

不飽和領域の原位置計測手法の研究

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

2000年2月

株式会社ダイヤコンサルタント

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,

JAPAN

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

不飽和領域の原位置計測手法の研究

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

西田 薫*, 前村庸之*

要 旨

岩盤内に空洞を掘削すると、周辺岩盤に不飽和領域が発生する可能性がある。この不飽和領域では、岩盤の酸化還元状態が変化し、物質移行特性が変化するため、その範囲を定量的に把握することが重要である。しかし、そのような手法は十分に確立されていない。

本研究は、岩盤中の不飽和領域を定量的に把握できる計測手法を開発し、実用化を図ることを最終目標としている。今年度は基礎的研究として、1) 改良型棒状 TDR プロープの適用性試験、2) パッカー式プロープの問題点の調査と仕様・構造の改良に関する試験、3) TDR 波形の自動読み取りに関する既存技術の調査および自動化方法の提案、4) 低比抵抗岩盤に適用するための TDR プロープの改良に関する試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 改良型棒状 TDR プロープの有効性を確かめた。
- 2) 電磁波の影響範囲は、最大でプロープ間隔程度であり、プロープ間隔が大きくなると測定される比誘電率は小さくなる。プロープ長さは測定値に影響しない。
- 3) TDR 波形の自動読み取り方法としては微分法が最適である。
- 4) プロープ表面にコーティングを施すことにより、読み取りやすさが向上するが、測定値は真の比誘電率と異なる。

本報告書は、株式会社ダイヤコンサルタントが核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

契約番号：110D0195

サイクル機構担当グループおよび担当者：東濃地科学センター 地層科学研究グループ
竹内真司

* 株式会社ダイヤコンサルタント

A study on in-situ measuring method of an unsaturated zone

Kaoru Nishida* and Tsuneyuki Maemura*

Abstract

It is generally considered that an unsaturated zone may be generated in the vicinity of a drift after excavation. In such a zone, invasion of air containing oxygen possibly changes geochemical environments (e.g. redox condition) and mass transfer characteristics of the rock mass. Thus, the importance of measuring technique for the extent of this unsaturated zone is very large. However, no such technique has been fully developed at this moment.

This study work aims to develop such practical measuring methods within several years ahead. In this year, fundamental studies on TDR method were conducted on 1) applicability of the improved rod-type probes, 2) technical problems in the measuring method with packer-type probes and improvements on specifications and designs of the probes, 3) validities of the existing methods of TDR wave analysis for obtaining dielectric constants automatically, and 4) improvement of TDR probes for measuring dielectric constants of low-resistivity rocks. Conclusions were obtained as below:

- 1) The applicability of the improved rod-type probes to rock samples was validated.
- 2) The extent of effective electromagnetic field of the TDR measurement was at most as same as the size of spacing of probes. The measured dielectric constant decreased as the spacing of probes increased. The length of probes had no effect on the measurement.
- 3) The derivative-based method is most suitable for automatic analysis of TDR wave outputs.
- 4) The insulation coating improved legibility of TDR wave output, but the measured dielectric constant was different from the real value.

This work was performed by DIA CONSULTANTS CO., LTD. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

JNC Liaison: Shinji Takeuchi

Geological Research Execution Group, TONO Geoscience Center

* DIA CONSULTANTS CO., LTD

目次

1. 研究の概要	1
1.1 研究委託の目的	1
1.2 研究委託の範囲	1
1.3 研究委託の内容	1
2. 研究経緯および実施内容	3
2.1 不飽和領域の計測手法に関する研究経緯	3
2.2 平成 11 年度の実施内容	3
3. 改良型 TDR 棒状プローブを用いた岩石コアの比誘電率測定	5
3.1 目的	5
3.2 供試体	5
3.3 プローブ設置方法	8
3.4 実験結果	9
3.5 考察	21
4. パッカープローブの構造の検討に関する試験	23
4.1 パッカープローブの概要	23
4.2 プローブ間隔および長さの違いによる波形や読み取り値の変化	24
4.2.1 概要	24
4.2.2 実験方法	25
4.2.3 実験結果	26
4.2.4 考察	27
4.3 プローブ間隔と電磁波の影響範囲との関係	29
4.3.1 概要	29
4.3.2 実験方法	29
4.3.3 実験結果	31
4.3.4 考察	34
4.4 パッカーの構造と加圧媒体の影響評価	36
4.4.1 目的	36
4.4.2 実験方法	36
4.4.3 実験結果	37
4.4.4 考察	38
5. TDR 波形データ解析手法の検討	40
5.1 はじめに	40

5.2	典型的な TDR 波形およびキャリブレーション.....	40
5.3	波形解析手法概要.....	41
5.4	微分法.....	45
6.	低比抵抗岩盤への TDR の適用性検討.....	50
6.1	目的.....	50
6.2	試験方法.....	50
6.3	試験結果.....	51
6.4	考察.....	52
7.	まとめ.....	53
7.1	本年度の研究成果.....	53
7.2	今後の課題.....	54

謝辞

参考文献

付録

1. 図表
2. TDR 波形データ
3. 写真

表目次

表 3.2-1	これまでと今年度の室内試験で使用した供試体	6
表 3.2-2	コア供試体の一覧表および主要物性値	8
表 3.4-1	比誘電率測定結果一覧表（来待砂岩 KS10-5）	10
表 3.4-2	比誘電率測定結果一覧表（白川砂岩 SS10-4）	11
表 3.4-3	比誘電率測定結果一覧表（稲田花崗岩 IG10-3）	12
表 3.4-4	比誘電率測定結果一覧表（田下凝灰岩 TT10-4）	13
表 3.4-5	比誘電率測定結果一覧表（荻野凝灰岩 OT10-3）	14
表 3.4-1	体積含水率－比誘電率関係の特徴	20
表 4.4-1	2 種類のパッカーおよびプローブに対する比誘電率	37

図目次

図 3.2-1	比誘電率測定用の岩石供試体および測定プローブ	7
図 3.3-1	空隙を残さないプローブの設置方法	8
図 3.3-2	室内試験の実施状況の模式図	9
図 3.4-1	体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（来待砂岩）	15
図 3.4-2	体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（白浜砂岩）	16
図 3.4-3	体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（稲田花崗岩）	17
図 3.4-4	体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（田下凝灰岩）	18
図 3.4-5	体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（荻野凝灰岩）	19
図 3.5-1	体積含水率と比誘電率との関係（H11 年度全岩種）	22
図 4.1-1	パッカープローブによる測定概念図およびプローブの構造図	23
図 4.2-1	プローブ間隔および長さによる TDR 波形特性の変化を調べる試験の概念	24
図 4.2-2	円周プローブの配置	25
図 4.2-3	円周プローブ長と比誘電率との関係（空中での測定）	26
図 4.2-4	円周プローブ長と比誘電率との関係（水中での測定）	26
図 4.3-1	電磁波の影響範囲を調べる実験方法の概念	29
図 4.3-2	軸方向プローブの支持器	30
図 4.3-3	円周方向プローブの配置	31
図 4.3-4	水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ）	33
図 4.3-5	水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ）	33
図 4.3-6	円周プローブで測定される領域	35
図 4.3-7	円周プローブでの比誘電率推定値と実測値との比較	35
図 4.4-1	パッカーおよび加圧媒体の影響を調べる実験の概念	37

図 4.4-2	パッカー使用時に円周プローブで測定される領域.....	38
図 5.2-1	典型的な TDR 波形の例.....	41
図 5.3-1	マニュアル法の概要.....	41
図 5.3-2	TDR 波形とその 1 階微分.....	42
図 5.3-3	微分法の概要.....	42
図 5.3-4	TDR プローブのインピーダンスモデル概念.....	43
図 5.3-5	シミュレーション法による波形の計測値と計算値.....	44
図 5.3-6	ダイオードスイッチングコントロール法の概要.....	44
図 5.4-1	Savitzky-Golay 法によるスムージングの一例（区間データ数=50）.....	46
図 5.4-2	Savitzky-Golay 法によるスムージング手順の概要（区間データ数=5）....	47
図 5.4-3	TDR 波形とその 1 階微分の一例（区間データ数=50）.....	48
図 6.2-1	低比抵抗岩盤に対するプローブの改良試験.....	50
図 6.3-2	3 種類のプローブによる TDR 波形.....	51

1. 研究の概要

1.1 研究委託の目的

岩盤内に空洞を掘削すると、空洞への地下水流入により空洞周辺岩盤に不飽和領域が発生する可能性がある。不飽和領域の発生によって、空洞周辺岩盤中の水圧低下や岩盤への酸素の侵入による地下水の水質変化が生じるとともに、空洞が水で再飽和した後も、周辺岩盤に侵入した酸素の影響がある期間残留する可能性が考えられるため、不飽和領域の範囲やその特性の定量的な評価が、地下貯蔵施設等の性能を評価する上で重要となっている。

このような観点から、東濃地科学センターでは岩盤を対象とした不飽和領域の計測・解析手法の開発を目的として、室内試験、東濃鉱山を構成する堆積岩を対象とした原位置試験および解析手法に関する研究を実施してきた。このうち、不飽和領域の計測手法に関する研究では、電磁波を利用した計測手法を用いることにより、岩盤の飽和・不飽和状態をある程度推定できる見通しが得られている。

今年度は、平成 5 年度から平成 10 年度までに実施した不飽和領域に関する研究をベースに、昨年度までに開発した計測手法について、その実用化に向けた信頼性の向上、計測原理および問題点の再検討を行う。

1.2 研究委託の範囲

平成 11 年度は以下の項目について研究委託を実施した。

- (1) 不飽和領域の原位置計測手法に関する研究
- (2) 打合わせ議事録の作成、研究報告書の作成、研究報告会の実施

1.3 研究委託の内容

平成 10 年度までに実施した不飽和領域の計測手法に関する研究により、以下の成果が得られた。

- ① 室内試験の結果から、岩盤中の電磁波伝播速度から比誘電率を求めることで、岩種に関わらずその体積含水率の推定が可能であり、さらに、その岩盤の有効間隙率が既知であれば、飽和度の算出が可能である。
- ② 原位置計測手法として TDR 法、および孔間レーダー法を試行し、東濃鉱山における試験や人工砂地盤を用いた土槽実験により、それらの計測手法の適用性を確認した。また、TDR 法に関しては、プローブ設置方法の改良を重ねた結果、岩石の正確な比誘電率を測定できることを室内試験により確認した。

一方、これまでの室内および原位置試験結果から、以下のような課題も残った。

- ・ 孔間レーダー法は、大まかな飽和・不飽和状態の把握には利用できるが、TDR

や ADR と比較して応答が鈍く、分解能も劣る。

- ・ 孔間レーダー法は、坑道壁面近傍（壁面から 1 m 以内）での測定に難点がある。
- ・ TDR 法では、従来土壌を対象にして用いられてきた棒状プローブを、原位置岩盤に設置することは困難であり、改良型プローブでもその問題は解決されていない。
- ・ 棒状プローブの設置の困難を解消するために、パッカープローブを新たに考案し、予備的な適用性試験を行ったが、その装置の構造や計測方法等を確立するには至っていない。

これらの結果を踏まえ、平成 11 年度は以下の内容の研究を行った。

- ① 改良型 TDR 棒状プローブを用いた室内試験の実施（平成 10 年度に実施しなかった岩種を対象とする）
- ② パッカープローブの実用化を目指した、従来計測手法の問題点の調査および仕様・構造の改良
- ③ TDR の波形データ読み取りの自動化に関する既存技術の調査、および適切な自動化方法の提案
- ④ 埋設型の TDR プローブについて低比抵抗岩盤に対するプローブの改良に関する試験の実施

2. 研究経緯および実施内容

2.1 不飽和領域の計測手法に関する研究経緯

不飽和領域の広がりを把握する方法として、岩盤の弾性波速度（超音波速度）、比抵抗および電磁波速度（比誘電率）の分布を物理探査により直接測定することを考えた。室内試験による検討の結果、比誘電率が岩種に拠らず、乾燥状態から飽和状態までの広い範囲の含水量と一意的な関係を有することが明らかとなり、不飽和領域の計測手法として、最も有効であることがわかった。

続いて、比誘電率の測定方法として孔間レーダー法と TDR を取り上げ、岩盤への適用性を検討した。TDR については、比誘電率測定に用いるプローブの構造と設置方法、ならびに適用可能な岩種について検討した結果、以下のような知見が得られた。

- ・ 埋め込み式（棒状）プローブのロッド本数は、2 本より 3 本の方がわずかに有利であるが、2 本でも実用上問題ない。
- ・ ロッドの設置方法は、ロッドと計測孔径との間に隙間がないようにすることが理想的である。隙間がある場合には、導電性材料を充填することにより隙間の影響を軽減できる。
- ・ 棒状プローブを原位置で設置することは困難である。これに対し、岩石の表面に貼付するテーププローブは、埋め込み式プローブと同等の測定結果を与え、かつ設置がより容易である。
- ・ 岩盤の深度方向にプローブを設置する方法として、ボーリング孔内にパッカーを用いてテーププローブを密着させる方法（パッカープローブ）を新たに考案した。
- ・ 孔間レーダー法については、坑道壁面近傍（壁面から 1 m 以内）での測定に難点があることが、原位置試験の結果明らかとなった。

2.2 平成 11 年度の実施内容

平成 11 年度は、以下の研究を実施した。

(1) 改良型 TDR 棒状プローブを用いた室内試験の実施

過去に改良型 TDR 棒状プローブを用いた測定を実施していない岩種を対象として、室内試験を実施した。

(2) パッカープローブの実用化を目指した、従来計測手法の問題点の調査および仕様・構造の改良

以下の項目について室内実験により検討し、パッカープローブの仕様・構造の改良に関する検討を行った。

- ① 電磁波の影響範囲とプローブ間隔の関係
- ② プローブ間隔による波形や読み取り値の変化の観察（円周方向プローブ）
- ③ パッカーの構造と加圧媒体の影響評価

(3) TDR の波形データ読み取り自動化に関する既存技術の調査、および適切な自動化方法の提案

より客観的にデータを読み取る手法について、既存技術の調査を実施し、本研究に最適と思われる手法を提案した。

(4) 埋設型の TDR プローブについて低比抵抗岩盤に対するプローブの改良に関する試験

低比抵抗な岩盤にも対応できると考えられる TDR プローブの改良方法として、次の 2 点の有効性を比較実験により検討した。

- ① プローブ先端にゴムなどの絶縁材料を詰める方法
- ② プローブを絶縁材料（アクリル樹脂）でコーティングする方法

3. 改良型 TDR 棒状プローブを用いた岩石コアの比誘電率測定

3.1 目的

平成 6 年度から 10 年度にかけて、TDR により様々な岩種の比誘電率と体積含水率の関係を計測してきた。その結果、いずれの岩種においても、比誘電率と含水率とが広範囲に渡ってほぼ直線関係にあることがわかり、比誘電率を測定することにより含水率を推定できることが示された。

しかし、いくつかの岩種では、飽和度 100%付近で、含水率のわずかな変化とともに比誘電率が大きく変化する現象が見られ、この領域だけが全体的な直線関係から外れていた。この原因は、プローブと孔壁との間に隙間が存在し、飽和時にはこの隙間に水が存在しているが、水のポテンシャルが低下すると、まずこの隙間から脱水が起こり、測定値に大きな変化が現れるためであると考えられた。そこで、このような隙間を残さないプローブの設置方法の検討が行われた。

平成 9 年度には、プローブに導電性材料を塗布して設置する方法を検討し、これによって、隙間の影響を低減できることが判った。さらに平成 10 年度には、より簡便かつ確実に隙間を充填できる改良型の TDR 棒状プローブを考案し、適用性の検討を行った結果、正確な比誘電率を測定できる見通しが得られた。

そこで本研究では、これまでに改良型 TDR 棒状プローブを用いた比誘電率測定を実施していない岩種を対象として、同プローブを用いた室内試験を実施し、その有効性をさらに検証するとともに、正確な含水率と比誘電率の関係を求めることとした。

3.2 供試体

表 3.2-1 に、過去および本年度の室内試験で使用した供試体の岩種と形状、間隙率、供試体の個数およびプローブの本数を示す。

表3.2-1 これまでと今年度の室内試験で使用した供試体

実施年度	岩種	試験 個数	プローブ 本数	間隙率 (%)	形状(mm)および選定理由
平成 6 年度	多胡砂岩	3	2	15.6~21.3	100×100×200 粗粒な砂岩
平成 7 年度	来待砂岩	2	3	21.3~21.7	φ100×H130 均質な砂岩
	白浜砂岩	2	3	13.2~13.4	φ100×H130 均質な砂岩
	白河熔結 凝灰岩	2	3	24.0~24.7	φ100×H130 均質な凝灰岩
	稲田花崗岩	2	3	0.989~1.06	φ100×H130 代表的な花崗岩
	明世累層凝灰 質細粒砂岩	2	2	53.5~54.0	φ100×H130 東濃地点の岩石
平成 8 年度	田下凝灰岩	2	2	31.3~31.7	φ100×H130 大谷石の一種 比較的均質
	荻野凝灰岩	2	2	28.3~28.6	φ100×H130
	白河熔結 凝灰岩	2	2	23.4~24.6	φ100×H130 均質な凝灰岩
	多胡砂岩	2	2	22.7~23.0	φ100×H130 粗粒砂岩
	来待砂岩	2	2	22.1	φ100×H130 粗粒砂岩
	ウェスターリー 花崗岩	2	2	1.38~1.42	φ100×H130 代表的な花崗岩
	明世累層凝灰 質細粒砂岩	2	2	53.7~53.8	φ100×H130 東濃地点の岩石
	田下凝灰岩	1	2	32.5	φ100×H130 間隙率 30% 前後
平成 9 年度	白河熔結 凝灰岩	1	2	25.4	φ100×H130 間隙率 25% 前後
	白浜砂岩	1	2	14.3	φ100×H130 間隙率 15% 前後
	豊浦標準砂	2	2	39.2~39.9	φ100×H130 標準砂
	セメント	3	2	32.7~33.3	φ100×H130 プローブ設置は コントロール可能
	明世累層凝灰 質細粒砂岩	1	2	51.8	φ=100×H130
	多胡砂岩	1	2	23.4	φ=100×H130
	白河熔結 凝灰岩	1	2	23.1	φ=100×H130
平成 10 年度	左官砂	1	2	47.7	φ=100×H130 人工土層材料
	来待砂岩	1	2	22.2	φ=100×H131
	白浜砂岩	1	2	14.8	φ=101×H130
	稲田花崗岩	1	2	0.701	φ=101×H129
	田下凝灰岩	1	2	33.7	φ=100×H131 *注
平成 11 年度	荻野凝灰岩	1	2	26.8	φ=101×H129 *注

*注：供試体を採取した岩石ブロックは、平成 9 年度までと異なっている。

表3.2-1で、改良型の二重管式棒状 TDR プローブを用いた試験は、平成 10 年度から実施している。したがって、過去に測定を行った岩種のうち、改良型プローブによる試験を実施していないものは次の 6 岩種である。

来待砂岩、白浜砂岩、稲田花崗岩、田下凝灰岩、荻野凝灰岩、ウェスターリー花崗岩

上記のうち、ウェスタリー花崗岩は試料の入手が困難であることから、これを除いた5岩種の各1供試体について、改良型プローブを用いたキャリブレーション試験を実施した。プローブの大きさは、H10年度と同じく外管の外径10mm、内管の外径9mm×長さ100mmとした。

岩石供試体及び測定プローブの模式図を図3.2-1に示す。

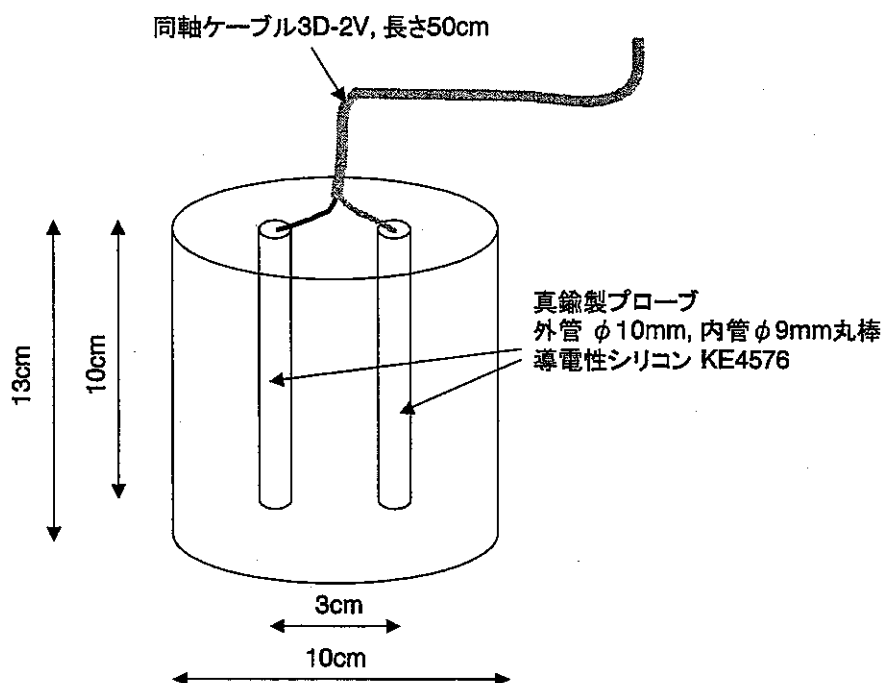


図 3.2-1 比誘電率測定用の岩石供試体および測定プローブ

比誘電率測定用供試体の形状・寸法は、これまでの試験と同様に直径100mm×高さ130mmの円柱状供試体を基本とし、岩石ブロックよりボーリングマシンにより採取した。比誘電率測定用の測定孔の本数は、平成10年度と同様に2本とし、測定孔の中心間隔を3cmとして、供試体の高さ方向に10cmの深さで削孔した。

