

静電容量センサによるベントナイト系材料の水分量計測に関する基礎的研究

Fundamental Study on Moisture Measurement of Sand-bentonite Mixture Using a Capacitance Sensor

小松 満	Mitsuru KOMATSU	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
佃 明恵	Akie TSUKUDA	(岡山大学大学院環境生命科学研究科)
榊 利博	Toshihiro SAKAKI	(スイス放射性廃棄物管理共同組合)

放射性廃棄物地層処分に関する研究において、緩衝材及び処分坑道の埋戻し材の再冠水挙動を評価することが重要な課題となっている。そこで、本研究では原位置でベントナイト系材料の水分量をモニタリングする手法に着目し、誘電率を計測する従来の手法よりも比較的安価な市販の静電容量センサの適用性について検討した。具体的には、ベントナイト70%と砂30%の混合材料を対象に、校正曲線の特徴について考察するとともに、一次元浸潤試験を実施して計測精度を確認した。その結果、飽和付近において感度が低下する傾向が見られたが、校正方法を見直した上で校正曲線を再検討した結果、一定の適用性を確認することができた。

キーワード：ベントナイト、体積含水率、静電容量センサ、再冠水 (IGC : D-4)

1. はじめに

現在、我が国の原子力政策において大きな課題となっているのが放射性廃棄物処分への取り組みであり、その中でも、使用済み燃料の再処理により発生する高レベル及びTRU廃棄物処分が挙げられる。このうち、高レベル放射性廃棄物は2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」¹⁾に基づき、地下300mより深い安定した地層中に処分することとされている。

地層処分の基本的概念は、天然の地層に工学的な対策を組み合わせた多重バリアシステムにあり^{2),3)}、岩盤(天然バリア)、ガラス固化体及びオーバーパック、緩衝材の人工隔壁(人工バリア)を組み合わせたものとなっている。このうち緩衝材はオーバーパックと岩盤の間に充填され、地下水による放射性核種の溶解と移行を抑制することによって、廃棄物に含まれる放射性物質による影響が人間環境に及ばない役割が求められており、深地層における地盤特性の把握や適用する地盤材料の性能評価など、地盤工学上の課題は多い⁴⁾。

一方、岩盤中に坑道が掘削されると、掘削影響領域(EDZ)が発生し、割れ目の発生や進展、応力状態や間隙水圧の変化などが生じる懸念がある。また、坑道の掘削により湧水が生じ、岩盤中の地下水の流出と流入のバランスが崩れると、坑道周辺の岩盤内に不飽和領域が形成される可能性がある⁵⁾。不飽和領域が廃棄物を埋設する処分坑道周辺に形成されると、埋戻し後の処分坑道には空気などの気相が存在する状態となる。さらに、緩衝材及び埋戻し材の施工直後の状態は不飽和であり、再冠水によって飽和状態へと移行するものの、長期間不飽和状態を保つ可能性もある。なお、気相の存在は、地層処分において、オーバーパックの腐食挙動や地下環境(天

然バリア)の還元性環境への回復などに影響すると考えられるため、不飽和領域の影響は処分システムの性能評価において適切に検討すべき項目であるとともに、現地での飽和状態への移行過程、すなわち水分量のモニタリングが重要である。

現在、我が国では、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構により、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発が行われている。幌延深地層研究所では、地下施設の建設と並行して、堆積岩を対象に掘削影響試験や模擬廃棄体を用いた実証試験が実施されている⁶⁾。また、瑞浪超深地層研究所では、花崗岩を対象にした地層科学研究が行われている⁷⁾。いずれも岩盤と緩衝材及び埋戻し材に対する再冠水挙動の評価のために坑道内での水分量のモニタリングが進められている。

ここで、ベントナイト系材料の水分量のモニタリングに関する既往の研究をまとめる。まず、Dirksen and Dasbergは、ベントナイトとともに数種の土質材料についてTDR(Time domain reflectometry)法を用いて誘電率を測定し、ベントナイト系材料の誘電特性が他の材料と異なること、その原因として乾燥密度や比表面積が影響していることを指摘している⁸⁾。また、RobinsonはDirksen and Dasbergが示した結果を基に、TDR法による誘電率の測定における誘電損失成分について種々の検討を行っている^{9), 10)}。Kellenersらは、TDR法とキャパシタンス法(静電容量法)を用いて砂とベントナイトの誘電率を測定している¹¹⁾。この研究では、同時にネットワークアナライザーを用いた測定結果も示しており、ベントナイト中の体積含水率が $0.401 \leq \theta \leq 0.877$ の範囲ではTDR法の反射信号が減衰のために現れず、測定結果を得る事が出来なかったとしている。また、近年、複素誘電率の測定例も見られるようになっている。

Logsdon は、サンプルホルダー内に数種類の土質試料をそれぞれ詰め、10MHz~1GHz の周波数帯での測定結果を示している¹²⁾。圧縮ベントナイトに関しては、Kupfer らがネットワークアナライザを用いた TDR 法により、透過プローブ内にベントナイトと砂の混合材を入れ、種々の乾燥密度に対する複素誘電率の測定を実施している¹³⁾。

一方、近年、市販の静電容量センサが土壌の水分量のモニタリングに広く用いられるようになってきており、電磁波の発信及び受信装置が必要な TDR 法やネットワークアナライザを用いる方法よりも簡易な手法としてその応用が期待されている。そこで、本研究では、処分坑道閉鎖後の再冠水挙動を評価する上で重要な項目となっている水分量の測定について、埋戻し材を対象に、砂を混合したベントナイト系材料に対する市販の静電容量センサの適用性を検討した。なお、検討にあたっては、筆者らがこれまで提案してきた水分量の計測方法である FDR-V(Frequency dime domain reflectometry)法^{14),15),16),17)}と比較する形で実施した。

