

# 誘電率計測法による地盤の汚染度及び有効間隙率の 測定方法に関する基礎的研究

西垣 誠<sup>1\*)</sup>・小松 満<sup>2)</sup>・金 萬鎰<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 岡山大学環境理工学部, <sup>2)</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科

<sup>1), 2)</sup> 〒700-8530 岡山市津島中3-1-1

(平成15年7月16日受理)

**The basic study on measuring method of contamination of the ground and  
the effective porosity by using dielectric constant measuring system**

**Makoto Nishigaki<sup>1\*)</sup>, Mitsuru Komatsu<sup>2)</sup> and Man-il Kim<sup>2)</sup>**

Faculty of Environmental Science and Technology<sup>1)</sup>, Graduate School of Natural Science and Technology<sup>2)</sup>,

Okayama University,

Tsusima Naka, Okayama 700-8530, Japan

## Abstract

For evaluating subsurface contamination, sampling method (boring) is commonly used, but this method cannot monitor the change of in-situ contamination and concentration with respect to time. The purpose of this study is to develop a measuring system for subsurface contamination in which a so-called FDR (Frequency Domain Reflectometry) and FDR-V (with Vector network analyzer) system was 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. In addition, the method for obtaining the effective porosity using this equipment was shown. Concretely, the sensor was inserted in the ground, and the liquid in which the dielectric constant differed on the water in the circumference was injected, and the method for obtaining the effective porosity from the change of the dielectric constant was proposed.

**Key words:** Dielectric constant, Contamination, Frequency Domain Reflectometry, In-situ, Effective porosity

## 1. 緒 言

近年、地盤・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唯一であり、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。しかし、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地盤汚染度の調査手法の確立である。まずは、

その基礎的な研究として、電磁波の反射応答を周波数領域で解析して誘電率を計測するFDR法 (Frequency Domain Reflectometry) [1]とFDR-V法 (FDR with Vector network analyzer) [2]の2種類の装置を用いて、その適用性について検討した。

また、近年、解析シミュレーション技術が発達し、汚染状況やその範囲が把握可能となっているが、地盤内の地下水浸透特性に関わる物性値を測定する統一された試験法の確立が遅れているため、より正確な評価を行う上での障害となっている。特に、物質の移行特性に大きく関係するパラメータである有効間隙率は原位置で迅速かつ正確に求める試験法がないため、その測定方法の確立が求められている。

そこで、本研究では、地盤に挿入したセンサー周辺に水とは誘電率の異なる液体を注入することで、誘電率の変化から有効間隙率を求める方法を提案し

\*Tel: 086-251-8164, E-mail: n\_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

た。ここでは、その基礎研究として飽和地盤を対象としてエタノール溶液を注入し、有効間隙率を算定した。得られた結果に対しては、別途トレーサー試験を行い、その妥当性を検証した。

## 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[1]をFig.1に示す。既知長の電極ロッドを用いて、発信器（A点）より100MHz~1.7GHzの高周波を地盤に加える。電磁波の進行速度は周囲の誘電率によって変化するため、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、方向性結合器を経て受信器（D点）で観察される。この合成干渉波の周波数間隔から次式により誘電率 $\epsilon$ を求める。

$$\epsilon = k(C/2L\Delta f_m)^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta f_m$ :ピーク平均周波数差 (Hz),  $L$ :電極長 (m),  $C$ :真空中の光速 ( $=3 \times 10^8$  m/sec),  $k$ :補正係数。

### 2.2 各物質の誘電率の測定

Fig.2に水と灯油の測定スペクトルを示す。誘電率が低い程、干渉波のピーク間隔は大きくなるため、水が灯油に比べて非常に高い誘電率（80.4）を有しており、土粒子の誘電率が2~3程度であることを