表3.2-2には、平成10年度、11年度に使用したコア供試体の主要物性値を示した。

表3.2-2 コア供試体の一覧表および主要物性値

年度	岩種	供試体 番号	プローブ本数, 概略寸法	供試体 概略寸法 cm	湿潤 密度 g/cm ³	乾燥 密度 g/cm ³	有効間 隙率 %	吸水率 %
平成 10 年度	明世累層 凝灰質 細粒砂岩	AS10-5	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	1.71	1.20	51.8	43.3
	多胡砂岩	TS10-3	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	2.16	1.92	23.4	12.2
	白河熔結 凝灰岩	SWT10-6	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	2.23	2.00	23.1	11.6
	左官砂	Sand-3	2本, $\phi 5\text{mm} \times$ $L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	1.97	1.49	47.7	32.0
平成 11 年度	来待砂岩	KS10-5	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	2.25	2.03	22.2	10.9
	白浜砂岩	SS10-4	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	2.44	2.29	14.8	6.45
	稲田 花崗岩	IG10-3	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	2.625	2.618	0.70	2.68
	田下 凝灰岩	TT10-4	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	2.06	1.72	33.7	19.6
	荻野 凝灰岩	OT10-3	2本, $\phi 10\text{mm}$ $\times L10\text{cm}$	$\phi 10 \times H13$	1.96	1.69	26.8	15.9

3.3 プローブ設置方法

プローブとして外径 10mm の真鍮製のパイプと、その中に挿入する内径 9mm の真鍮製の丸棒を組み合わせたものを用いた。プローブの設置方法を図3.3-1に示す。導電性の充填剤を注入した外管を設置孔内に挿入しておき、その中に内管を押し込むと、外管内の充填剤がパイプ先端から押し出され、パイプと設置孔内壁の間の空隙部分を埋めて、口元部まで還流される。充填剤には導電性シリコン KE4576（信越シリコーン製）を使用した。

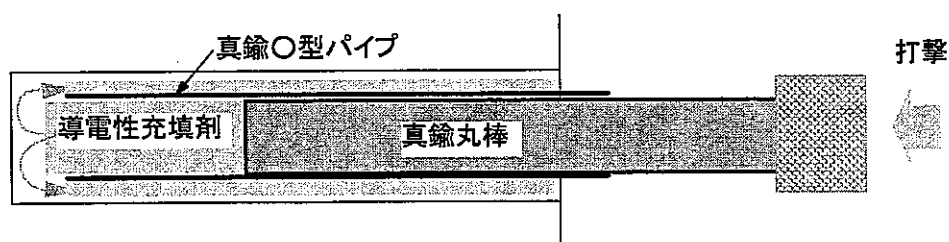


図 3.3-1 空隙を残さないプローブの設置方法

室内試験の模式図を図3.3-2に示す。

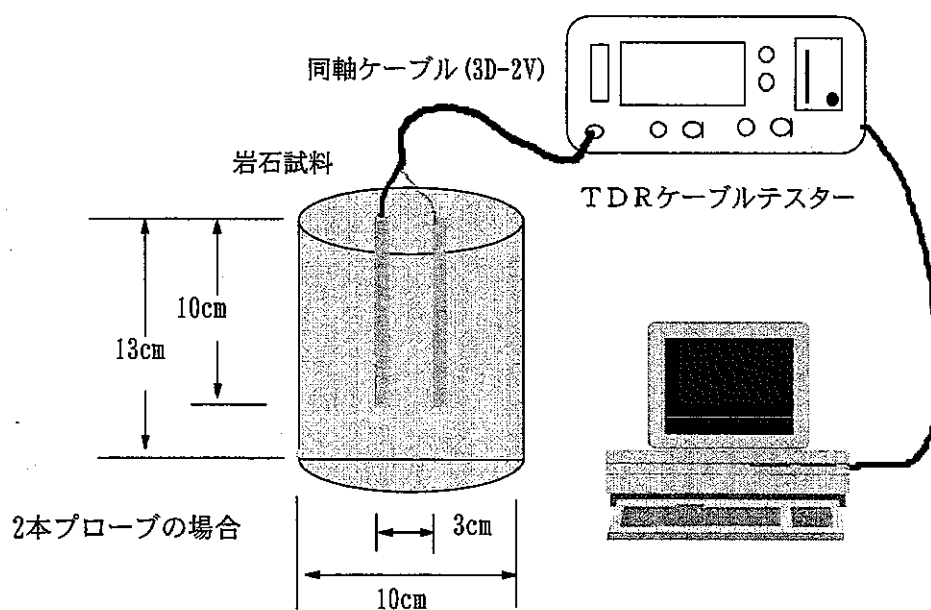


図 3.3-2 室内試験の実施状況の模式図

3.4 実験結果

表3.4-1から表3.4-5に TDR 測定結果を示す。また、図3.4-1から図3.4-5には、岩種ごとの比誘電率と体積含水率および飽和度との関係を、平成7年から9年にかけて測定した結果も併せて図示した。

表 3.4-1 比誘電率測定結果一覧表（来待砂岩 KS10-5）

試料: KS10-5 来待砂岩 プローブ2本

強制湿潤重量*:	2300.20 (g)	プローブ重量:	169.78 (g)
水中重量*:	1279.86 (g)	湿潤密度	2.25 (g/cm ³)
強制乾燥重量*:	2074.17 (g)	乾燥密度	2.03 (g/cm ³)
有効間隙率:	0.222	吸水率	0.109

番号	重量* (g)	体積含水 率 θ_v	飽和度 (%)	TDR-L (cm)	比誘電率	測定日	備考
1	2300.20	0.222	100.0	42.8	18.32	H12.1.6	
2	2292.59	0.214	96.6	42.1	17.72	H12.1.8	
3	2285.36	0.207	93.4	41.9	17.56	H12.1.11	
4	2283.16	0.205	92.5	40.7	16.56	H12.1.12	
5	2275.12	0.197	88.9	39.7	15.76	H12.1.14	
6	2268.63	0.191	86.0	38.8	15.05	H12.1.18	
7	2262.75	0.185	83.4	38.5	14.82	H12.1.19	
8	2255.94	0.178	80.4	37.2	13.84	H12.1.21	
9	2241.68	0.164	74.1	37.0	13.69	H12.1.22	
10	2227.36	0.150	67.8	36.9	13.62	H12.1.24	
11	2226.54	0.149	67.4	36.1	13.03	H12.1.26	
12	2223.62	0.146	66.1	36.1	13.03	H12.1.28	
13	2218.21	0.141	63.7	35.5	12.60	H12.1.30	
14	2209.81	0.133	60.0	35.3	12.46	H12.2.3	
15	2202.61	0.126	56.8	35.1	12.32	H12.2.5	
16	2194.07	0.118	53.0	34.7	12.04	H12.2.8	
17	2177.20	0.101	45.6	33.9	11.49	H12.2.11	
18	2156.98	0.081	36.6	32.9	10.82	H12.2.13	
19	2133.58	0.058	26.3	31.0	9.61	H12.2.15	
20	2118.72	0.044	19.7	29.0	8.41	H12.2.18	
21	2105.11	0.030	13.7	27.1	7.34	H12.2.20	
22	2092.79	0.018	8.2	26.2	6.86	H12.2.22	
23	2085.65	0.011	5.1	26.6	7.08	H12.2.24	
24	2075.34	0.001	0.5	25.3	6.40	H12.2.26	

*): 重量はプローブを除いた試料の重量である。

プローブの直径は10mmである。

プローブは2重管構造を採用し、導電性シリコンをプローブ周囲の空隙に充填した。

体積含水率 θ_v = (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 水中重量)

飽和度 = $100 \times (\text{重量} - \text{強制乾燥重量}) / (\text{強制湿潤重量} - \text{強制乾燥重量}) \%$

表 3.4-2 比誘電率測定結果一覧表（白川砂岩 SS10-4）

試料 SS10-4 白川砂岩 プローブ2本

強制湿潤重量*：	2471.52 (g)	プローブ重量：	174.78 (g)
水中重量*：	1458.19 (g)	湿潤密度	2.44 (g/cm ³)
強制乾燥重量*：	2321.86 (g)	乾燥密度	2.29 (g/cm ³)
有効間隙率：	0.148	吸水率	0.0645

番号	重量* (g)	体積含水 率 θ_v	飽和度 (%)	TDR- L (cm)	比誘電率	測定日	備考
1	2471.52	0.148	100.0	34.7	12.04	H12.1.12	
2	2464.55	0.141	95.3	34.2	11.70	H12.1.14	
3	2459.03	0.135	91.7	33.1	10.96	H12.1.18	
4	2452.59	0.129	87.4	32.7	10.69	H12.1.19	
5	2445.33	0.122	82.5	32.2	10.37	H12.1.21	
6	2432.13	0.109	73.7	31.7	10.05	H12.1.22	
7	2411.72	0.089	60.0	30.6	9.36	H12.1.26	
8	2411.47	0.088	59.9	30.2	9.12	H12.1.28	
9	2407.78	0.085	57.4	30.1	9.06	H12.1.30	
10	2397.66	0.075	50.6	28.9	8.35	H12.2.3	
11	2388.71	0.066	44.7	28.1	7.90	H12.2.5	
12	2377.70	0.055	37.3	27.6	7.62	H12.2.8	
13	2366.79	0.044	30.0	27.2	7.40	H12.2.11	
14	2350.96	0.029	19.4	26.1	6.81	H12.2.13	
15	2337.32	0.015	10.3	25.0	6.25	H12.2.15	
16	2327.77	0.006	3.9	23.9	5.71	H12.2.18	
17	2324.77	0.003	1.9	23.5	5.52	H12.2.20	
18	2325.33	0.003	2.3	23.5	5.52	H12.2.22	
19	2323.23	0.001	0.9	23.7	5.62	H12.2.24	
20	2322.18	0.000	0.2	23.2	5.38	H12.2.26	
21	2322.30	0.000	0.3	23.0	5.29	H12.2.27	

*)：重量はプローブを除いた試料の重量である。

プローブの直径は10mmである。

プローブは2重管構造を採用し、導電性シリコンをプローブ周囲の空隙に充填した。

体積含水率 θ_v = (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 水中重量)

飽和度 = 100 × (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 強制乾燥重量) %

表 3.4-3 比誘電率測定結果一覧表（稲田花崗岩 IG10-3）

試料：IG10-3 稲田花崗岩 プローブ2本

強制湿潤重量*：	2658.42 (g)	プローブ重量：	169.00 (g)
水中重量*：	1645.67 (g)	湿潤密度	2.62 (g/cm ³)
強制乾燥重量*：	2651.32 (g)	乾燥密度	2.62 (g/cm ³)
有効間隙率：	0.00701	吸水率	0.003

番号	重量* (g)	体積含水率 θ_v	飽和度 (%)	TDR-L (cm)	比誘電率	測定日	備考
1	2658.42	0.00701	100.0	25.8	6.66	H12.1.6	
2	2657.91	0.00651	92.8	25.8	6.66	H12.1.8	
3	2657.25	0.00586	83.5	25.8	6.66	H12.1.11	
4	2656.61	0.00522	74.5	25.6	6.55	H12.1.12	
5	2655.39	0.00402	57.3	25.6	6.55	H12.1.14	
6	2656.08	0.00470	67.0	25.7	6.60	H12.1.18	
7	2655.32	0.00395	56.3	25.7	6.60	H12.1.19	
8	2654.80	0.00344	49.0	25.5	6.50	H12.1.21	
9	2654.56	0.00320	45.6	25.5	6.50	H12.1.22	
10	2653.67	0.00232	33.1	25.8	6.66	H12.1.24	
11	2653.46	0.00211	30.1	25.5	6.50	H12.1.26	
12	2653.37	0.00202	28.9	25.5	6.50	H12.1.28	
13	2653.26	0.00192	27.3	25.3	6.40	H12.1.30	
14	2653.24	0.00190	27.0	25.1	6.30	H12.2.3	
15	2653.07	0.00173	24.6	25.2	6.35	H12.2.5	
16	2652.96	0.00162	23.1	25.4	6.45	H12.2.8	
17	2652.89	0.00155	22.1	25.2	6.35	H12.2.11	
18	2652.63	0.00129	18.5	25.2	6.35	H12.2.13	
19	2652.25	0.00092	13.1	24.9	6.20	H12.2.15	
20	2652.01	0.00068	9.7	25.0	6.25	H12.2.18	
21	2651.95	0.00062	8.9	24.5	6.00	H12.2.20	
22	2651.67	0.00035	4.9	25.1	6.30	H12.2.22	
23	2651.57	0.00025	3.5	25.0	6.25	H12.2.24	
24	2651.38	0.00006	0.8	25.7	6.60	H12.2.26	

*): 重量はプローブを除いた試料の重量である。

プローブの直径は10mmである。

プローブは2重管構造を採用し、導電性シリコンをプローブ周囲の空隙に充填した。

体積含水率 θ_v = (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 水中重量)

飽和度 = 100 × (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 強制乾燥重量) %

表 3.4-4 比誘電率測定結果一覧表 (田下凝灰岩 TT10-4)

試料 TT10-4 田下凝灰岩 プローブ2本

強制湿潤重量* :	2093.33 (g)	プローブ重量 :	172.3 (g)
水中重量* :	1075.44 (g)	湿潤密度	2.06 (g/cm ³)
強制乾燥重量* :	1749.94 (g)	乾燥密度	1.72 (g/cm ³)
有効間隙率 :	0.337	吸水率	0.196

番号	重量* (g)	体積含水 率 θ_v	飽和度 (%)	TDR-L (cm)	比誘電率	測定日	備考
1	2093.33	0.337	100.0	49.0	24.01	H12.1.11	
2	2085.87	0.330	97.8	46.6	21.72	H12.1.12	
3	2079.76	0.324	96.0	47.2	22.28	H12.1.14	
4	2074.21	0.319	94.4	48.4	23.43	H12.1.18	
5	2067.90	0.312	92.6	46.7	21.81	H12.1.19	
6	2052.04	0.297	88.0	46.9	22.00	H12.1.21	
7	2034.05	0.279	82.7	46.7	21.81	H12.1.22	
8	2032.78	0.278	82.4	46.0	21.16	H12.1.24	
9	2029.14	0.274	81.3	47.0	22.09	H12.1.25	
10	2018.99	0.264	78.4	45.1	20.34	H12.1.26	
11	2006.62	0.252	74.7	45.4	20.61	H12.1.28	
12	1990.46	0.236	70.0	45.6	20.79	H12.1.30	
13	1963.70	0.210	62.2	43.4	18.84	H12.2.3	
14	1925.22	0.172	51.0	38.8	15.05	H12.2.5	
15	1878.97	0.127	37.6	36.1	13.03	H12.2.8	
16	1878.82	0.127	37.5	35.4	12.53	H12.2.11	
17	1842.70	0.091	27.0	34.0	11.56	H12.2.13	
18	1805.02	0.054	16.0	30.4	9.24	H12.2.15	
19	1789.10	0.038	11.4	27.7	7.67	H12.2.18	
20	1772.13	0.022	6.5	24.2	5.86	H12.2.20	
21	1759.71	0.010	2.8	23.4	5.48	H12.2.22	
22	1753.46	0.003	1.0	23.1	5.34	H12.2.24	
23	1751.66	0.002	0.5	22.1	4.88	H12.2.26	

*): 重量はプローブを除いた試料の重量である。

プローブの直径は10mmである。

プローブは2重管構造を採用し、導電性シリコンをプローブ周囲の空隙に充填した。

体積含水率 θ_v = (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 水中重量)

飽和度 = 100 × (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 強制乾燥重量) %

表 3.4-5 比誘電率測定結果一覧表（荻野凝灰岩 OT10-3）

試料 OT10-3 荻野凝灰岩 プローブ2本

強制湿潤重量*	1965.78 (g)	プローブ重量:	172.96 (g)
水中重量*	960.47 (g)	湿潤密度	1.96 (g/cm ³)
強制乾燥重量*	1696.79 (g)	乾燥密度	1.69 (g/cm ³)
有効間隙率:	0.268	吸水率	0.159

番号	重量* (g)	体積含水 率 θ_v	飽和度 (%)	TDR- L (cm)	比誘電率	測定日	備考
1	1965.78	0.268	100.0	45.1	20.34	H12.1.6	
2	1958.56	0.260	97.3	44.7	19.98	H12.1.8	
3	1951.93	0.254	94.9	43.3	18.75	H12.1.11	
4	1950.05	0.252	94.2	43.2	18.66	H12.1.12	
5	1942.67	0.245	91.4	42.9	18.40	H12.1.14	
6	1935.94	0.238	88.9	42.2	17.81	H12.1.18	
7	1929.56	0.232	86.5	41.6	17.31	H12.1.19	
8	1922.94	0.225	84.1	40.7	16.56	H12.1.21	
9	1907.36	0.209	78.3	39.1	15.29	H12.1.22	
10	1886.46	0.189	70.5	37.1	13.76	H12.1.24	
11	1885.60	0.188	70.2	37.0	13.69	H12.1.25	
12	1882.36	0.185	69.0	36.8	13.54	H12.1.26	
13	1873.30	0.176	65.6	36.2	13.10	H12.1.28	
14	1862.92	0.165	61.8	35.7	12.74	H12.1.30	
15	1850.24	0.153	57.0	35.0	12.25	H12.2.3	
16	1831.78	0.134	50.2	34.1	11.63	H12.2.5	
17	1811.13	0.114	42.5	32.7	10.69	H12.2.8	
18	1787.75	0.090	33.8	31.1	9.67	H12.2.11	
19	1766.33	0.069	25.9	29.7	8.82	H12.2.13	
20	1741.04	0.044	16.5	26.8	7.18	H12.2.15	
21	1731.59	0.035	12.9	25.2	6.35	H12.2.18	
22	1723.02	0.026	9.8	24.6	6.05	H12.2.20	
23	1709.32	0.012	4.7	24.2	5.86	H12.2.22	
24	1701.27	0.004	1.7	24.9	6.20	H12.2.24	
25	1698.46	0.002	0.6	23.9	5.71	H12.2.26	

*): 重量はプローブを除いた試料の重量である。

プローブの直径は10mmである。

プローブは2重管構造を採用し、導電性シリコンをプローブ周囲の空隙に充填した。

体積含水率 θ_v = (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 水中重量)

飽和度 = 100 × (重量 - 強制乾燥重量) / (強制湿潤重量 - 強制乾燥重量) %

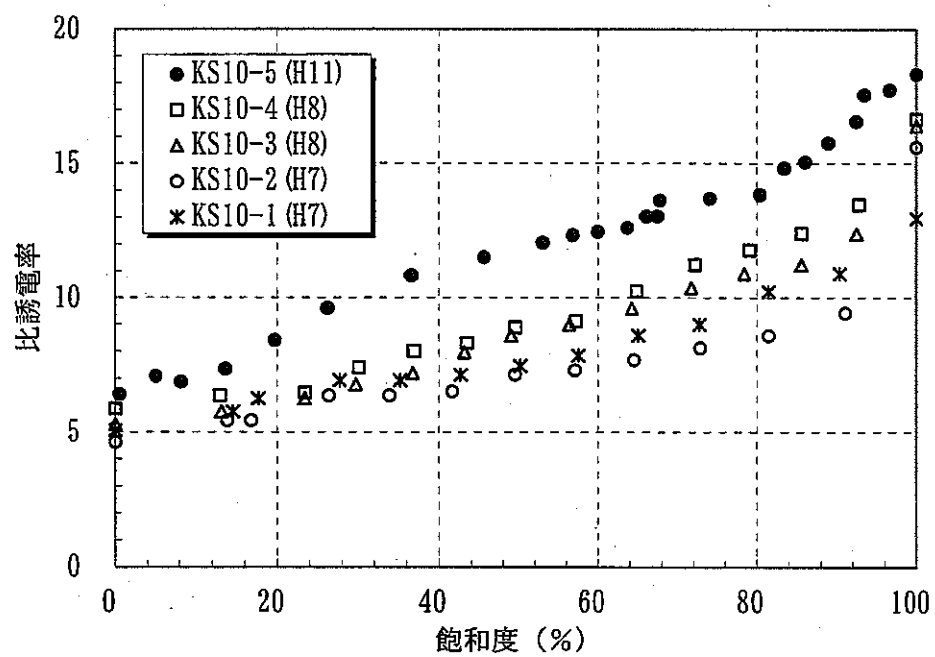
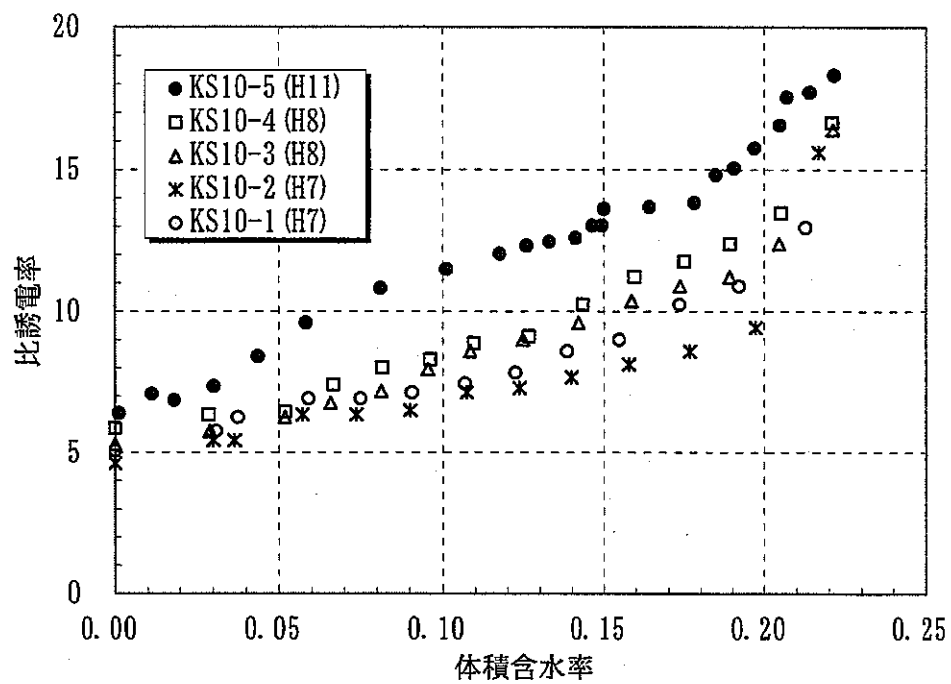