2. 静電容量センサによる校正

2.1 イオン濃度に対する測定値の変化

本研究で用いた市販の静電容量センサの電極厚さは約 1.6~1.7 mm であり、測定範囲は、電極の厚さ方向に約 1cm、面方向に約 2cm である¹⁸⁾。ベントナイト系材料は間隙水への溶出イオンが多く存在することから、まず、塩水の濃度を変化させて出力値の変化を確認した。図-1 にセンサの出力値と塩水濃度の関係を示す。なお、計測結果は、センサからの出力値 (Raw Data) で整理した。その結果として、濃度 1.0%までの間で大きく増加する傾向を示した。次に、図-2 にベントナイト混合土の間隙水のイオン濃度の変化を示す。同図は、供試体を作製する際の溶液の塩分濃度を変化させた上で、間隙水の濃度をリーチング試験により測定した結果であり、図中の凡例は各体積含水率に対する Na イオン及び Cl イオンの濃度を示している。ここで、低い溶液濃度でも間隙水は高いイオン濃度を示すことが分かる。つまり、静電容量センサでベントナイト系材料を測定する場合、通常の土質試料よりも高い値を示すこととなる^{19),20)}。

一方、本研究で比較対象として用いる FDR-V 法の基本システムは、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 (測定面の直径 ϕ 12mm) から構成されており、それぞれが 50 Ω の同軸伝送線により接続されている¹⁴⁾。測定原理はプローブ先端における電磁波の反射係数の比を求めることで比誘電率 (以下、単に誘電率と称する) を算定するものであり、25MHz ~4GHz の範囲で実数部と虚数部の誘電率が得られるが、本研究での計測値は 1GHz の値で評価した。

複素誘電率に対する塩濃度の影響について、図-3のよ

うに、Santamarinaら²¹⁾により水と塩水の誘電率の実数部と虚数部の値が示されている。周波数が低い領域では、誘電損失成分である虚数部が大きくなるが、実数部では 1GHz においてもわずかな変化となっている。つまり、FDR-V法はイオン系物質が混入した場合や誘電損失の大きな物質に対しても誘電成分と損失成分を分離した測定が可能であることが特徴である。

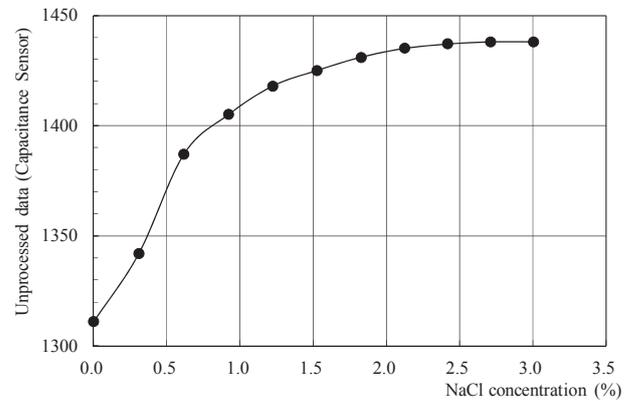


図-1 複素誘電率に対する塩濃度の影響¹³⁾

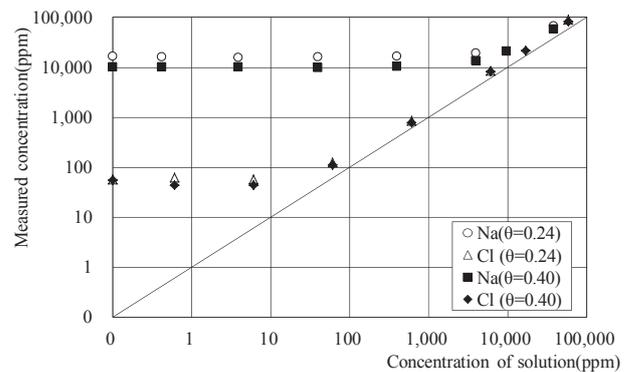
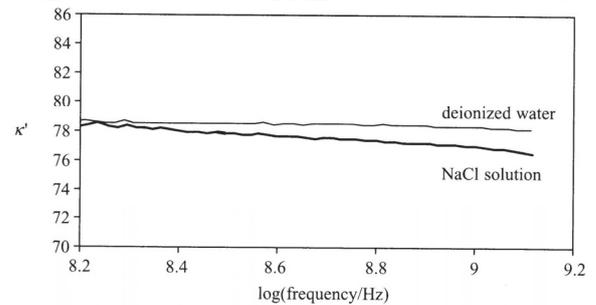
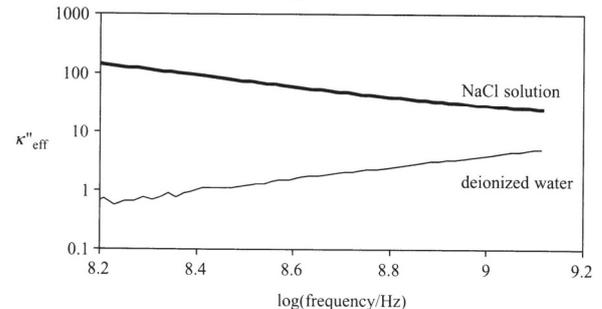


図-2 ベントナイト混合土の間隙水のイオン濃度



(a) 誘電率実数部



(b) 誘電率虚数部

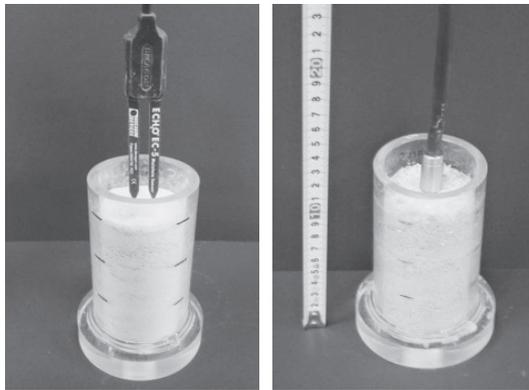
図-3 複素誘電率に対する塩濃度の影響¹³⁾

2.2 試料及び測定方法

山形県産Na型ベントナイトと珪砂の混合材料を体積150cm³の亚克力製容器に充填した供試体を作成した。高レベル放射瀬廃棄物処分場で使用される計画の埋戻し材を対象とした供試体の仕様を表-1に示す。炉乾燥させたベントナイト系材料に所定の水分を加えて十分に攪拌した後、3層に分けて所定の高さになるように締め固めた。また、センサ設置前の状況を写真-1に示す。静電容量センサは供試体上部から挿入し、FDR-Vセンサは供試体に接触させて測定した。

