸透に伴う含水(油)量の変化を経時的にモニタリングし、その結果から土壌内における汚染物質の浸透挙動について検討(プロファイリング)するために提案した試験方法である。本研究で用いた大型土壌カラム(内径 30cm, 高さ 33cm)試験装置は、120°間隔で HP II を設置することによりセンサを設置した高さにおける同一平面上での土層への汚染物質の浸透の様子を、中層および下層において計測できるように設計されている(図 2 および図 3 参照)。



図 2 大型土壌カラム試験装置

さらに、水平方向と鉛直方向で物質移動の異方性が生じるのかを検討するために中層および下層にセンサを鉛直に設置した。供試体の作製は、試料である山砂を空中落下法によりカラム内に入れ、最上部である中層の表面を平滑に成形した。試験ではまず、中層の上部に蒸留水による湛水層を 10cm 確保し、まんべんなく土中に浸透可能な状態とした。蒸留水を流し込み始めた時間を 0 分とし、HP II を用いたモニタリ

ングを行った。これらの試験方法は下辺ら(2014)²⁾を参考にした。

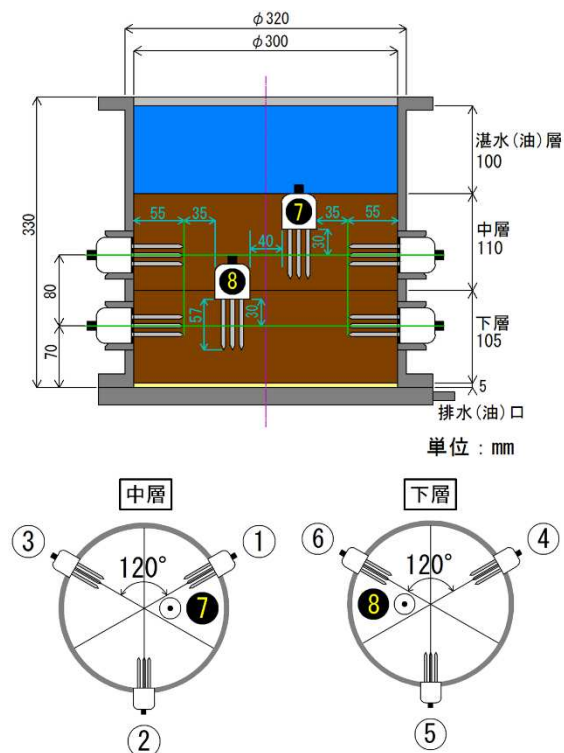


図 3 本装置の模式図と HP II の設置位置

3 試験結果と考察

(1) HP II キャリブレーション試験

ここでは、モニタリング - プロファイリングにおいて重要となるセンサからの出力値(誘電率 ϵ)と含水量の関係および電気伝導度 EC について検討する。

まず、誘電率 ϵ と含水量を表すパラメータである体積含水率 θ_w の関係について図 4 に示す。なお、体積含水率 θ_w は式(1)で定義される。ここで、 V_w : 液相の体積、 V : 全体の体積である。HP II と比較するために図中に本研究室で多くの実績がある ADR 土壌水分計(以下、ADR とする)と林(2001)³⁾および諸泉ら(2008)⁴⁾による豊浦標準砂の結果の結果を併記する。

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} \quad (1)$$

図 4 より、第一に誘電率 ϵ と体積含水率 θ_w の

間に強い正の相関関係($R>0.96$)があることが分かる。さらに、HPⅡの山砂は、同じ砂質土の豊浦標準砂の結果である林(2001)³⁾および諸泉ら(2008)⁴⁾やADRの傾向に比較的近いことが確認できる。ゆえに、試験者やセンサという要因が異なっても同等の結果が得られると考える。第二に、砂質土に対して火山灰質粘性土と火山灰質有機質土の傾向が異なっている。これは、保水性などの土の特性が出力値に反映されたものであると考えられる。ゆえに、個々の対象としている土でキャリブレーション試験を行うことが望ましいといえる。