図 3.4-1 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（来待砂岩）

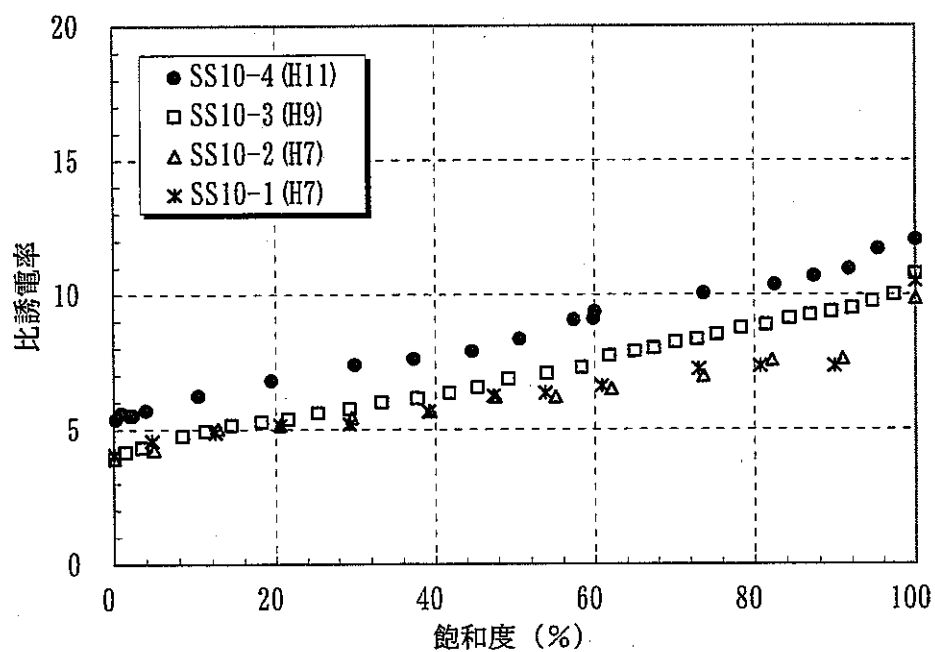
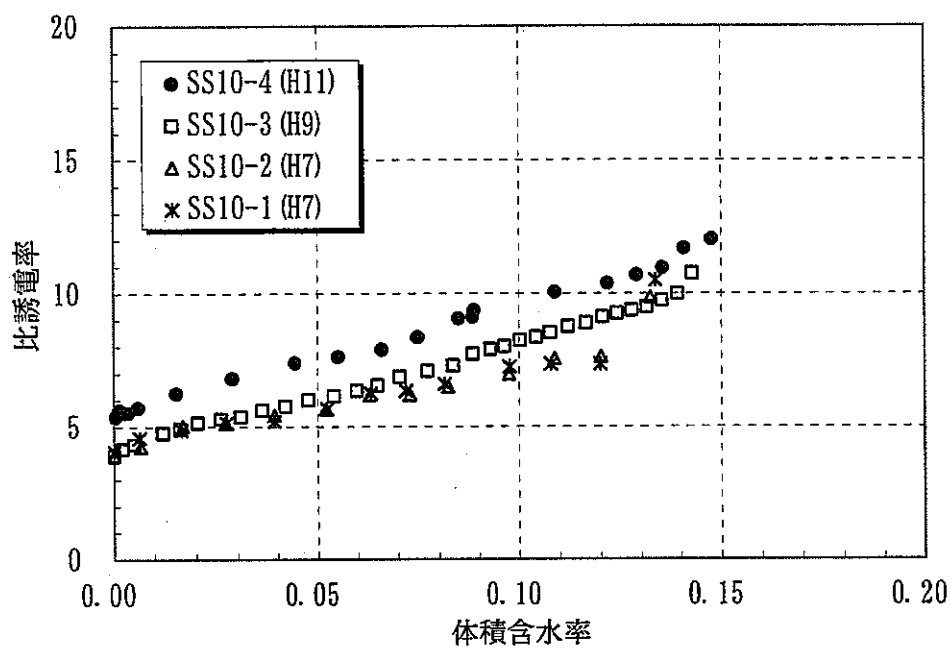


図 3.4-2 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（白浜砂岩）

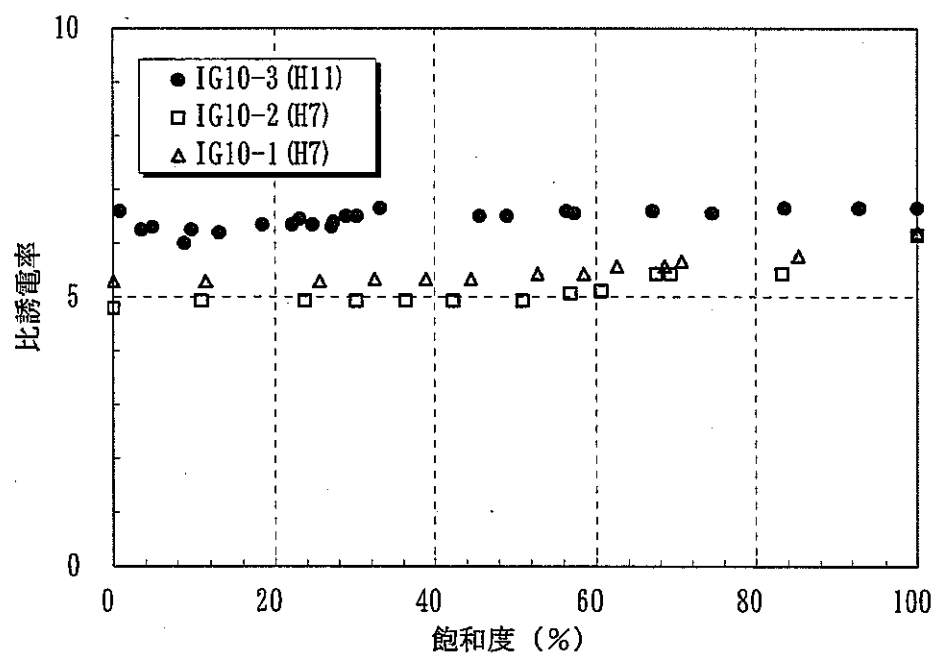
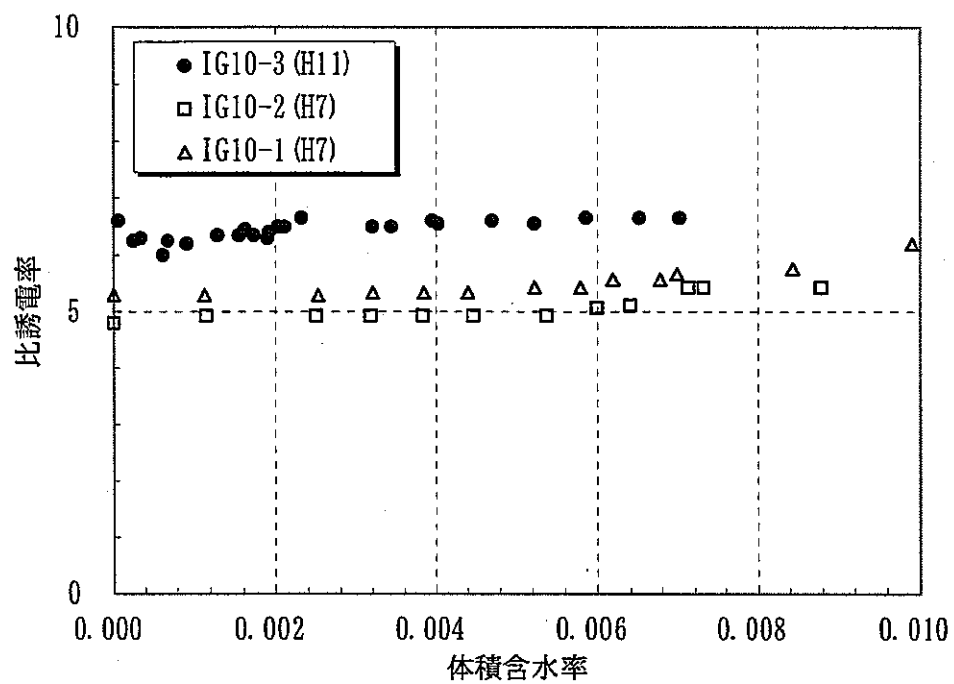


図 3.4-3 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（稲田花崗岩）

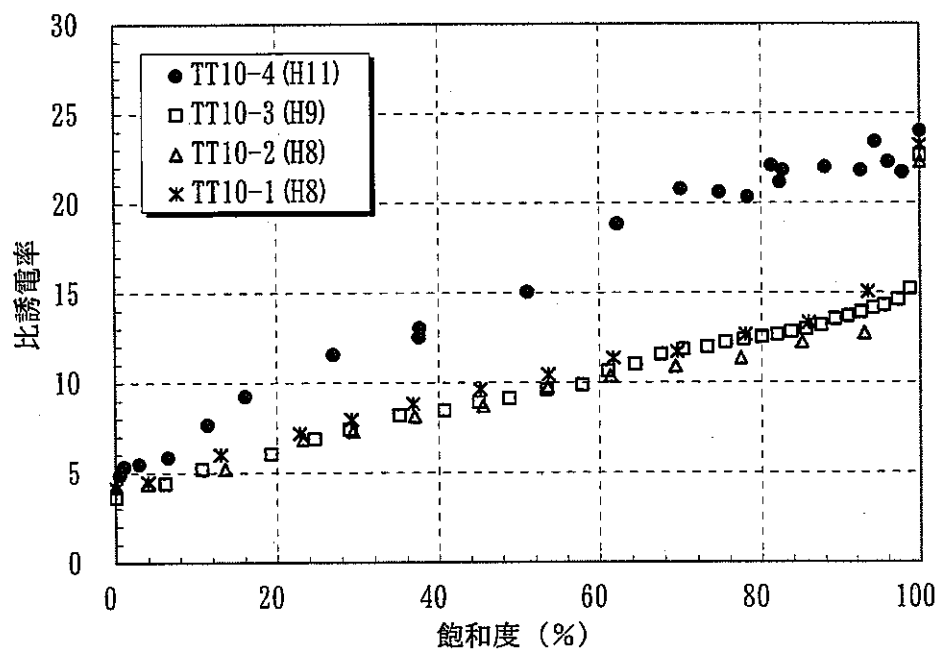
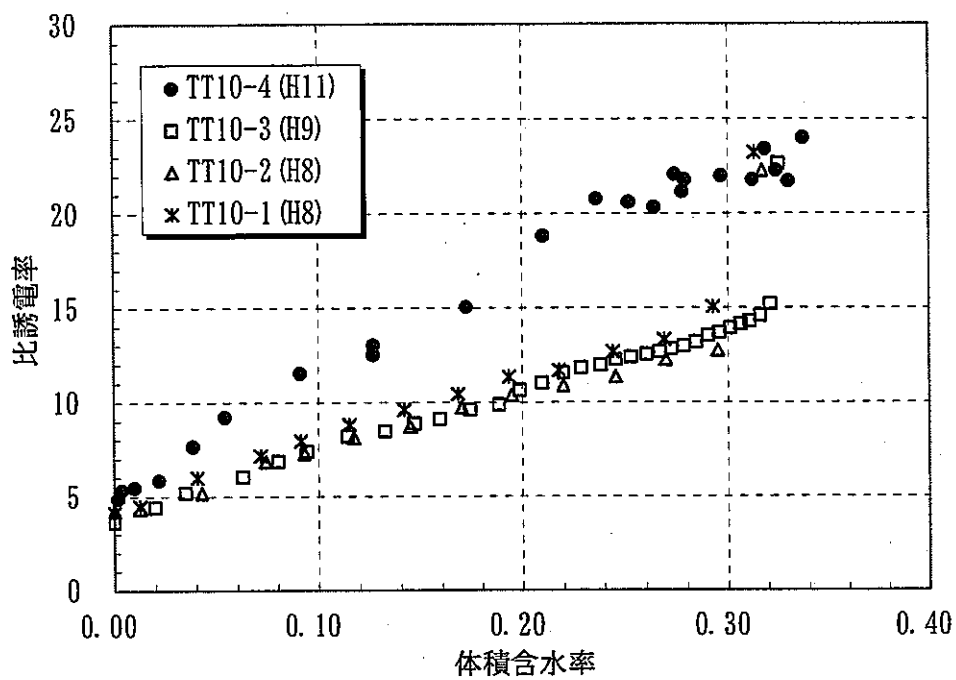


図 3.4-4 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係 (田下凝灰岩)

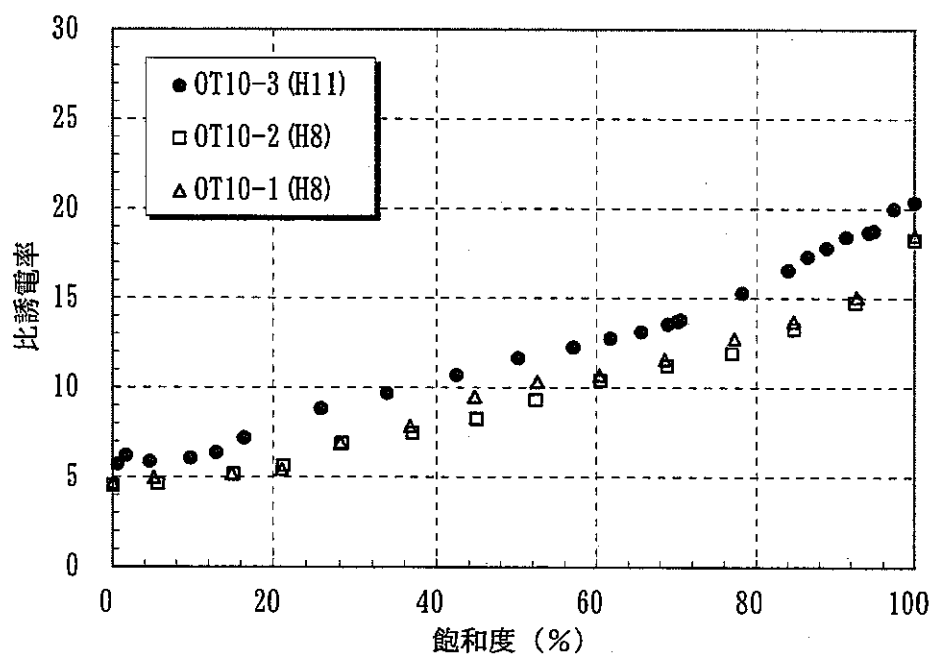
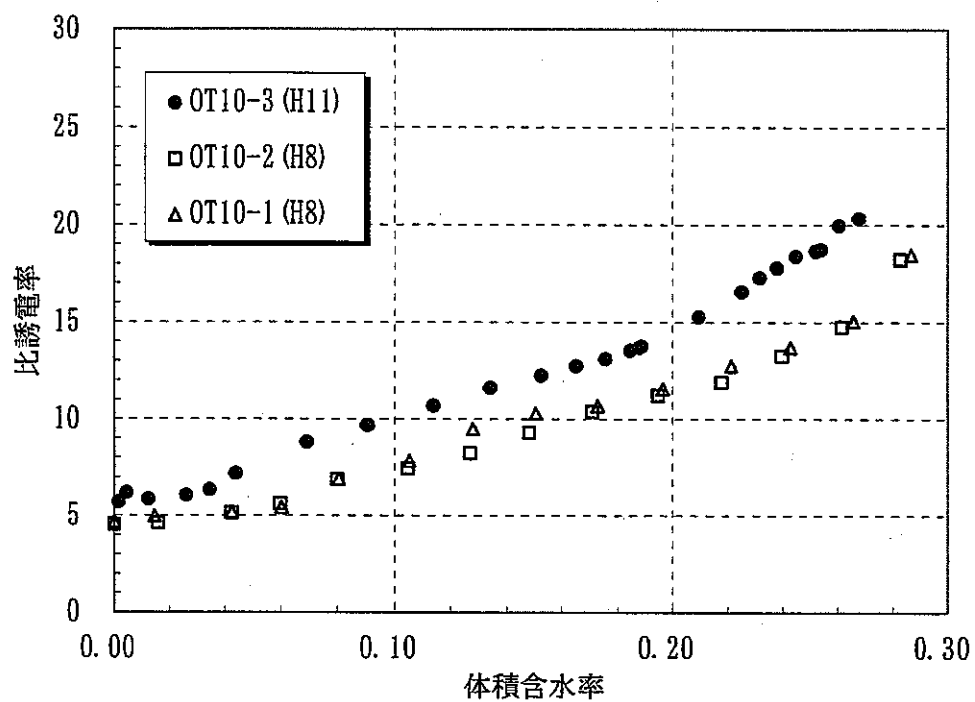


図 3.4-5 体積含水率および飽和度と比誘電率との関係（荻野凝灰岩）

稲田花崗岩を除けば、いずれの岩種においても、比誘電率は体積含水率の変化に対して有意な変化を示した。稲田花崗岩では、比誘電率の変化はほとんど認められなかった。

過去の測定結果と比較すると、いずれの岩種でも、同一の体積含水率に対して全般的に高めの比誘電率を示した。飽和時の比誘電率で比較すると、田下凝灰岩では従前の結果とほぼ同一であり、それ以外の岩では 1～2 程度高い値であった。また、稲田花崗岩を除く 4 岩種については、過去の測定結果と比べて、飽和度 100%付近での比誘電率の変化が緩やかになっていた

それぞれの岩種について得られた体積含水率－比誘電率関係の特徴を、過去の測定結果と比較して表3.4-1にまとめた。

表3.4-1 体積含水率－比誘電率関係の特徴

岩石試料	特徴
来待砂岩	- 両者はおおむね直線関係にあるが、含水率の高い領域で、体積含水率に対する比誘電率の変化がやや大きく現れる。 - 過去のデータと比較して、飽和体積含水率はほぼ等しく、同一含水率に対して、全般的に比誘電率は高め。 - 乾燥側の端では、過去のデータとほぼ同一値を示している。
白浜砂岩	- 両者はほぼ直線関係にあり、その傾きは平成 9 年度とほぼ同一。 - 過去のデータと比較して、飽和体積含水率はわずかに大きく、比誘電率は、同一体積含水率に対して全般的に 0.5～2 程度高め。
稲田花崗岩	- 過去のデータと比較して、飽和体積含水率は小さく、比誘電率は同一含水率に対して全般的に高め。 - 全般的に比誘電率はほとんど変化しないが、乾燥側でやや変化が見られ、値がばらつく。
田下凝灰岩	- 両者はおおむね直線関係にあるが、含水率 0.2 付近で比誘電率の変化がやや大きく現れる。 - 過去のデータと比較して、飽和体積含水率はほぼ等しく、比誘電率は全般的に高め。 - 飽和に近い領域で、データに大きなばらつきが見られる。 - 飽和側と乾燥側の端では、過去のデータとほぼ同一値を示している。
荻野凝灰岩	- 両者はほぼ直線関係にあるが、含水率の低い領域で、体積含水率に対する比誘電率の変化がやや小さい。 - 過去のデータと比較して、飽和体積含水率はやや小さく、比誘電率は全般的にやや高め。 - 乾燥側の端では、過去の測定値よりも 1 程度高い値である。

3.5 考察

飽和度 100%付近での比誘電率の変化から、今回のプローブ設置法が孔壁との隙間を埋めるのに有効であることが確かめられた。また、いずれの試料についても、同一含水率に対する比誘電率の値が過去の測定値より高めになっているのは、読み取り方法の個人差によるものと推察される。

なお、田下凝灰岩と荻野凝灰岩は、供試体を採取したブロックが前年度までと異なっているが、このうち田下凝灰岩については、飽和体積含水率が等しく、かつ飽和・乾燥側の端での比誘電率が、過去の測定値とほぼ等しいことから、前年度までの試料と同一に扱えるものと判断できる。荻野凝灰岩は、飽和体積含水率が異なっているため、過去の測定値と直接比較して議論することは妥当でない。

今回測定した岩種のうち稲田花崗岩を除く 4 岩種と、平成 10 年度に測定した 3 岩種（多胡砂岩、白川熔結凝灰岩、明世累層凝灰質細粒砂岩）の体積含水率－比誘電率関係を、図3.5-1に示す。今年度の 4 岩種と平成 10 年度の白川熔結凝灰岩のデータは、ほぼ同一曲線の周囲に分布していた。この曲線を Topp (1980)の経験式と比較すると、体積含水率の高い領域でやや近い値を示すものの、全体的には同一含水率に対してやや高い比誘電率を示した。これは、既往の研究で指摘されている通り、これらの岩種の間隙率が、Topp 式が良く当てはまる砂質土壌に比べて小さいためであると考えられる。すなわち、同一含水率で比較すると、岩石は土壌に比べて気相率が小さく、固相や液相の割合が大きいため、全体の比誘電率が高くなるためであると考えられる。

一方、多胡砂岩と明世累層凝灰質細粒砂岩は、他の岩種とは異なった関係を示している。これは、多胡砂岩は不均質性が強いため、測定している範囲と試料全体の含水率が一致しない可能性があること、また明世累層凝灰質細粒砂岩は粘土鉱物を多く含み、比抵抗が小さいために比誘電率が特異な値になっていることによるものと考えられる。

稲田花崗岩については、含水率の低下とともに比誘電率がわずかに小さくなるものの、その変化の大きさは測定値のばらつきと同程度であり、有意な変化とは言い難かった。実際の読み取りは、TDR 波形を 1/10 に縮小して図面上で行っているため、波形の読み取り時に 0.3mm 未満、すなわち測定値で 3mm 未満の精度を期待することは難しい。このため、稲田花崗岩のような有効間隙率の小さい岩には、本手法の適用は困難であると判断できる。しかし、読み取りの自動化がなされれば、精度の問題は解決される可能性がある。

