FDR 法による土壌・地下水汚染のモニタリング手法に 関する基礎的研究*

西垣 誠**・小松 満***・金 萬鎰****

A basic study on monitoring method of contamination of soil and groundwater by using Frequency Domain Reflectometry method*

Makoto NISHIGAKI **, Mitsuru KOMATSU *** and Man-il KIM ****

Abstract

For evaluating subsurface contamination, sampling method (boring) is commonly used, but this method can not monitor the change of in-situ contamination and concentration with respect to time. The purpose of this study is to apply a measuring system for subsurface contamination in which a so-called FDR (Frequency Domain Reflectometry) and FDR-V (with Vector network analyzer) system are employed to measure the salinity and oil contaminant. This FDR and FDR-V method is a coaxial probe method, which allows the measurement of the dielectric. The experimental study indicates the possibility in measuring both the contaminant concentration and volumetric moisture content. Besides, it was possible to measure the oil infiltration behavior at the good accuracy by using one dimension column.

Key Words: Dielectric constant, Contamination, Frequency Domain Reflectometry, In-situ, Investigation, Monitoring

要 旨

土壌汚染を調査するために、ボーリングによって試料を採取する方法が一般的に用いられているが、この方法では原位置にてリアルタイムに汚染度の経時変化をモニタリングすることは困難である。本研究では、FDR (Frequency Domain Reflectometry) と FDR-V (FDR with Vector network analyzer) を塩水や油汚染の測定法として応用することを目的とした。この FDR と FDR-V システムは、同軸プローブを用いた方法で、誘電率を測定するものである。具体的には、飽和土に対する汚染度の測定及び不飽和土に対して、汚染度と体積含水率の測定が同時に行えることを示した。また、一次元の透油実験を行い、その浸透挙動を精度良く測定することができた。

キーワード: 誘電率、汚染物質、周波数領域応答システム、原位置、有効間隙率、調査、モニタリング

* 日本地下水学会1999年春季講演会にて一部口頭発表 (1999年5月27日)

** 岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 ()

Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

*** 岡山大学大学院自然科学研究科

Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

**** 岡山大学大学院自然科学研究科後期博士課程

Doctor course, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

1. はじめに

近年、土壌・地下水汚染が大きくクローズアップされており、効率的な調査・修復技術の確立が求められている。現在、地盤の汚染度の測定法としては、サンプリングによる方法が一般的であるが、原位置において汚染度の経時的な変化を把握することは困難である。汚染の現況や将来的な広がり、さらに修復状況を把握するためには、原位置で比較的容易にこれらを測定する手法の確立が必要不可欠である。そこで、本研究は汚染された地盤に対して誘電率分布を測定することで、経時的な汚染度の変化を測定することを目的とした。具体的には、水と汚染物質の誘電率の差を利用した飽和・不飽和領域における土壌汚染度を調査する計測法の確立である。

誘電率計測法は、Topp (1980) が TDR 法を用いて土壌の誘電率から体積含水率を把握するキャリブレーション曲線を示したことがよく知られている。近年ではセンサー内部に電磁波の送受信点が組み込まれた ADR 法 (Gaskin et al., 1996, 中島ら, 1998) が広く用いられている。この ADR 法は、非常に簡便な方法であり、ケーブル長などの影響を受けない点に長所があるが、一般的に得られるデータは電圧値のみであるために、体積含水率と汚染物質の濃度の2つのパラメータを分離することは困難である。また、高飽和度の測定結果が実際よりも高く見積もられるという結果も示されている (西垣ら, 1998)。一方、TDR 法においては過去に汚染度の測定に対していくつかの適用例 (例えば、Topp et al., 1988, Ferre et al., 1998, Persson, 2001) があるものの、周波数を固定して時間領域で評価するため、得られた波形の解析が複雑で、精度上の問題がある。これらに対しては、近年 TDR 法に関する国際会議も開かれており、様々な検討が行われている (Dowing, 2001)。