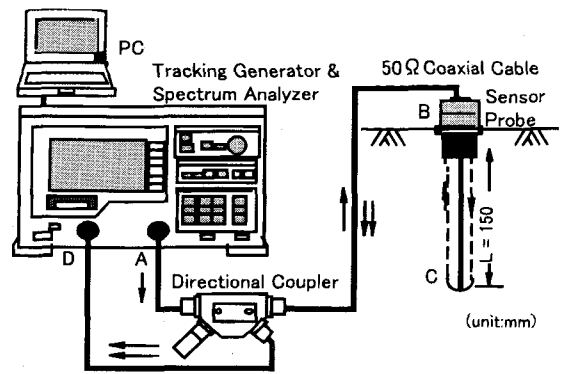


Fig.1 FDR System

考慮すると、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、測定は20°Cの恒温状態で行った。

### 2.3 汚染地盤の誘電率の測定

次に、不飽和状態の供試体を作成し、測定した。まず、間隙率 $n=0.4$ の一定条件で、加える水の量を変化させ誘電率の測定を行った。Fig.3(a)に誘電率( $\sqrt{\epsilon}$ )と体積含水率( $\theta_w$ )の関係を示す。ここで、両者には直線関係があることが知られている [3]。また、Topp[4],[5]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。この差は測定装置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。

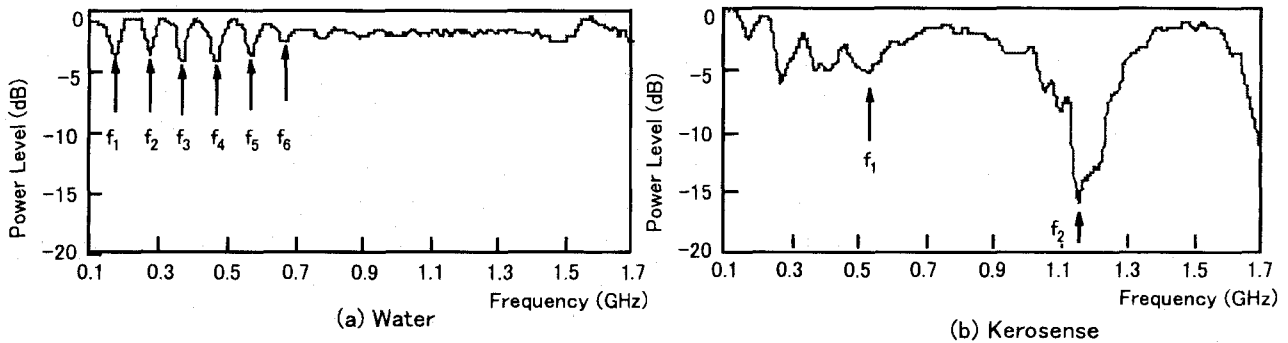


Fig.2 Measured Spectrum for each material at 20°C.

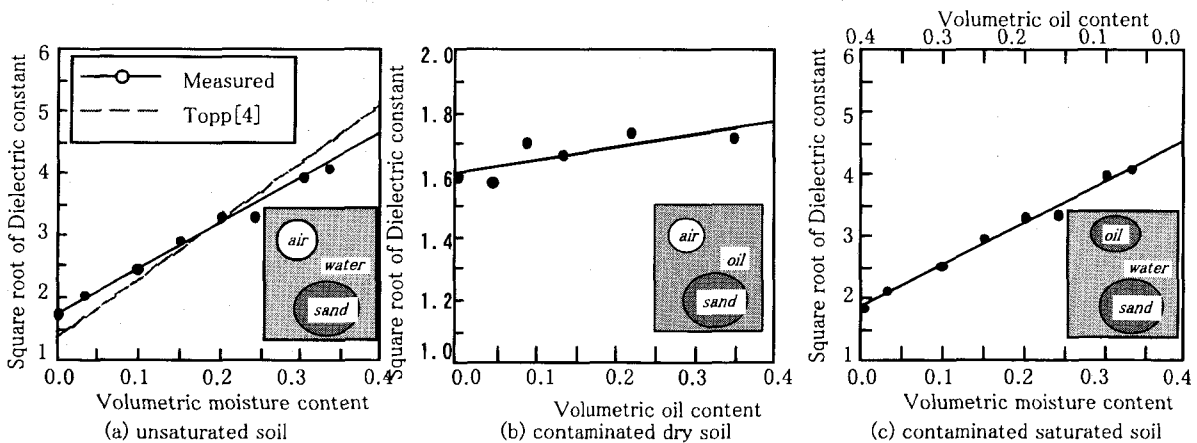


Fig.3 Relationships between Square root of dielectric constant with volumetric water/oil content at 20°C.

