

FDR法による高配合圧縮ベントナイト系材料の 水分量測定方法に関する研究

西垣 誠* 小松 満* 千々松 正和**

Measuring Method of Water Content for High compacted Bentonite Block by using Frequency Domain Reflectometry

Makoto NISHIGAKI*, Mitsuru KOMATSU* and Masakazu CHIJIMATSU**

(Received December 28, 2005)

In the high-level radioactive waste disposal project, in order to know the infiltration behavior, it have to be examined that the bentonite buffer material is used as a barrier, and the measuring device of moisture with the high accuracy is required. In this study it is discussed the usefulness for Frequency Domain Reflectometry (FDR) method through the measuring dielectric constant and making the calibration curve for the several kinds of bentonite material block (pure and silica sand mixing).

Key Words: *Measuring Syatem, Bentonite, Volumetric mousture content, Frequency domain reflectometry*

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の地層処分における緩衝材, 余裕深度処分における低透水層, 地下施設の埋め戻し材等にベントナイト系材料を用いることが検討されており(佐久間, 1992; 駒田, 2003), その性能評価を行う上で, 地下水の浸潤挙動を正確に把握することが重要である。そこで, ベントナイト系材料の浸透特性や膨潤特性に関しては, これまでも数多くの研究が行われてきたが(竹内ら, 1995; Komine et al., 1999), メカニズムや物理特性などでなお未知な点が多い。さらに, 実際の施工直後においてこれらは不飽和状態であり, 再冠水に伴って水分状態が時々刻々と変化することから, 各飽和度での浸透及び膨潤挙動の把握が必要とされ, 問題としては非常に複雑である。ここで, ベントナイト系材料の浸透特性を把握する上での問題点を挙げると以下のようになる。

- 1) 砂質土や礫類に比べて透水性がきわめて低いことから, 試験に長時間を要する。
- 2) 測定重量が微量であるため, 結果に精度上の問題が生じる。

- 3) 浸透に伴い膨張・収縮などの体積変化を生じ, 透水係数や水分特性曲線が変化する。
- 4) 試験に用いる含水量・圧力・密度等の計測装置に測定範囲や測定時間等の制約がある。

特に, 水分量測定装置に関しては, 微小な水分移動の測定装置や原位置での経時的なモニタリングに適した装置が皆無であることから試験を行う上での障害となっており, 現在, より適用性の高い計測システムの開発が急務となっている。そこで, 本研究では, 複素誘電率を測定するFDR法⁵⁾を採用し, 圧縮ベントナイト材料に対する適用性を確認することを目的とした。

2. 測定概要

FDR法は同軸ケーブルの先端での反射特性から誘電率を測定する方法である(西垣ら, 2004)。また, イオン系の物質が混入した場合でも複素数(誘電率と誘電損失)を取り扱うため, 他の誘電率を測定する方法に比べて有利な点が多い。今回用いた2種類のFDR装置を**Photo 1, 2**に示す。周波数の違いによる測定値の変化を把握するため, 周波数領域の異なる2種類の装置(V1: 1~18GHz, V2: 0.1~3GHz)を用いた。

*岡山大学大学院環境学研究科
**間組技術・環境本部原子力部

3. 供試体の作成・測定ケース

測定を実施した試料は山形県産Na型ペントナイト (Kと称する) と米国ワイオミング産Na型ペントナイト (Mと称する) 2種類であり、それぞれ乾燥粉末で分級されたものと原鉱を用いた。測定ケースをTable 1に示す。また、それぞれの試料に対する測定ケースをTable 2に示す。各乾燥密度で含水比を調整した供試体を用い、20℃の恒温室内で測定した。なお、結果の整理方法としては、供試体の表面を5箇所測定した後、その平均値で評価した。