また、TDR 法や ADR 法と同様に電磁波を用いて土壌の誘電率を測定する方法として、FDR 法がある (Stephan, 1995、日本地下水学会編、2001)。これは、電磁波の反射応答を周波数領域で解析する手法であり、ボーリング孔内にセンサーを挿入して孔壁の水分量を計測する方法 (Thomas (1966)) や電極を直接土壌中に挿入する

方法 (冀ほか、1996) 等がある。また、周波数領域におけるインピーダンス応答特性から複素誘電率を取り扱う方法も行われている (例えば、Wobischall (1977), Ulaby et al. (1986), Udo (1989), Santamarina et al. (2001), Dirksen & Hihorst (1994))。

本研究では、土壌の汚染度を原位置で調査する手法の基礎的な研究として、これらの FDR 法のうち、冀ほか (1996) の方法を基本とした装置とベクトルネットワークアナライザを用いて複素誘電率を測定する装置 (西垣ほか、1999; 以後 FDR-V 法と称する) の2種類の FDR 法を用いて、その適用性について検討した。なお、本論文で用いた誘電率とは全て比誘電率のことである。

2. FDR 法による地盤内誘電率測定

2.1 FDR システム

FDR 法の計測システム (冀ほか、1996) を図1に示す。既知長 (L) の電極ロッドを用いて、発信器 (Tracking Generator: A 点) より 100MHz ~ 1.7GHz の高周波の電磁波を被測定物質 (土壌) に加える。電磁波の進行速度は周囲の土壌の誘電率によって変化するため、土壌への入力端 (B 点) での反射波と電極先端 (C 点) からの反射波を生ずる。この2つの反射波は合成干渉波を生じ、方向性結合器 (Directional Coupler) を経て受信器 (Spectrum Analyzer: D 点) で観察される。ここで、電極先端からの反射波の信号は、電極を

図1 FDR システムによる土壌の誘電率計測法
Fig. 1 FDR System to measure the dielectric constant for soil.

往復するのに必要な時間だけ位相が遅れるので、測定される2つの反射波の合成干渉波は、一定の周波数間隔で山と谷が現れることになる。この電極先端からの反射波の位相遅れは、測定物質の誘電率に依存するため、結果として合成干渉波の周波数間隔から式(1)によって測定対象物の誘電率 ε を求めることが出来る。

$$\varepsilon = k(C/2L\Delta f_m)^2 \quad (1)$$

ここで、 Δf_m : スペクトルのピーク周波数差 (Hz)、 L : 電極長 (m)、 C : 真空中の光速 ($= 3 \times 10^8$ m/sec)、 k : 補正係数。

なお、本研究で用いた測定装置は冀ほか

(1996) の装置を一部改良し、トラッキングジェネレータとスペクトラムアナライザーが一体化した送受信装置及び絶縁体部分を延長した土壤に密着しやすい電極を用いた。

2.2 各物質の誘電率の測定

汚染地盤を構成する物質(空気、水、土粒子、汚染物質)の誘電率特性を把握するため、内径 $\phi 60$ mm、高さ200mmの容器に試料を詰めて供試体を作成し、150mmの電極長のプローブで誘電率の測定を行った。

図2にそれぞれ、空気、水、標準砂(豊浦珪砂; 間隙率0.4)、アセトン(純度99%)、市販の灯

図2 FDR法による各物質の測定スペクトラム

Fig. 2 Measured spectrum for each material measured by FDR.

油、ガソリンの測定スペクトルを示す。図中の縦軸は電磁波の電圧振幅であり、横軸は周波数である。このピークの周波数差を求め、式(1)に代入して誘電率を求める。誘電率が低い程、干渉波のピーク間隔は大きくなるため、空気や油のような低誘電体では、本システムの測定範囲において1つのピークしか検出できないが、図2より水やアセトンではほぼ等間隔でピークが出現していることがわかる。ここで得られた値(括弧内:理科年表、2000)は、空気1.0、水80.4(80.4)、標準砂2.5(2.5)アセトン20.0(20.7)、灯油2.0、ガソリン1.7であり、これより水が他の物質に比べて非常に高い誘電率を有しており、地盤の誘電率は主として水に影響されることがわかる。なお、図中の縦軸の電圧振幅は、測定物の誘電率や測定系における電磁波の減衰に関して変化する値である。また、電磁波は連続的にトラッキングジェネレータから入射されるとともに、測定される合成干渉波のスペクトルは連続的に表示されることから、1回の測定時間は1秒程度である。一方、誘電率は温度変化によっても影響を受けるが、今回は20℃の恒温状態で測定を行った。