表-1 ベントナイト混合砂校正用供試体仕様

質量混合比(%)		乾燥密度 (g/cm ³)	土粒子密度 (g/cm ³)	寸法(mm)	
ベントナイト	珪砂			直径	高さ
70	30	1.40	2.721	50	76



(a) 静電容量センサ (b) FDR-V センサ
写真-1 校正測定時の様子 (センサ設置前)

2.3 測定結果と校正曲線の作成

静電容量センサの出力値と体積含水率との関係を図-4に示す。なお、同図には比較のために別途センサメーカーによって作成された豊浦砂に対する校正曲線を併記した。豊浦砂よりも高い計測値を示しているのは上述した間隙水のイオン濃度による影響であるが、飽和に近い領域で感度が低下する状況が見受けられる。KellenersらがTDR法と静電容量法を用いてベントナイトの誘電率を測定した結果¹¹⁾では、同様に飽和状態の計測値の感度が低下する傾向を示していることから、静電容量型のセンサ特有の現象である可能性が考えられる。一方、図-5にFDR-Vセンサの測定結果を示す。図中に併記したToppらがTDR装置を用いて測定した砂質・粘土試料に対する校正曲線²²⁾と比較すると、飽和に近い領域で測定値が若干低下する傾向を示しているが、感度はさほど低下していない。次に、図-6及び図-7にこれらの結果を用いて算定した校正曲線を併せて示す。いずれも近似曲線を3次式で表したが、水分量の増加に合わせて出力値が増加する傾向を示した。結果として、ベントナイト系材料に対しても他の土質材料とは別の校正曲線を作成することで測定が可能であることを確認した。

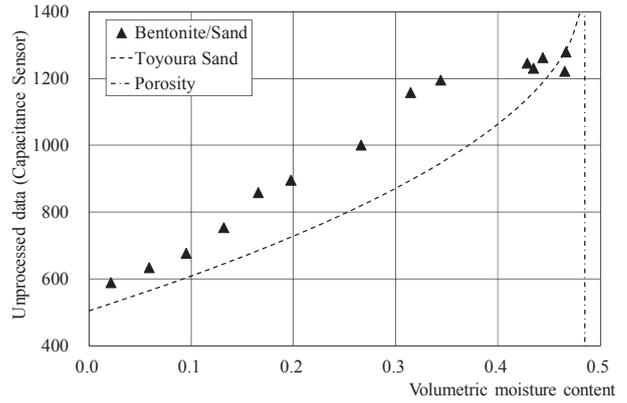


図-4 静電容量センサ計測結果

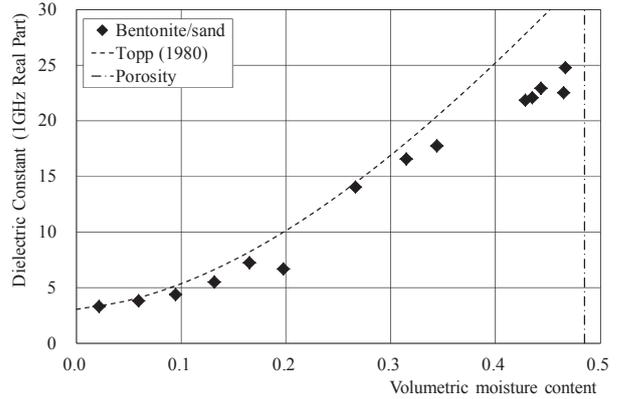


図-5 FDR-V センサ計測結果

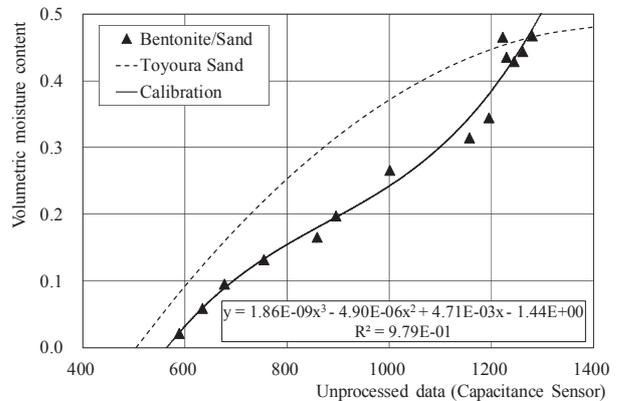


図-6 静電容量センサ校正曲線

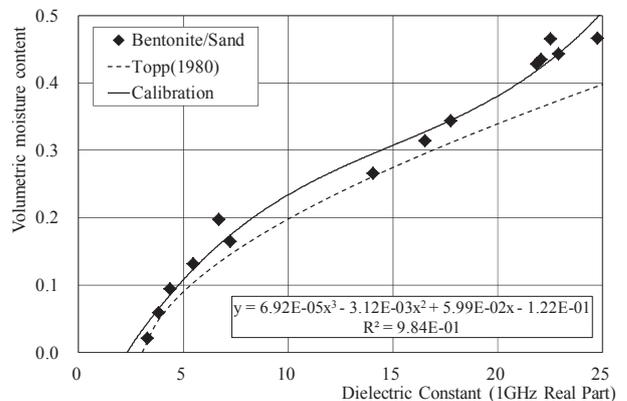


図-7 FDR-V センサ校正曲線

3. 鉛直一次元浸潤試験（再冠水試験）

3.1 試験概要

上述のように静電容量センサでの校正結果において飽和付近の測定感度が低下する傾向を示したことは、坑道内での計測に適用する上での障害となる。現場において最適含水比付近で締め固められるベントナイト混合土の初期体積含水率は比較的高いことから、飽和に近い領域での変化を捉える必要があることがその理由である。そこで、一次元カラムを用いた浸潤試験を実施し、校正時と同じ仕様で作製した供試体下部から背圧を加えた蒸留水（脱気水）を再冠水させた際の測定値を確認することで、静電容量センサの適用性を確認することとした。