次に、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。Fig.3(b)に $\sqrt{\epsilon}$ と体積含水率( $\theta_{oil}$ )の関係を示す。わずかに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、測定精度の向上が必要である。

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、Fig.3(c)に誘電率体積含水率-体積含水率の関係として示す。ただし、飽和状態で水と灯油の均一試料を作成するのは困難であるため、Fig.3(a)の不飽和土の測定値をもとに、Fig.2の空気と灯油の誘電率の値を用い、空隙を灯油で置換する形で算出した。結果として、飽和地盤で間隙率が既知の場合、誘電率を測定することで地盤の汚染度を把握することが可能となった。

### 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[2],[6]は、Fig.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 SMA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被測定

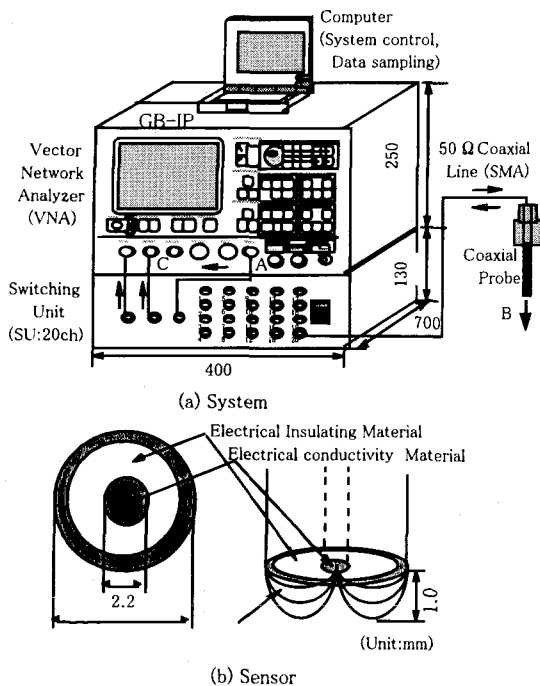


Fig.4 Schematic diagram of FDR-V system.

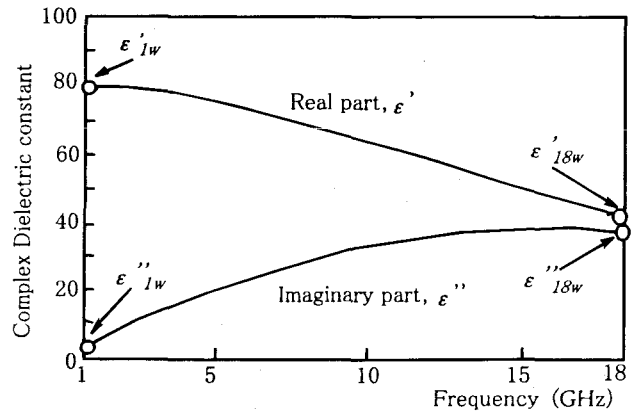


Fig.5 Complex dielectric constant of pure water versus frequency at 20 °C.

物の複素誘電率を算定する。なお、プローブの測定影響範囲は、Fig.4(b)のように、プローブ先端の1mm以内とごく近傍である。複素誘電率 $\epsilon^*$ は、式(2)で示される電気容量性(実数部)と導電性(虚数部)を示す指標である。つまり、主に実数部では水分量を、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[7]。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\epsilon'$ :誘電率実数部、 $\epsilon''$ :誘電率虚数部である。測定データとしてはFig.5のように1~18GHzの周波数範囲で401ポイントの複素誘電率の実数部 $\epsilon'$ と虚数部 $\epsilon''$ が得られる。したがって他の誘電法に比べて得られる情報が多いため、水分量だけでなく他の要素も測定が可能である。

#### 3.2 各試料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層で均一に締め固めて供試体を作成し、測定を行った。Fig.6に、それぞれ一定の温度、乾燥密度下で測定した結果を示す。ここでは最も変化の大きかった1GHz誘電率実数部( $\epsilon'_1$ )について整理した。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、ほぼ同一の曲線で校正が可能であるといえる。

