

サーモ TDR を用いた不飽和砂土の油汚染度推定 Estimation of oil content in unsaturated sandy soil using thermo-TDR sensor

○諸泉利嗣*・繁澤和佳子**・三浦健志*

MOROIZUMI Toshitsugu*・HANZAWA Wakako**・MIURA Takeshi*

1. はじめに 土壌・地下水中の油汚染度の非破壊測定法として誘電率法を用いた手法が研究されてきた（例えば、Persson & Berndtsson, 2002）。この方法は、土壌・地下水の誘電率を出力情報としてとらえ、その出力情報から水と油の誘電率の差を利用して土壌の内部情報としての油含有量を推定するという逆解析的方法と考えることができる。この手法は、油-水飽和土壌系の油汚染度の推定では一定の成果を上げてきた（例えば、Moroizumi & Sasaki, 2008）が、油-水-空気の不飽和土壌系では依然として検討の余地がある。本研究では、誘電率に加えて体積熱容量を同時に測定することにより、これら 2 つの物性値から不飽和砂土における油汚染度の推定手法について検討した。

2. 実験方法 実験システムは、TDR100（Campbell Scientific Inc.）、データロガーCR23X（Campbell Scientific Inc.）、直流安定化電源 DM-112MU（大倉電気製）、パーソナルコンピュータ、サーモ TDR センサーから構成されている。

供試土には豊浦砂を用いた。油汚染物質には、比重の軽い油としてヒマシ油を、比重の重い油として HFE-7100 の 2 種類を使用した。HFE-7100 が地下水汚染の原因として取り上げられている TCE（トリクロロエチレン）に物性が類似していることや、ヒマシ油、HFE-7100 ともに人体に無害であることなどから、この 2 つの油を選定した。含油率と含水率の和が $0.1 \sim 0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ となるように含水率を $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ずつ増加させ計 28 通りの場合の試料を作成し、油と蒸留水を豊浦砂に均一になるように混ぜ、 390 cm^3 （ $13 \times 6 \times 5 \text{ cm}$ ）の亚克力製カラムに充填した。

誘電率は TDR100 を用いて反射係数の波形を測定し、その波形から誘電率を求めた。熱特性はプローブのヒーター部に 6V、20 秒の熱パルスをかけ、ヒーター部から 6mm 離れたセンサー部で土壌の温度変化を測定し、双極熱パルス法を用いて体積熱容量を求めた。上記の実験を 3 セット行った。含油率の推定を検討する際には、そのうちの 2 セットをキャリブレーションに用い、残りの 1 セットを検証用に用いた。実験は、室温 $20 \sim 25^\circ \text{C}$ の範囲内で行った。

3. 実験結果 本報告では、ヒマシ油の実験結果について述べる。含油率 (θ_{oil}) - 体積含水率 (θ_w) - 誘電率 (K) の関係を Fig.1 に示す。ある一定の θ_{oil} に対しては θ_w の増加にともない K は大きく増加するが、ある一定の θ_w に対しては θ_{oil} の増加にともなう K の増加は僅かである。これは、ヒマシ油の誘電率が 4.4 であり、水の誘電率である 80.1 に比べると非常に小さいため、砂土の誘電率は、ヒマシ油の含有量より水の含有量によって大きく変化するためである。

含油率 (θ_{oil}) - 体積含水率 (θ_w) - 体積熱容量 (HC) の関係を Fig.2 に示す。誘電率の実験結果と同様に、ある一定の θ_{oil} に対しては θ_w の増加にともない HC は大きく増加するが、ある一定の θ_w に対しては θ_{oil} の増加にともなう HC の増加は僅かである。これは、ヒマシ油の体積熱容量が $1.99 \text{ MJM}^{-3} \text{ K}^{-3}$

* 岡山大学大学院環境生命科学研究科 Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama Univ. , ** 元岡山大学大学院自然科学研究科 The previous student at Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama Univ.

キーワード：土壌・地下水、非破壊測定、誘電率、体積熱容量

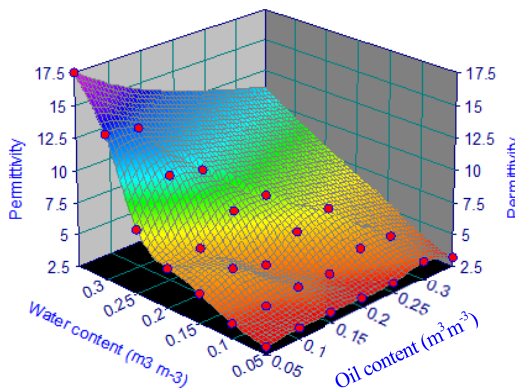


Fig.1 Relationship between oil content, water content, and permittivity.