3.2 試料及び試験装置

炉乾燥させたベントナイト混合材料を十分に攪拌した後、あらかじめセンサを取り付けた容器に設定した乾燥密度（ $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ）になるように $\phi 10\text{cm} \times 6\text{cm}$ のアクリル製カラム内に締め固めた。試験装置の概略図を図-8、センサの設置位置と計測範囲の概略図を図-9に示す。静電容量センサ及びFDRセンサは供試体中央高さに設置し、計測範囲は静電容量センサが鉛直方向に 2.0cm 、水平方向に 1.0cm である。また、FDR-Vセンサは鉛直方向が 1.2cm 、水平方向が半径 0.6cm の半円状となり、センサと接触している部分の影響を強く受けることがわかる。つまり、供試体下部から浸潤してくる際に、静電容量センサの方が早く反応することとなる。上部には供試体の体積膨張を防ぐ目的でメタルフィルターを敷設し、下部には徐々に冠水が進行するようにセラミックディスクを設置した。ここで、セラミックディスクの空気侵入値は 300kPa 、飽和透水係数は $2.11 \times 10^{-7}(\text{m}/\text{s})$ である。注水は供試体下部に接続した三重管マリオットビュレットに 250kPa の背圧を加えて実施し、ビュレット内の水位変化から注水量を算出した。

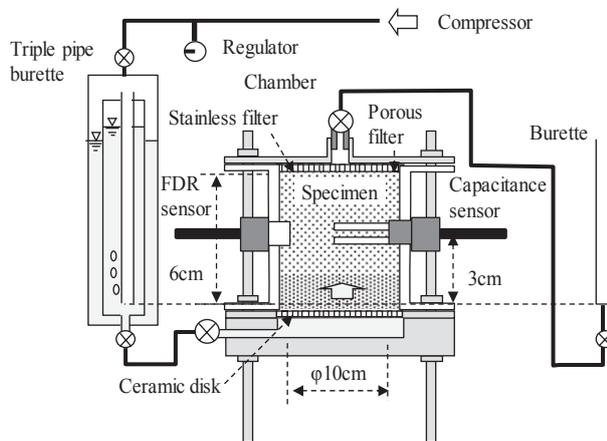


図-8 鉛直一次元浸潤試験装置概略図（再冠水試験）

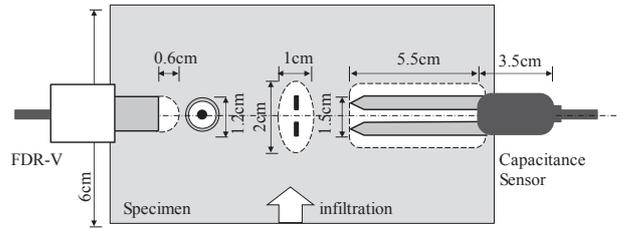


図-9 センサ設置位置と計測範囲（再冠水試験）

3.3 試験結果

注水量と供試体内での平均の体積含水率の経時変化を図-10、両センサの出力結果を図-11に示す。水分量の増加に伴い、徐々に計測値が上昇する挙動を示した。本試験における締め固め後の供試体の間隙率は 46% であり、先の校正曲線を作成した際の間隙率より約 2.5% 低いが、数%の密度変化の影響は無視できる²²⁾ことから、体積含水率が 0.46 の点に達した時点が飽和状態の目安である。つまり、 22 日経過後に供試体を浸潤前線が通過したものと判断し、飽和状態とみなした。なお、注入量がこの後も増加しているのは、供試体からの流出があるためである。両センサの挙動を比較すると、静電容量センサの反応が早く現れているが、これは計測範囲の違いに起因している。次に、それぞれの校正曲線を適用して体積含水率の経時変化をまとめた結果を図-12に示す。図-9に示したようにFDR-Vセンサは静電容量センサより計測範囲が狭いことから、途中で急激に値が上昇した後、注水量から算出した結果と整合した。その一方、静電容量センサは注水初期から徐々に値が増加しているが、注水量から算出した結果よりも低い値を示した。そこで、注水量から算出した体積含水率と両センサの計測値との関係に対して校正曲線と比較した結果を図-13及び図-14にそれぞれ示す。体積含水率 $0.1 \sim 0.3$ 程度までの低～中水分領域では計測範囲の影響で差異が認められるが、少なくとも乾燥付近と飽和付近の結果は一致すべきものである。特に飽和付近の結果は、FDR-Vセンサでは良好な一致を示しているものの、静電容量センサでは体積含水率で最大 0.1 程度の誤差を含んでいる。原位置試験での埋戻し材の初期水分量は高いことから、校正方法を再考する必要があることが判明した。