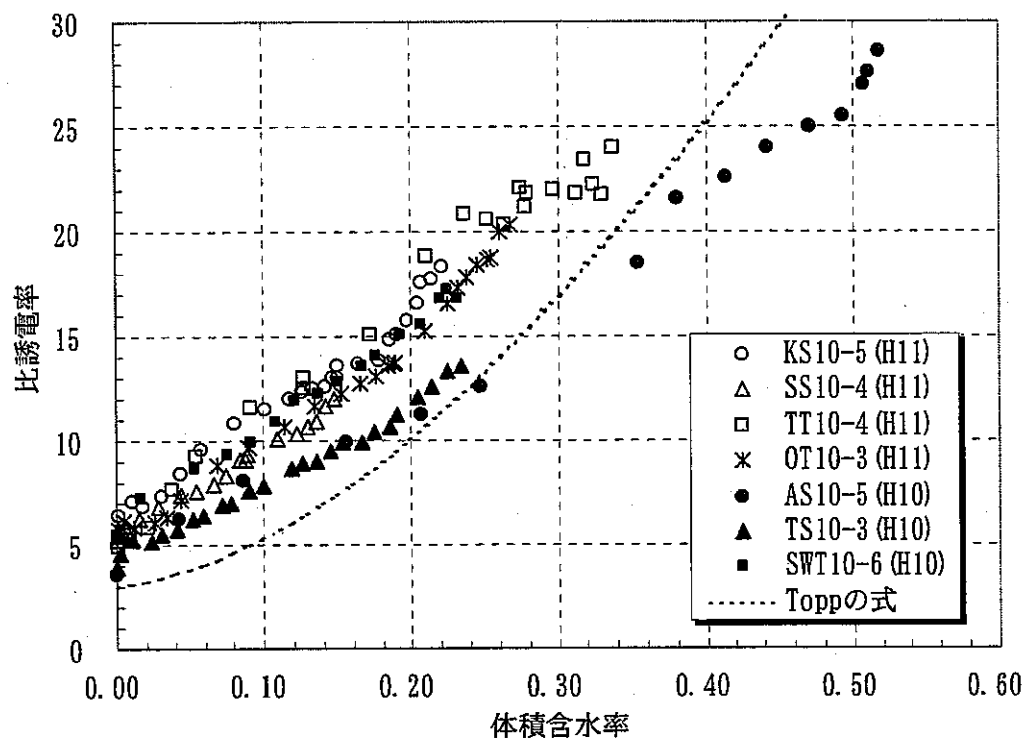


図 3.5-1 体積含水率と比誘電率との関係 (H11 年度全岩種)

4. パッカープローブの構造の検討に関する試験

4.1 パッカープローブの概要

図4.1-1にパッカープローブによる測定概念図とパッカープローブの構造図を示す。

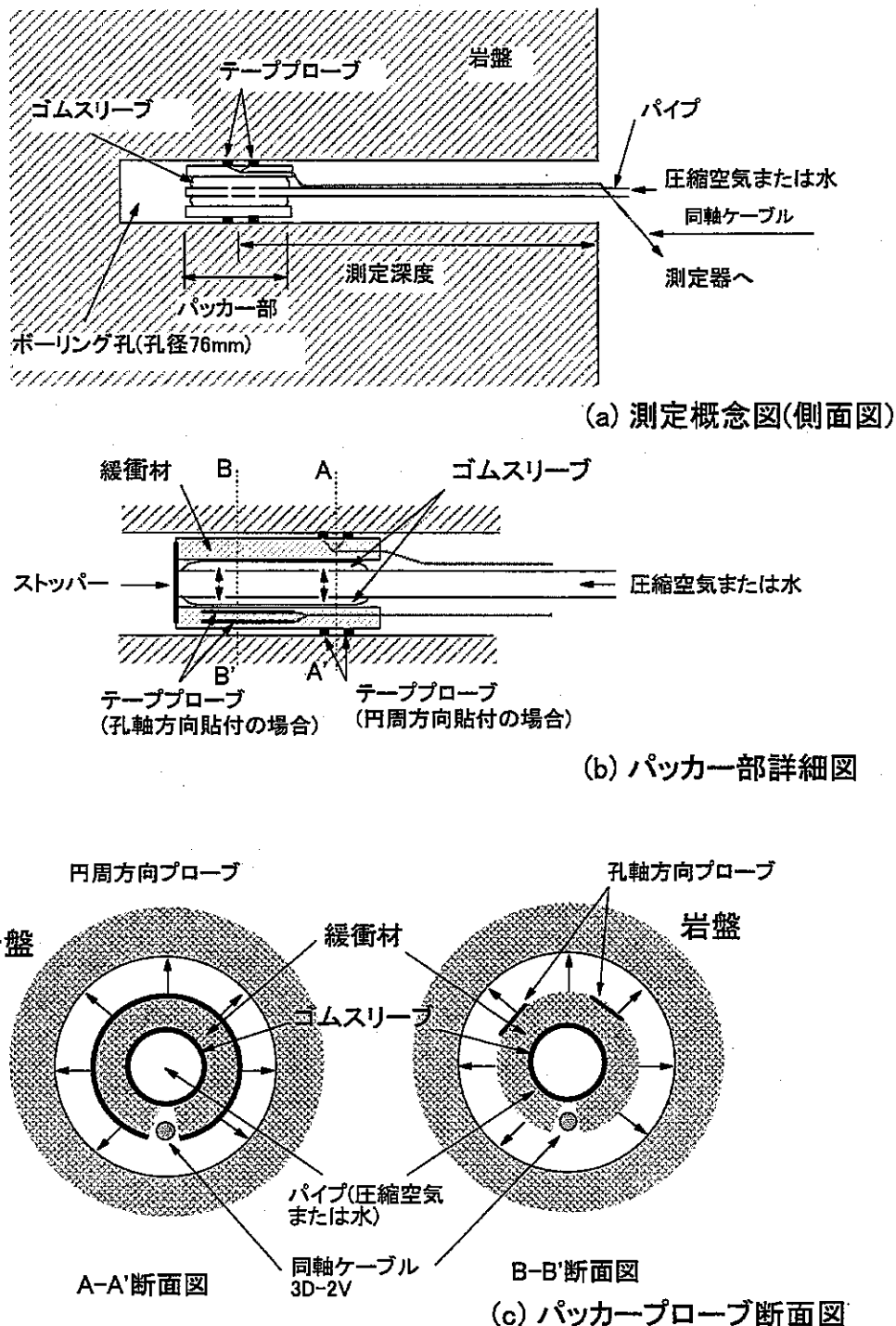


図 4.1-1 パッカープローブによる測定概念図およびプローブの構造図

パッカープローブは、岩石の表面に貼付するテーププローブを、ボーリング孔内で使用に適用した TDR プローブの一形態である。パッカープローブの構造は、図 4.1-1(b), (c)に示すように、ゴムパッカーに被せた緩衝材の表面に、円周方向または円

柱軸方向に沿って金属製のテーププローブを貼り付けたものとなっている。測定時には、測定対象となる深度までパッカーをボーリング孔内に挿入した後、パッカーを膨らませることにより孔内壁面にテーププローブを圧着させ、プローブ周辺の地盤の比誘電率測定を行う。

平成 10 年度に、パッカープローブの適用性に関する検討を室内試験および原位置測定により実施した。その結果、パッカープローブを TDR 測定に適用できる可能性が高いことが示唆された。一方、実用を目指すためには装置の構造や計測方法等を確立する必要があり、以下のような項目が検討課題として挙げられた。

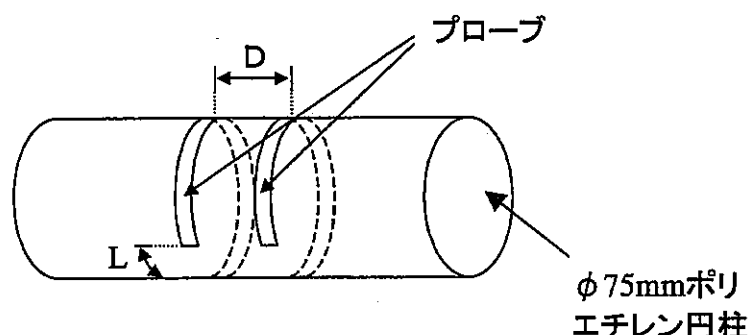
- ① プローブ間隔および長さの違いによる波形や読み取り値の変化
- ② 電磁波の影響範囲とプローブ間隔の関係
- ③ パッカーの構造と加圧媒体の影響評価

この章では、上記の検討課題について実施した実験の結果を示す。

4.2 プローブ間隔および長さの違いによる波形や読み取り値の変化

4.2.1 概要

円周方向プローブのプローブ間隔および長さとの関係について検討するために、図4.2-1に示すように、比誘電率が一定な均質材料からなる丸棒にプローブを取り付け、プローブの間隔 D およびプローブ先端部の円周方向間隙幅 L を変化させた場合の、TDR 波形や読み取り値の変化を観察した。ここでは、丸棒の材質にポリエチレン（比誘電率 2.3 程度）を用いた。



$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_a}{2}$$

が成り立つと考えられるが、 D, L を変えた場合はどうなるか。

ε_1 : 円柱材料の比誘電率 ε_a : 空気の比誘電率 (= 1)

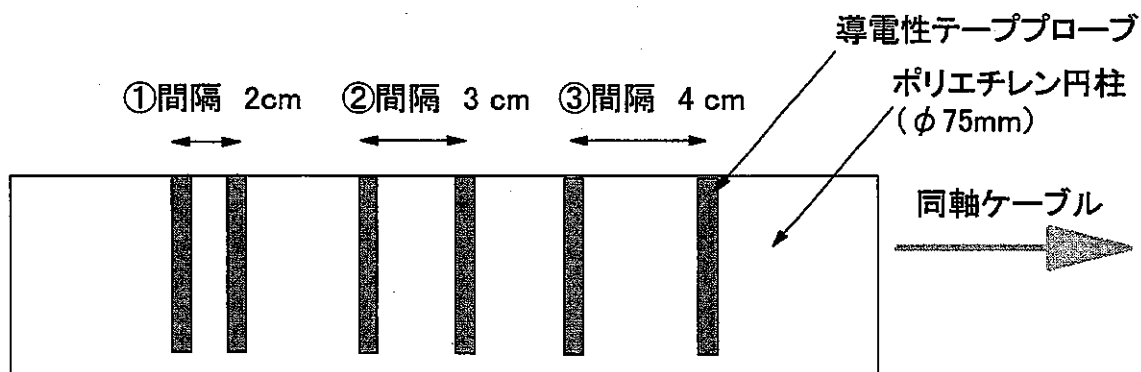
図 4.2-1 プローブ間隔および長さによる TDR 波形特性の変化を調べる試験の概念

4.2.2 実験方法

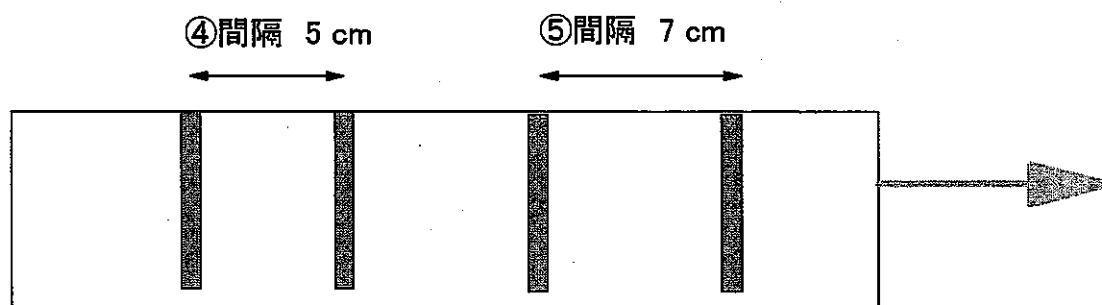
図4.2-2にプローブの設置状況を示す。直径 7.5cm、長さ約 80cm のポリエチレン丸棒に、プローブ間隔が 2, 3, 4cm のものを一つのグループとし、間隔 5, 7cm をもう一つのグループとして、それぞれ同一の丸棒に貼り付けて測定に用いた。プローブの長さは、初期で円周の 95% (22.4cm) とした。

プローブの幅 W を 6mm とし、プローブ間隔 D を上記の 5 通り、プローブ先端部の円周方向間隙幅 L を、円周の 5%, 10%, 15%, 20% の 4 通り、測定場所を空気中および水中の 2 通り、計 40 通りの組み合わせについて TDR による測定を行った。

測定は、まず空気中において、間隙幅 L を円周の 5% から 20% まで 5% 刻みで大きくしていく過程について行った。間隙幅 L は、プローブの先端部をカッターで円周の 5% ($=1.18\text{cm}$) ずつ切り取ることにより調節した。最も短いプローブ長についての測定が終了した後に、プローブを初期の長さのものに交換し、同様の手順によりプローブ長を変化させながら、水中における TDR 測定を行った。



(a) 円周方向プローブ、プローブ長 円周の80~95%



(b) 円周方向プローブ、プローブ長 円周の80~95%

図 4.2-2 円周プローブの配置

4.2.3 実験結果

図4.2-3と図4.2-4に、様々なプローブ間隔の円周方向プローブについて、先端部の円周方向間隙幅、すなわちプローブ長さを変化させたときの TDR 読み取り長さ、および比誘電率の変化を示す。また、付録 1 には個別の測定結果のグラフ（図 A4.2-1から図 A4.2-20）を、付録 2 にはそれぞれの計測で得られた TDR 波形を示した。

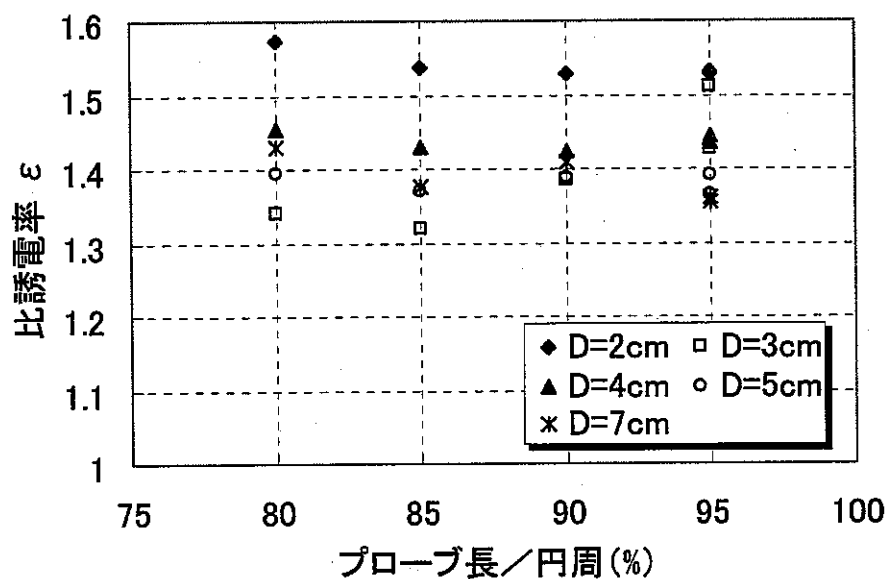


図 4.2-3 円周プローブ長と比誘電率との関係（空中での測定）

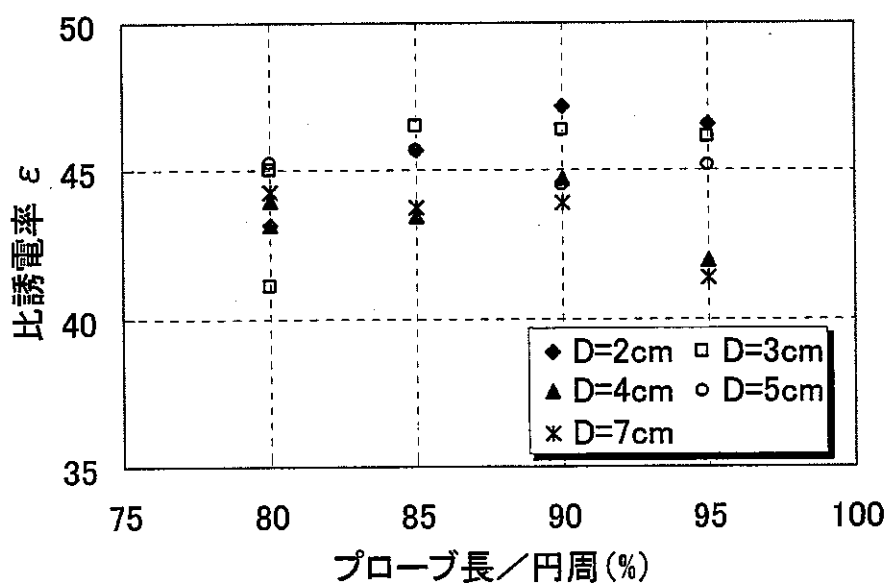


図 4.2-4 円周プローブ長と比誘電率との関係（水中での測定）

実験結果は、空中・水中それぞれでの測定について以下のようにまとめられる。

(1) 空中での測定

先端部の円周方向間隙幅が大きくなる、すなわちプローブ長が減少するに従って、TDR 読み取り長さも直線的に減少した。このため、比誘電率はプローブ長に依らずほぼ一定の値であった。プローブ間隔が 3cm の場合は、プローブ長が円周の 80～90% の時に比誘電率が比較的小さい値を示したが、これは測定値のばらつきと見ることもできるであろう。

また、ばらつきが大きいものの、プローブ間隔が大きくなるとともに比誘電率が減少するような傾向が見られた。これは、プローブ間隔が大きくなるにしたがって、TDR 波形の反射波の立ち上がりが緩やかになり、読み取り値が減少したためであると考えられる。プローブ間隔が 5cm 以上になると比誘電率は 1.4 程度となり、これは、空気とポリエチレンの平均的な比誘電率 $1.65 (= (1.0 + 2.3) / 2)$ よりも 10～20% 程度低い値であった。なお、プローブ長を変化させたことによる反射波の立ち上がりの読み取りへの影響はほとんどなかった。

(2) 水中での測定

空中での測定と同様に、TDR 読み取り長さはプローブ長に比例して変化したため、比誘電率はプローブ長に依らずほぼ一定であった。ただし、プローブ間隔が 2cm の場合は、プローブ長が円周の 90% 以下の範囲で、プローブ長の減少とともに比誘電率が減少する傾向を示した。

TDR 波形からは、空中での測定と同様に、プローブ間隔が大きくなると反射波の立ち上がりが緩やかになる傾向が見られた。しかし、読み取り値が大きくばらついたために、プローブ間隔の読み取り値への影響は明らかでなく、比誘電率の変化の傾向は明確ではなかった。なお、水中で測定された比誘電率は 4.5 程度であり、これは水とポリエチレンの平均的な比誘電率 $41.6 (= (81 + 2.3) / 2)$ よりも 10% 程度高い値であった。プローブ長を変化させたことによる、波形の立ち上がりの読み取りへの影響はほとんどなかった。

4.2.4 考察

測定結果は、空中・水中ともに比誘電率の値がばらついているが、空中については最大で $\pm 10\%$ 、水中については $\pm 6\%$ の範囲内に全ての値が収まっており、全体的にはプローブ長によらずほぼ同一の値を示したものと判断できる。測定された比誘電率は、水とポリエチレンの平均比誘電率よりも、空中では低く、水中では高かったことから、ともにプローブ円周の内側よりも外側の比誘電率の影響がより多く現れると考えられる。

空気中と水中を比較すると、前者ではプローブ長が短くなるほど値のばらつきが大きくなるのに対し、後者では長くなるほどばらつきが大きくなっている。これは、空中での測定では TDR 読み取り長さの絶対値が小さくなるため、相対的な読み取り誤差が大きくなる可能性があるためである。一方、後者では、水中における電磁波の減衰が大きいため反射点が読み取りにくくなり、読み取り誤差が大きくなっているためと考えられる。岩を対象とした測定では、空中、水中それぞれの測定の中間的な波形特性となるため、読み取り誤差の影響は小さくなるであろう。したがって、今回設定したプローブ長の範囲では、プローブ長の違いに起因する比誘電率の違いはほとんど無視できると思われる。

4.3 プローブ間隔と電磁波の影響範囲との関係

4.3.1 概要

過去のパッカープローブを用いた試験では、特に円周方向プローブについてプローブ間隔による読み取り値の変化が認められた。そこで、この現象の原因を明らかにするために、電磁波の影響範囲がプローブ間隔によってどのように変化するかを、軸方向、円周方向の2種類のプローブについて調べた。

4.3.2 実験方法

図4.3-1に、電磁波の影響範囲を調べる実験方法の概念を示す。

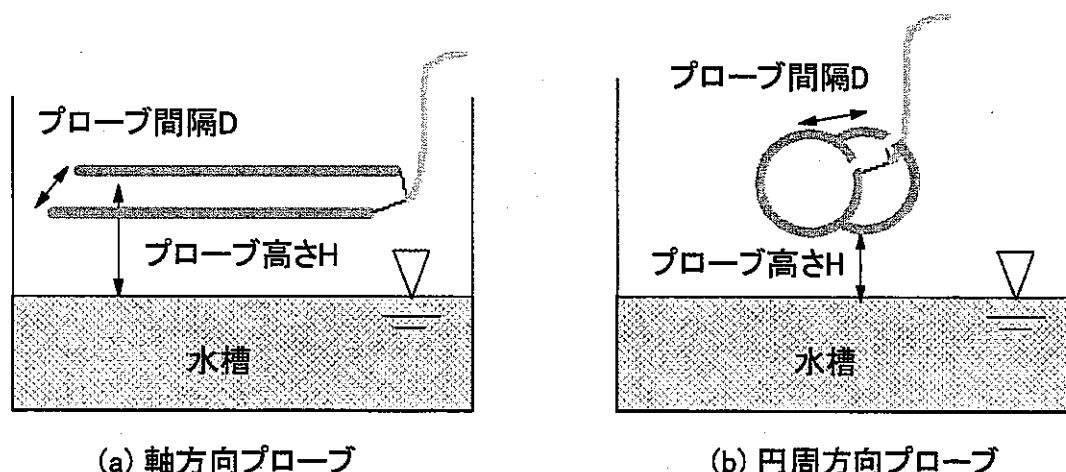


図 4.3-1 電磁波の影響範囲を調べる実験方法の概念

間隔が D のテーププローブを、水槽の水面から H の高さに設置したときの、プローブ周辺の比誘電率を測定する。水の比誘電率は 81 と大きいため、プローブの電磁波の影響範囲内に水槽の水が存在すると、そうでない場合に比べて比誘電率が高く表れると予想される。すなわち、 H を変化させたときの比誘電率の変化を調べることにより、プローブ間隔が D のときの電磁波の影響範囲を知ることができる。

軸方向プローブは、図4.3-2に示すようなアクリル製の支持器に貼り付けて用いた。プローブとなる導電性テープを貼り付ける台座は可動式であり、プローブ間隔を 2～15cm までの任意の値に設定することができる。軸方向プローブの長さは、昨年度の原位置試験で用いた棒状プローブと同じ 30cm とした。

円周方向プローブは、図4.3-3に示すように、プローブ間隔が 2, 3, 4cm のものを一つのグループとし、間隔 5, 7cm をもう一つのグループとして、直径 75mm、長さ約 80cm のポリエチレン円柱に貼り付けた。プローブ長（テープの長さ）は円周の 95% (22.4cm) とした。

テープの幅 W を 6mm とし、プローブ間隔 D を 2, 3, 4, 5, 7cm の 5 通り、水面からプローブまでの距離 H を、 $0.5D$, D , $1.5D$, $2.0D$ の 4 通りとして、全ての組み合わせ