#### 3.3 汚染物質濃度の測定

Fig.7に、Fig.6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、溶出イオンによる濃度上昇の影響をとらえていることから、この性質を利用して、不飽和砂における塩分濃度の校正を行った。各塩分濃度に対して体積含水率と1GHzの実数部の関係を測定した結果をFig.8に示す。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、次式で体積含水率を測定することが可能である。

$$\theta = -4.93 \times 10^{-5} \epsilon_1'^3 - 2.09 \times 10^{-4} \epsilon_1'^2 + 4.85 \times 10^{-2} \epsilon_1' - 1.29 \times 10^{-1} \quad (R^2 = 0.98) \dots (3)$$

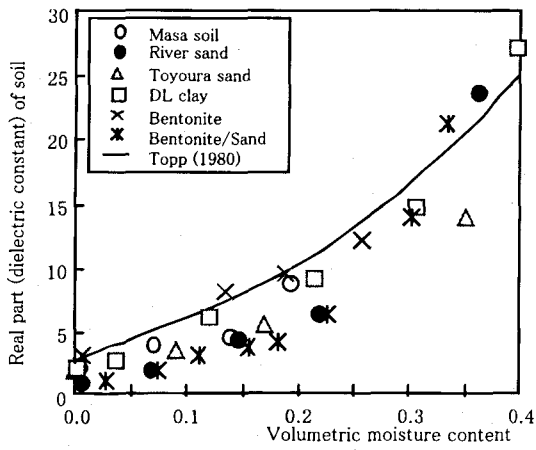


Fig.6 Real part at 1GHz of complex dielectric constant of each soil at 20 °C.

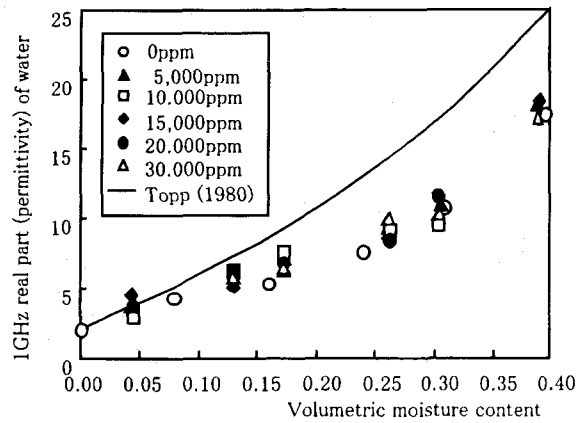


Fig.8 Real part versus volumetric moisture content for different salinities of soil. (Toyouira sand: n=0.43)

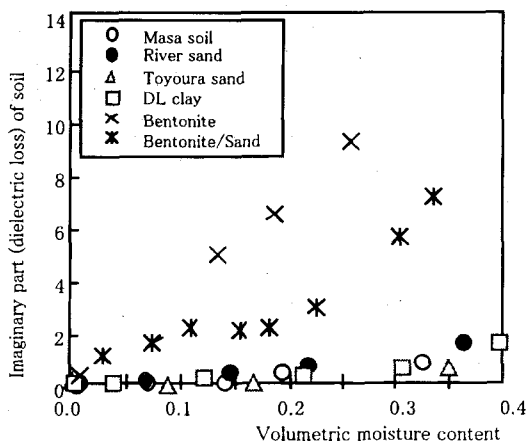


Fig.7 Imaginary part at 1GHz of complex dielectric constant of each soil at 20 °C.

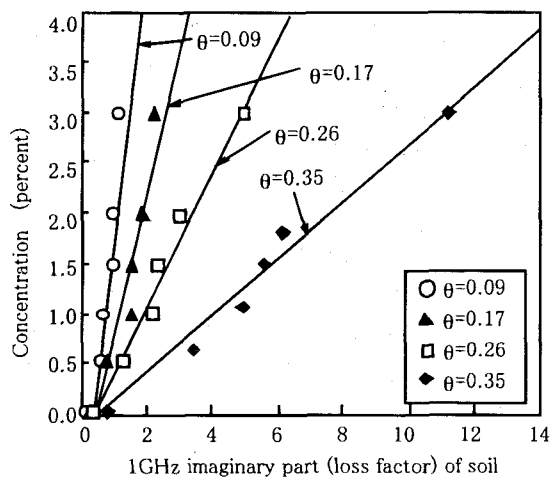


Fig.9 Concentration of salinity of soil versus 1GHz imaginary part for different volumetric moisture contents. (Toyouira sand: n=0.43)