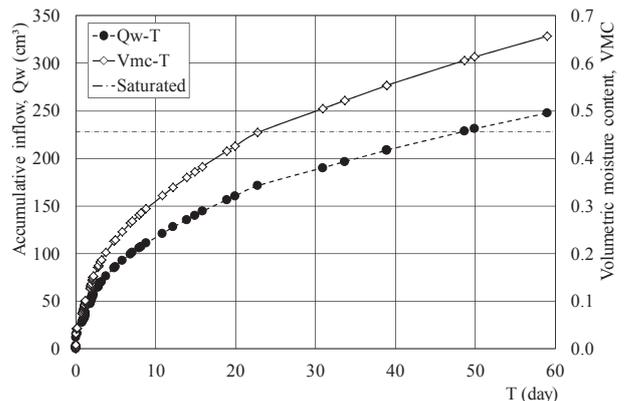


図-10 注水量及び体積含水率の経時変化

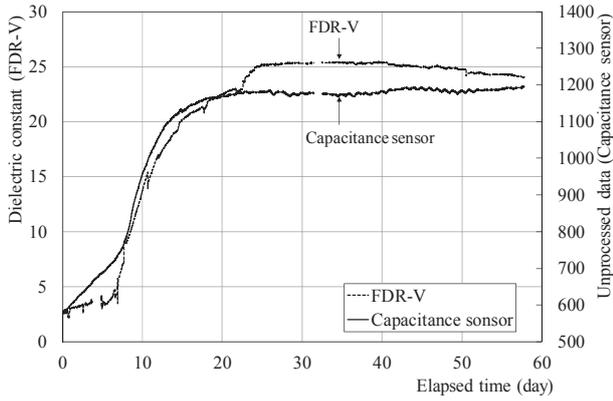


図-11 静電容量センサ及びFDRセンサ出力結果

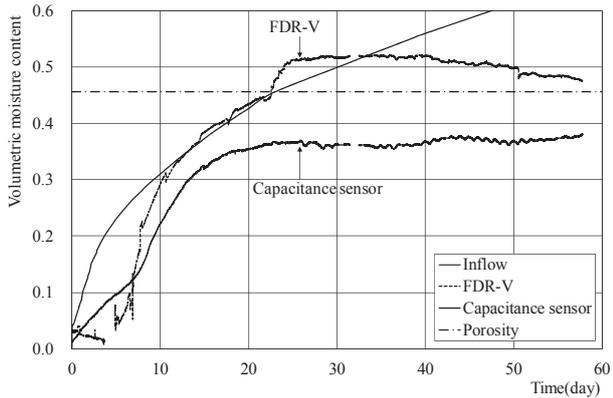


図-12 注入量と各センサ計測値から算出の体積含水率

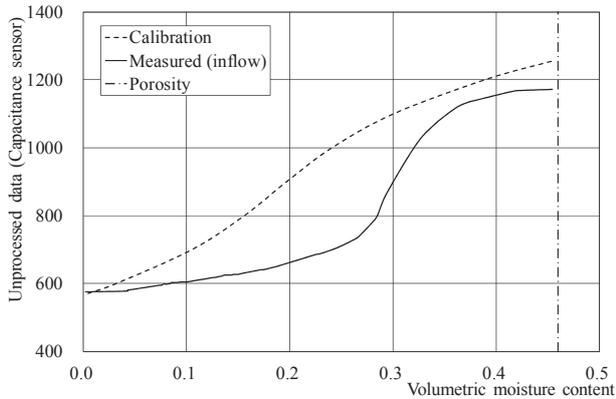


図-13 静電容量センサの測定結果と校正曲線の比較

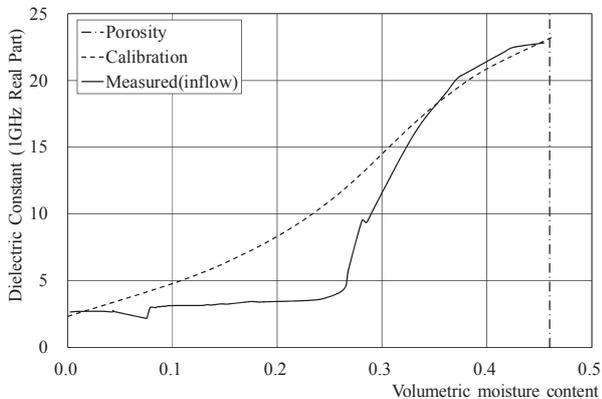


図-14 FDR-Vセンサの測定結果と校正曲線の比較

4. 校正方法の再検討

4.1 測定方法

先の校正において、センサ挿入時の密度増加による影響の懸念がある点を改善するため、図-15に示すように、先の校正時に用いたアクリル製容器の底にあらかじめセンサを設置した状態で所定の水分を加え十分に攪拌したベントナイト系材料を5層に分けた上で、それぞれが所定の高さになるように締固めた。

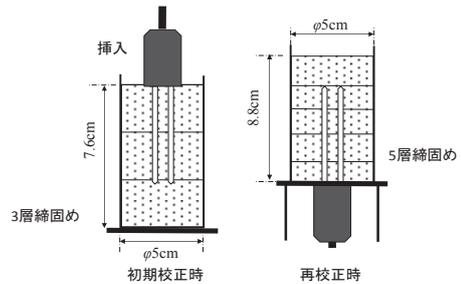


図-15 校正測定方法概略図

4.2 測定結果

静電容量センサについて、先の校正結果に再校正での測定結果を加えたものを図-16に示す。先の結果と比較して若干測定値は低下した。つまり、センサと供試体の間での密度の低下による結果であると判断できる。

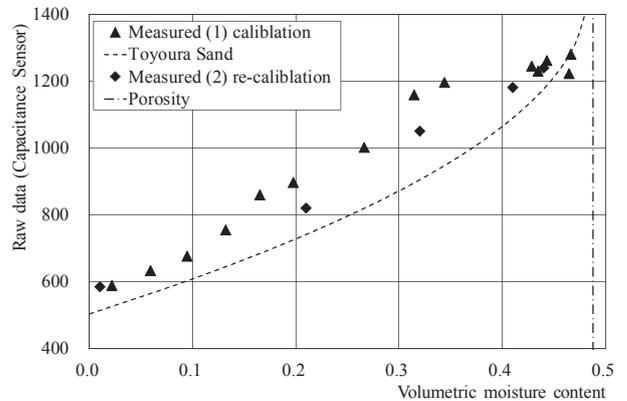


図-16 静電容量センサ再計測結果

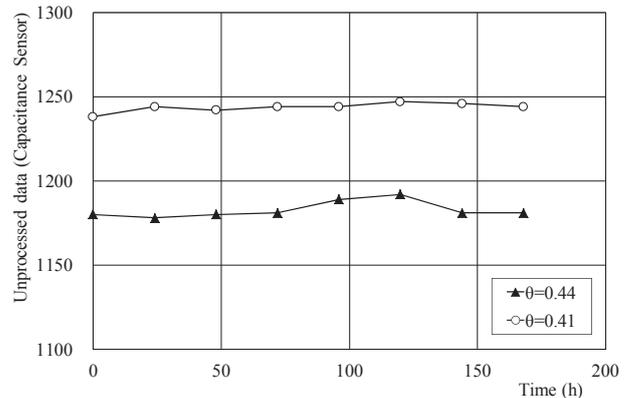


図-17 測定値の経時変化 (θ : 供試体の体積含水率)