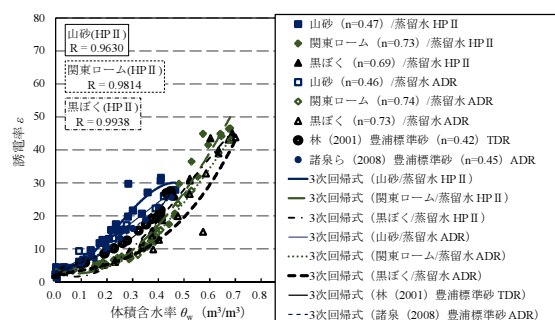


図4 体積含水率 θ_w と誘電率 ε の関係

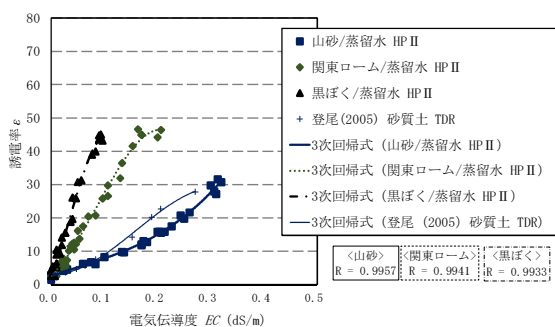


図5 誘電率 ε と電気伝導度 EC の関係

次に、誘電率 ε と土中の電気伝導度 EC の関係について図5に示す。比較のために登尾(2005)⁵⁾による砂質土の結果を併記する。図より第一に誘電率 ε と電気伝導度 EC の間に強い正の相関関係($R>0.993$)があることが分かる。第二に、山砂と登尾(2005)⁴⁾の結果を比較すると傾向が比較的似ていて、誘電率の最大の差 $\Delta\varepsilon_{\max}$ は7

程度であった。ゆえに試験者やセンサという要因が異なっても同等の結果が得られると考える。

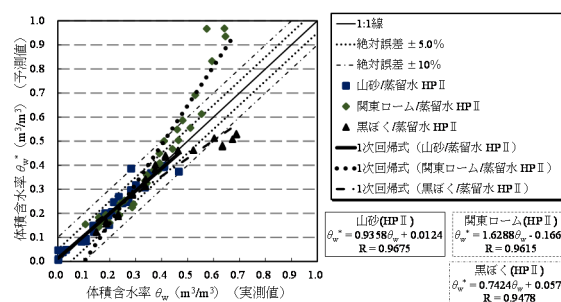


図6 体積含水率の実測値 θ_w と予測値 θ_w^* の比較

キャリブレーション試験で得られた3次回帰式の精度を検討するためにJIS 炉乾燥法によって得られた体積含水率 θ_w との相対誤差について図6で検討した。その結果、山砂に関しては高い精度(誤差 $\pm 5\%$ 以内の点が全体の92%)で予測することができたと考える。関東ロームに関しては、誤差 $\pm 5\%$ 以内の点が全体の65.6%であった。また、予測体積含水率 θ_w^* が $0.1 \sim 0.2(\text{m}^3/\text{m}^3)$ と $0.4(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 以降の領域では過大評価する傾向があることが分かった。黒ぼくに関しては、全体の73.3%の点が誤差 $\pm 5\%$ 以内に収まった。また、予測体積含水率 θ_w^* が $0.1 \sim 0.3(\text{m}^3/\text{m}^3)$ と $0.5(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 以降の領域では過小評価するようである。よって、関東ロームと黒ぼくの精度については更なる検討が必要であると考える。

(2) 大型土壌カラム試験

ここでは、大型土壌カラム試験から得られた結果について土中における物質移動の観点から検討する。図7に時間経過に伴う誘電率 ε の変化を示す。なお、図中に山砂の飽和状態における誘電率 ε_{sat} を併記する。