について実験を行った。測定は、まず H を $0.5D$ から $2.0D$ まで大きくしていく過程について行い、次に $2.0D$ から $0.5D$ まで小さくしていく過程を行った。この他、いくつかのプローブ間隔については、 $H < 0.5D$ となる場合の測定も併せて行った。

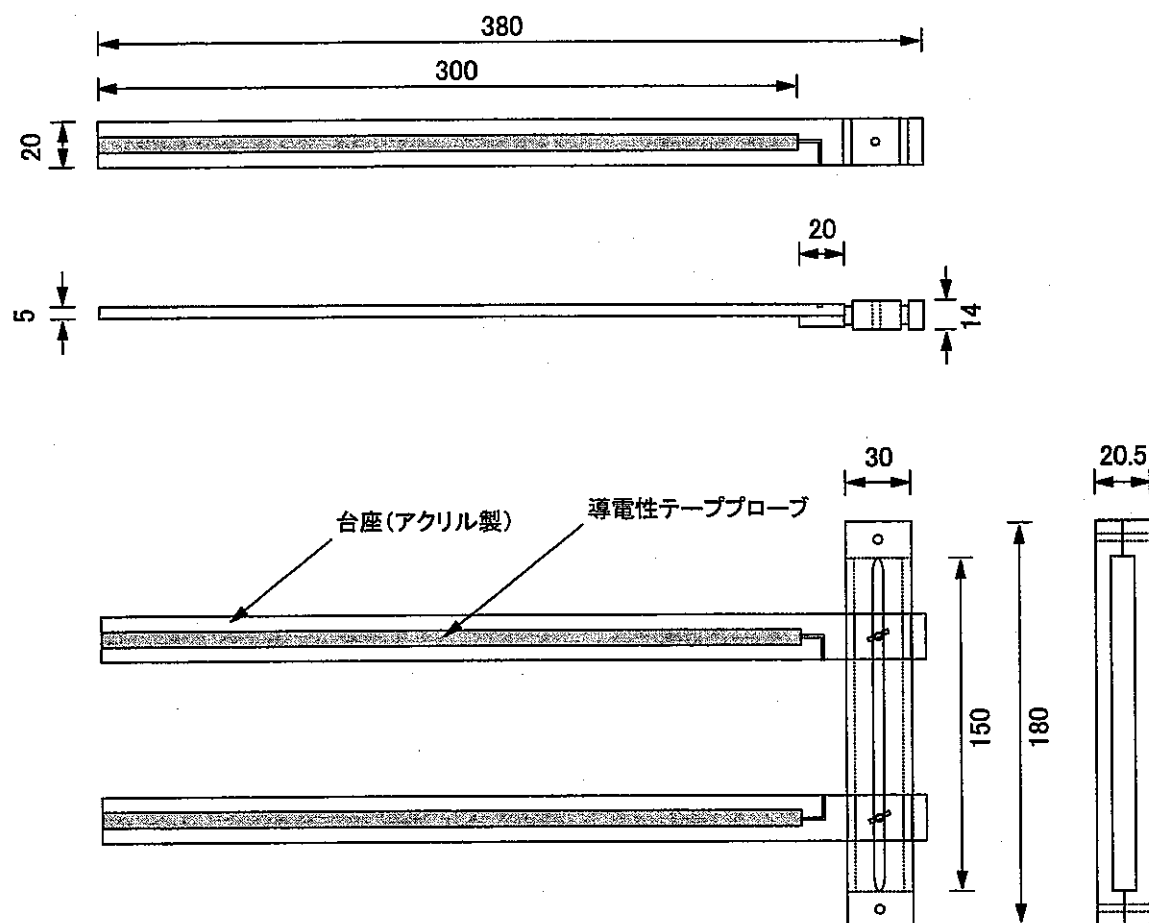
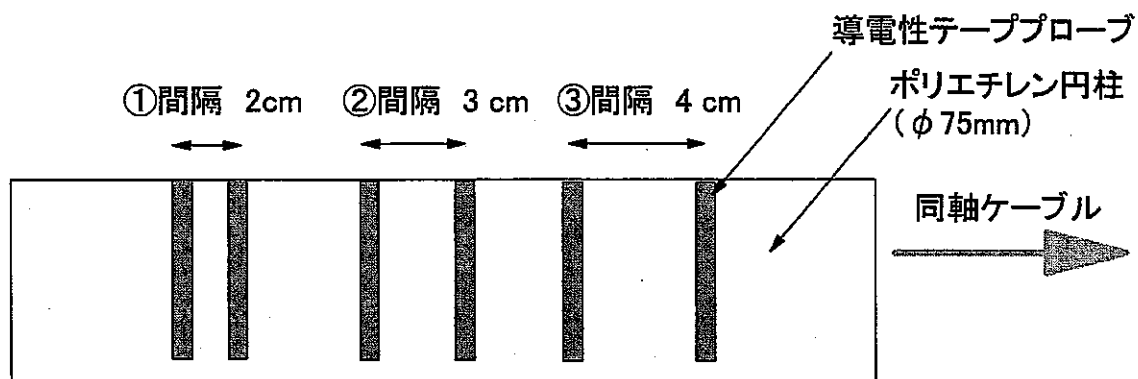
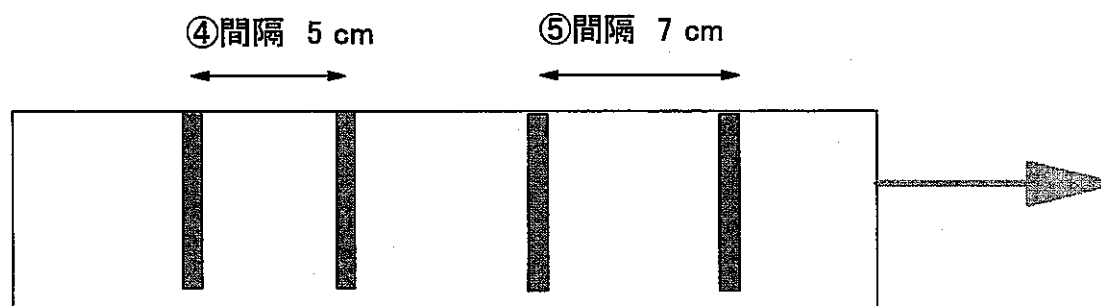


図 4.3-2 軸方向プローブの支持器



(a) 円周方向プローブ、プローブ長 円周95%



(b) 円周方向プローブ、プローブ長 円周の95%

図 4.3-3 円周方向プローブの配置

4.3.3 実験結果

図4.3-4と図4.3-5に、それぞれ軸方向プローブ、円周方向プローブを用いた実験の結果をまとめて示す。また、付録1の図A4.3-1から図A4.3-10には、プローブ間隔とプローブ形状別の測定結果のグラフを示した。

実験結果は、それぞれのプローブについて以下のようにまとめられる。

(1) 軸方向プローブ

- H が D に対して十分大きいとき、比誘電率は $D = 2\text{cm}$ で 1.39, $D = 7\text{cm}$ で 1.16 となり、プローブ間隔が大きくなるほど、比誘電率が小さくなる傾向を示した。
- いずれのプローブ間隔でも、水面からの距離 H がプローブ間隔 D 以上の範囲では、比誘電率の値はほとんど変化しなかった。
- H が $0.5 D$ のときは、 $D = 7\text{cm}$ を除く全てのプローブ間隔で、比誘電率が $H > D$ のときの値に比べて大きくなった。 H が $0.5 D$ よりも小さい範囲では、 $D = 7\text{cm}$ を含む全てのプローブ間隔で比誘電率の変化が見られた。また、この範囲での比誘電率の変化は、プローブ間隔が小さいほど、より大きくなる傾向を示した。

(2) 円周方向プローブ

- H が D に対して十分大きいとき、比誘電率は $D = 2\text{cm}$ で 1.45, $D = 7\text{cm}$ で 1.28 となり、軸方向プローブと同様に、プローブ間隔が大きくなるほど比誘電率が小さくなる傾向を示した。
- $D = 3\text{cm}$ と 4cm , $D = 5\text{cm}$ と 7cm は、同一の H/D に対してそれぞれほぼ等しい比誘電率を示した。
- いずれのプローブ間隔でも、水面からの距離 H がプローブ間隔 D 以上の範囲では、比誘電率の値はほとんど変化しなかった。また、 $H=1.0D$ と $H=0.5D$ を比較しても、比誘電率の変化はわずかであり、全てのプローブ間隔で明確に比誘電率に変化が認められるのは、H が $0.5D$ より小さい範囲であった。
- 円周方向プローブで測定された値は、H が D に対して大きいときで 1.28～1.47 であった。これらは、空気とポリエチレンの平均的な比誘電率 1.65 よりも 10～20%程度低い値であった。

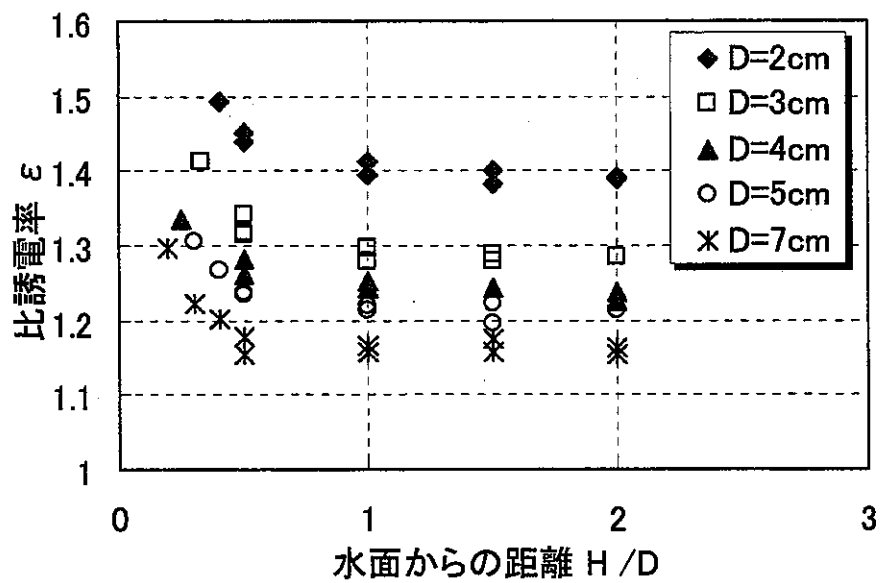


図 4.3-4 水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ）

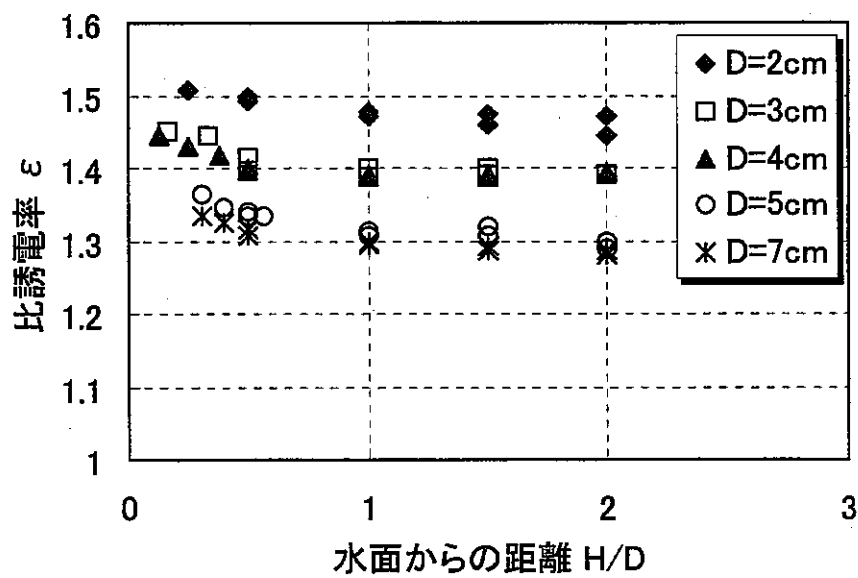


図 4.3-5 水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ）

4.3.4 考察

(1) プローブ間隔と電磁波の影響範囲

軸方向、円周方向プローブともに、水面からの距離がプローブ間隔の 1.0 未満になると、比誘電率の変化が起こっている。このことから、プローブが形成する面に垂直な方向の影響範囲は、最大でプローブ間隔の 1.0 倍程度の広がりであると考えられる。また、プローブ間隔が短くなるほど影響範囲が大きくなる傾向が見られるが、この原因として、プローブ間隔が小さいほど、間隔に対するプローブ幅の比が大きくなり、その影響が無視できなくなることが挙げられる。したがって、プローブ幅の影響を排除するためには、プローブ間隔はなるべく大きいほうがよいと思われる。

(2) プローブ間隔と比誘電率の変化

軸方向、円周方向プローブともに、プローブ間隔が大きくなると、反射波の立ち上がりがなだらかになり、読み取り値（換算プローブ長）が減少するため、結果的により小さい比誘電率が得られる。この原因として、軸方向プローブの場合は、電磁波の影響範囲内にアクリル製のプローブ支持台が存在することの影響が考えられる。すなわち、電磁波の影響範囲体積内に占めるプローブ支持台の割合が、プローブ間隔が大きくなるほど小さくなるため、というものである。しかし、単純な比例計算からは実験で得られたような比誘電率の低下は得られない。また、この傾向は軸方向プローブ固有でなく、4.2 節の円周方向プローブを用いた実験でも得られている。波形からは、反射波のエネルギーの逸散によるものと推察されるが、この点についてはさらに理論的な検討が必要であろう。結果だけから定性的に判断すると、プローブ長は 4.0cm 程度までが望ましいと言える。

円周方向プローブで測定された値は、空気とポリエチレンの平均比誘電率 1.65 よりも 10～20%程度低い値であった。全般的に低い値になっていることから、円周方向プローブで測定される比誘電率は、円柱材料とその外側との単純な平均ではないことが予想される。

円周方向プローブで測定される領域が、図4.3-6に示すように、円周の内側と外側にそれぞれプローブ間隔の a 倍 ($a < 1.0$) の幅と仮定すると、プローブ間隔 D の違いにより、影響範囲に含まれる空気とポリエチレンの体積比が変化する。このとき、測定される比誘電率 $\varepsilon(D)$ が、測定領域内に占める各媒体の比誘電率の重み付き平均で表されるとすると、その値は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\varepsilon(D) &= \{\varepsilon_a(2r+aD) + \varepsilon_1(2r-aD)\} / 4r & (aD < r) \\ \varepsilon(D) &= [\varepsilon_a aD(2r+aD) + \varepsilon_1 \{r^2 + (aD-r)^2\}] / 2(r^2 + a^2 D^2) & (aD > r)\end{aligned}$$

ここで、 r はプローブを取り付けた円柱の半径である。

$a = 1.0$ の時の計算値 $\varepsilon(D)$ と、水面との距離 H がプローブ間隔 D よりも十分に大きいときの平均値 ε を図4.3-7に示す。これによると、実測値は計算値よりやや大きめであるが、ほぼ同様の変化の傾向を示していることがわかる。したがって、電磁波の影響範囲が周面に垂直な方向にプローブ間隔 D の 1.0 倍程度という判断は、ほぼ妥当であると考えられる。なお、プローブ間隔がボーリング孔の半径より大きい場合、周の内側で二重に測定される範囲が生じる可能性がある。これを避けるために、プローブ間隔は最大でもボーリング孔の半径を越えない程度が望ましいと思われる。

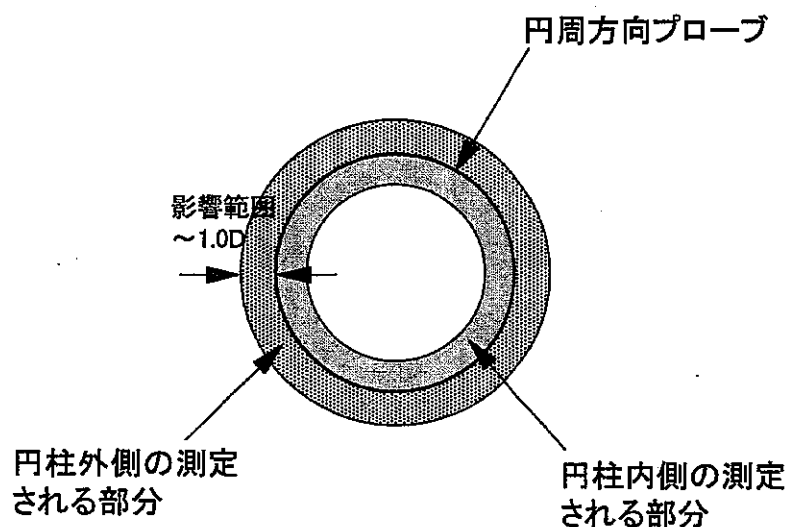


図 4.3-6 円周プローブで測定される領域

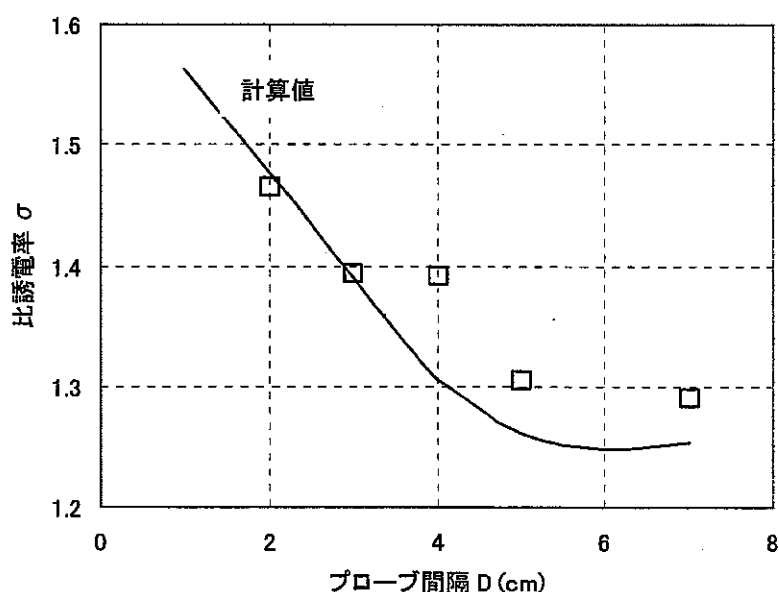


図 4.3-7 円周プローブでの比誘電率推定値と実測値との比較

4.4 パッカーの構造と加圧媒体の影響評価

4.4.1 目的

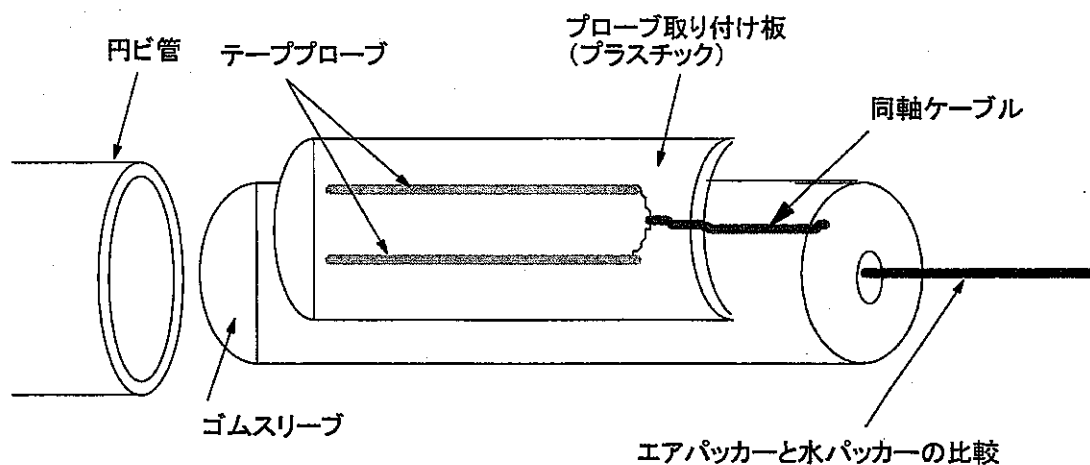
平成 10 年度に開発したパッカープローブは、図 4.1-1(c)にあるように、ゴムスリーブの上に厚み 20mm の発泡スチロールを緩衝材として巻き、その表面にプローブを貼り付けた構造となっていた。この緩衝材は、1) パッカーを構成するゴムや中央の管路の素材（ここではアクリル）が電磁波の影響範囲に入らないようにする、2) パッカーに圧力をかけたときに、緩衝材が孔壁面の細かい凹凸に追従して変形し、プローブと岩盤の密着性を高める、ことを目的として導入されたものであった。しかし、平成 10 年度の実験から、パッカーに圧力をかけて測定した際に発泡スチロールはエア圧によって圧縮・破壊されていたことがわかり、1) のような緩衝材の役割が保持されていたかどうか疑問が残った。そこで、今年度は緩衝材の必要性があるのかどうかを検討するために、緩衝材を省略してプローブを薄いプラスチック板に取り付け、エアパッカーと水パッカーの双方を用いて空中での比較試験を行った。

4.4.2 実験方法

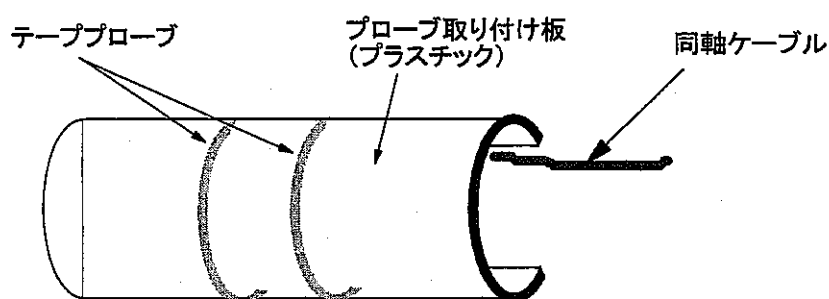
図4.4-1に実験の概念図を示す。厚さ 0.3mm の透明プラスチック板に、テーププローブを取り付けたものをパッカーに巻き付けて塩化ビニル管（塩ビ管）に挿入し、パッカーに空圧もしくは水圧を加えて TDR 測定を行った。

塩ビ管の内径 ϕ は 7.76cm、肉厚は 0.54cm であり、プローブの幅は 0.6cm、長さは塩ビ管の内周の 90%、プローブの間隔は $\phi/2 = 3.88\text{cm}$ であった。また、パッカー圧は空気の場合 160kPa とし、水の場合も同程度を目安とした。