2.3 汚染地盤の誘電率の測定

次に、先と同じ容器を用いて供試体を作成し、標準砂の不飽和土と不飽和汚染土のそれぞれについて土壌の誘電率の測定を行った。

(1) 不飽和土(砂-水-空気)

間隙率 $n = 0.4$ の一定条件で、加える水の量を

変化させ土壌の誘電率の測定を行った。図3(a)に誘電率($\sqrt{\epsilon}$)と体積含水率(θ_w)の関係を示す。ここで、 $\sqrt{\epsilon}$ と θ_w には直線関係があることが知られており(Whally, 1993)、本測定結果においても良好な相関関係が得られた。また、Topp et al. (1980)がTDR法を用いて作成した校正曲線と比較すると、低・高含水比領域で最大1割程度の差異が見られた。この差は用いた電極形状や周波数、さらに土質の違いによるものと考えられ、別に校正曲線を作成することで解決できる。

(2) 不飽和汚染土(砂-灯油-空気)

水の代わりに灯油を用いて不飽和汚染土を作成し、同様に測定を行った。図3(b)に誘電率($\sqrt{\epsilon}$)と体積含油率($\theta_{oil} = V_{oil}/V$)の関係を示す。なお、体積含油率はあらかじめ水分を調整した試料に入れた灯油の量から求めた。水の場合と比較すると誘電率は低く、わずかではあるが灯油の量が増加するとともに空気と灯油の置換によって誘電率は上昇する傾向を示しているが、その変動幅が小さいため、この場合には精度上の問題が生じることが判明した。

(3) 飽和汚染土(砂-水-灯油)

さらに、飽和地盤に対して汚染度測定の基礎となるキャリブレーション曲線を、図3(c)に土壌の誘電率-体積含水率-体積含油率の関係として示す。ただし、水と灯油のそれぞれの飽和状態での値は実測値であるが、水と灯油が混在した状態で均一な試料を作成するのは困難であることから、図3(a)の不飽和土の測定値をもとに、先に

図3 種々の条件での汚染土の誘電率の測定

Fig. 3 Measured data of dielectric constant for contaminated soil under each condition.

得られた空気と灯油の値を用いて次式で土壌の誘電率を推定した。

$$\sqrt{\epsilon''} = \sqrt{(\sqrt{\epsilon})^2 - (\epsilon_a - \epsilon_{oil})(n - \theta)} \quad (2)$$

ここで $\sqrt{\epsilon''}$: 飽和汚染土壌の誘電率、 $\sqrt{\epsilon}$: 不飽和土壌の誘電率、 ϵ_a : 空気の誘電率 (=1.0)、 ϵ_{oil} : 灯油の誘電率 (=2.0)、 n : 間隙率 (=0.4)、 θ_w : 体積含水率。なお、土壌の誘電率を表すモデルは土壌の性質と構造に着目した混合モデルが一般的に用いられている (例えば、Roth et. Al., (1990))。ここでは簡単のためにこの混合モデルのうち、並列モデル (各誘電率値に掛かる係数を1としたもの) を基本とした。

厳密に考えると、モデルの整合性の問題や灯油の誘電損失の影響があるが、ここではそれらは小さいものとし、結果として、飽和地盤で間隙率が既知であれば (図-3 (c) の関係を求めるには間隙率が既知である必要がある)、土壌の誘電率を測定することで汚染度が推定できることを示した。

3. FDR-V 法による地盤内誘電率測定

3.1 FDR-V システム

FDR-V の基本システム (Udo, 1989, Nishigaki & Komatsu, 2000, Komatsu & Nishigaki, 2002) は、図4 (a) のようにベクトルネットワークアナライザ、スイッチングユニット、測定プローブから構成されており、それぞれが50Ω同軸伝送線により接続されている。ベクトルネットワークアナライザより出力された電磁波は、本体のA点から各チャンネルのポートを通して同軸伝送線により先端の同軸プローブに達して、プローブ先端のB点で反射して戻ってくる。