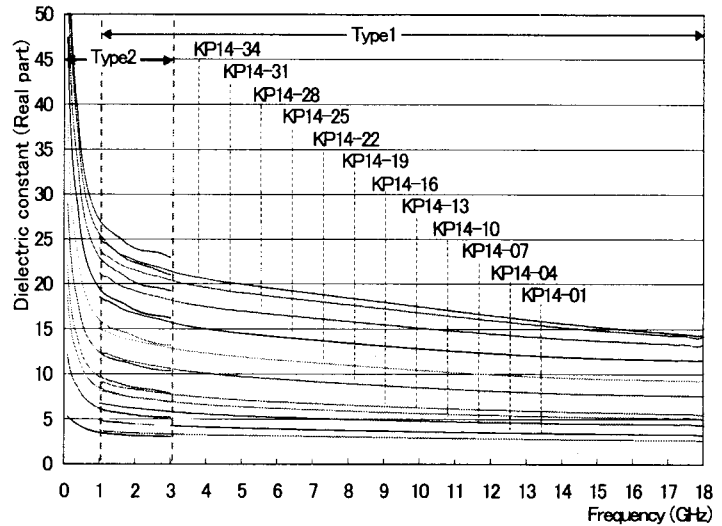
4. 測定結果

(1) 誘電率の周波数特性

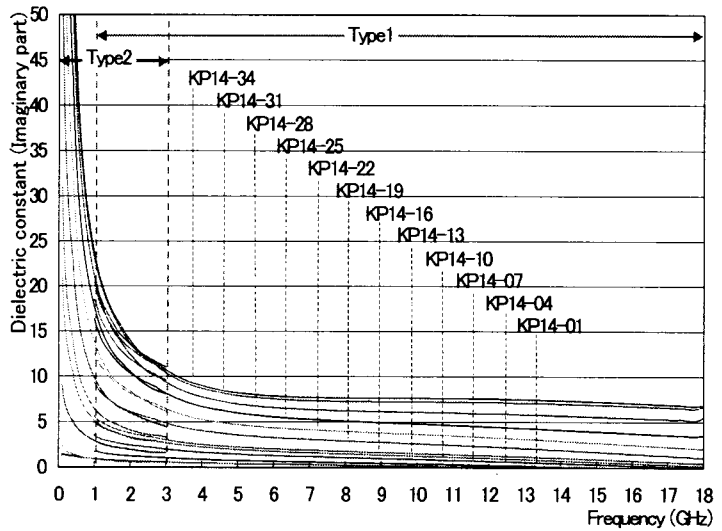
測定結果の一例として、Fig.2にKP14における誘電率(DCと称する)と周波数の関係を示す。同図において、含水率が増加するとともに実数部、虚数部とも値が増加していくことがわかる。また、周波数が低い程大きな値となっており、特に通常の土質試料には見られない虚数部の値の変化が大きい。これは、含水率が高い程ペントナイト中のイオン濃度の影響で誘電損失が生じているものであり、特に低い周波数領域において顕著である。

(2) 含水比による変化

Fig.2の結果を基に含水比(WCと称する)で整理した結果をFig.3に示す。含水比が上昇するほど実数部、虚数部ともに上昇していることが分かる。供試体内の水分量の増加に伴い、ペントナイト中のイオン物質が水分中に溶解する量