測定は、まず空気パッカーを用いて軸方向プローブ、円周方向プローブそれぞれについて行い、続いて水パッカーを用いて同様に行った。



(a) 軸方向プローブの場合の取り付け方法



(b) 円周方向プローブの場合の取り付け方法

図 4.4-1 パッカーおよび加圧媒体の影響を調べる実験の概念

4.4.3 実験結果

表4.4-1に、それぞれのパッカーおよびプローブによる測定結果を示す。水パッカーを用いた軸方向プローブによる測定では、パッカー加圧中にプローブと同軸ケーブルの結合部分が破断したためにデータが得られなかった。

表4.4-1 2種類のパッカーおよびプローブに対する比誘電率

プローブ方向	軸方向		円周方向	
	空気	水	空気	水
比誘電率	3.0	—	3.0	12.5
備考	160kPa で加圧	パッカー加圧中に プローブと同軸ケーブルの結合部分が破断した	160kPa で加圧	加圧値は不明

4.4.4 考察

円周方向プローブによる測定結果で、水パッカーを用いたときの比誘電率が空気パッカーを用いたときよりも大きくなっていることから、プローブの電磁波の影響範囲にパッカーの一部が含まれていたことがわかる。

軸方向、円周方向プローブとも、空気パッカーを用いたときの比誘電率は 3.0 である。両者は、波形の立ち上がり部分にやや相違が見られるものの、比誘電率自体は同一の値を示しており、電磁波の影響範囲は同程度であったと考えられる。ところで、ポリ塩化ビニル(PVC)とゴムの比誘電率はそれぞれ 3.5, 3.0 であるので、得られた比誘電率は、プローブの近くに存在する PVC とゴムの比誘電率に近いことになる。このことから、今回の実験条件において、プローブが形成する面に垂直な方向の影響範囲は、プローブ間隔 D よりもはるかに小さいのではないかと予想される。

また、水パッカーを用いた円周方向プローブでの測定結果は 12.5 であるが、もしプローブが形成する面に垂直な方向の影響範囲が、プローブ間隔 D 程度であり、塩化ビニルやパッカーゴムの肉厚よりもはるかに大きいのであれば、水パッカーを用いたことにより比誘電率はもっと大きい値を示すはずである。このことから、プローブが形成する面に垂直な方向の影響範囲は小さいことが予想される。

ここで、4.3.4 項での考察に則って、円周方向プローブで測定される領域が、図4.4-2に示すように、円周の外側と内側にそれぞれプローブ間隔の a 倍, b 倍 ($b < a < 1.0$) の幅と仮定すると、 a, b の値によって影響範囲に含まれる PVC、ゴム、空気、水の体積比が変化する。なお、プラスチック板の厚みは 0.3mm と小さいため、ここではその影響を無視できると考えた。

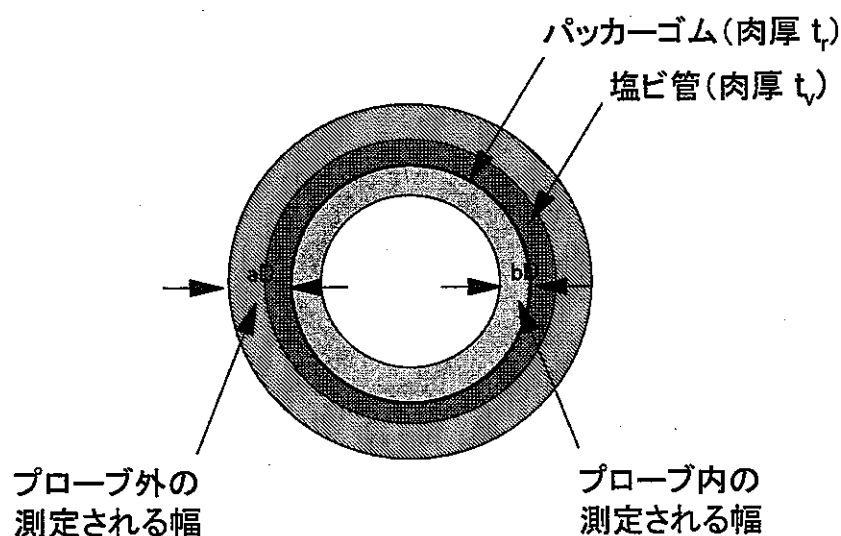


図 4.4-2 パッカー使用時に円周プローブで測定される領域

このとき、測定される比誘電率 $\epsilon(a, b)$ が、測定領域内に占める各媒体の比誘電率の重み付き平均で表されるとすると、その値は次式のようなになる。

$$\varepsilon(a,b) = \frac{\{\varepsilon_a(ar+aD+t_v)(aD-t_v) + \varepsilon_v t_v(ar+t_v) + \varepsilon_r t_r(2r-t_r) + \varepsilon_i(2r-bD-t_r)(bD-t_r)\}}{\{2r+(a+b)D\}(a+b)D}$$

ここに、 $\varepsilon_a, \varepsilon_v, \varepsilon_r, \varepsilon_i$ はそれぞれ空気、PVC、ゴム、パッカー内部の媒体（空気または水）の比誘電率、 r は塩ビ管の内径、 t_v, t_r はそれぞれ塩化ビニル、ゴムの肉厚である。なお、制約として $aD > t_v, bD > t_r$ を設けた。

ゴムの肉厚を0.1cmと仮定し、実測値に最も近くなるような a, b を求めたところ、およそ $a = 0.14, b = 0.052$ が得られた。これによると、電磁波の影響範囲は、外側に対しては塩ビ管の肉厚にほぼ等しく、内側に対してはゴムの肉厚の2倍程度となる。しかし、この値は4.3.4項で得られたものとは大きく異なっている。

以上の考察から、緩衝材を用いない場合、電磁波の影響範囲はパッカーゴムによって著しく狭められた可能性が考えられるが、さらなる理論的、実験的検討が必要であると思われる。

ところで、軸方向プローブと水パッカーを組み合わせた測定では、プローブと同軸ケーブルの結合部分が破断する現象が起こった。一方、同じ水パッカーを用いた場合でも、円周方向プローブの場合は破断が生じていない。これは、今回使用した水パッカーのゴムが張力の小さいものであり、かつ加圧が塩ビ管を立てた状態で行われたため、比重の大きい水はパッカーの下部に溜まりやすく、パッカーの上部と下部で圧力のかかり方が不均等になり、軸方向プローブに限界以上の張力がかかったためであると考えられる。これに対し、円周方向プローブの場合は、1本のプローブが同じ高さにあり、かかる圧力が比較的均等であったため、破断が生じなかったものと見られる。空気を用いたパッカーでは、水中にパッカーを設置した場合に、浮力の影響を受けることが想定される。不飽和領域を測定対象とする場合、ボーリング孔内は空気で満たされていることから、加圧媒体としては比重差の影響のない空気がより望ましいと言える。また、パッカーゴムの不均一性により、膨らみが不均等になる可能性も考えられることから、その影響を緩和するために緩衝材を入れることが望ましいと思われる。

5. TDR 波形データ解析手法の検討

5.1 はじめに

TDR による比誘電率の測定は、測定対象となる媒体中の電磁波の伝播速度を測定することにより行う。具体的には、媒体に挿入したプローブに、同軸ケーブルを介してケーブルテスターからパルス信号を送り、この信号がプローブ端部で反射して帰ってくるまでの時間を測定する。過去に実施した不飽和領域の計測手法の研究では、この時間の測定を、ケーブルテスターで得られた波形からマニュアルで読み取ることにより実施してきたが、この方法は読み取りの一貫性や個人差の影響が避けられない上に、読み取りの労力がかかるという問題もある。そこで、ここではより客観的にデータを読み取る手法について、既存技術の調査を実施し、本研究に最適と思われる手法を提案することとした。

岩石試料中を電磁波パルスが伝播する場合、電磁エネルギーの減衰が小さければプローブの始点および終点の2箇所において明瞭な反射が見られる。粘土鉱物を多く含む比抵抗の小さい岩石試料などのように、試料によってはプローブ終点の反射が明瞭でなく、読み取りが困難な場合もある。いずれの場合においても、現在用いられているデータ解析手法は波形に接線を引く方法が主流でマニュアル法と微分法の2つがある。それ以外にも以下に示すような方法がある。本章ではこれらの概要について紹介し、本研究に最適と思われる波形解析手法を提案する。

5.2 典型的な TDR 波形およびキャリブレーション

図5.2-1に気中、試料中における典型的な TDR 波形を示す。両図において、明瞭な反射点が2箇所に見られる。最初の反射点は同軸ケーブルの分岐開始位置（プローブ電極の始点ではない）、もう一つがプローブ終点での反射である。つまり、2反射点間の距離は、ケーブル分岐位置からプローブ終点までの波形上の長さを示す。空気の比誘電率は1と既知であり、プローブの電極の実長も既知である。したがって、気中の波形において終点からプローブの実長分を差し引くことで得られる距離 AB は、ケーブルの分岐開始点からプローブ電極始点まで、つまりプローブのヘッド部の波形上の長さを示す。この長さがいわゆるプローブ定数であり、キャリブレーションはプローブ定数を求める作業とすることができる。

プローブが気中、試料中のいずれに設置されていても、プローブのヘッド部は通常の計測では空気中にあるため同条件である。したがって、試料中の波形において2つの反射点から求まる波形上の長さ AC から AB に相当する距離を差し引くと、試料中の「見かけ長さ」BC が算定できる。プローブの実長は既知であるため、この見かけ長さ BC より試料の比誘電率を求めることができる。

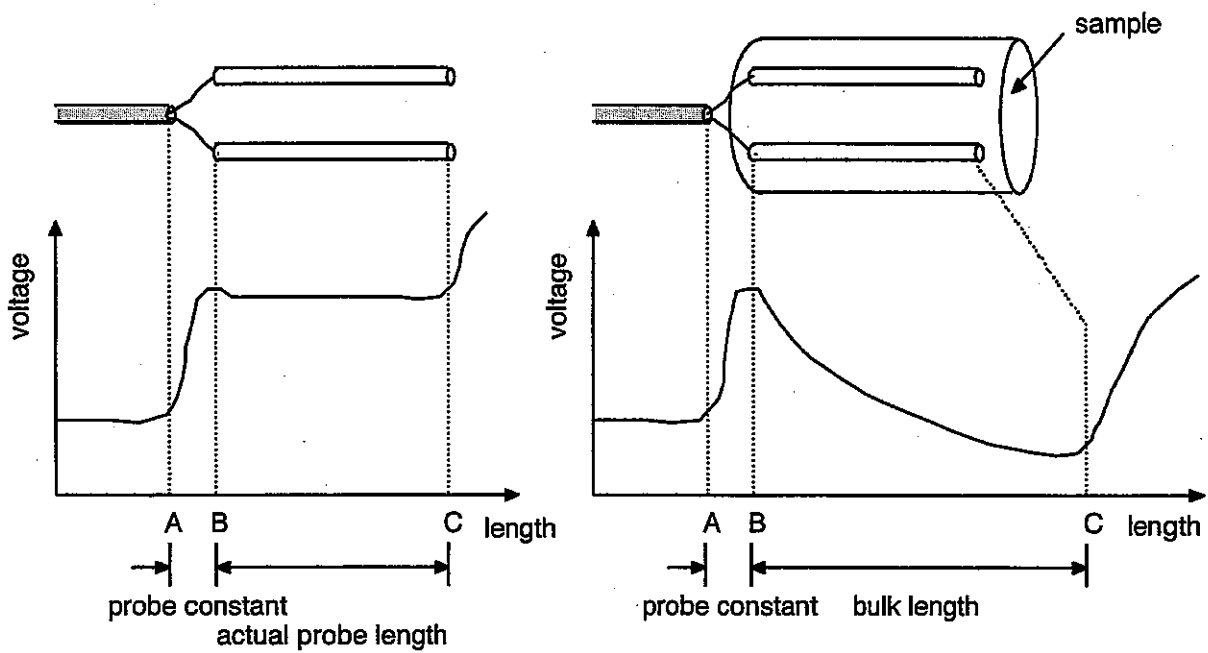


図 5.2-1 典型的な TDR 波形の例

5.3 波形解析手法概要

(1) マニュアル法

文字通り、人間の手作業で反射点を読み取る方法である。通常は、図5.3-1のようにピーク位置をプローブ電極の始点と仮定し、終点には図のように2本の接線を引いてこれらの交点を反射点とする方法である。最も簡単である一方、一貫性や読み取りの個人差の問題が考えられる。Timlin and Pachpsky (1996)によれば、同手法には精度的な問題はないとしている。しかし、計測の自動化などを考えた場合、同手法はあまり実用的とは言えない。

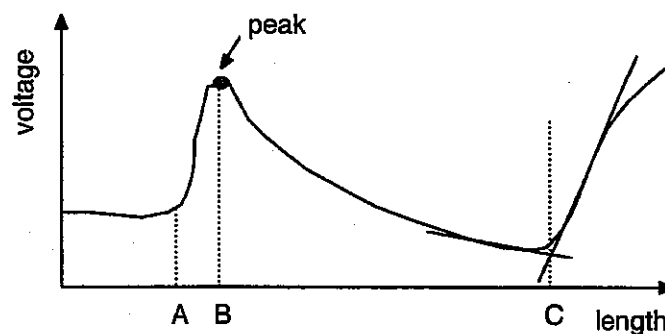


図 5.3-1 マニュアル法の概要

(2) 微分法

同手法はその原理の簡易さなどから、おそらく現在最も頻繁に用いられている方法であると思われる。アメリカ (Baker and Allmaras, 1990) やスイス (Schneebeli et al., 1995) で既に用いられているが、特に Baker and Allmaras による方法が最もよく用いられている。

図5.3-2の上を示すような典型的な TDR 波形においては、プローブの始点および終点の2箇所において明瞭な反射が見られる。この波形データの1階微分をプロットすると、2箇所ピークが見られる。

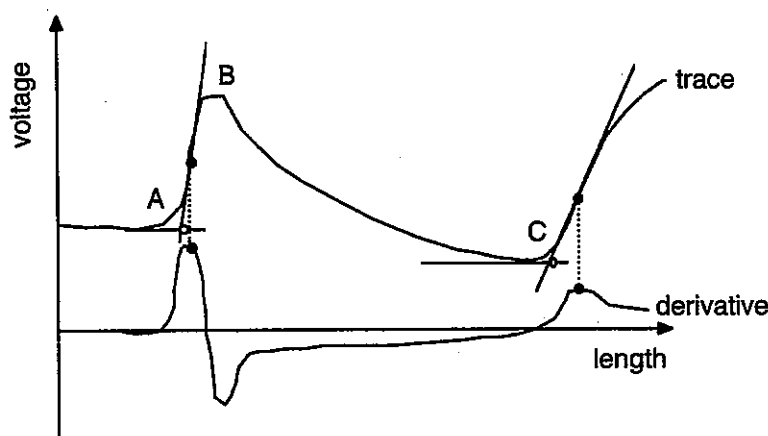


図5.3-2 TDR 波形とその1階微分

これらのピークは、TDR 波形の勾配が最も急な部分に当たる。微分法は、ここに相当する位置の波形データに接線を引き、これと水平に引いた基線の交点を反射位置とするものである。同手法の詳細については次節に示す。

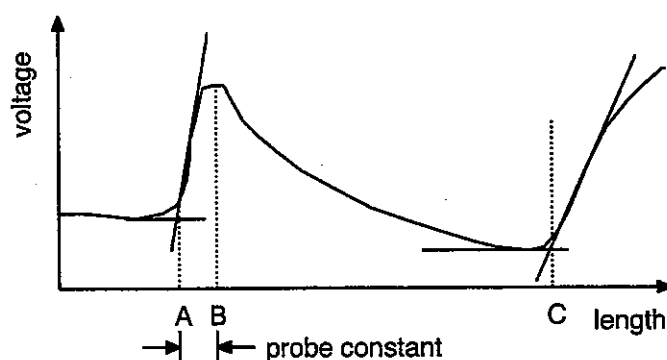


図 5.3-3 微分法の概要

(3) 波形シミュレーション法

典型的な TDR プローブは、同軸ケーブルの分岐点、電極の始点および終点の 3 箇所インピーダンスが大きく変化する。このインピーダンスの変化によって、波形上に反射がみられる。波形シミュレーション法は、プローブを電氣的にモデル化し、そのモデルに対する波形を理論的に計算するものである。波形の計測値に影響を与えるのは試料部分（電極の始点～終点）であるので、この部分のインピーダンスを変化させながら、波形の計算値が実測値と一致するような最適なインピーダンスを決定する。そして、インピーダンスから試料の比誘電率を求める。

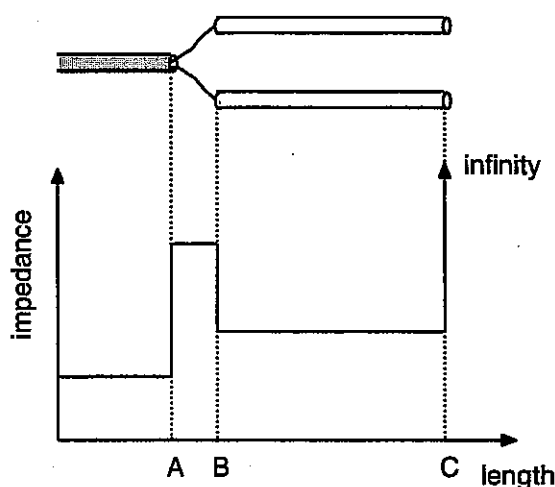


図 5.3-4 TDR プローブのインピーダンスモデル概念

同手法は、以下の 3 つの仮定に基づいている。

- 試料は絶縁体とする。プローブ伝播中の電磁エネルギーの減衰はない。
- 同軸ケーブル、同軸ケーブル分岐点～電極始点、電極始点～終点の 3 区間におけるインピーダンスはそれぞれ区間内で均質とする。
- 多重反射については、Yanuka et al. (1988)の理論が成立するものとする。

Timlin and Pachpsky (1996)によれば、同手法の精度はマニュアル法や微分法と比べてそれほど劣らないという。しかし、例えば東濃鉾山における明世累層細粒砂岩などは、比較的導電性の高い試料であることが分かっているため、上記の絶縁体とする仮定は成立しない。また、パラメータを求めるための繰り返し計算にかかる時間などを考え併せると、本研究に最適な手法であるとは言えない。

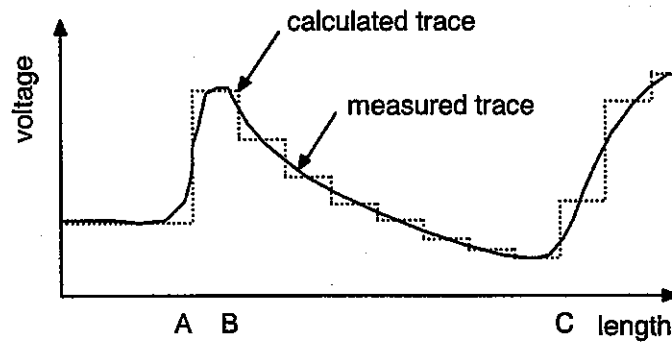


図 5.3-5 シミュレーション法による波形の計測値と計算値

(4) ダイオードスイッチングコントロール法

TDR プローブにダイオードを用いる方法は、Ledieu (1986)によって初めて示された。プローブの所定の箇所に設置したダイオードをショートさせることにより、波形上でダイオードの位置を確認するというものである。図5.3-6はプローブ終点にダイオードを設置した例である。まずダイオードがオフの状態（ダイオードがない場合と同じ状態）の波形 A を計測する。次に、ダイオードをオンにした状態で波形 B を計測する。波形 B はダイオードの位置より手前では波形 A と全く同じである。最後に波形 A と B の差を計算すると、ダイオードの位置で明瞭な反射が見られる。

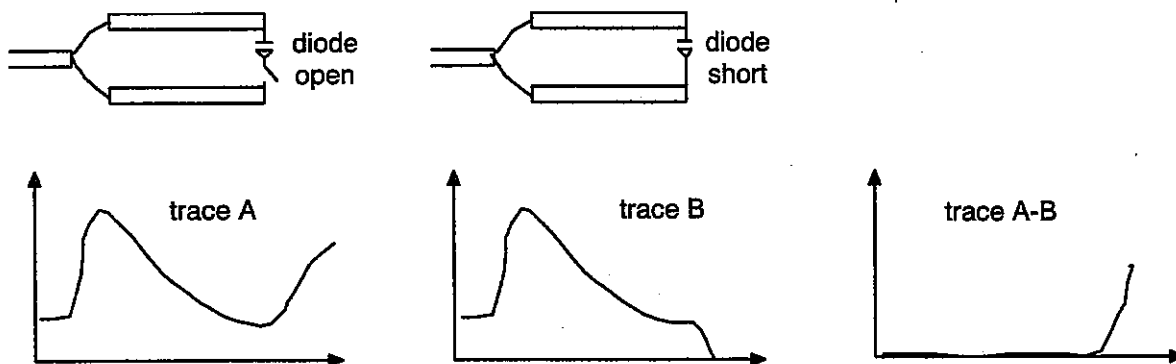


図 5.3-6 ダイオードスイッチングコントロール法の概要

さらに Hook et al. (1992)は、プローブの数箇所にダイオードを設置し、所定の位置のダイオードを順次ショートさせ波形上でその位置を確認し、ダイオード間におけるみかけ長さを求めた。この原理を用いたプローブのうち、Segmented probe と呼ばれるものが ViewPoint 社から商品化されている。これは、電極間の数箇所にダイオードを設置し、電極間をすべて樹脂で埋めた構造であり、プローブの断面形状は長方形である。したがって、本研究のように岩石を測定対象とするような場合には、設置が困難であると考えられる。また、最も測定感度が敏感な電極間を樹脂で埋めてしまうこ

と、電極間距離が小さいため電極間を除くプローブの極周辺の測定をしていることが考えられ、設置状況が測定精度に大きな影響を与えることが想定される。以上を考えると、同手法もまた岩石を対象とした本研究に適しているとは言えない。

(5) 解析手法まとめ

Timlin and Pachepsky (1996) は(1)～(3)の手法を比較した結果、全ての手法で同程度の精度が得られたが、強いていえば微分法が最も精度が良かったと報告している。本研究では岩石を対象とすること、将来的には比較的多数の計測に伴う計測の自動化を念頭に置く必要があること、手法そのものの精度と間便性などを考慮すると、微分法が最適と考えられる。

