



坑道周辺における不飽和領域の原位置計測手法の研究 ーキャリブレーション試験の簡略化と計測装置の開発についてー

片岡 達彦 前村 庸之*1 竹内 真司 松井 裕哉* 向井 圭

東濃地科学センター

*幌延深地層研究センター

*1株式会社ダイヤコンサルタント

A Study on Method for In-Situ Measurement of Unsaturated Zones around a Drift -Simplification of Calibration Test and Development of Measurement Probe-

Tatsuhiko KATAOKA Tsuneyuki MAEMURA *1 Shinji TAKEUCHI Hiroya MATSUI* Kei MUKAI

TONO Geoscience Center

*HORONOBÉ Underground Research Center

*1DIA Consultants Co. Ltd.

岩盤中に空洞を掘削するとその周辺岩盤中に不飽和領域が発生することが想定される。東濃地科学センターでは、この領域の範囲や体積含水率分布を把握することを目的とし、TDR (Time Domain Reflectometry) を原位置で適用するための研究を実施している。

岩石コアの体積含水率 θ と比誘電率 ε との関係を求めるキャリブレーション試験では、供試体への電極の改良設置方法を4岩種に適用し、その有効性を確認した。また、少数の計測値から三相混合モデルに基づく $\theta - \varepsilon$ 関係を求めることにより、キャリブレーションを簡略化できる可能性を示した。

原位置計測における電極の設置を容易にするため、電極をパッカーにより孔壁に密着させて測定する方法を考案した。比誘電率既知の材料を用いた室内試験により、電極間隔と測定時の電磁波影響範囲 (計測範囲) との関係調べ、計測値が測定対象と緩衝材の平均比誘電率となるように、プローブの構造を決定した。開発したパッカー式プローブの原位置適用試験を東濃鉱山で実施したところ、同一深度の比誘電率に再現性のある計測結果が得られた。

It is generally considered unsaturated zones can be generated in the vicinity of a drift after excavation. Tono Geoscience Center has been conducting researches on applying time domain reflectometry (TDR) to in-situ measurement of the extent and water content profile of unsaturated zones.

An improved insertion method of waveguides was applied to the calibration test of the volumetric water content θ and the dielectric constant ε relationship of four kinds of rocks, and was proved valid. Calibration labor can be reduced using the $\theta - \varepsilon$ relationship based on the three-phase mixing model estimated by a few measured data.

To allow easy installation of waveguides, a method was developed that uses an air packer to press waveguides against a borehole wall. Configuration of the packer-type probe was designed to measure the average dielectric constant of the object and the buffering material. The in-situ dielectric measurement at Tono mine using the packer-type probe resulted in reproductive data at the same depth.



片岡 達彦

瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ所属
地質環境研究グループ兼務
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の表層調査業務及び東濃鉱山における坑道周辺水理調査業務に従事



前村 庸之

ジオエンジニアリング事業部所属
多孔質体の不飽和特性及び物質移動解析関連業務に従事



竹内 真司

瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ所属
地質環境研究グループ兼務
副主任研究員
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の表層及び深層調査業務及び東濃鉱山における坑道周辺水理調査業務に従事



松井 裕哉

深地層研究グループ所属
副主任研究員
深地層研究所計画の地層科学研究における試錐調査、地質環境のモデル化と地下施設建設に伴う地質環境の変化の予測業務及び地下施設設計研究に従事



向井 圭

瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ所属
地質環境研究グループ兼務
超深地層研究所計画及び広域地下水流動研究の深層調査業務及び東濃鉱山における坑道周辺水理調査業務に従事

キーワード

不飽和領域, 比誘電率, TDR, 東濃鉱山, ニアフィールド, 体積含水率, 有効間隙率, 三相混合モデル, キャリブレーション試験, 岩石

Unsaturated Zone, Dielectric Constant, Time Domain Reflectometry (TDR), Tono Mine, Near Field, Volumetric Water Content, Effective Porosity, Three-phase Mixing Model, Calibration Test, Rock

1. はじめに

岩盤中に坑道のような空洞を掘削すると、周辺岩盤から空洞へ向かう地下水の流れが生じる。この地下水の移動速度若しくは流量よりも、空洞壁面からの水の蒸発や、強制的な地下水の汲み上げ量のほうが大きい場合は、不飽和領域、すなわち岩盤中の間隙が水で満たされていない領域が発生する。

一般に、地下深部では地下水は還元性を示すが、不飽和領域が形成され、酸素を含んだ空気が岩盤に侵入すると、地下水の還元性が失われて、岩盤中の物質移行特性が変化することが考えられる。また、空洞を埋め戻し等により閉塞し、周辺岩盤が再び地下水で飽和した後も、岩盤に侵入した酸素の影響がある期間残存する可能性がある。このような過渡的な酸化状態は、放射性廃棄物の地層処分システムの安全性確保の観点から好ましくない状態である。けれども、現在までのところニアフィールドにおける酸化還元状態の変遷の解析モデルでは、不飽和領域は不明な点が多いという理由から考慮されていない¹⁾。したがって、人工バリアの設置環境を検討する上で、空洞掘削時の不飽和領域の広がりやを定量的に把握することが必要と考えられる。

空洞周辺に発生する不飽和領域の範囲や含水量分布を定量的に把握するため、原位置計測手法及び解析モデルの研究が、深部地質環境の科学的研

究の一環として1993年から実施されている。樺原ほか(1999)は²⁾、原位置計測手法について岩石供試体を用いた室内試験、及び東濃鉱山による原位置試験を実施し、「岩石の含水量計測に比誘電率測定が有効であること」、「岩石コアを用いたTDR (Time Domain Reflectometry)*による室内試験により、含水量と比誘電率の正確な対応関係(キャリブレーションカーブ)が得られること」、「TDR、孔間レーダにより原位置で計測した比誘電率測定値と、キャリブレーションカーブから含水量を求めることが可能であること」を確認し、不飽和領域の原位置計測手法を実用化するために以下の課題を指摘している。