その反射波から得られる反射係数と、あらかじめ測定された標準校正溶液の反射係数との比から次式によって被測定物 (土壌) の複素誘電率を算定する。

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon_a^* (\rho_{mm} - \rho_{mo})(\rho_{ms} - \rho_{ma})}{(\rho_{mm} - \rho_{ms})(\rho_{mo} - \rho_{ma})} + \frac{(\rho_{mm} - \rho_{ma})(\rho_{mo} - \rho_{ms})}{(\rho_{mm} - \rho_{ms})(\rho_{mo} - \rho_{ma})} \quad (3)$$

ここで、 ϵ_a^* : 標準溶液の複素誘電率 (水 (80.4: 20℃) かアセトン (20.7) を用いる)、 ρ_{mm} 、 ρ_{mo} 、 ρ_{ms} 、 ρ_{ma} : それぞれ、被測定物、オープン (空气中に電極を開放: $\epsilon=1$)、ショート (インジウムシートに電極を密着: $\epsilon=\infty$)、標準溶液の測定で得られた反射係数) である。このように先のFDR法とは基本的な原理は異なるが、複素誘電率を周波数領域で連続的に測定することから、ここではFDR法の一種として取り扱った。

本システムでの測定影響範囲は、プローブ先端の数mm以内である。そのため、得られた値が土壌の特性を表現しているとは必ずしも言えないが、ここでは同一の試料に対する測定を数回実施し、その平均値を取ることで再現性を確保した。また、電極の端面で測定するため、他の方法と比べて電極を試料に挿入する必要がない。したがってこのような特徴から、微小な水分移動を捉えるには有効な方法であると考えられる。

式 (3) で得られる複素誘電率 (ϵ^*) は、式 (4) で示される実数部と虚数部で表される (Topp, et al, 1980)。

図4 FDR-V システム装置図

Fig. 4 Schematic diagram of FDR-V system.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_R + j(\varepsilon_I + \sigma_{dc}/2\pi f \varepsilon_0) \quad (4)$$

ここで、 ε_R ：誘電率実数部、 ε_I ：誘電率虚数部、 σ_{dc} ：導電率、 f ：周波数、 ε_0 ：真空の誘電率、 $j = \sqrt{-1}$

また、Debye 型分散を表す式でこれらの実数部と虚数部を表現すると以下の式となる (Ulaby *et al.*, 1986)。

$$\varepsilon_R = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f \tau)^2}, \quad \varepsilon_I = \frac{2\pi f \tau (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{1 + (2\pi f \tau)^2} \quad (5)$$

ここで、 ε ：変位分極だけによる誘電率、 ε_0 ：静電場における誘電率、 τ ：誘電緩和時間であり、虚数部は電場と分極の間に位相差があることあること、つまり誘電損失が生じることを意味する。位相差 δ に対しては次式が成り立つ。

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_I + \sigma_{dc}/2\pi f \varepsilon_0}{\varepsilon_R} \quad (6)$$

一般的な誘電率計測法 (TDR 法・ADR 法・FDR 法) は、この誘電損失が1MHz～1GHzの範囲で非常に小さいことから、式 (4) において複素誘電率が主に実数部で表されることを利用している。一方、誘電損失は上記の範囲外での周波数や導電率の大きさによって変化する値である。したがって、主に実数部では含水量を虚数部では塩分や汚染物質の混入による影響を表していることがわかる。

本システムでは、1回の測定において、1秒程度の測定時間で図5のように1～18GHzの周波数範囲の実数部 ε_R と虚数部 ε_I の値がそれぞれ連続的に得られる。

3.2 各供試体に対する水分量のキャリブレーション

各試料を任意の含水量に調整し、内径50mm、高さ30mmのモールドに3回に分けて均一に締め固めて供試体を作成し、誘電率の測定を行った。試料は図6に示す粒度をもつ豊浦標準砂、マサ土、川砂、DLクレイ、山形産ベントナイト、ベントナイト混合土 (乾燥重量比：山形産ベントナイト：豊浦標準砂=15:85) の6種類を用い、それぞれ一定の温度、乾燥密度に調整して実施した。

図5 純水の複素誘電率と周波数の関係 (20℃)

Fig. 5 Complex dielectric constant of pure water versus frequency at 20°C.