図7より、第一に0分から5分の間で中層、下層の順番に誘電率 ε が上昇していることが分かる。この結果は、蒸留水の浸透過程と一致する。第二に、5分以降の定常状態において誘電

率 ϵ は 30~35 の間である。また、山砂の飽和状態における誘電率 ϵ が 36 付近であることから、試験開始 5 分で大型土壌カラム内が飽和状態になったと考えられる。第三に、5 分以降の定常状態において同一平面の誘電率の最大誤差 $\Delta\epsilon_{\max}$ は 5 程度である。これを 予測体積含水率 θ_w^* に変換すると、 $\Delta\theta_w^* = 0.0268(\text{m}^3/\text{m}^3)$ であり、これはメーカーから提供されている HP II の測定誤差 $\Delta\theta_w \pm 0.03(\text{m}^3/\text{m}^3)$ (Stevens(2013))⁶⁾ 以内であるから、許容範囲であると判断した。よって、0 分から 5 分を除けば、同一平面上における蒸留水の物質移動について面内等方性があるといえる。第四に、中層と下層における水平および鉛直に設置したセンサの誘電率 ϵ の傾向に概ね違いは見られなかった。ゆえに、蒸留水の物質移動について異方性は認められない。

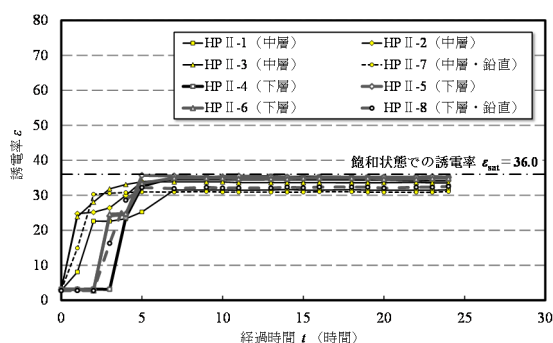


図7 大型土壌カラム試験における誘電率 ϵ の各センサでの経時変化

4 結論

- (1) センサの出力値と含水量の間には強い相関関係が見られた。
- (2) センサの出力値と含水量の関係は土質の違いによってその傾向が異なる。
- (3) 山砂においては、センサの出力値から含水量を精度よく予測することが出来た。
- (4) 大型土壌カラム内における蒸留水の移動に伴う土中の含水量の経時変化をセンサで把握することが出来た。

以上のことから、蒸留水については土中の含

水量の測定が可能であるといえる。また、蒸留水の浸透に伴う土中の含水量の経時変化におけるモニタリング・プロファイリングは可能であるといえる。この結果をもとに、今後は液相の対象を NAPL に広げて検討したい。

「引用・参考文献」

- 1) 下辺悟, ADR 土壌水分計の適用性とその工学的利用, 地盤工学シンポジウム論文集, No.49, (2004), p.39 - 46.
- 2) 下辺悟, 齊藤準平, 小野亮, ADR - MT 法を用いた土中の物質移動のモニタリング手法によるプロファイリングに関する基礎的研究, 第 59 回地盤工学シンポジウム論文集, (2014), p. 485 - 490.
- 3) 林為人, 山岡博, 杉田信隆, 高橋学, 砂の比誘電率および比抵抗に及ぼす間隙水の塩分濃度の影響, 応用地質, No.42, (2001), p. 140 - 148.
- 4) 諸泉利嗣, 佐々木裕美, 三浦健志, Amplitude Domain Reflectometry 法による不飽和砂地盤中の NAPL 含水量と誘電率に関する基礎的研究, 環境制御, No.30, (2008), p. 27 - 32.
- 5) 登尾浩助, サーモ TDR プローブによる不飽和土壌中の有機汚染物質濃度の測定, 土木学会論文集, No. 783/VII 34, (2005), p. 33 - 38.
- 6) Stevens, "Stevens Hydra Probe Users Manual", Stevens Water Monitoring System, Inc, (2013), p. 74.