- ①設置が容易で、信頼性及び実用性の高い原位置計測装置の開発
- ②キャリブレーションの不要化ないし簡略化の検討と、それに向けたデータの蓄積
- ③ほかの計測手法との比較・検討

本報告では、上記①、②に定めるものとして、1999年度以降に実施された原位置計測手法の実用化を目的とした研究のうち、多くの岩種の正確なキャリブレーションカーブの取得と、原位置計測装置であるパッカー式プローブの開発、及び東濃鉱山における適用試験の結果を報告する。

2. キャリブレーション室内試験

原位置岩盤の比誘電率測定値から含水量を推定

* TDRによる比誘電率測定原理

TDRは、信号発生部からケーブルに入射したパルス波が、プローブ端部で反射して再び戻ってくるまでの時間を測定することにより、プローブを挿入した媒体中の電磁波の伝播速度を求め、これにより媒体の比誘電率を求める方法である。TDRで反射波の時間変化は、ケーブル上の伝播距離における波形の変化として表示される。ここで、比誘電率が既知である空気中と、比誘電率がこれと異なる媒体中で測定されたTDR波形を比較すると、プローブ終端の反射点の位置が変化し、空気中でのプローブ長(L_{air})が見かけのプローブ長(L_{app})に変化する。電磁波の伝播速度と比誘電率の関係は式(1)、空気中におけるこの関係は式(2)で表される。

$$v = c / \sqrt{\epsilon} \quad (1)$$

$$v_{air} = c / \sqrt{\epsilon_{air}} = c \quad (2)$$

ここで、

c : 光速 ($= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

v : ある媒体中の電磁波伝播速度

ϵ : ある媒体の比誘電率

v_{air} : 空気中の電磁波伝播速度

ϵ_{air} : 空気の比誘電率 ($= 1$)

である。見かけ(波形上)のプローブ長(L_{app})と実際のプローブ長(L_{probe})との関係は次式で示される。

$$L_{app} = (L_{probe}/v) \times v_{air} \quad (3)$$

式(1)~(3)より、ある媒体の比誘電率は次式で求められる。

$$\epsilon = (L_{app}/L_{probe})^2 \quad (4)$$

するためには、あらかじめ室内試験により含水量と比誘電率の正確なキャリブレーションカーブを取得しておく必要がある。TDRにより比誘電率を測定して含水量を推定する手法は、土壌については、Topp et al. (1980) により汎用性の高い比誘電率と体積含水率との関係式が示された³⁾後、完全に実用化され、数種類の商用計測器が流通するに至っているが、岩石に適用した事例はいくつかの報告^(例えば4)5)6)があるに過ぎず、測定方法に改善の余地が残されていると共に、測定データの蓄積が望まれている。

TDRによる岩石コアの比誘電率測定においては、図1に示すようにコアに2本の金属製の電極を設置するが、電極と設置孔の間に隙間がある場合、測定値に大きな影響が現れる。この隙間の影響を取り除くため、樺原ほか(1999)は、図2に示すような、導電性シリコンを隙間に充てんしながら電極を設置する方法を考案し、瑞浪層群明世累層の砂岩と白河熔結凝灰岩の2岩種各1試料についてその有効性を確認した²⁾。