一方、Fig.9は、異なる水分量に調整した供試体に対する  $\epsilon''$  と塩分濃度の関係を示したものである。それぞれの  $\theta$  に対して直線関係が認められる。そこで、式(3)より求めた  $\theta$  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

$$C = 6.42\theta - 0.16\epsilon'' + 8.26\epsilon'' \cdot \exp(-8.67\theta) - 2.03 \quad (R^2 = 0.90) \quad \dots(4)$$

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。Fig.10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。

#### 4 注入による地盤の誘電率測定手法

##### 4.1 概要

Fig.11に対象とする手法の概略図を示す。FDR法とFDR-V法のそれぞれの測定器と同軸ケーブルで接続した電極を地盤内に挿入する。同じパイプ内には注入管を設置しており、水と誘電率の異なる液体を

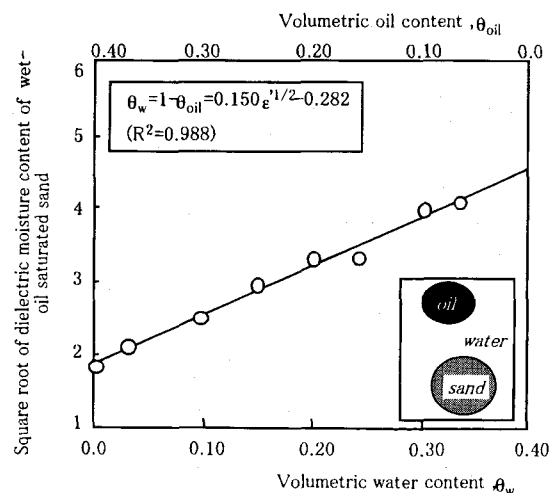


Fig.10 Calibration curve of oil-contaminated saturated soil. (Toyouira sand: n=0.40, oil=kerosene)

注入してその変化量から地盤の有効間隙率を算定する。なお、FDR-Vシステムは電極の先端部のみの測定であるので局所的な値を、FDRは電極の全域にわたって測定するので挿入した部分の平均値を測定する。

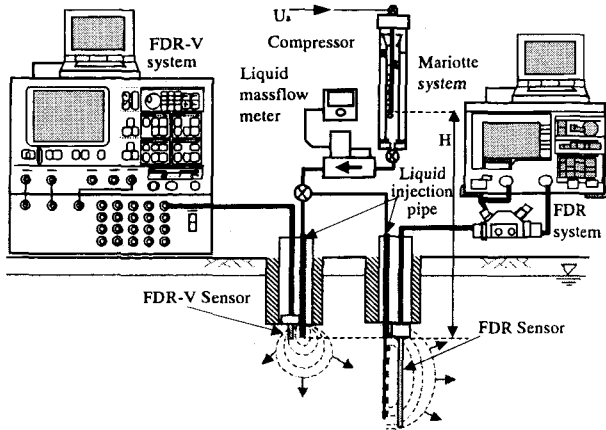


Fig.11 Schematic diagram of the effective porosity measuring method by the insitu injection technique.

#### 4.2 飽和地盤の間隙率の測定

飽和地盤において電極を挿入し、液体を注入する前の誘電率を測定すれば、体積含水率と誘電率の関係から間隙率  $n$  が求まる。Fig.12に測定した結果と

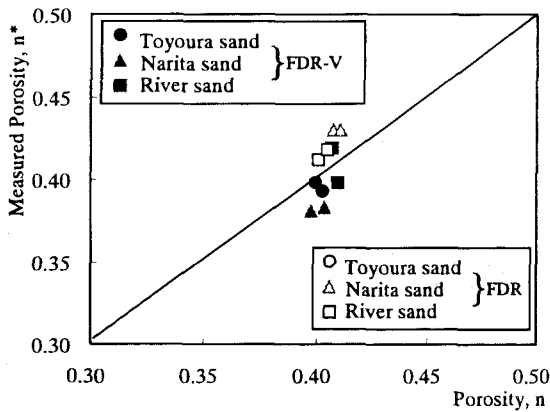


Fig.12 The measurement result of the porosity of the saturated sand.

Table 1 Effective porosity measurement result by the injection.