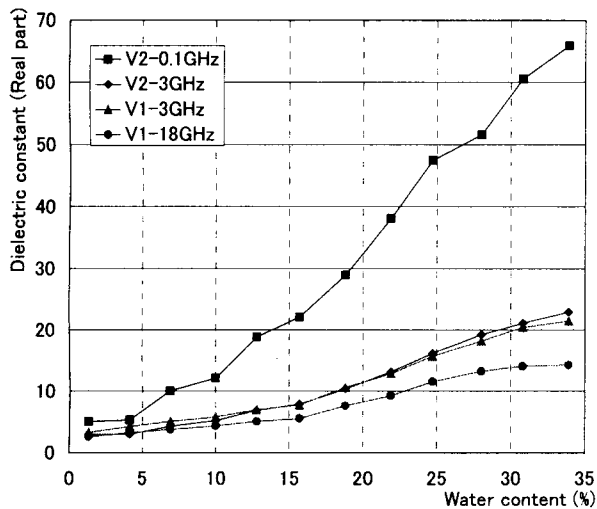


(a) Real part

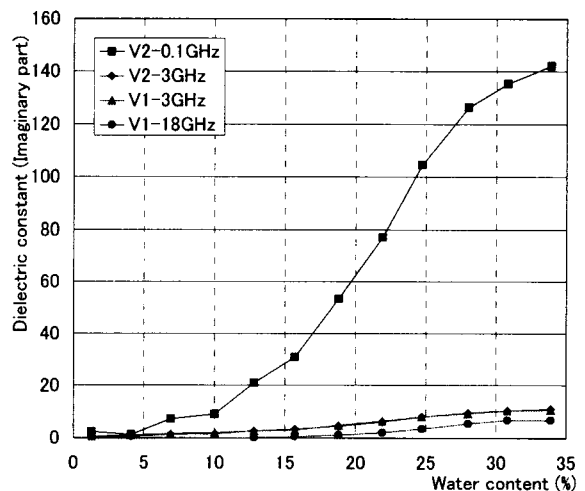


(b) Imaginary part

Fig.2 Relationships between dielectric constant (DC) and frequency of KP



(a) Real part



(b) Imaginary part

Fig.3 Relationships between DC and water content of KP14

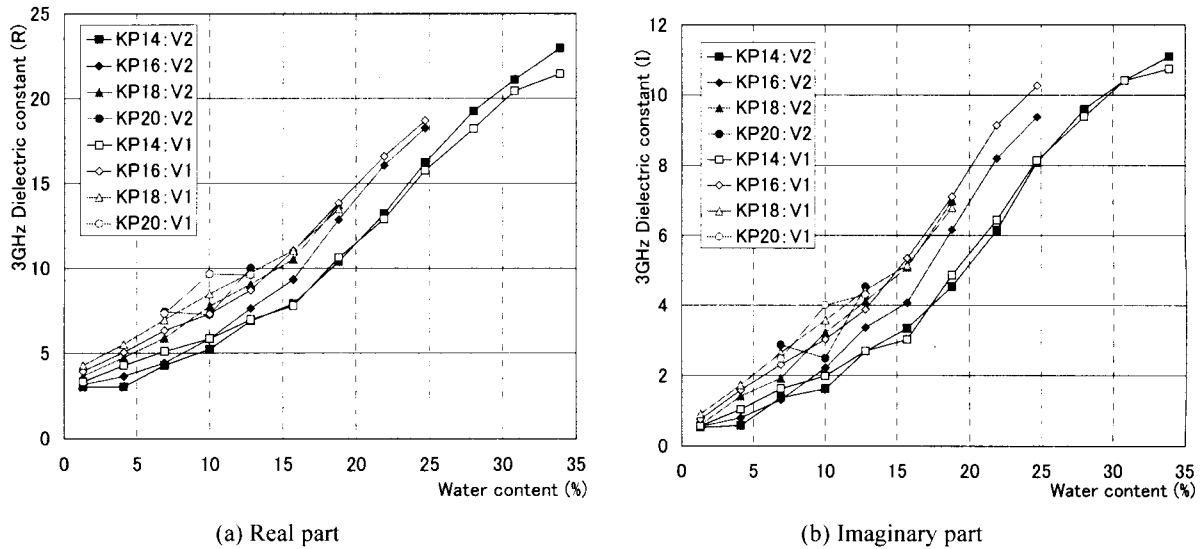


Fig.4 Relationships between DC and water content of KP at 3GHz

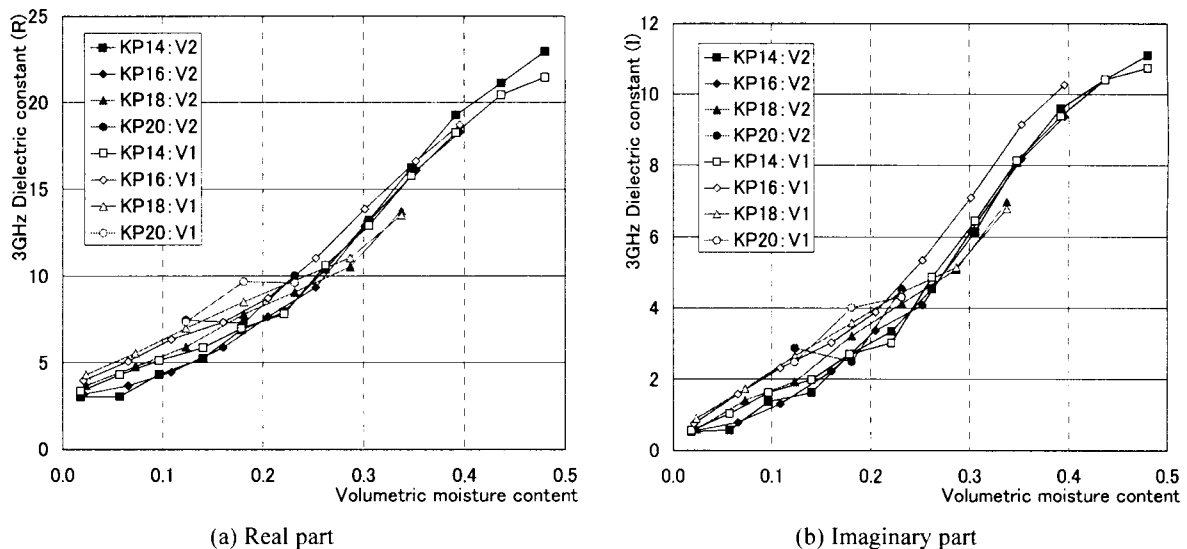


Fig.5 Relationships between DC and volumetric moisture content of KP at 3GHz

が増加するためであると考えられる。また、周波数が大きいくほど、誘電率の値は低下している。これは、1GHz以上において周波数の増加に伴い分極による影響が生じるためであり、供試体が誘電体であるにもかかわらず非常に大きな誘電損失を持つことがわかる。その一方で1GHz以下の領域では通常は一定の値となる。通常、TDR(Topp et al. 1980)やADR(中島ら, 1998)のような誘電率を計測する方法は、誘電損失がある値以上になると被測定物が誘電性よりも導電性が卓越するため、電磁波を加えても測定に必要な反射波が生じず計測が不能となる。この点は本手法の大きな利点である。次に、Fig.4にV1とV2のそれぞれ両方で測定した3GHzにおけるKPの含水比と誘電率の関係を示す。乾燥密度が高いほど、実数部・虚数部とも値が増加している。これは、本手法がある一定の体積内に含まれる水分量を計測しているためであり、同じ含水比の供試体でも乾燥密度が増加する

と同体積中の水分量が増加するためである。虚数部の値が増加しているのは、水分量の増加に伴い、イオン濃度が増加しているためである。

(3) 体積含水率と誘電率の関係

Fig.5に体積含水率と誘電率の関係を示す。体積含水率が増えるほど誘電率実数部の値は増加するが、同様に虚数部も増加する。また、乾燥密度が違ってても、実数部・虚数部ともに、ほぼ一定の値となる。つまり、校正曲線においては乾燥密度の違いによらず一つの曲線の適用が可能である。

5. 校正曲線の作成

上述の結果を踏まえて、3GHzの実数部におけるデータを用いて校正曲線を作成した。Fig.6に3GHzにおける全試料の誘電率実数部データと校正曲線及び