5.4 微分法

ここでは、基本的に Baker and Allmaras (1990) の方法に基づき、解析手順をステップごとに示す。図5.4-1および図5.4-2に、実際の TDR 波形データの一部を Savitzky-Golay 法 (Gorry, 1990)によりスムージングした一例、およびスムージングの主な手順を示す。

(1) スムージング

取得したデータには若干のノイズが含まれ、直接微分すると大きなばらつきが見られることがある。したがって、微分に先立って波形データを平滑化 (スムージング) する必要がある。Savitzky-Golay 法は、一定の時間間隔 Δt で計測されたデータのスムージングおよび数値微分を行うための一つの方法である。

Savitzky-Golay 法によるスムージングの手順は次の通りである (区間データ数が5の場合)。

- 最初の連続した5点のデータを回帰区間とする。X座標は-2, -1, 0, 1, 2とする。
- 上記の回帰区間に対し、2次関数による曲線回帰を実施する。
- 上記回帰区間の中心位置 (X=0) の点における値を回帰曲線から求め、これをこの点の値とする。その値は、次式で求められる。

$$Y_{smoothed}(0) = \frac{1}{35}[-3Y(-2) + 12Y(-1) + 17Y(0) + 12Y(1) - 3Y(2)]$$

- 1つ右に移動し、同様の計算を実施する。X座標は常に-2, -1, 0, 1, 2とする。
- 両端の境界においては、特別な取り扱いが必要となる。例えば、左端の境界では5点区間の場合、中心点を含む左側3点分の値は最初の5点から求まる関数により求める。TDR 波形の場合、両端のデータは重要ではないのでここでは論じない。詳細については上記参考文献を参照。

Gorry (1990)は3次関数の例も示しているが、TDR 波形の場合は特に急激な変化がないので2次関数で問題はない。区間点数は、全データポイント数によって適当な値を設定（参考値：全データ数の1～2%程度）することが可能である。

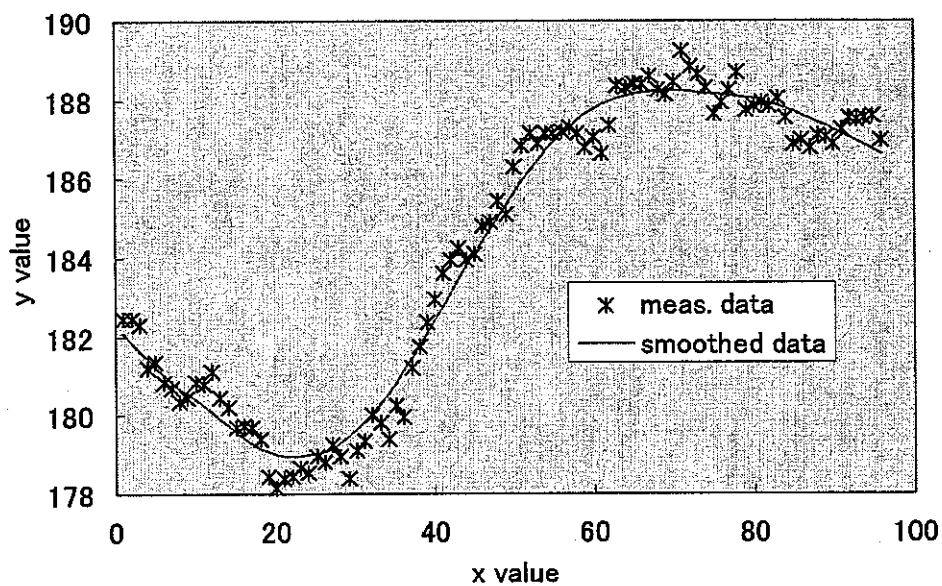
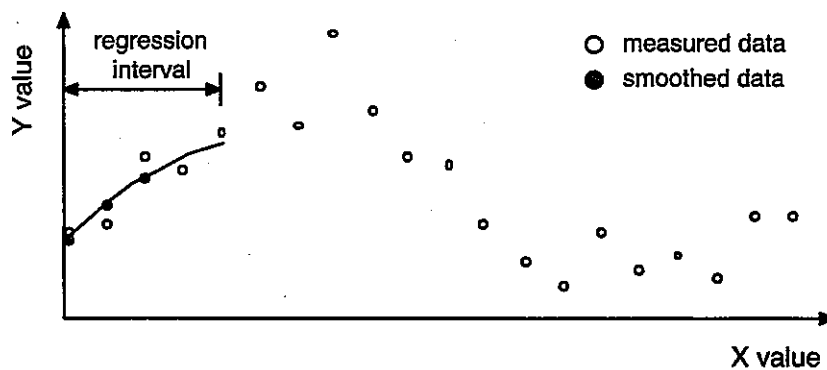
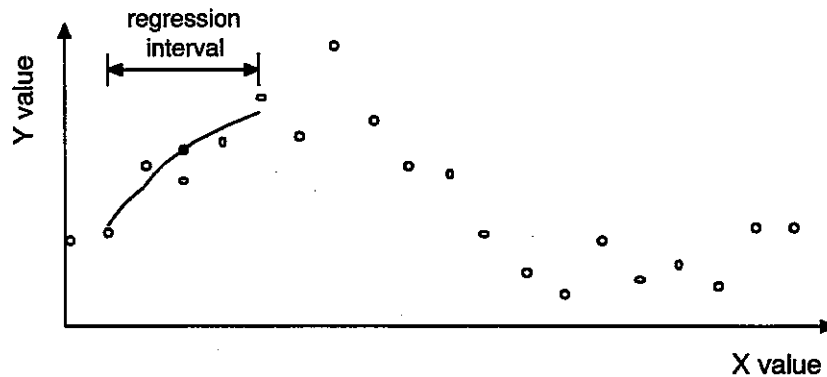


図 5.4-1 Savitzky-Golay 法によるスムージングの一例（区間データ数=50）

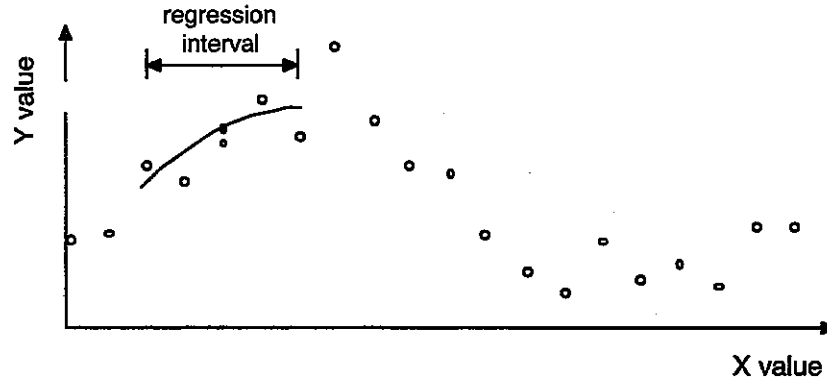
STEP 1 (includes boundary)



STEP 2



STEP 3



FINAL STEP (connect all smoothed data)

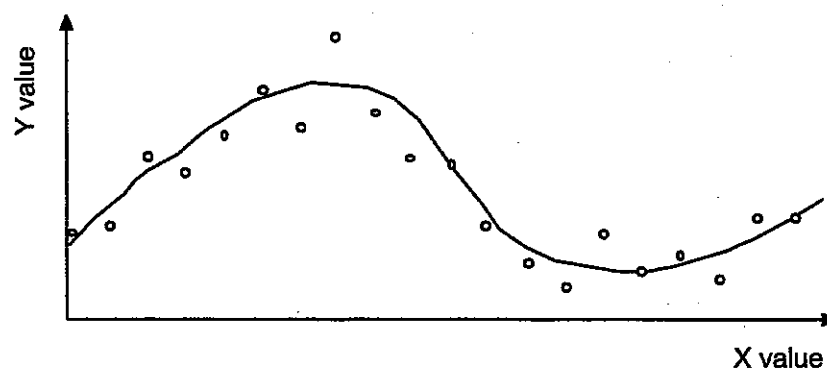


図 5.4-2 Savitzky-Golay 法によるスムージング手順の概要 (区間データ数=5)

(2) 数値微分

Savitzky-Golay 法では、それぞれの回帰区間で2次関数の回帰曲線が得られるため、スムージングと同時にその微分を容易に求めることができる。区間データ数が5のとき

き、中心位置における 1 階微分は、次式によって求めることができる。

$$Y_{\text{derivative}}(0) = \frac{1}{10}[-2Y(-2) + 1Y(-1) + 0Y(0) + 1Y(1) - 2Y(2)]$$

図5.4-3に、スムージングした TDR 波形とその 1 階微分の一例を示す。

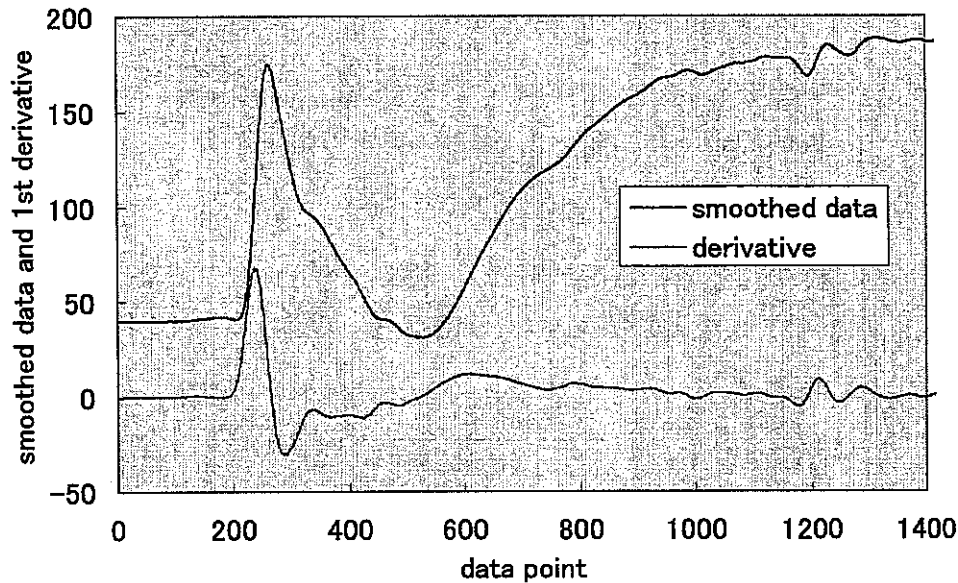


図 5.4-3 TDR 波形とその 1 階微分の一例（区間データ数=50）

(3) 反射点の算定

TDR 波形では、同軸ケーブル分岐点および電極終点の 2 箇所にて明瞭な反射が見られる。図5.4-3において、ケーブル分岐点の反射はデータポイント 200 番近辺、終点の反射は 600 番の少し手前で見られる。これらの反射点位置を客観的に求めるために次の手順を用いる。

- ケーブル分岐点における反射ではその勾配は常に最大値を示す。したがって、1 階微分の最大値（データポイント 220 番近辺）に対応する位置で波形に接線を引く。
- 反射直前の適当数のデータを取り、その平均値の位置に X 軸と平行な線を引く。
- これら 2 本の線の交点位置をケーブル分岐点における反射点（A 点）とする。
- この A 点にあらかじめキャリブレーションで求めたプローブ定数を加える。これにより、波形上の電極始点（B 点）が求まる。
- 電極終点における反射は通常 2 番目に大きな勾配（データポイント 600 番近辺）として現れる。1 階微分で 2 番目のピークを求め、この位置で波形に接線を引く。
- 反射直前のデータで局所的な最小値を探し、この位置に X 軸と平行な基線を引く。
- これら 2 本の線の交点位置を、電極終点における反射位置（C 点）とする。

(4) 見かけ長さの算定

波形上で電極始点 (B 点) および終点 (C 点) の位置が分かれば、BC 間距離がみかけ長さである。このみかけ長さは、電磁波パルスがこの試料 (電極の真の長さは既知) を伝播するのに要した時間に、空气中ならどれだけの距離を伝播するかという長さである。試料の比誘電率は常に空気のものよりも大きく、試料中の伝播速度は空气中より遅くなるため、見かけ長さは常にプローブの実際の長さよりも大きくなる。

(5) 比誘電率の算定

電磁波の伝播速度と比誘電率の間には次の関係がある。

$$v_{air} = \frac{c}{K_{air}}, \quad v_{samp} = \frac{c}{K_{samp}}$$

ここで、

c : 光速 ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)

v_{air} : 空气中での電磁波速度

v_{samp} : 試料中での電磁波速度

K_{air} : 空気の比誘電率 ($= 1$)

K_{samp} : 試料の比誘電率

L_{probe} : プローブの実際の長さ (実際の BC 間距離)

L_{samp} : 見かけ長さ (波形上の BC 間距離)

ここで、見かけ長さはプローブの実際の長さとな次のような関係がある。

$$L_{samp} = \frac{L_{probe}}{v_{samp}} v_{air}$$

したがって、試料の比誘電率は次式で求められる。

$$K_{samp} = \left(\frac{L_{probe}}{L_{samp}} \right)^2$$

6. 低比抵抗岩盤への TDR の適用性検討

6.1 目的

東濃鉱山における明世累層細粒砂岩はきわめて低比抵抗な岩盤である。そのため、同岩盤を対象とした TDR 測定では、電磁波の減衰が大きくて波形の立ち上がり点が不明瞭になり、比誘電率の算定が困難になる現象が認められた。そこで、このような場合にも対応可能とするために、プローブの改良方法について検討を行った。ここでは、下記の 2 つの方法の有効性について比較試験を行って検討した。

- ① プローブ先端にゴムなどの絶縁材料を詰める方法
- ② プローブをエポキシ樹脂などの絶縁材料でコーティングする方法

6.2 試験方法

図 6.2-1 に、実験方法の概念図を示す。

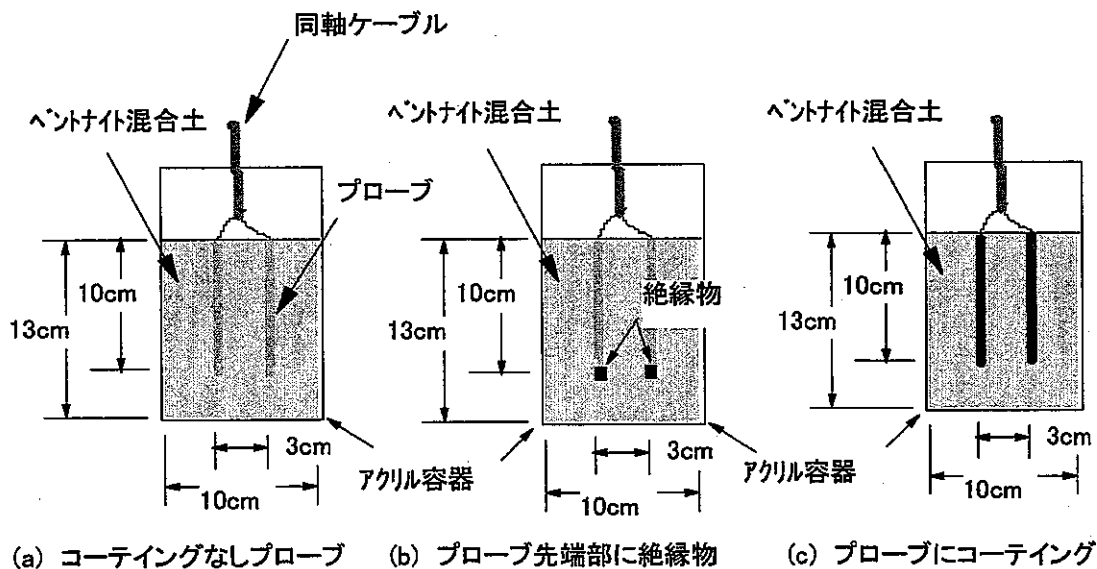
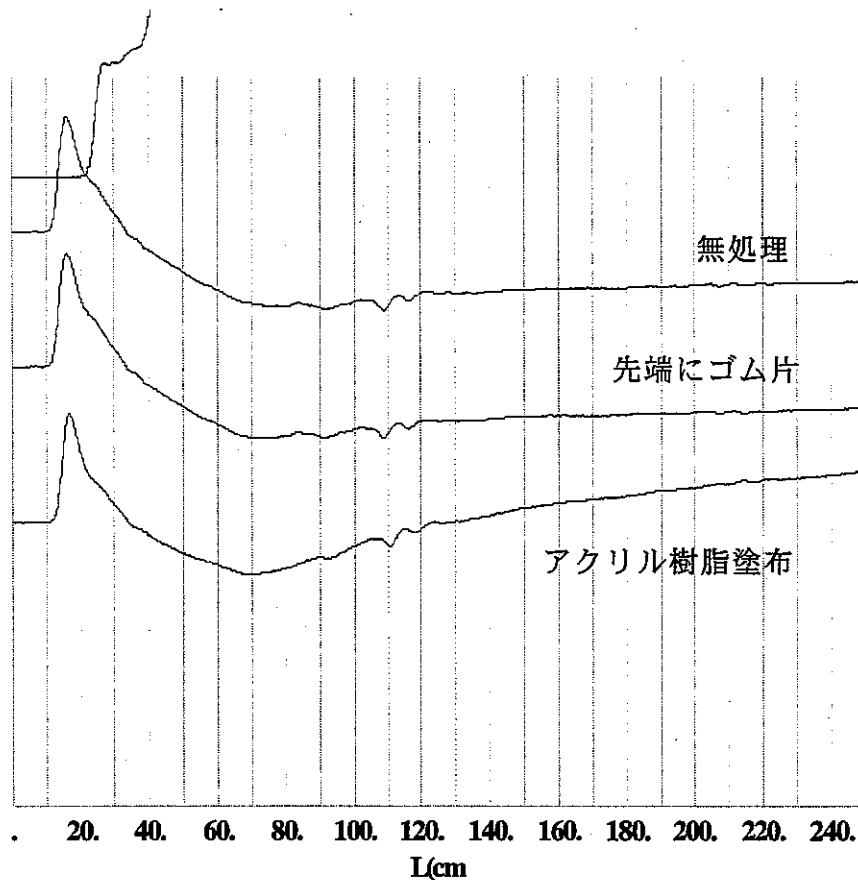


図 6.2-1 低比抵抗岩盤に対するプローブの改良試験

本実験では、低比抵抗岩盤の代わりに豊浦標準砂とベントナイトの混合土（以下、混合土と呼ぶ）を用いた。砂とベントナイトとの混合比は、質量比で 7 対 3 になるようにした。あらかじめ水分調整した混合土を直径 10cm、高さ 13cm の円筒形アクリル容器に所定の密度で充填し、直径 5mm、長さ 10cm の TDR プローブを円柱軸方向に設置して、電磁伝播速度の測定を行った。TDR プローブは、(a) 無処理、(b) プローブの先端に絶縁性のゴムを取り付けたもの、(c) プローブの全体にアクリル製樹脂（無色水性ニス）を塗布したもの、の 3 種類を用意し、それぞれを用いて測定した TDR 波形データから、主に反射波の明瞭性について検討を行った。

6.3 試験結果

図 6.3-2 に、それぞれのプローブによる代表的な波形データを示す。波形は、上から順に無処理、先端にゴムを貼り付けたもの、アクリル樹脂でコーティングしたものである。



BENI30-1s.TXT

図6.3-2 3種類のプローブによる TDR 波形

無処理のプローブを用いたときには、反射波の立ち上がりが極めて不鮮明であった。プローブの先端にゴム片を貼り付けた場合は、立ち上がりの改善はほとんど見られなかった。これに対し、アクリル樹脂を塗布したものは、反射波の立ち上がりが明瞭になっており、著しい改善が見られた。

見かけのプローブ長は、無処理では $L = 63.3\text{cm}$ 、先端にゴム片を貼り付けたものでは $L = 64.0\text{cm}$ とほぼ同じ値であったが、アクリル樹脂でコーティングしたものは $L = 57.0\text{cm}$ となり、測定される比誘電率は小さい値となった。

6.4 考察

プローブをアクリル樹脂でコーティングすることによって、反射波の立ち上がりがより明瞭になり、読み取り精度が向上したが、見かけのプローブ長が小さくなり、比誘電率がより小さい値となった。これは、プローブに塗布したアクリル樹脂の影響を受けたものであり、真の比誘電率はこれよりも高い値であると考えられる。したがって、コーティングを施したプローブは、試料の比誘電率自体を測定する目的には利用できない。

しかし、目的が真の比誘電率の測定でなく、比誘電率と体積含水率の関係を求めることであれば、このプローブも適用可能である。試料の含水状態の変化によって、コーティング樹脂の状態は変化しないと考えられるため、孔壁との密着さえ確保されていれば、測定された比誘電率の値と試料の体積含水率との関係を得ることができる。すなわち、体積含水率の相対的な変化を把握することが可能と思われる。その際に問題となるのは、比誘電率と体積含水率のキャリブレーションがプローブ固有になってしまうことである。したがって、汎用性のあるキャリブレーションデータを得るためには、コーティング厚さとプローブの太さを揃える必要があるであろう。

また、プローブ先端に絶縁材料を詰める方法は、波形の改善には有効でないことが判明した。これは、低比抵抗性媒体では、プローブ先端における電磁波エネルギーの逸散よりも、プローブ内を往復する際のエネルギーの逸散のほうがはるかに大きいためであると考えられる。

7. まとめ

7.1 本年度の研究成果

本年度の研究成果は、以下のようにまとめられる。

(1) 改良型 TDR 棒状プローブを用いた岩石コアの比誘電率測定

5 岩種を対象として、改良型棒状 TDR プローブを用いた含水比－比誘電率の変化曲線の測定を実施した結果、以下の結論が得られた。

- ① 同一岩種を用いた過去の測定結果と比べて、飽和度 100%付近での比誘電率の変化が緩やかになっており、改良型のプローブ設置法が、プローブと孔壁との隙間を埋めるのに有効であることが改めて確かめられた。
- ② 稲田花崗岩を除く今年度の 4 岩種と平成 10 年度の白川熔結凝灰岩のデータは、ほぼ同一曲線の周囲に分布していた。また、Topp 式と比較すると、同一含水率に対して全体的に高い比誘電率を示した。
- ③ 多胡砂岩と明世累層凝灰質細粒砂岩は、他の岩種とは異なった関係を示した。この理由として、多胡砂岩は不均質性が強いために、測定している範囲と試料全体の含水率が一致しない可能性があること、また明世累層凝灰質細粒砂岩は、粘土鉱物を多く含み、比抵抗が小さいために比誘電率が特異な値になっていることが考えられる。
- ④ 稲田花崗岩のような有効間隙率の小さい岩に対しては、本測定法は読み取り精度の観点から適用困難である。しかし、読み取りの自動化がなされれば、精度の問題は解決される可能性がある。