ここでは、測定データの蓄積とキャリブレーション手法の簡略化に資するために、前述の電極設置方法をほかの岩種に適用して計測した結果について述べる。

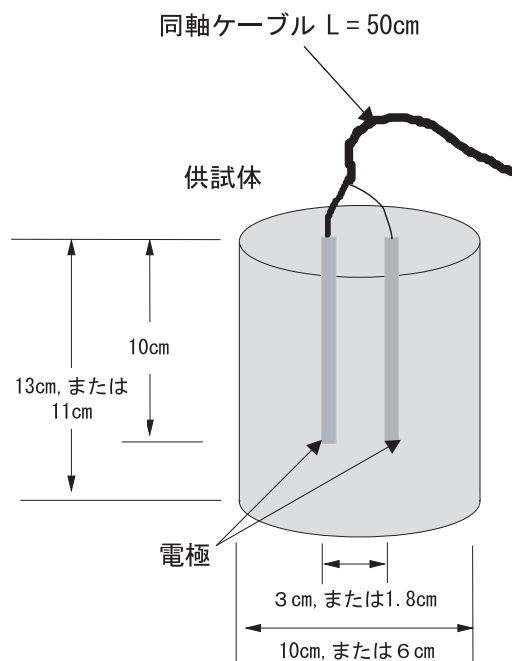


図1 キャリブレーション試験供試体

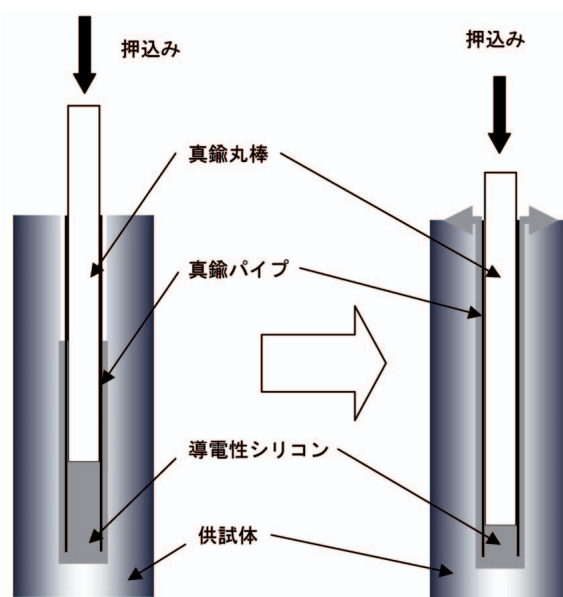


図2 電極の設置方法

2.1 試験方法

測定対象として、来待砂岩、白浜砂岩、田下凝灰岩、稲田花崗岩、荻野凝灰岩、及び後述する原位置試験の測定対象である瑞浪層群明世累層中の泥質凝灰岩（以下、泥質凝灰岩）を用いた。表1に供試体の岩種、大きさ、及び主要物性値を示す。泥質凝灰岩については採取深度を併せて示す。泥質凝灰岩を除く5岩種は岩石ブロックから採取し、電極には外管の直径10mm、長さ10cmの真鍮を用いた。また、泥質凝灰岩はサイクル機構の東濃鉱山に掘削された試験孔01 SI-10から試料を採取し、電極には外管の直径5mm、長さ9cmないし10cmの真鍮を用いた。

試験は、飽和した供試体に電極を設置し、供試体を乾燥させながら飽和度（水の体積／間隙の体積）を100%から0%まで変化させ、その過程で供試体の質量とTDRによる比誘電率を計測する方法で実施した。計測間隔は飽和度換算で約5%を目標とし、計測の前に供試体内の水分分布を均一にするため、供試体をビニール袋にいれて一晩放置した。

2.2 結果と考察

来待砂岩、白浜砂岩、田下凝灰岩、荻野凝灰岩の4岩種について、体積含水率 θ_v （水の体積／岩石の体積）と比誘電率 ϵ の関係を図3に示す。同図には、各岩種の3相混合モデルに基づく計算値

表1 供試体一覧表

岩 種	供試体 番 号	採取孔及び 深 度	供 試 体 概略寸法 [cm]	湿润密度 [g/cm ³]	乾燥密度 [g/cm ³]	有効間隙率 [%]	吸 水 率 [%]
来待砂岩	KS-5	—	φ10×H13	2.25	2.03	22.2	10.9
白浜砂岩	SS-4	—	φ10×H13	2.44	2.29	14.8	6.45
稲田花崗岩	IG-3	—	φ10×H13	2.63	2.62	0.7	2.68
田下凝灰岩	TT-4	—	φ10×H13	2.06	1.72	33.7	19.6
荻野凝灰岩	OT-3	—	φ10×H13	1.96	1.69	26.8	15.9
瑞浪層群 明世累層 泥質凝灰岩	M1001	01SI-10孔 1.43~1.54m	φ6×H11	1.68	1.09	58.5	53.5
	M1002	01SI-10孔 2.84~2.97m	φ6×H13	1.68	1.10	58.2	52.8
	M1003	01SI-10孔 8.21~8.34m	φ6×H13	1.71	1.17	55.2	47.5

を併せて示した。3相混合モデルとは、土壌や岩石が空気、水、固体の3相からなる混合物であり、各相の比誘電率がその体積割合に応じて、全体の比誘電率に寄与すると考えるもので、見かけの比誘電率 ε_a は(1)式で表される。

$$\varepsilon_a^\alpha = (n - \theta_v) \varepsilon_{air}^\alpha + \theta_v \varepsilon_{water}^\alpha + (1 - n) \varepsilon_{solid}^\alpha \quad (1)$$

ここに、 ε_{air} 、 ε_{water} 、 ε_{solid} はそれぞれ空気 (= 1)、水 (= 81)、岩石 (= 4~7) の比誘電率、 n は有効空隙率である。 α は形状係数で、Roth et al. (1990) によれば、経験的に $\alpha = 0.5$ とすると実験値とよく一致する⁷⁾。各岩種の計算値は、有効間隙率に測定値を用い、 ε_{solid} をパラメータとして、飽和と体積含水率0付近の計測値と適合するように求めた。

図3に示した4岩種では、 θ_v と ε はほぼ直線的

な関係を示した。また、電極と設置孔との間に隙間が存在する場合には、飽和付近での比誘電率の急激な変化が起こると考えられるが²⁾、同図からはいずれの岩種についてもこのような変化は確認されなかった。このことから、前掲図2のような電極設置方法により、この4岩種についても隙間の影響を取り除くことができたと考えられる。

また、(1)式による計算値は田下凝灰岩については全体的に実測値よりも小さい値であったが、そのほかの3岩種では実測値の変化とよく適合していた。このことから、多数の測定を行わなくとも、飽和と $\theta_v = 0$ 付近の実測データを用いて、3相混合モデルによりある程度の精度でキャリブレーションカーブを推定できると考えられる。