図6 試料の粒度分布

Fig. 6 Grain size distribution for each soil.

図7 各試料に対する複素誘電率実数部の値 (20℃)

Fig. 7 Real part at 1GHz of complex dielectric constant of each soil at 20°C.

なお、センサー校正のための標準校正溶液としてはアセトンを用いた。図7に、キャリブレーションの結果を示す。結果は最も変化の大きかった1GHz誘電率実数部 (ϵ_{R1}) について整理した。この図から、どの試料に対しても水分量の増加に伴う誘電率値の上昇がみられており、同様の曲線で校正が可能であるといえる。すなわち、FDR-V法においても他の方法と同様の校正曲線を用い、 ϵ_{R1} を計測することで体積含水率が求められることになる。

3.3 汚染物質濃度の測定

図8に、図7と同一測定時における1GHzでの虚数部の結果を示す。この中でベントナイト、ベントナイト混合土が水分量の増加に伴って虚数の値が上昇している。つまり、イオンを含むことによる誘電損失の影響をとらえていることから、この性質を利用して不飽和土（豊浦標準砂）における塩分濃度の校正を行った（井上、1998）。

供試体は、キャリブレーションの時に用いたモールドに、あらかじめ濃度を調整した塩水と豊浦砂を混ぜた上で均一になるように詰めた。なお、測定は同一の供試体に対して5回実施し、その平均値を用いた。図9に豊浦砂に対して塩分濃度を変化させて測定した結果を示す。低周波領域の虚数部分に大きな変化が現れていることがわか

る。次に、各塩分濃度に対して体積含水率 (θ_{sw}) と1GHzの実数部 (ϵ_{R1}) の関係を図10に示す。この図から、実数部には塩分濃度の変化がほとんど現れていないことから、次式で体積含水率 (θ_{sw}) を測定することが可能である。なお、式(7)での相関係数は $R^2=0.98$ である。

$$\theta_{sw} = -4.93 \times 10^{-5} \epsilon_{R1}^3 - 2.09 \times 10^{-4} \epsilon_{R1}^2 + 4.85 \times 10^{-2} \epsilon_{R1} - 1.29 \times 10^{-1} \quad (7)$$

一方、図11は、異なる水分量に調整した供試体に対する1GHzの虚数部の誘電率 (ϵ_{I1}) と塩分濃度

図9 塩分に対する複素誘電率と周波数の関係（豊浦砂、 $\theta=0.17$, $n=0.43$ ）

Fig. 9 Complex dielectric constant versus frequency for salinity effect. (Toyoura sand: $\theta=0.17$, $n=0.43$).

図8 各試料に対する複素誘電率虚数部の値（20℃）
Fig. 8 Imaginary part at 1GHz of complex dielectric constant of each soil at 20℃.

図10 各塩分濃度に対する1GHzの実数部と体積含水率の関係（豊浦砂、 $n=0.43$ ）

Fig.10 Real part versus volumetric saline water content for different salinities of soil. (Fine sand: porosity $n=0.43$).

の関係を示したものである。それぞれの θ_{sw} に対して直線関係が認められる。そこで、式 (7) より求めた θ を用いることで不飽和地盤中の塩分濃度は次式で表される。なお、式 (8) の相関係数は $R^2=0.90$ である。

$$C = 6.42 \theta_{sw} - 0.16 \varepsilon_{R1} + 8.26 \varepsilon_{R1} \cdot \exp(-8.67 \theta) - 2.03 \quad (8)$$

図11 各体積含塩率における塩分濃度と1GHzの虚数部の関係 (豊浦砂、 $n=0.43$)

Fig.11 Concentration of salinity of soil versus 1 GHz imaginary part for different volumetric moisture Contents (Fine sand: porosity $n=0.43$).