また、試料の膨潤挙動による測定値の変化を確認するため、センサの出力値の経時変化を図-17に示す。この結果から、時間による変化はないものと判断した。

4.3 分散系モデルによる校正曲線の作成

図-6及び図-7に示した校正曲線はいずれも3次式を用いたが、飽和付近の感度が低下する現象は曲線の形状にも関係するため、ここでは別途、分散系モデルを用いた校正曲線を作成することとした。

固相の土粒子の中に液相の土壌水と気相の空気などが分散していると考えた場合の誘電率を表すモデルは次式で示される²⁴⁾。

$$\epsilon = \theta_{air}\epsilon_{air}^{\alpha} + \theta_{solid}\epsilon_{solid}^{\alpha} + \theta_w\epsilon_w^{\alpha} \quad (-1 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

ここで、 θ_{solid} , θ_w , θ_{air} : それぞれ全体積に占める土粒子, 水, 空気の体積比, n : 間隙率, ϵ_{solid} , ϵ_w , ϵ_{air} : それぞれ土粒子, 水, 空気の誘電率である。直列モデルは $\alpha=-1$, 並列モデルは $\alpha=1$ の場合となり, 土壌の誘電特性は分散モデルの α を決定することで表現できる。なお, Robinsonらは上述のモデルを基にした次式(2)で表される飽和と乾燥状態の誘電率の値から求める2点 α 混合モデルを提案している²⁴⁾。

$$\epsilon^{\alpha} = \frac{\theta}{n}\epsilon_{sat}^{\alpha} + \left(1 - \frac{\theta}{n}\right)\epsilon_{dry}^{\alpha} \quad \therefore \theta = \frac{\epsilon^{\alpha} - \epsilon_{dry}^{\alpha}}{\epsilon_{sat}^{\alpha} - \epsilon_{dry}^{\alpha}} \cdot n \quad (2)$$

ここで、 ϵ :誘電率, ϵ_{sat} :飽和状態における誘電率, ϵ_{dry} :乾燥状態における誘電率, θ :体積含水率, n :間隙率, α :形状パラメータ(校正曲線の形状を決定する値で $-1 < \alpha < 1$ の範囲)である。

そこで、得られたデータの中の誘電率と体積含水率との関係について式(2)中のパラメータ α を最小二乗法で求めた結果、表-2となった。ここで、静電容量センサについては、誘電率をセンサ出力値としてそのまま適用した。両センサにおける先の校正曲線との比較を図-18及び図-19にそれぞれ示す。静電容量センサの再校正に用いた測定データが少ない中でモデルの適用を試みたが、これらの結果から、飽和付近の感度が上昇していることが分かる。次に、図-12で示した鉛直一次元浸潤試験における注入量と各センサ計測値から再校正曲線を用いて算出した体積含水率の経時変化を図-20に示す。先の結果では特に静電容量センサの飽和時の測定結果が10%以上の差異を示していたが、ここでは約5%程度まで改善されていることが分かる。また、測定値の上昇過程も両センサで比較的近い値を示した。

表-2 2点 α 混合モデルの各係数

	Capacitance sensor	FDR-V
α	0.50	0.50
n	0.45	0.47
ϵ_{sat}	1238	24.80
ϵ_{dry}	570	2.50

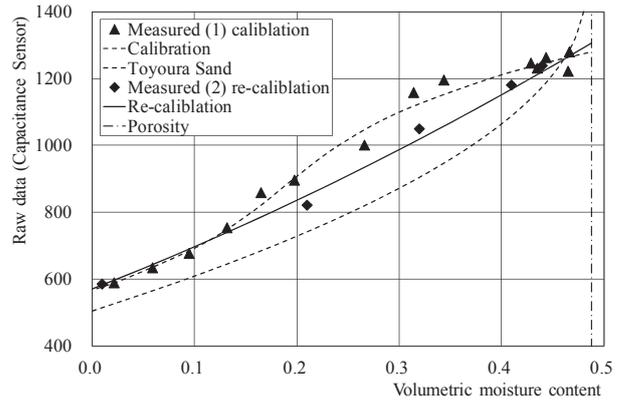


図-18 静電容量センサ校正曲線の再設定

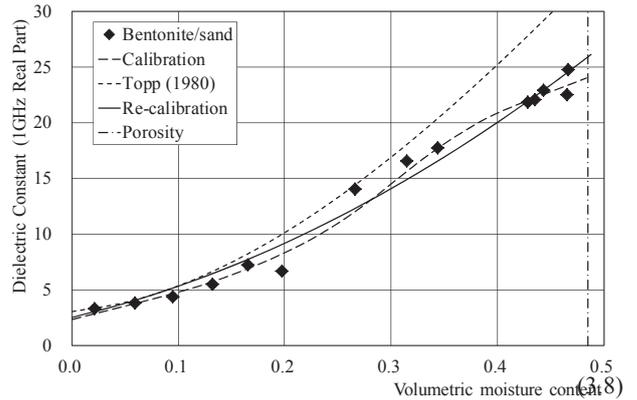


図-19 FDR-V センサ校正曲線の再設定

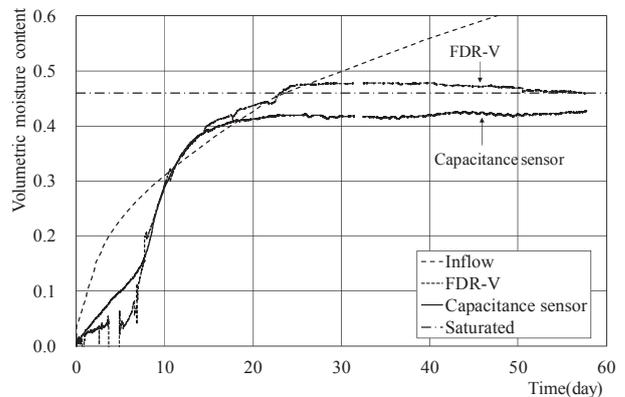


図-20 鉛直一次元浸潤試験(再冠水試験)における体積含水率の経時変化の再検討(再校正曲線使用)