稲田花崗岩について、体積含水率と比誘電率の

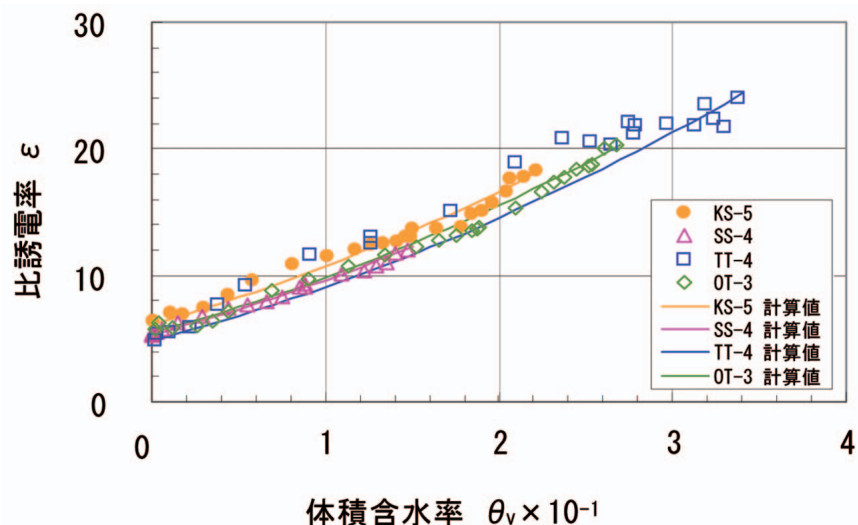


図3 各岩種の体積含水率と比誘電率
(KS：来待砂岩，SS：白浜砂岩，TT：田下凝灰岩，OT：荻野凝灰岩)

関係を図4に示す。比誘電率は体積含水率とほぼ直線的な関係にあったが、その変化幅は小さかった。また、乾燥側では測定値のばらつきが大きくなったが、この原因は不明である。したがって、稲田花崗岩のような有効間隙率の小さい岩については、測定値のばらつきを抑える工夫をするとともに、測定データの蓄積を図り、統計的に信頼性の高いキャリブレーション曲線を求める必要がある。また、このような測定手法が適用できる有効間隙率の範囲についても検討する必要がある。

泥質凝灰岩について、体積含水率と比誘電率の関係を図5に示す。同図には、3相混合モデルにより、 $\theta_v = 0$ 付近の計測値に適合するように求めた計算値を併せて示す。比誘電率は飽和付近で比較的大きな変化を示した。また、 θ_v が0.35以上の範囲では、供試体M1001が、M1002及びM1003よりも計測値の差が大きかった。

計測終了後に供試体を破壊し、電極への導電性シリコンの付着状況を調べたところ、写真1のように付着していない部分が認められたことから、飽和付近での比誘電率の大きな変化は、電極と設



写真1 乾燥後の供試体M1002から採取した電極（黒い物質は導電性シリコン。付着していない箇所がある）

置孔の隙間に起因する可能性が高いと考えられる。また、 θ_v が0.35以上の範囲で見られた供試体間の測定値の差は、飽和に近い状態でのTDR波形の反射が不明瞭で読み取りが困難であったことや、波形上の特定の位置に生じた定位置反射が読み取りの障害となったことに起因すると考えられる。 θ_v が35～55%の範囲では、いずれの供試体においても比誘電率がほとんど変化せず、 θ_v が30%の付近で大きな変化が認められた。この現象は、供試体内の水分の不均一性、電極と設置孔の隙間の存在、あるいは波形上の定位置反射の存在に起因する可能性が考えられるが、はっきりとした原因は不明である。

以上のように、この岩石については、飽和付近と湿潤側の測定値に問題が生じたが、波形の立ち上がり不鮮明な点は、電極表面へのコーティングにより改善できることが示されている⁸⁾。また、定位置反射は同軸ケーブル長を変更すること、電極と設置孔の隙間は充てん剤を粘性の低いものに変更すること、水分の不均一性については、乾燥に十分な時間をかけることにより、それぞれ解決できる可能性がある。

3. パッカー式プローブの開発

計測装置の設置を容易にする方法として、坑道から掘削した試錐孔を利用し、その所定の深度への設置が容易な構造としてパッカー式を採用することとした。パッカー式とは、緩衝材の表面に取り付けた電極を、その内側にあるパッカーを膨張させることにより試錐孔の孔壁に圧着させる方式

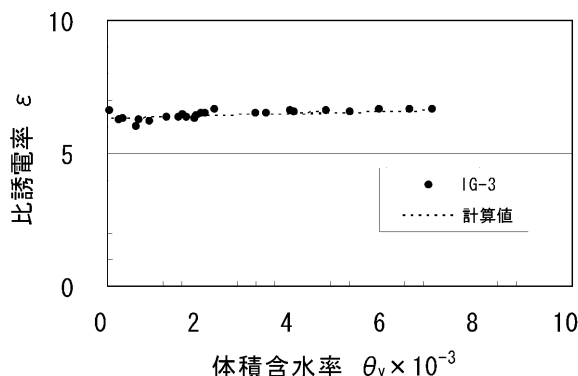


図4 稲田花崗岩の体積含水率と比誘電率

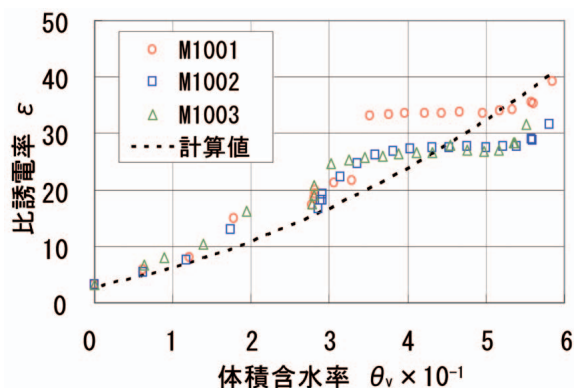


図5 泥質凝灰岩の体積含水率と比誘電率

であり、図6のように計測するものである。

パッカー式による計測と前述したキャリブレーション試験の相違点は「計測対象である岩盤と計測対象でない緩衝材の比誘電率を同時に計測し、計測対象のみの比誘電率を得ること」である。このため計測範囲を調べて、装置を構成する部品が計測の妨げにならないような構造とすること、また、計測値から岩盤の比誘電率を求める方法を導くことが必要である。