図12 空気、豊浦砂 ($n=0.40$)、灯油の複素誘電率
Fig.12 The complex dielectric constant for air, Toyoura sand ($n=0.4$) and kerosene.

次に、FDR と同様に灯油を用いて油汚染を対象とした測定を行った。まず、図12に各物質に対する誘電率の測定結果を、また、図13に飽和地盤におけるキャリブレーション曲線を示す。ほぼFDRと同様の精度で測定が可能であることがわかった。なお、FDRの場合は電極長以上の供試体が必要であるため作成が困難であったが、今回

図13 油汚染飽和砂のキャリブレーション曲線 (豊浦砂: $n=0.40$ 、油: 灯油)

Fig.13 Calibration curve of oil-contaminated saturated soil (Toyouura sand: $n=0.4$, oil = kerosene).

図14 各体積含油率に対する1GHzの実数部の周波数スペクトル ($\theta_w=0.08$, $n=0.40$)

Fig.14 The 1GHz real part of dielectric constant for different oil contaminated sand ($\theta_w=0.08$, $n=0.40$)

の供試体はわずかな量で測定が可能であることから、先と同様のモールドに灯油を入れ、あらかじめ水分を調整した試料を水分が分離しないように均一に詰めた。

そして、さらに図14、図15に一定の水分状態での灯油の含有量を変化させて測定した結果を示す。灯油の含有量が増えるにしたがって実数部が上昇

しているが、塩水の場合と比べて虚数部は小さな変化であった。さらに、塩水汚染の場合と同様の手順でこれらを整理した結果を図16と図17に示す。図16の実数部ではある程度の相関が見られるが、図17の虚数部では低い。このため、塩水汚染の場合と同様にこれら2つの関係から水分量と汚染物質の濃度を算定することは困難であり、その可能性については今後の課題である。つまり、虚数部の変化が小さいことが原因であり、誘電損失

図15 各体積含油率に対する1GHzの虚数部の周波数スペクトル ($\theta_w=0.08$, $n=0.40$)

Fig.15 The 1GHz imaginary part of dielectric constant for different oil contaminated soil ($\theta_w=0.08$, $n=0.40$).

図16 各体積含水率に対する1GHz実数部と体積含油率の関係 (豊浦砂: $n=0.40$)

Fig.16 Real part versus volumetric oil content for different moisture contents at 1GHz (Toyoura sand: $n=0.40$).

図17 各体積含水率に対する1GHz虚数部と体積含油率の関係 (豊浦砂: $n=0.40$)

Fig.17 Imaginary part versus volumetric oil content for different moisture contents at 1 GHz (Toyoura sand: $n=0.40$).

図18 エタノールの複素誘電率 (20°C)

Fig.18 The complex dielectric constant of ethanol at 20°C.

の多い物質に対して本手法が有効であると言える。例えば、図18にエタノールの実数部と虚数部の測定結果を示すが、灯油の場合とは異なり誘電損失が大きいことがわかる。

4. 鉛直一次元飽和透油実験

次に、先のキャリブレーション結果を基に、鉛直一次元の飽和透油実験を行い、FDR法の適用性について検討を行った。なお、試料には標準砂（豊浦珪砂）及びズダンⅣにより赤色に着色した灯油を用いた（棚橋・藤縄、1998）。

4.1 実験装置および内容

実験装置の概要を図19に示す。高さ60cm、幅20cm、奥行き10cmの亚克力製の角柱モールドに水中落下で飽和砂供試体を作成した。そして、上端の2.5cmの部分から5cmおきに12本のFDR測定プローブを横方向から設置し、経時的な誘電率の変化を測定した。実験は、図18に示すように飽和状態の供試体の上流側からマリオットビュレットより1cmの水頭を与え、灯油を浸透させた。下流側はオーバーフロータンクによって供試体下端に定水位をとった。一定時間浸透させた

後、今度はマリオットビュレットとオーバーフロータンクを入れ換えた状態で供試体下端から水を浸透させ、上端から排油を行った。

4.2 実験結果

図20(a)、(b)にそれぞれ透油と透水の方法を、図21(a)、(b)にそれぞれの過程における供試体上端から2.5cm、17.5cm、32.5cm、42.5cm、57.5cmの5点での体積含水率・体積含油率の経時変化を示す。灯油の浸透・排出に伴って体積含水率・体積含油率の変化の過程がとらえられている。