5. 鉛直一次元浸潤試験(吸水試験)

5.1 試験装置

再校正した結果に基づき、先の鉛直一次元浸潤試験装置を用いて、今度は背圧を作用せず、マリオットビュレット(2重管)により供試体上端に一定水位を保った吸水試験を実施した。試料はこれまでのものと同様であるが、初期体積含水率は $\theta=0.09$, 間隙率は $n=0.49$ である。なお、計測センサにはより細かいピッチで水分挙動の変化を捉えるために、図-21に示すように $\phi 3.5\text{mm}$ のFDR-Vセンサを新たに7本追加した。

5.2 試験結果

注水量と供試体内での平均の体積含水率の経時変化を図-22、両センサの出力結果を図-23に示す。ここでは、静電容量センサの値が7日以降で急激に上昇する結果を示した。

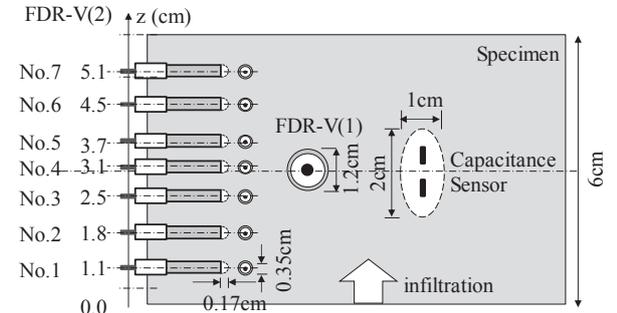


図-21 センサ設置位置と計測範囲 (吸水試験)

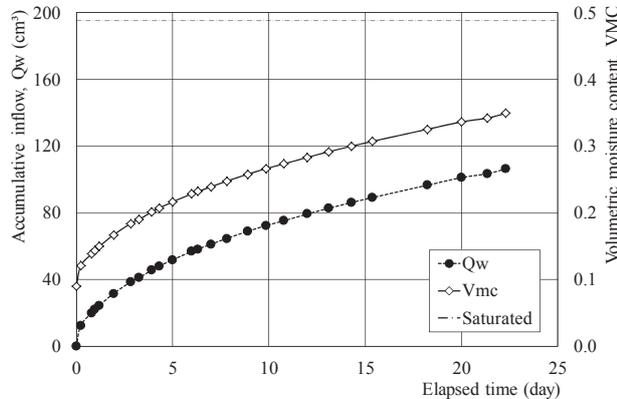


図-22 注水量及び体積含水率の経時変化

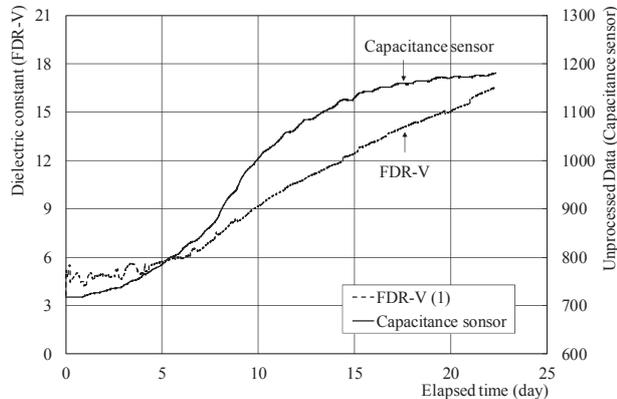


図-23 静電容量センサ及びFDRセンサ出力結果

次に、追加した FDR-V(2)センサでの計測結果を図-24に示す。下部のセンサから徐々に水分量が上昇している挙動を捉えているが、中心部分である No.4 のセンサが給水量よりも低い値を示した。供試体下部に水分量の高い領域が形成されているものと推察されるが、その原因は現時点では特定できていない。さらに、図-18及び図-19から得られた校正曲線をそれぞれ適用して体積含水率の経時変化をまとめた結果と両センサに近い3点の FDR-V(2)センサでの計測結果を図-25に示す。22日経過後の結果において FDR-V(1)センサは吸水量から算出した体積含水率よりも約1%程度低い値(約1%程度)

を示しており、供試体内での水分分布がなだらかに変化し、供試体中心部が全体の平均的な水分量を示すと仮定すると妥当な範囲であると判断できる。一方、静電容量センサは5%程度大きな値となっているが、浸潤試験時より注水量の変化に対して追従している様子を示した。このように静電容量センサでの測定値に改善が見られたものの、ここで示した吸水試験の結果は途中段階までであることから、吸水終了後に供試体を解体して炉乾燥法により実際の水分量との比較を行う必要がある。

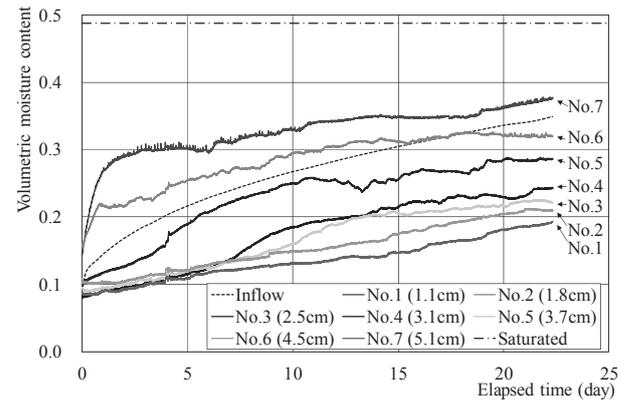


図-24 注水量と各センサ計測値から算出の体積含水率

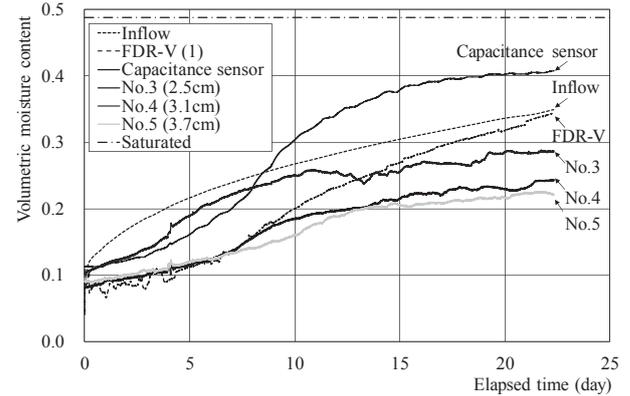


図-25 注水量と各センサ計測値から算出の体積含水率

6. まとめ

本研究では、ベントナイト系材料の水分量に対する計測手法に着目し、市販の静電容量センサの適用性について既存の測定手法である FDR-V 法と比較する形で検討した。得られた知見を下記にまとめる。