3.1 実験方法

パッカー式プローブによる計測範囲を調べるために、次の2つの実験を行った。これらの実験では、電極の周辺に比誘電率が既知である材料を用いており、計測値が受けた周囲の材料からの影響の程度を解釈が可能である。

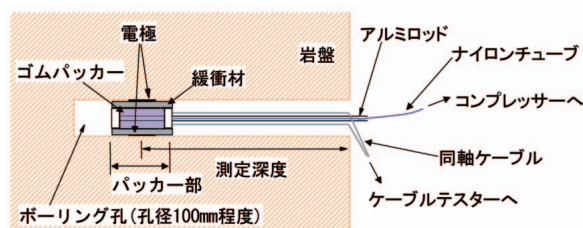


図6 パッカー式プローブ概念図

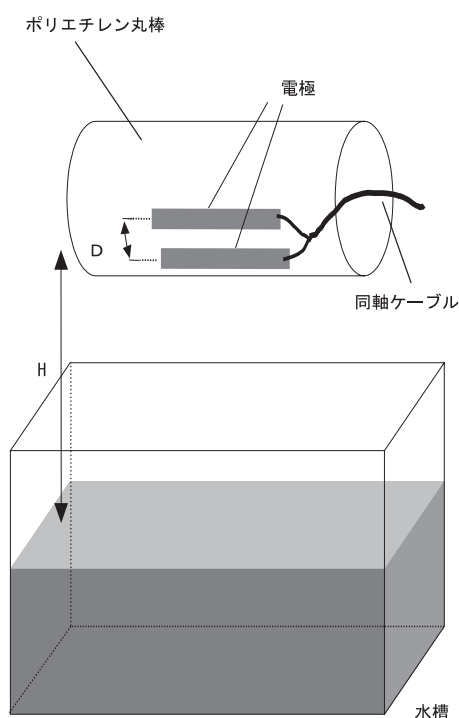


図7 実験（I）装置の概要

＜実験I＞パッカー外側の計測範囲の検討

電極の中心線の間隔がDとなるようにポリエチレン製丸棒の軸方向（長さ方向）に平行に電極を設置した実験装置（図7）を用い、電極を水槽の水面からの高さHに設置したときの比誘電率を、H, Dを変えながら計測した。電極の長さは30cm, 幅は6mmとした。

＜実験II＞パッカー内側の計測範囲の検討

肉厚tのポリエチレン製円筒容器に、容器の長さ方向に間隔Dで電極を設置した実験装置（図8）を用い、異なるD, tについて容器が中空のときと水を入れたときの比誘電率を計測した。電極の長さは30cm, 幅は6mmとした。

実験I, IIで、電極の周辺にある物質の比誘電率は、空気が1, ポリエチレンが2.3であるのに対し、水は81と大きいと、計測範囲での水の有無により、比誘電率は大きく変化すると考えられる。すなわち、Hまたはtを変化させたときの比誘電率の変化から、計測範囲を知ることが可能となる。

3.2 実験結果

実験Iの試験結果を図9に示す。電極間隔によらず、電極から水面までの距離Hが電極間隔Dより大きいとき、比誘電率の値はほぼ一定となり、その平均は1.67となった。

実験IIの試験結果を図10に示す。容器の肉厚tが大きくなるにつれて、容器が中空の場合と、中に水を入れた場合の比誘電率の差が小さくなって一定値に近づき、容器の肉厚tが電極間隔Dより大きくなると、比誘電率の値はほぼ一定となり、その平均は1.63となった。

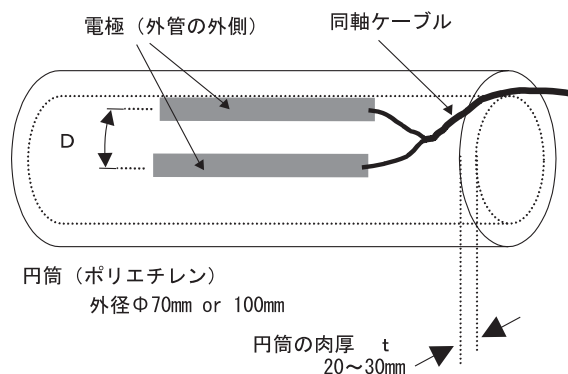


図8 実験（II）装置の概要

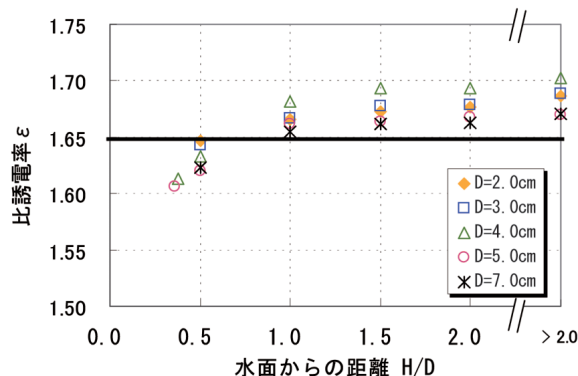


図9 計測結果 (実験Ⅰ)

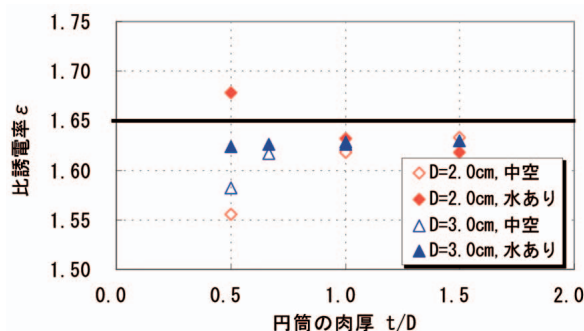


図10 計測結果 (実験Ⅱ)