Top(1980)がTDRを用いて作成した土質試料に対する校正曲線を示す。ここで、同定された校正曲線は次式(1)で示される。

$$\theta = 6.55 \times 10^{-5} \epsilon_{R3}^3 - 3.51 \times 10^{-3} \epsilon_{R3}^2 + 7.42 \times 10^{-2} \epsilon_{R3} - 1.85 \times 10^{-1} \quad (R^2=0.895) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 θ : 体積含水率, ϵ_{R3} : 3GHzにおける誘電率実数部, R^2 : 相関係数である。高含水比領域でToppの校正曲線から外れているのは、ベントナイトの誘電損失が原因であると判断できる。また、Fig.7に式(1)により推定された校正曲線の精度を示す。この図から式(1)を適用した場合の精度は約20% (体積含水率0.1)程度となる。このことから、ベントナイトの種類によってばらつきが生じるため、より精度の高い測定を行う際の校正曲線作成には、個別に作成したものを適用する方が望ましいと判断できる。そこで、Fig.8及びFig.9にKPのみの結果を示す。校正精度はより増し、約5% (体積含水率0.025)程度となった。同様にして、Fig.10及びFig.11

にKG, Fig.12及びFig.13にKS, Fig.14及びFig.15にMP, Fig.16及びFig.17にMGの結果をそれぞれ示す。校正精度は、約5~15%となっているが、ベントナイト単体の結果は比較的ばらつきが小さい一方で原鉱については大きい。これは原鉱の方が粒子が大きくブロック作製の際に均一な水分分布でないことと、FDRプローブ自体が局所的な測定範囲であるために、この水分分布のばらつきに対して直接影響を受けたものと推察される。

そこで、次に測定精度の向上を目標に、Photo 4に示すより大きな断面積(φ15mm)のプローブを作成して同様の測定を実施した。Fig.18にMGにおける体積含水率と誘電率の関係、Fig.19に測定精度を示す。これらの結果から、測定精度が約15%から約5%と大幅に向上していることがわかる。MGはKPよりも粒径が大きいため、小さな断面積のプローブではばらつきが大きいことがこれらの原因であり、より大きなプローブを用いることでより平均化した結果を得ることが可能となった。

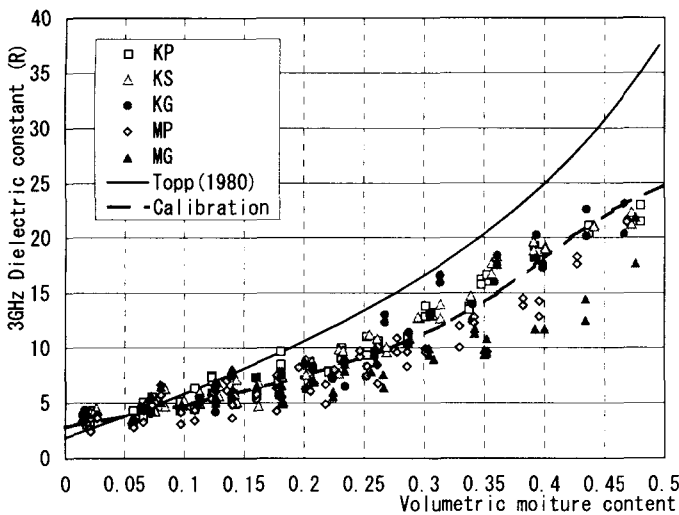


Fig.6 Relationships between DC and volumetric moisture content.