- (1) ベントナイトと硅砂の混合材料を各水分状態で締め固めて作成した供試体に対する測定を行い、静電容量センサと FDR-V 法の両センサともに水分量の増加に合わせて測定値が増加する状況を確認し、通常の土質材料とは別の校正曲線を作成することで、測定が可能であるとの判断に至った。
- (2) 締め固めたベントナイト混合土供試体に対して浸潤試験を実施し、水分量の増加挙動を確認した結果、静電容量センサにおける飽和付近での測定精

度の検証が必要であることが判明した。

- (3) 校正時において、センサ挿入による方法からあらかじめセンサを設置した状態で供試体を作製する方法に見直した結果、測定値が低下する傾向が見られた。また、飽和付近の感度を向上させる新たな校正曲線を作成した。
- (4) 再校正した結果を用いて、鉛直次元浸潤試験(吸水試験)を実施した結果、静電容量センサの計測値の変化が浸潤試験時よりも改善する結果を示したが、供試体内の実際の水分分布を踏まえて更なる測定精度の検証が必要であることが判明した。

謝辞

本研究における室内試験の実施にあたり、川俣源喜氏(平成27年3月岡山大学卒業、現玉野市)にご尽力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、平成12年法律第117号、2000.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊-1 わが国の地質環境、JNC TN1400 99-021, 1999.
- 3) 日本原子力研究開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—TRU 廃棄物処分技術検討書根拠資料集、3-4 緩衝材の仕様設計 (3.2.1.2(3)), pp.1-28,2005.
- 4) 小峯秀雄：地盤工学を取り巻くビッグプロジェクトと最先端技術の研究・開発動向、地盤工学会誌、Vol.61, No.11/12, pp.3-6, 2013.
- 5) 鈴木英明、伊藤彰、杉田裕、川上進：水理的ゆるみ域がおよぼす処分坑道周辺の不飽和領域形成に関する感度解析、日本原子力研究開発機構、JNC-TN8400, 2002-008, 58p., 2002.
- 6) 日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター：幌延深地層研究計画平成24年度調査研究成果報告、74p., 2013.
- 7) 日本原子力研究開発機構東濃地科学センター：平成24年度事業報告及び平成25年度事業計画の概要、7p., 2013.
- 8) Dirksen, C., and S. Dasberg: Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.57, pp.660-667, 1993.
- 9) Robinson, D. A., S. B. Jones, J. M. Wraith, D. Or and S. P. Friedman: A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry, *Vadose Zone Journal*, Vol.2, No.11, pp.444-475, 2003.
- 10) Robinson, D. A., M. G. Schaap, D. Or and S. B. Jones: On the effective measurement frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials, *Water Resour. Res.*, Vol. 41, W02007, doi:10.1029/2004WR003816, 2005.
- 11) Kelleners, T. J., D. A. Robinson, P. J. Shouse, J. E. Ayars and T. H. Skaggs: Frequency Dependence of the Complex Permittivity and Its Impact on Dielectric Sensor Calibration in Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.69, pp.67-76,2005.
- 12) Logsdon, S. D.: Soil Dielectric Spectra from Vector Network Analyzer Data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.69, pp.983-989, 2005.
- 13) Kupfer, K., E. Trinks, N. Wagner and Ch. Hubner: TDR measurements and simulations in high lossy bentonite materials, *Meas. Sci. Technol.*, Vol.18, pp.1118-1136, 2007.
- 14) 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.
- 15) Komatsu, M, and 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.
- 16) 小松満、西垣誠、浜崎聡、千々松正和：FDR法によるベントナイト系材料の温度変化を考慮した水分量測定方法に関する研究、第43回地盤工学研究発表会、D-04-547, pp.1093-1094, 2008.
- 17) 小松満、西垣誠、千々松正和、中間茂雄：FDR法によるベントナイト系材料の浸潤挙動の測定方法に関する研究、土木学会第64回年次学術講演会講演概要集、III-279, pp.557-558, 2009.
- 18) Limsuwat, A., T. Sakaki, A. and T. H. Illangasekare :Experimental quantification of bulk sampling volume of ECH2O soil moisture sensors, *Proceedings of the 29th Annual American Geophysical Union Hydrology Days*, March 25-27, 2009, ed. J. A. Ramirez, Colorado State University, Fort Collins, CO, , pp. 39-45, 2009.
- 19) 齊藤忠臣、藤巻晴行、井上光弘：ECH₂O水分プローブと4極センサーを用いた土壌水分・塩分の同時測定法、農業土木学会全国大会講演要旨集、pp.808-809, 2005.
- 20) 宮本英揮、長裕幸、伊藤祐二、筑紫二部、江口書彦：種々の電気伝導度条件に対する静電容量式土壌水分センサーの校正モデル、植物環境工学(J.SHITA), Vol.21, No.2, pp.86-91, 2009.
- 21) Santamarina, J. C., K. A. Klein and M. A. Fam: Soils and Waves -Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring-, *John Willey & Sons*, pp.374-389, 2001.
- 22) Topp, G. C., J. L. Davies, and A. P. Annan: Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, Vol.16, pp.574-582, 1980.
- 23) 西垣誠・小松満・千々松正和：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、日本地下水学会2005年秋季講演会講演要旨、pp.260-265, 2005.
- 24) Robinson, D. A., S. B. Jones, J. M. Blonquist Jr., and S. P. Friedman: A physically derived water content / permittivity calibration model for coarse-textured, layered soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.69, pp.1372-1378, 2005.

(2015年6月22日 受付)