3.3 実験結果の考察

実験の結果から計測範囲、計測値についてそれぞれ考察する。

(1) 計測範囲

電極と水面との距離であるHあるいはtがDと同程度かそれ以上となると、比誘電率の計測値はほぼ一定となる。このことから、電極から周面外側・内側の影響範囲はDと同程度と考えられる(図11)。

安原ほか(1990)はTDR法による土壌水分計測

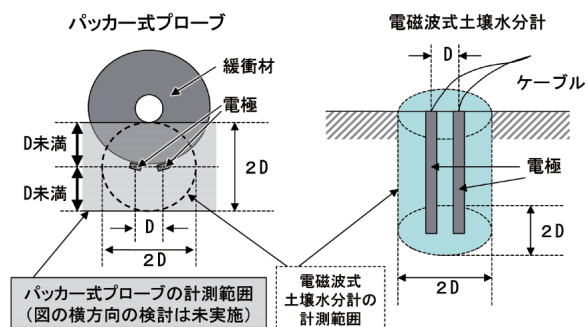


図11 パッカー式プローブと電磁波式土壌水分計の計測範囲

装置を電磁波式として紹介し、その計測範囲をDの2倍の直径を持ち、高さを電極の長さLとする円柱の大きさ(図11)であると報告している⁹⁾。これは、今回得られたパッカー式による計測範囲と調和的である。

(2) 計測値

実験で計測された比誘電率は、電極と水との距離であるHあるいはtが電極間隔と同程度かそれ以上であるとき、空気とポリエチレンの比誘電率の平均1.65(図9、図10の太線)にほぼ等しく、その違いはおよそ1.4%である。このことから、計測される比誘電率は、周面内部の物質と周面外部の物質との平均にほぼ等しいと考えられる。したがって、パッカー式プローブで計測される見かけの比誘電率は、次式で表される。

$$\varepsilon_{app} = (\varepsilon + \varepsilon_i) / 2 \quad (2)$$

ここで

ε_{app} : 見かけの比誘電率

ε : 計測対象の比誘電率

ε_i : 緩衝材の比誘電率

である。緩衝材の比誘電率 ε_i 、実際の電極長 L_{probe} は既知であるため、TDRによる見かけの電極長 L_{app} が計測されれば、計測対象の比誘電率を次式により求められる。

$$\varepsilon = 2 \times (L_{app} / L_{probe})^2 - \varepsilon_i \quad (3)$$

3.4 パッカー式プローブの設計

実験により明らかとなった計測範囲と、計測値から測定対象の比誘電率を得る方法を踏まえて、原位置計測装置であるパッカー式プローブを設計

表2 パッカー式プローブの仕様

項目	仕様
本体	寸法: $\phi 60\text{mm} \times L 1,000\text{mm}$ (ロッド接続部含む) 材質: アルミニウム製 付属品: 測定用同軸ケーブル×2, 加圧用チューブ×1
パッカー膨張部	寸法: $\phi 60\text{mm} \times L 600\text{mm} \times t 1\text{mm}$ 材質: ゴム製 加圧方式: 圧縮空気または窒素ガス 最大許容圧: 100kPa 以上
外部緩衝材	寸法: $\phi 92\text{mm} \times L 700\text{mm} \times t 25\text{mm}$ 材質: 発泡ポリエチレン製
電極	寸法: $W 6\text{mm} \times L 300\text{mm} \times t 3\text{mm}$ 数量: 2本 (1対) 間隔: 2.4cm (プローブと孔軸の成す角 30°) 材質: 真鍮製

した。

試験に用いる孔は、キャリブレーション試験に必要な試料を同時に採取することが必要であるため、HQ（孔径98mm）とした。

パッカー式プローブの仕様を表2に、構造を図12に、概観を写真2に示す。設計に当たり、各仕様について以下の検討を行った。

(1) 電極間隔

電極間隔は計測範囲と密接に関連し、電極間隔を大きくすると、計測範囲も大きくなる。計測箇所の岩盤の不均質性の影響を小さくするためには、電極間隔をある程度大きくする必要があるが、緩衝材の内側にも計測範囲が及ぶためパッカー式プローブの構造上の制約を受ける。この制約から電極間隔は2.4cmとした。

(2) 電極の幅・長さ・本数

実験で支障がなかったことから、電極の幅、長さ、本数はこれまでの実験で用いてきたものと同じく、それぞれ6mm、30cm、2本とした。

なお、これまでの研究により電極の幅、長さ、本

数が波形や計測値に与える影響について、電極の幅は狭いほうが比較的に有利であること、長さは50mm以上あれば長さの影響は認められないこと、本数の違い（2本・3本）による計測値の違いは認められないことが報告されている¹⁰⁾。

(3) 緩衝材の材質・厚さ

本装置で用いる緩衝材は、「適度に弾性があり、電磁波が減衰しにくく、吸水性が小さい」といった特性を持つことが望まれる。また、緩衝材の比誘電率は計測対象の比誘電率との平均値として取得されるため、計測値への影響を少なくするためになるべく小さい値であることが望ましい。これらの条件をたす材料として、発泡ポリエチレンを採用し、その物性を表3に示した。

緩衝材の厚さは電極間隔より大きいことが望ましいため25mmとした。

4. 原位置試験

パッカー式プローブを用いた原位置試験をサイクル機構の東濃鉱山第2立坑第2計測坑道で実施した。試錐孔は、泥質凝灰岩（有効間隙率0.55～0.59）に掘削された水平孔（01SI-10）を用い、試錐孔内で岩盤の深度方向の比誘電率分布を計測した。