透油過程においては、灯油の浸潤前線が各プローブ位置に達した時点から含油量が急激に上昇しており、また、灯油が浸透していくにつれて体積含油率の上昇度が遅くなってきている。これは灯油の単位体積重量 (0.79gf/cm^3) による影響、及び目詰まりを生じた可能性が考えられる。

そして最終的には、体積含水率は約0.05、体積含油率は約0.35の値に落ち着いている。この体積含水率の値は土粒子に吸着して残留した水分量であると考えられ、体積含油率の値は飽和砂試料における灯油の浸透に対する有効間隙率を表している。

図19 鉛直一次元飽和透油実験装置

Fig.19 Schematic diagram of one-dimensional flow test.

また、排油過程では、水が灯油を押し出す形で灯油と水の置換が生じていることがわかる。今度は透油過程よりも短時間で体積含水率が回復していることがわかる。つまり、灯油の排出過程では、灯油が間隙に浮遊しているために排出されやすいものと考えられる。そして最終的な値をみると、今度は体積含水率で0.15程度の残留量がみられた。これは一度汚染された地盤に対する水の浸透に対する有効間隙率を表している。結論として、難溶解性物質 (NAPL) である灯油が地下水

面に達した場合、地下水位の変動により、地下水面下にも灯油が残留する可能性があることがわかる。

6. おわりに

本研究では、原位置における地盤汚染度の測定法としてFDR法の適用性を検討するために基礎的な測定を実施した。具体的には、原理の異なる2種類の装置 (FDR法、FDR-V法) に対して、ま

(a) Kerosene inflow from the top

(b) Water inflow from the bottom

(a) The variation of volumetric water/oil content kerosene inflow from the top

(b) The variation of volumetric water/oil content water inflow from the bottom

図20 透水及び透油の方法

Fig.20 The method of water/oil infiltration.

図21 鉛直一次元飽和透油実験結果

Fig.21 Results of one-dimensional flow test.

ず、それらの測定システムについて簡単に紹介した。次に、FDR法で飽和砂の汚染への適用を灯油を用いて試みるとともに、FDR-V法で、飽和砂と不飽和砂に対する汚染への適用を塩水と灯油を用いて検討し、それぞれの測定手法について個別に評価した。

今回、得られた知見を以下に列挙する。

- (1) FDR法とFDR-V法を用いて瞬時に地盤の誘電率分布を測定することが可能であるが、多点の測定が必要とされる。また、FDR-V法では一つの測定点に対してその近傍で数回の測定を実施し、それらの平均値で評価する必要がある。
- (2) 飽和地盤に対しては、実数部の誘電率の値を用いることで、汚染度が測定可能である。
- (3) 不飽和地盤においては、FDR-V法を用いて複素誘電率を測定することで、塩水の場合において水分量と同時に地盤の汚染度も測定が可能であることを示した。しかし、灯油を用いた測定では虚数部の変化が小さいことから汚染度の把握は困難である。
- (4) 灯油の一次元浸透実験を実施し、リアルタイムで地盤中の水と灯油の含有量を計測することで、有効間隙率や油の残留量などを把握することができた。しかし、ここで確認された灯油の浸潤速度や排油速度および水と灯油の残留量などは、供試体の粒径や供試体長などで異なってくると考えられる。

なお、今回得られた誘電率の値に関する定量的な結果については、本システムでのみ得られたものであり、他の電磁波誘電率計を用いて測定した場合は当然、周波数帯などの条件が異なるのでこの限りではない。