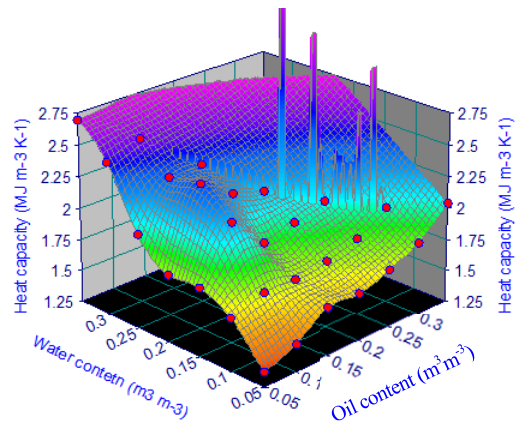


Fig.2 Relationship between oil content, water content, and volumetric heat capacity.

であり、水の体積熱容量の 4.18 に比べると小さいため、土壌全体の体積熱容量は、ヒマシ油の含有量より水の含有量に影響を受ける。

4. 汚染度の推定 K と HC の測定データから θ_{oil} と θ_w を推定するキャリブレーション式を、最適な関数型を自動的に決定する TableCurve3D (SYSTAT Software Inc.) を用いて求めた。

検証用のデータを用いて求めた θ_{oil} の推定値と既知の値の関係を Fig.3 に示す。RMSE は $0.061 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、 r^2 は 0.5 となり、キャリブレーション式 (RMSE = $0.051 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) よりは $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ほど RMSE は大きくなったが、ある程度の精度では θ_{oil} を推定できたと考える。油含有量が最も少ない $0.05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ では、 θ_{oil} の推定値は $0.01 \sim 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ とバラツキが大きく推定精度が悪いが、油が少ない領域での推定値の精度の悪さは影響の度合いが少ないと考える。 θ_w の推定値と既知の値の関係を Fig.4 に示す。油含有率の推定に比べると、 θ_w の推定値は 1:1 直線の回りによく集まっており、精度よく推定できていることがわかる。RMSE は $0.018 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 、 r^2 は 0.96 となり、キャリブレーション式 (RMSE = $0.019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) とほぼ同程度の精度であった。

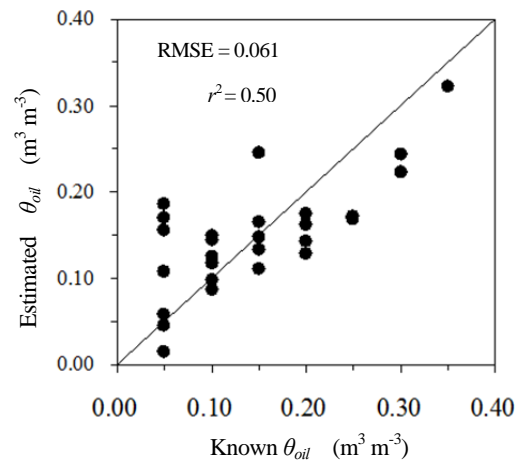


Fig.3 Relationship between the known and the estimated oil contents.

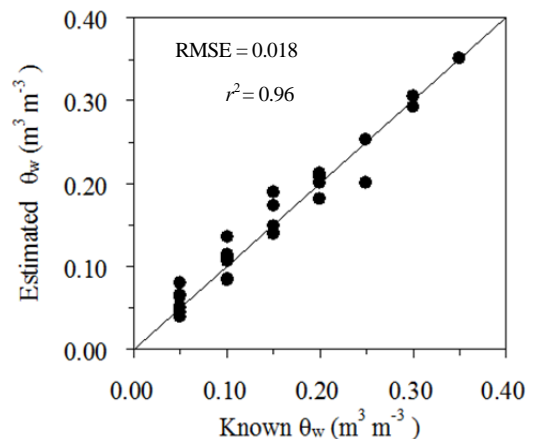


Fig.4 Relationship between the known and the estimated water contents.

4. おわりに 不飽和 4 相系の油汚染砂土では、サーモ TDR によって測定した誘電率と体積熱容量からは油汚染度はある程度の精度で推定できた。推定精度を向上させるためには、特に体積熱容量の測定精度の向上が必要であると考えられる。

<引用文献> Persson & Berndtsson (2002) doi:10.1029/WR000523, Moroizumi & Sasaki (2008) doi:10.2136/sssaj2006.0212