試験に使用した01SI-10孔の孔径は98mm、掘進

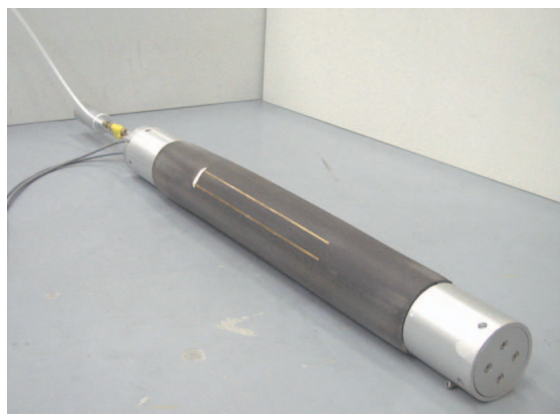


写真2 パッカー式プローブの外観

表3 緩衝材（発泡ポリエチレン）の物性値

見かけ密度：0.072g/cm ³	反発弾性：30%以上
引張強度*：880kPa	圧縮永久歪：2.5%以下
引裂強度*：390kPa	圧縮硬度*：110kPa
伸張率：90%以上	吸水率：1.0%以下

*）公表値は従来単位系であるが、ここではSIに換算して表示した。なお、kPa = kN/m²とした。

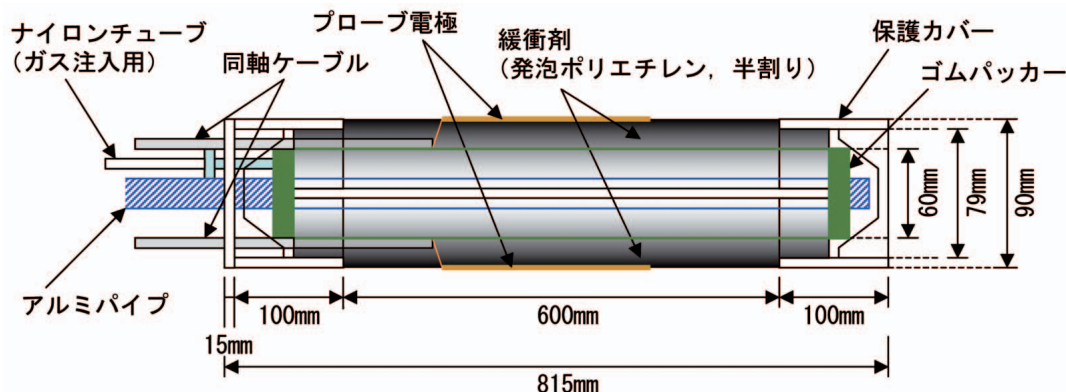


図12 パッカー式プローブの構造

長は20mであり、孔壁の崩壊がなかった1～9 mを計測区間とした。計測時に湧水は認められなかったが、試錐孔の下部（水平孔の底部）には水とスライムが少量溜まっていた。

4.1 計測方法

計測は以下の手順により実施した。

- ①試錐孔への挿入前に空気中にパッカー式プローブを立てた状態で比誘電率を計測し、プローブ定数(波形を読み取るために必要な値)を求める。
 - ②プローブを試錐孔の計測深度まで挿入し、パッカーをゆっくり加圧するとまもなくケーブルテストに表示される波形が変化し、更に加圧を続けるとやがて変化は収まる。このことから、波形の変化は電極が孔壁に接触したときに始まり、波形の変化の収束は電極が密着した状態と解釈できる(図13)。
 - ③波形の変化が収束した後の波形を取得する。
 - ④パッカーの圧力を開放して、次の深度に移動する。計測は孔口に近い部分から孔底に向かって押し入れながら行い、引き戻す際にも実施した。
 - ⑤プローブを取り出し、装置の外観を点検する。
- 今回計測対象となった泥質凝灰岩は、キャリブレーションの結果から、立ち上がりが明瞭なTDR波形を得られない可能性が考えられた。この対策として電極表面にコーティングを施し、深度方向の比誘電率分布を計測した。

4.2 試験結果と考察

計測結果を図14に示す。比誘電率として24～43の値が測定され、同一深度におけるプローブを試

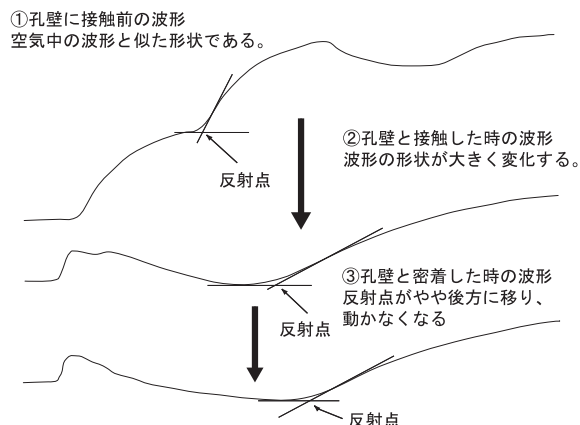


図13 電極と孔壁が密着する過程における波形変化の概念図

錐孔に押し入れる過程と引き戻す過程の計測値はほぼ同等であった。また、計測後にプローブの損傷は認められなかった。

なお、図5に示したキャリブレーション試験の結果において、飽和付近の比誘電率の測定値に不確実性があったことから、キャリブレーションカーブの信頼性が低いと考えられるため、計測された比誘電率からの体積含水率の推定は行っていない。