これらを実際に原位置の汚染度を測定するシステムとして実用化するには、測定精度の検討とプローブの形状など技術的な課題は多い。しかし、原位置で汚染度の分布を調査する場合やそれらの経時的な変化をとらえるには有効な方法であるため、今後はさらに様々なケースで測定を実施するとともにデータを蓄積し、飽和・不飽和地盤での汚染度の測定方法を確立することで、より実際の状況に即した汚染のメカニズムや修復段階での浄化度の予測が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 井上光弘 (1998) : 塩分を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価、水文・水資源学会誌、11、6、555-564.
- 冀 北平、三野 徹、赤江剛夫 (1996) : FDR計測法による地盤誘電率測定と特定深さの地盤水分測定、農業土木学会論文集、182、25-30.
- 棚橋秀行、藤縄克之 (1998) : 土中カラムにおける粒径・間隙率と灯油の浸入・残留量の関係について、地下水・地盤汚染とその防止対策に関する研究集会 第6回講演集、33-36.
- 中島 誠・井上光弘・澤田和男・クリスニコル (1998) : ADR法による土壌水分量の測定とキャリブレーション、地下水学会誌、第40巻第4号、509-519.
- 西垣 誠・小松 満・横田英嗣 (1998) : 誘電法を用いた不飽和浸透特性の計測法、日本地下水学会1998年春期講演会講演要旨、40-45.
- 西垣 誠、小松 満、熊本 創、二宮 功 (1999) : 誘電率計測法を用いた地盤塩水汚染度のモニタリング手法、土と基礎、47-10、17-20.
- 日本地下水学会編 (2001) : 雨水浸透・地下水涵養、21世紀の地下水管理、理工図書、20-21.
- 文部省国立天文台編 : 理科年表 CD-ROM、丸善、2000.
- Dirksen, C., M.A. Hihorst (1994): Calibration of a new frequency domain sensor for soil water content and bulk electrical conductivity, U.S. Bureau of Mines Spc. Publ. SP 19-94, 143-153.
- Dowing, H.C. (2001): Proceedings of Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Northwestern University.
- Ferre, P.A., J.D. Redman, D.L. Rudolph and R.G. Kachanoski (1998): The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand, Water Resour. Res., 34(5), 1207-1213.
- Gaskin, G.J. and J.D. Millker (1996): Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, J. Agric. Eng. Res., 63, 153-160.
- Komatsu M. and M.Nishigaki (2002): Study on in-situ measuring system of subsurface contamination using

- Frequency Domain Reflectometry, Environmental Geotechnics (4th ICEG), (de Mello & Almeida eds), 521-526.
- Nishigaki, M. and M. Komatsu (2000): Study on Measuring System of Subsurface Contamination using Frequency Domain Reflectometry with Vector Network Analyzer, In: Garnier, J., Thorel, L. & Haza, E. (ed.), Physical Modeling and Testing in Environmental Geotechnics.; Int. Symp., La Baule, France, 15-17 May 2000, France: LCPC: 43-49.
- Persson M. (2001): Using Time Domain Reflectometry for Non-Aqueous Phase Liquid Saturation Measurements, Proceedings of Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications, Northwestern University.
- Stephens, D.B. (1995): Vadose Zone Hydrology, Lewis Publishers, 227-229.
- Santamarina J.C., K.A. Klein and M.A. Fam (2001): Soils and Waves, John Wiley & Sons, 275-299.
- Thomas, A.M. (1966): In situ measurement of moisture in soil and similar substances by "fringe" capacitance, J. Sci. Instrum., 79, 1699.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan (1980): Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resour. Res., 16(3): 574-582.
- Topp, G.C., M. Yanuka, W.D. Zebchuk and S. Zegelin (1988): Determination of Electrical Conductivity Soil and Water Experiments in Coaxial Lines. Water Resour. Res., 24(7), 945-952.
- Udo, K. (1989): Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature. Journal of Chemical and Engineering Data. 34(4), 371-374.
- Ulaby, F.T, R.M. Moore and A.F. Fung (1986): Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume III, From Theory to Applications, Artech House, 2017-2103.
- Whally, W.R. (1993): Consideration on the Use of Time-Domain Reflectometry (TDR) for Measuring Soil Water Content, Journal of Soil Science. 44, 1-9.
- Wobschall, D. (1977): A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Water: The Semidisperse Model, IEEE, Vol.GE-15, No.1, 49-58.

(受付：2003年9月12日、受理：2004年2月6日)