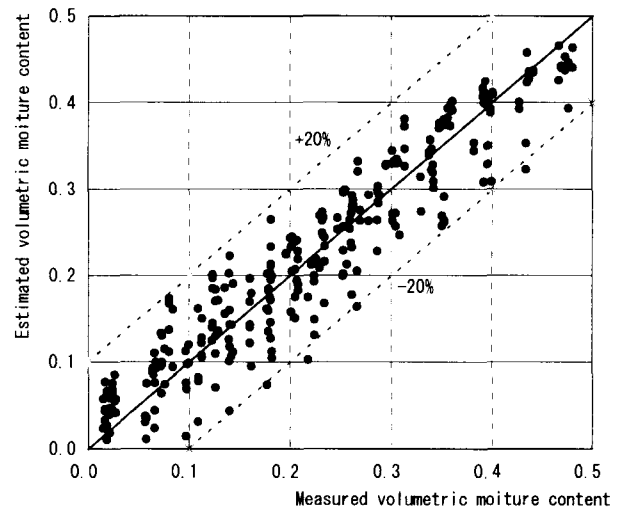


Fig.7 Accuracy of measured data.

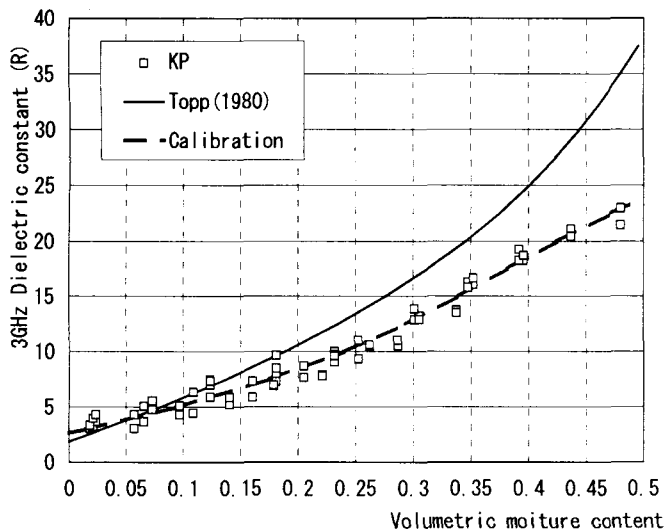


Fig.8 Calibration data of KP.

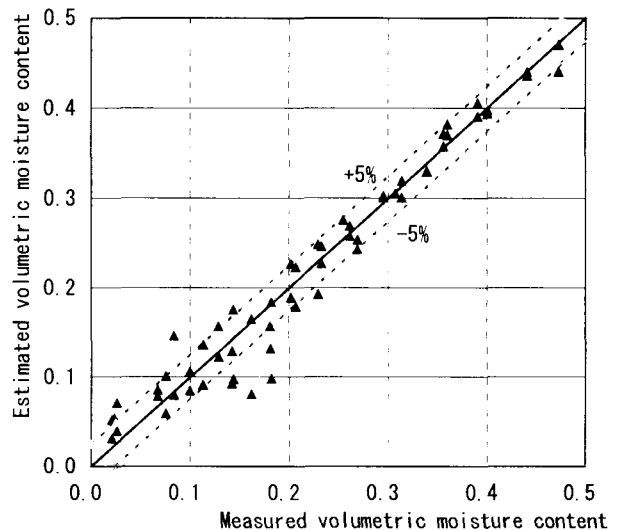


Fig.9 Accuracy for measured data of KP.