図14に示した計測結果より、深度4 mより浅い区間では、深度の増加と共に比誘電率が増加する傾向が、深度5～8 m間ではほぼ一定となる傾向が認められる。この傾向は異なる2つのプローブで同様に認められたことから、岩盤の含水状態、有効間隙率などの物性の変化、電極の設置状況に影響を与える孔壁の状態を、比誘電率の変化として計測したものと考えられる。

5. まとめ

5.1 キャリブレーション試験

キャリブレーション試験では、電極の設置方法を改良することにより、来待砂岩、白浜砂岩、田

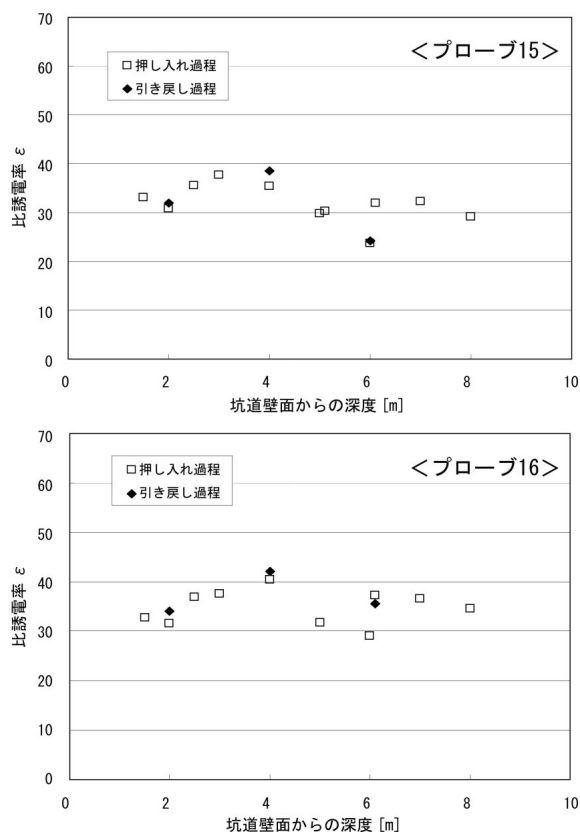


図14 比誘電率計測値の深度分布

下凝灰岩、荻野凝灰岩の4岩種において電極と岩石との隙間の影響を取り除くことができた。また、三相混合モデルを用いて、少数の計測データからキャリブレーションカーブをほぼ再現でき、キャリブレーション試験の簡略化ができる可能性が示された。一方、稲田花崗岩のように有効間隙率が極めて小さい岩石については、比誘電率の変化が小さいために適用が難しいことが確認された。原位置試験の対象とした泥質凝灰岩の試験結果には、比誘電率の変化が体積含水率の変化に比べて大きくなる現象や一定となる現象が認められ、問題が残った。

今後は、キャリブレーション試験における電極の設置方法や含水量調整方法の改良、試験の簡略化に取り組むと共に、更なる計測データの蓄積により、本手法が適用できる岩種や、有効間隙率の範囲についても検討していく必要がある。

5.2 パッカー式プローブ

原位置への設置が容易な構造としてパッカー式プローブを開発し、実用に耐える強度を持ち、計測値には再現性が認められた。

今後は、坑道周辺の含水量の変化を連続的かつ効率的に把握する観点から将来要求されるであろう、岩盤の含水量のモニタリングや、多区間同時計測といった機能を付加することが必要である。また、その際にはほかの手法による比較・検討を行うことが望ましいと考えられる。

6. おわりに

本研究では、キャリブレーション試験については、電極を設置する方法を改良した効果が確認され、キャリブレーション手法の簡略化の可能性を示すことができた。また、原位置計測については、TDR法を用いた原位置計測装置（パッカー式プローブ）を開発し、繰返し計測に耐えうる実用性と再現性のある計測結果を得ることができた。

今後は、当面の課題に取り組みつつ、将来予想される計測現場を念頭におき、より現実的な試験・研究を実施していくことが必要と考えられる。

謝 辞

本研究に当たり、岡山大学環境理工学部の西垣教授、埼玉大学地圏科学研究センター渡辺教授には、研究の初期段階から貴重なご助言をいただいたことを付記し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) “ニアフィールドにおける酸化還元状態変遷の解析のためのモデル開発”，核燃料サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-019, (1999)
- 2) 樺原 昇，今井 久，他：“不飽和領域の解析方法及び原位置計測手法の研究”，サイクル機構技報，No.4, p.111-119, (1999)
- 3) Topp, G. C., Davis, J. L. et al.: “Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines”, Water Resour. Res., 16, 574-582 (1980)
- 4) Hokett, S. L. et al.: “Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock”, J. Hydrology, 138, p.89-96 (1992)
- 5) Sakaki, T., K. Sugihara et al.: “Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock”, Water Resour. Res., 34, p.2623-2631 (1998)
- 6) Marschall, P., E. Fein, et al.: “Conclusions of the tunnel near-field programme (CTN)”, NAGRA Technical Report, 99-07 (1999)
- 7) Roth, K., R. Schulin, et al.: “Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach”, Water Resour. Res., 34, p.2267-2273 (1990)
- 8) “不飽和領域の原位置計測手法の研究”，核燃料サイクル機構技術資料，JNC TJ7400 2000-004, (2000)
- 9) 安原正也，安池慎治，他：“電磁波式土壤水分計—中性子水分計に代わる新しい水分計—”，地質ニュース430号，p.17-27, (1990)
- 10) “不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究”，核燃料サイクル機構技術資料，PNC TJ1449 96-006, (1996)