Method	Sand	Dielectric constant		Porosity $n$	Measured $n_e^*$	Ratio of $n_e^*/n$
		$\epsilon_{-initial}$	$\epsilon_{-final}$			
FDR-V	Toyoura	32.75	8.18	0.400	0.382	0.955
		32.37	8.49	0.403	0.381	0.945
	Narita	31.76	10.39	0.404	0.356	0.881
		31.57	10.93	0.398	0.340	0.854
River	34.65	10.04	0.407	0.366	0.899	
	33.02	9.06	0.410	0.384	0.937	
FDR	Toyoura	29.59	9.92	0.404	0.363	0.899
		29.59	10.05	0.404	0.361	0.894
	Narita	35.65	12.08	0.408	0.334	0.819
		35.66	10.98	0.411	0.354	0.861
River	34.05	10.92	0.401	0.343	0.855	
	34.49	11.66	0.405	0.337	0.832	

実際の間隙率の比較を示す。一部、電極の挿入による攪乱の影響が現れているが、高精度で測定が可能であるといえる。

#### 4.3 注入による飽和砂試料に対する測定結果

次に、先の供試体に対してエタノール水溶液(95%)を注入してFDR-V法とFDR法で誘電率の経時的な変化を測定した。なお、有効間隙率  $n_e$  はを次式により算定される。

$$\epsilon_{ep} = \epsilon_s(1-n) + \epsilon_w(n-n_e) + \epsilon_{eth} \cdot n_e \quad \dots (5)$$

ここで、 $\epsilon_w$   $\epsilon_{eth}$  : 土粒子、水、エタノール水溶液の誘電率、 $n$  : 地盤の間隙率、 $\epsilon_{ep}$  : 注入後の地盤の誘電率である。

Table 1 に、それぞれの測定結果を示す。いずれも間隙率の約80~95%程度の値となった。また、FDR-Vの方がFDRよりもやや高い値を示す傾向が現れている。これは、端面で測定するFDR-V法と比較して広範囲のFDR法の方がより注入による浸透部分の平均値を示しているためである。

#### 4.4 結果の妥当性の検証

次に、これらの測定値の妥当性を検証するため、Fig.13のような鉛直一次元トレーサー試験装置を用いて実際の有効間隙率を測定した [8]。トレーサーは、単位体積重量を水と等しくしたエタノール調整水溶液を用い、パルス状に注入した。Fig.14に豊浦砂に対する流出水の濃度経時変化を示す。有効間隙率の算定には、 $C/C_0=0.5$ となった時間を用いた。さらに、トレーサーをパルスではなく継続的に注入し

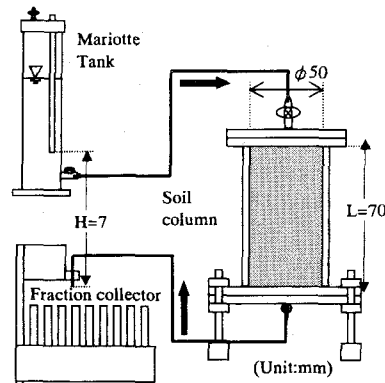


Fig. 13 The schematic diagram of tracer test.

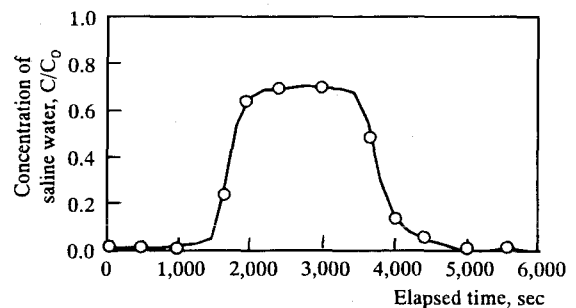


Fig.14 Break through curve by tracer test. (Toyoura sand)

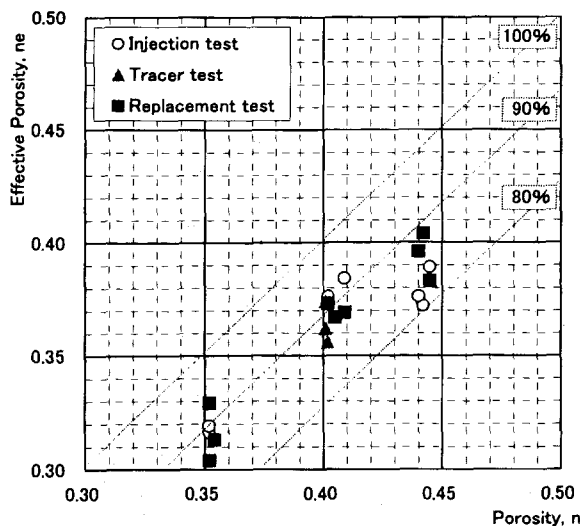


Fig.15 The comparison of the measurement results of the effective porosity (FDR).