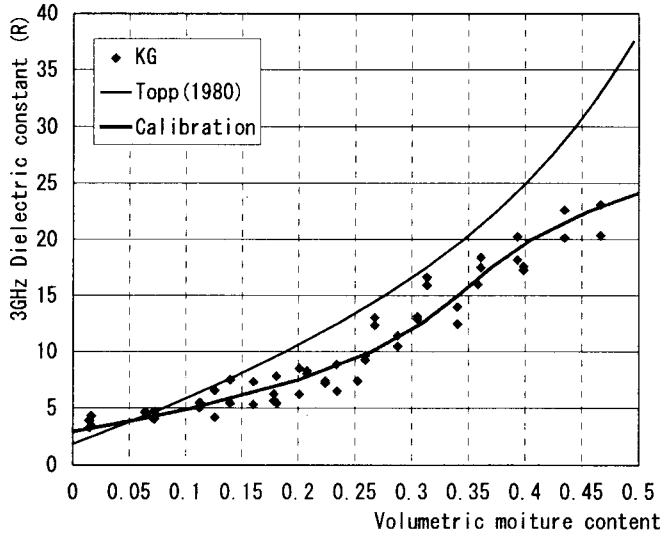


Fig.10 Calibration data of KG.

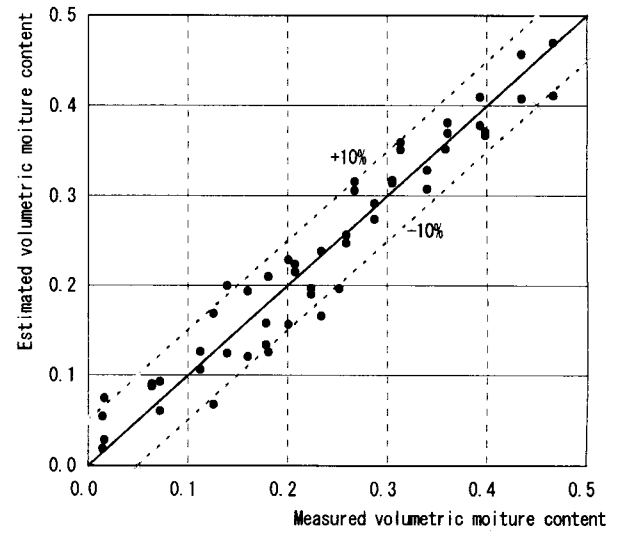


Fig.11 Accuracy for measured data of KG.

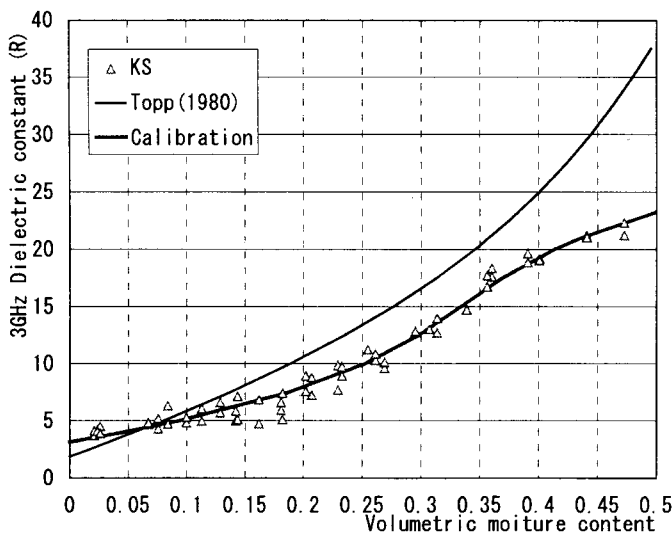


Fig.12 Calibration data of KS.

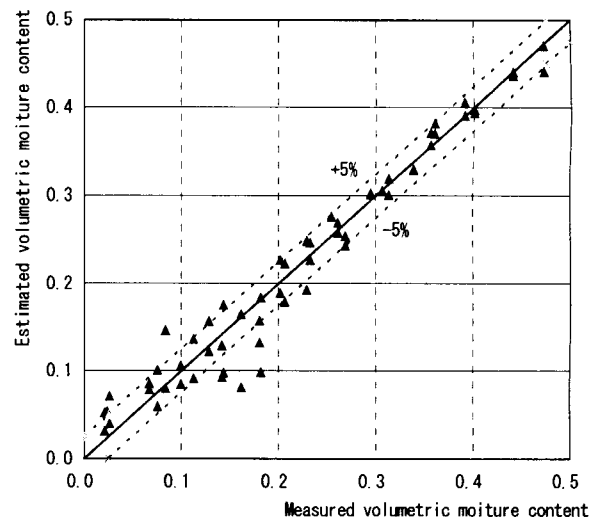


Fig.13 Accuracy for measured data of KS.