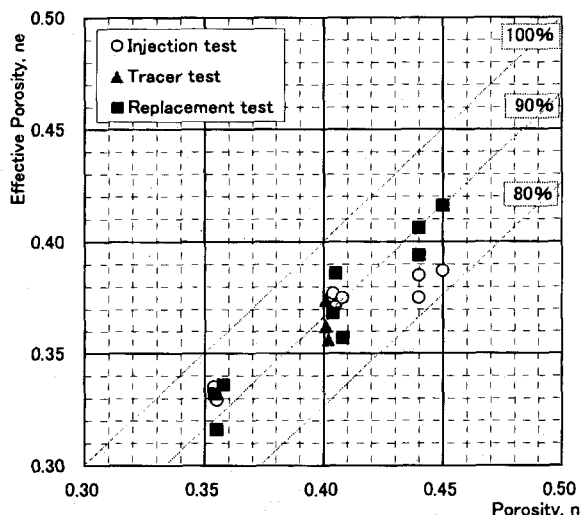


Fig.16 The comparison of the measurement results of the effective porosity (FDR-V).

て置換を行い、流出流量と濃度変化から有効間隙率を求めた。

これを置換試験として、先のトレーサー試験と併せて、FDRとFDR-Vに対してTable 1の注入試験結果と比較した結果をそれぞれFig.15, Fig.16に示す。これらの図から両者はほぼ良好な一致を示しており、今回提案した方法が妥当性が示された。

## 5 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誘電率計測法の適用性を検討するために、FDR法とFDR-V法を用いて基礎的な測定を行った。さらに、これまで把握が困難であった有効間隙率の原位置での測定手法を提案した。

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。

- (2) 飽和地盤に対しては、誘電率の一つの測定値のみで、比較的容易に汚染度が測定可能であることを示した。
- (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、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。
- (4) 地盤に挿入したセンサー周辺に水とは誘電率の異なる液体を注入し、その変化から有効間隙率を求める方法を提案した。この手法の有効性を検討するため、室内試験において数種類の砂試料に対して注入試験を行った。その結果、各測定値とも間隙率の約80~95%程度の結果が得られ、別途実施したトレーサー試験結果と比較して良好な一致を得た。ここで、トレーサーとして実際の汚染物質を用いることで、より正確な有効間隙率の値を得ることが出来る。

なお、計測システムの原位置への適用については、センサーの設置方法や液体の注入圧力・速度・影響範囲等の注入方法の検討が必要である。最終的には、飽和・不飽和地盤での汚染度と有効間隙率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。

最後に、本研究の一部は八雲環境科学振興財団の研究助成により実施された。ここに記して謝意を表する次第である。

## 文 献

1. 冀北平, 三野徹, 赤江剛夫, 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, No.182, pp.25~30 (1996)
2. 西垣誠, 小松満, 熊本創, 二宮功, 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, No.47-10, pp.17-20 (1999)
3. Whally, W.R., Consideration on the Use of Time-Domain Reflectometry (TDR) for Measuring Soil Water Content, Journal of Soil Science. 44: 1-9 (1993)
4. Topp, G.C., J.L. Davis & A.P. Annan, Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines., Water Resources Research, 16(3): 574-582 (1980)
5. Udo, K., Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature. Journal of Chemical and Engineering Data. 34(4): 371-374 (1989)
6. Komatsu M., M.Nishigaki, Study on in-situ measuring system of subsurface contamination using Frequency Domain Reflectometry, Environmental Geotechnics (4th ICEG), (de Mello & Almeida eds), pp.521-526 (2002)
7. Ulaby, F. T, R. M, Moore, A. F. Fung, Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume III, From Theory to Applications, Artech House, pp.2017-2103 (1986)
8. Shackelford C. D., Critical concepts for column testing, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.120, No.10, pp.1804-1828 (1994)