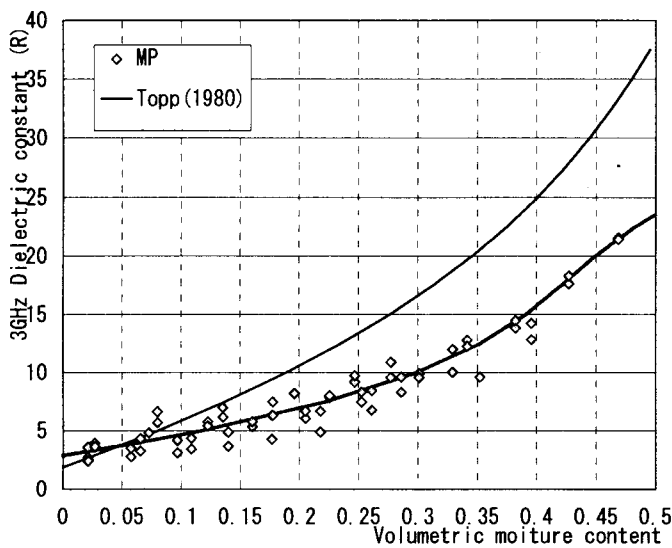


Fig.14 Calibration data of MP.

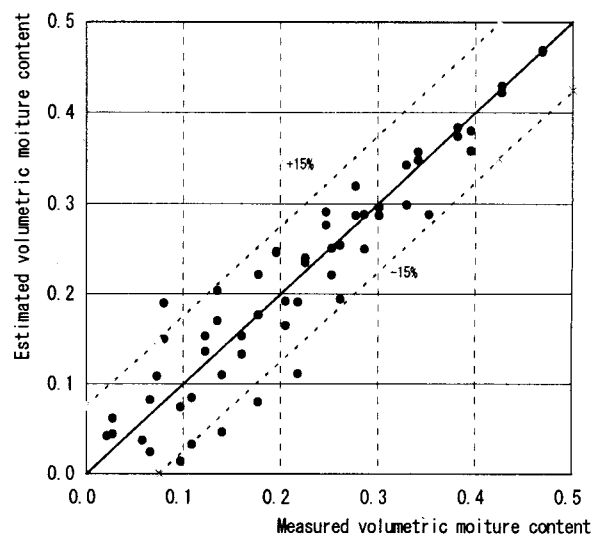


Fig.15 Accuracy for measured data of MP.

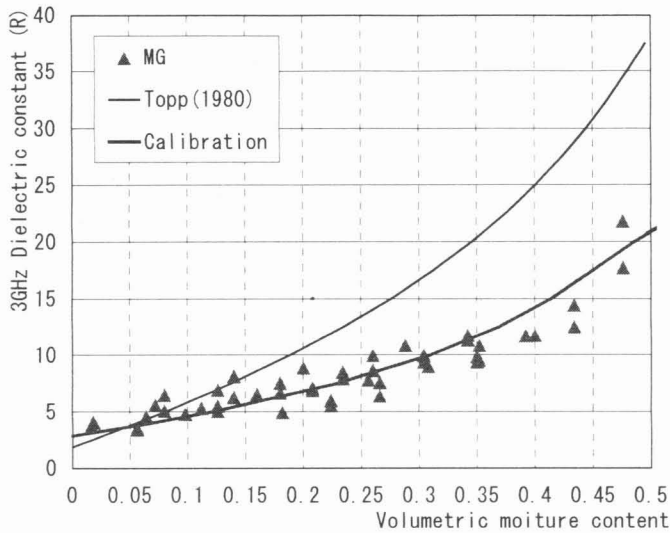


Fig.16 Calibration data of MG.

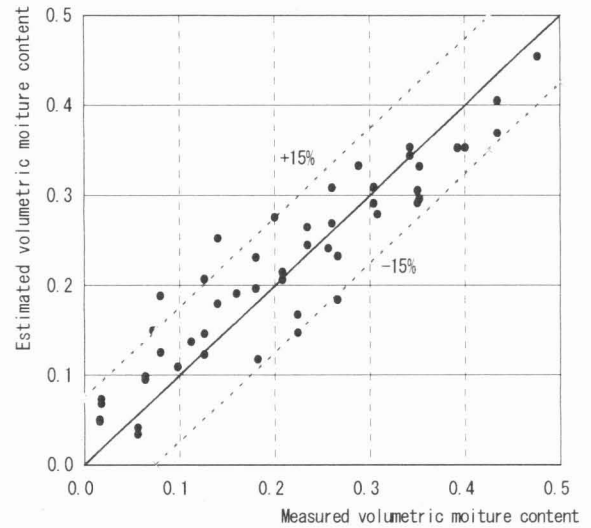


Fig.17 Accuracy for measured data of MG.

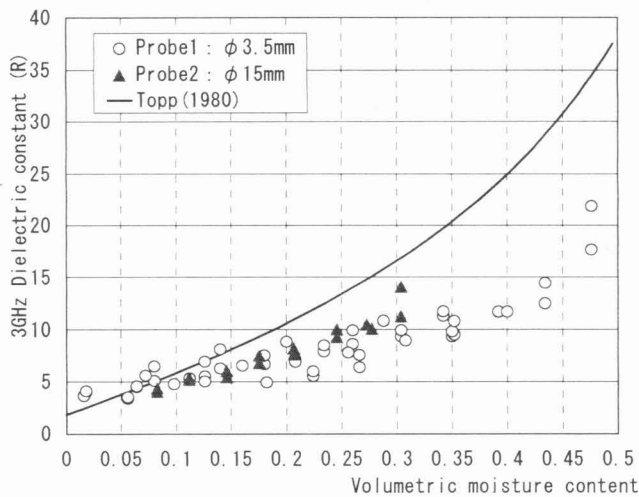


Fig.18 Calibration data of MG for different probe type.

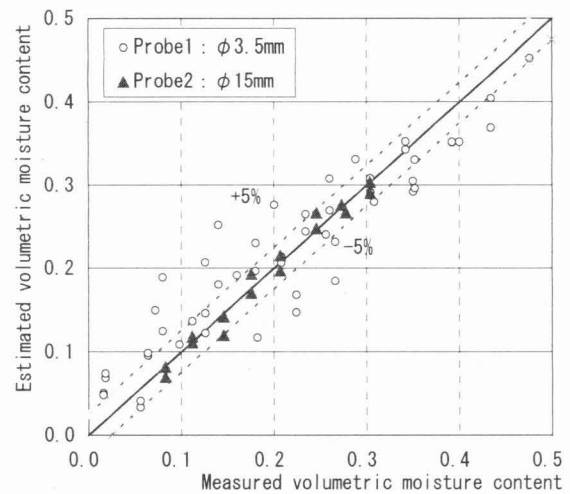
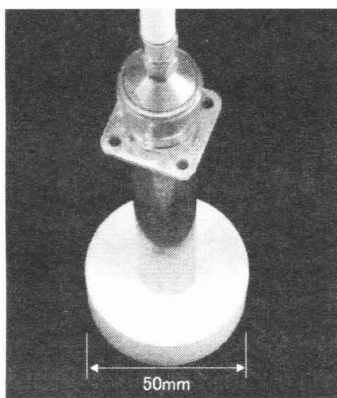


Fig.19 Accuracy for measured data of MG.

Photo 4 ϕ 15mm Probe and Specimen.

6. まとめ

本研究では、複素誘電率を周波数領域で測定する FDR 法を用いて、乾燥密度の異なるベントナイト単体のブロック状供試体の測定を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 体積含水率で整理した誘電率 3GHz 実数部のデータで校正曲線を作成した結果、平均約 10%程度(0.05)の誤差でキャリブレーションが可能となった。なお、3GHz 付近のデータは他の周波数のものと比べて比較的ばらつきが小さいため、この周波数での値を採用した。
- (2) 同一試料における実数部に対する乾燥密度の違いによる変化は小さいため、密度の影響をよらず、体積含水率の測定が可能である。
- (3) ベントナイトの種類が同一の場合、試料の違いによる変化は小さいため、単一の校正曲線を用いての測定が可能であるが、試料毎の校正曲線を別途作成することで、より精度の高い測定が可能である。
- (4) 断面積のより大きなプローブを用いることで、測定精度は向上する。

なお、今後の課題としては、温度に対する影響や計測の長期安定性を確認することが挙げられる。

参考文献

- 佐久間秀樹：高レベル放射性廃棄物と地層処分, 応用地質32巻6号, 1992.
- 駒田広也：地層処分と地質環境, 地質と調査, Vol.95, No.1, pp.19-24, 2003.
- 竹内真司・原啓二・中野政詩：圧縮ベントナイトの水分特性曲線及び水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学会論文報告集Vol.35, No.3, pp.129-137, 1995.
- Komine, H., N. Ogata : Experimental Study on Swelling Characteristics of Sand-Bentonite Mixture for Nuclear waste disposal, Soils and Foundations, Vol.34, No.2, pp.83-97, 1999.
- 西垣誠・小松満・金萬鎰：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, 地下水学会誌, 第46巻, 第2号, pp.145-157, 2004.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan : Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resour. Res., 16(3): 574~582, 1980.
- 中島誠・井上光弘・澤田和男・クリスニコル：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, 1998.