(2) パッカープローブの実用化を目指した、従来計測手法の問題点の調査および仕様・構造の改良

パッカープローブの実用化を目指すため、プローブ間隔および長さの違いによる波形や読み取り値の変化、電磁波の影響範囲とプローブ間隔の関係、パッカーの構造と加圧媒体の影響評価について、実験的な検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- ① 円周方向プローブでは、円周の内側よりも外側の比誘電率の影響がより多く現れる。これは、影響範囲の形状を最大でプローブ間隔と等しい厚みを持つ円管と仮定することで説明できる。
- ② プローブ長の違いによる比誘電率測定値の違いは、読み取り誤差に起因するものと考えられ、岩石を対象とした測定では無視できると考えられる。
- ③ プローブ間隔が大きくなると反射波の立ち上がりが緩やかになるため、結果的により小さい比誘電率が得られる。また、プローブ間隔が小さくなると、プローブ幅の影響を受ける可能性がある。
- ④ 不飽和領域を測定対象とする場合、水パッカーは比重差の影響により均等に膨らまない可能性があるため、空気パッカーのほうが望ましい。また、膨らみが不均

等になることによる影響を緩和するために緩衝材を入れることが望ましい。

(3) TDR 波形の読み取り自動化に関する既存技術の調査および適切な方法の提案

- ① 既存技術の調査を行い、本研究に最適と思われる手法として微分法を提案した。
- ② 微分法による具体的な測定手順として、Savitzky-Golay 法による波形のスミージングおよび数値微分の求め方と、波形における反射点の判定方法を示した。

(4) 低比抵抗岩盤に対するプローブの改良に関する試験

低比抵抗岩盤に対応するための TDR プローブの改良方法を検討し、次の結果が得られた。

- ① プローブ先端に絶縁材料を詰める方法は、波形の改善にはほとんど効果がない。
- ② プローブ表面を絶縁材料でコーティングすることにより、TDR 波形は改善されるが、得られた比誘電率は真の値とは異なる。キャリブレーションがプローブ固有になる問題を除けば、体積含水率の相対的な変化を把握することが可能と思われる

7.2 今後の課題

今年度までの研究により、改良型棒状 TDR プローブの有効性が確認され、有効間隙率が著しく小さい岩への適用性が問題となるものの、岩石コアを対象とした TDR 測定技術はほぼ確立されたものと考えられる。また、パッカー式プローブの実用化の観点では、電磁波の影響範囲やプローブ長が測定値に与える影響、およびパッカー加圧媒体に関する知見が得られ、設計に必要な基礎的情報が集まりつつある。しかしながら、プローブの貼付方向の選択や緩衝材の厚み等に関する検討が不十分であることから、今後は、これらの点を中心に計測手法の問題点や構造等に関する検討を進めた上で、試作プローブを作製することが求められよう。

なお、TDR 波形データの自動読み取りについては、具体的な手順を提示できたことから、これを実際の測定に適用し、問題点を抽出して、手法の確立を図ることが必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、岡山大学環境理工学部の西垣誠教授、埼玉大学工学部の渡辺邦夫教授には、研究の立案段階において、その方向付けに貴重なアドバイスをいただいた。また、東濃地科学センター地層科学研究グループの松井裕哉氏、櫛原昇氏には、計画の立案段階からその実施の過程において、多くのアドバイスと参考資料等のご提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

なお、本年度の共同研究者の一人である西田薫氏は、研究の完成を待たずして平成12年2月4日に満49歳の若さで逝去された。氏は、この不飽和領域研究に平成5年の開始時から携わり、物理探査分野における豊富な知識と経験を生かして、研究の発展に多大な貢献をされて来られた。また、本年度の研究においても、計画のほとんどを手がけられ、室内試験等にも病床に臥す直前まで精力的に取り組まれておられた。そのご尽力と功績に敬意を表するとともに、ここに謹んで哀悼の意を表するものである。(前村記す)

参考文献

(第3章)

今井久, 雨宮清, 加藤貴司, 西田薫, 荒川哲一, 前村庸之: 不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究, JNC TJ7400 99-009 (1999)

今井久, 雨宮清, 西田薫, 林為人, 蓑由紀夫: 不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究, PNC TJ1449 98-004(2) (1998)

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, pp.574~582 (1980)

(第4章)

今井久, 雨宮清, 加藤貴司, 西田薫, 荒川哲一, 前村庸之: 不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究, JNC TJ7400 99-009 (1999)

(第5章)

Baker, J. M., and R. R. Allmaras: System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time-domain-reflectometry, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, pp.1~6 (1990)

Gorry, P. A.: General least-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky-Golay) method, *Anal. Chem.*, 62, pp.570~573 (1990)

Hook, W. R., N. J. Livingston, Z. J. Sun, and P. B. Hook: Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, pp.1384~1391 (1992)

Ledieu, J., P. de Ridder, P. de Clerck, and S. Dautrebande: A method of measuring soil moisture by time-domain-reflectometry, *J. of Hydrology*, 88, pp.319~328 (1986)

Schneebeli, M., H. Fluhler, T. Gimmi, H. Wydler, H. P. Laser, and T. Bear: Measurements of water potential and water content in unsaturated crystalline rock, *Water Resour. Res.*, 31, pp.1837~1843 (1995)

Timlin, D. J., Ya. A. Pachepsky: Comparison of three methods to obtain the apparent dielectric constant from time domain reflectometry wave traces, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, pp.970~977 (1996)

Yanuka, M., G. C. Topp, S. Zegelin, and W. D. Zebchuk: Multiple reflection and attenuation of time domain reflectometry pulses: Theoretical considerations for application to soil and water, *Water Resour. Res.*, 24, pp.939~944 (1988)

付 録

1. 図 面
2. TDR波形データ
3. 写 真

1. 図

面

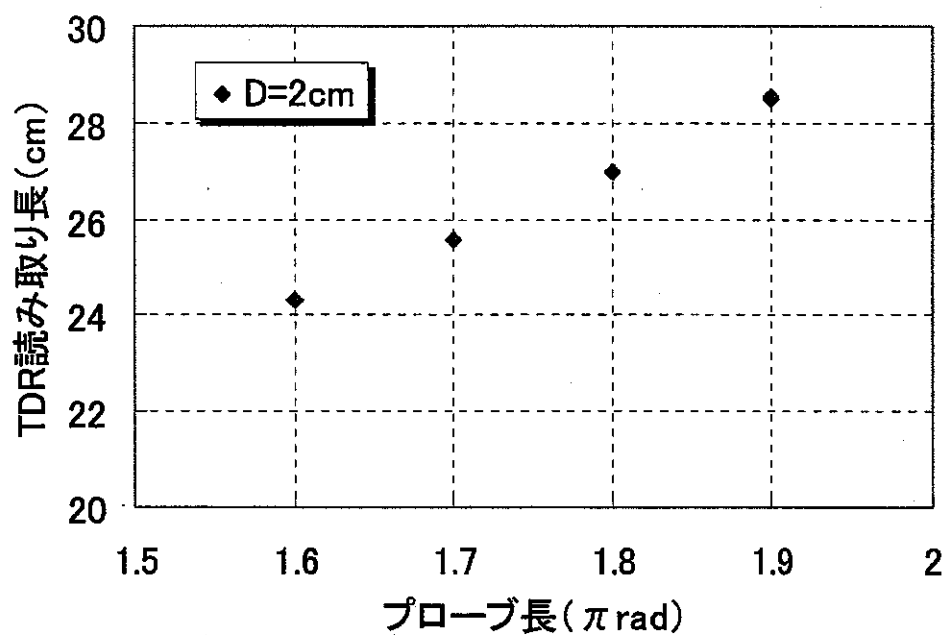


図 A4.2-1 円周プローブ長とTDR読み取り長との関係（間隔 2cm，空中）

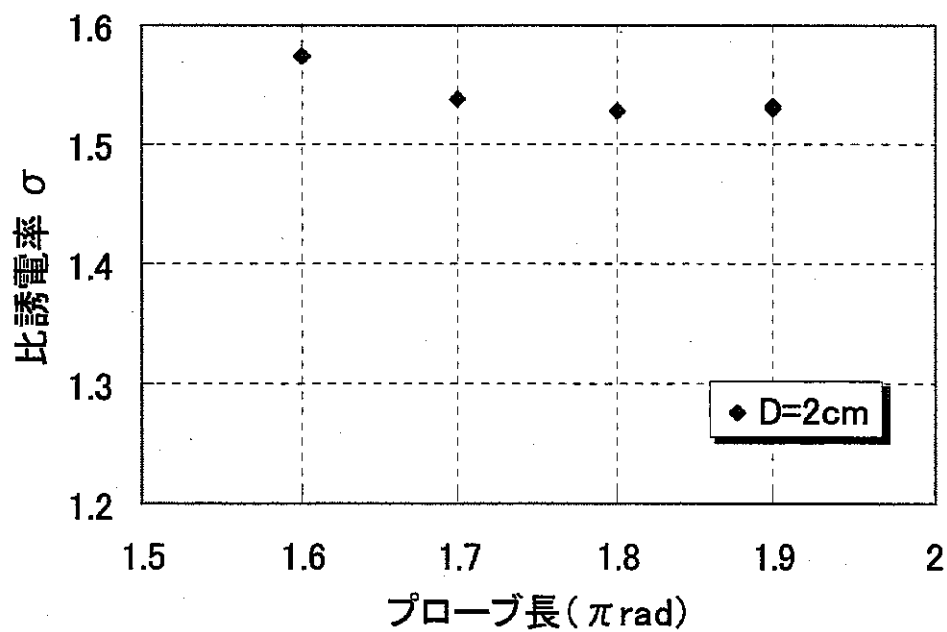


図 A4.2-2 円周プローブ長と比誘電率との関係（間隔 2cm，空中）

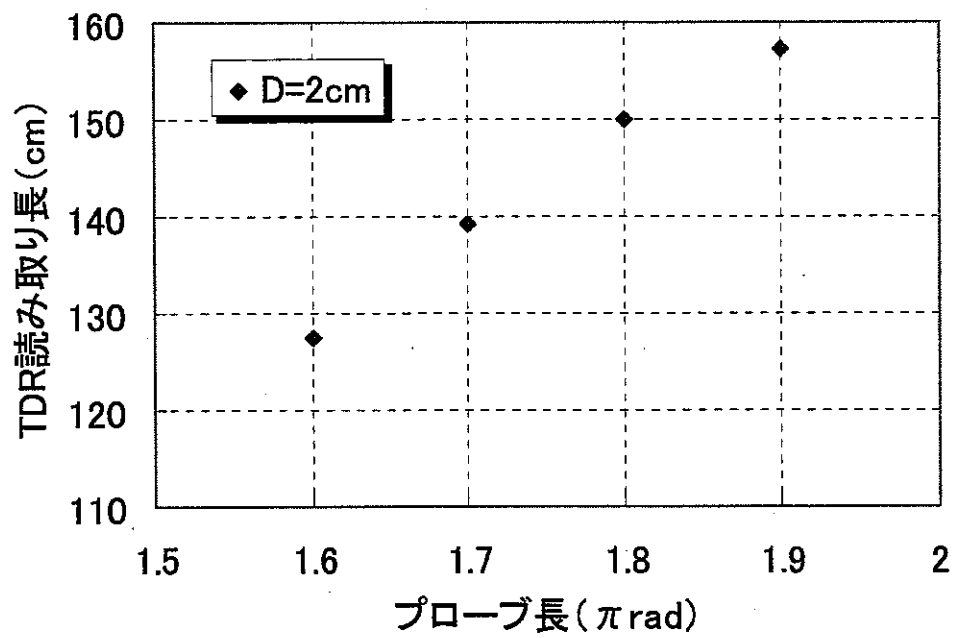


図 A4.2-3 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係（間隔 2cm，水中）

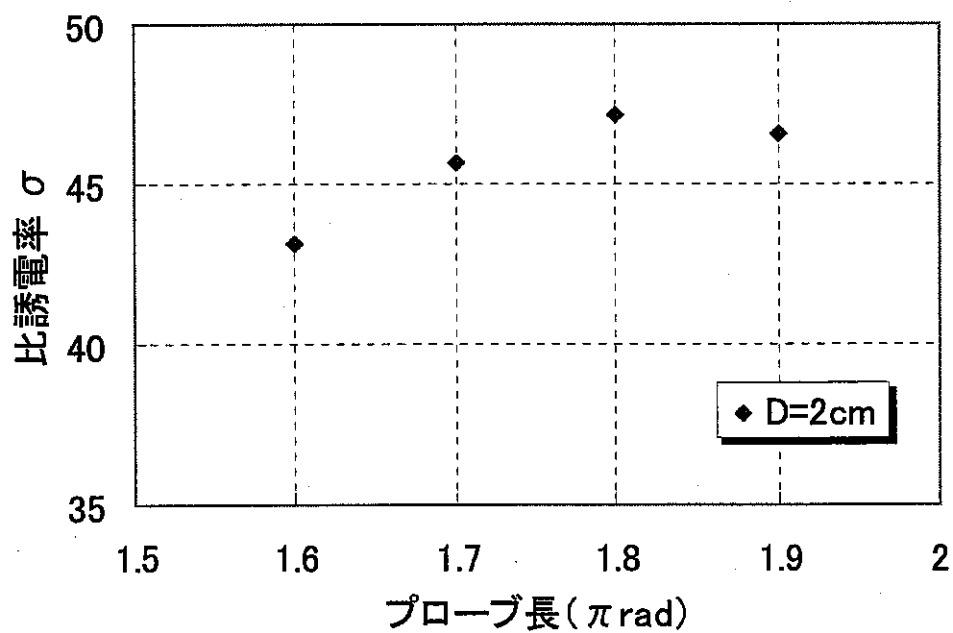


図 A4.2-4 円周プローブ長と比誘電率との関係（間隔 2cm，水中）

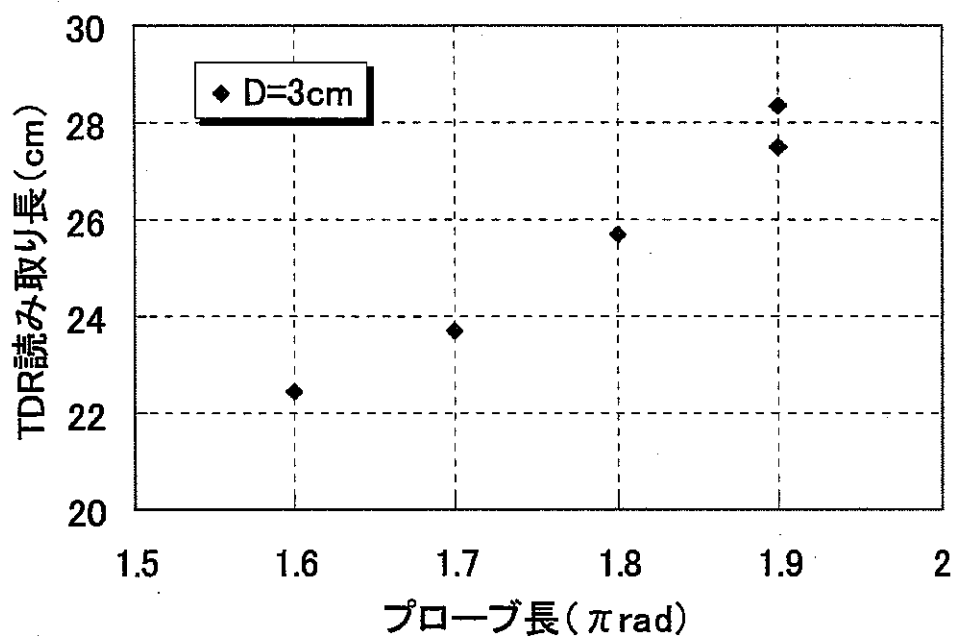


図 A4.2-5 円周プローブ長とTDR読み取り長との関係（間隔 3cm，空中）

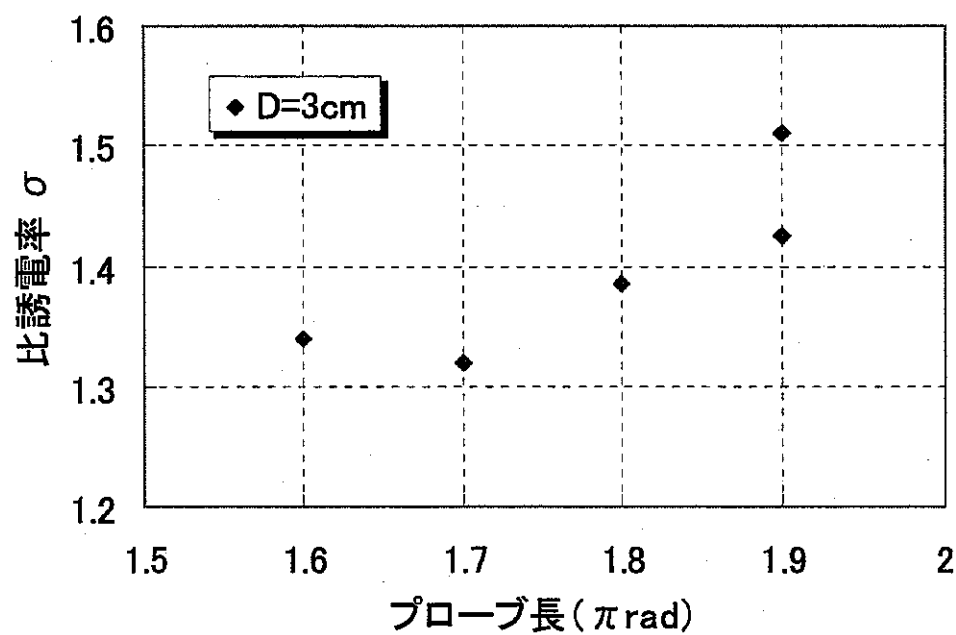


図 A4.2-6 円周プローブ長と比誘電率との関係（間隔 3cm，空中）

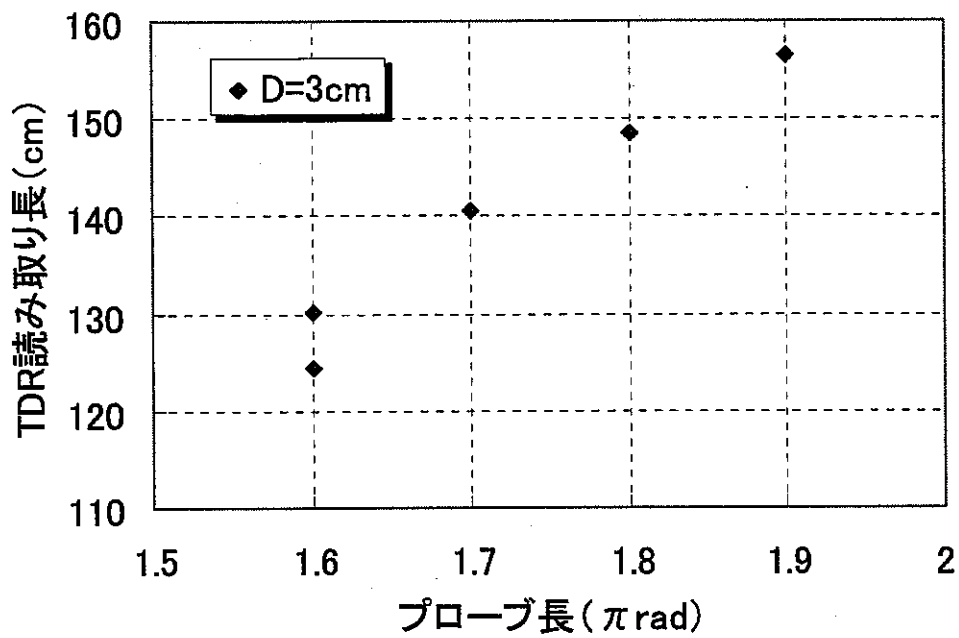


図 A4.2-7 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 2cm, 水中)

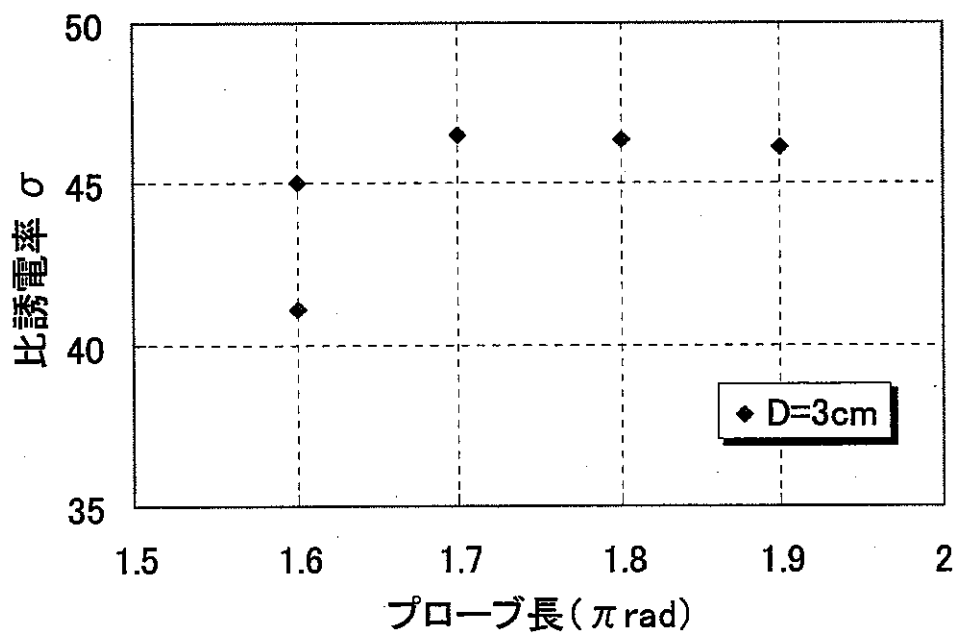


図 A4.2-8 円周プローブ長と比誘電率との関係 (間隔 3cm, 水中)

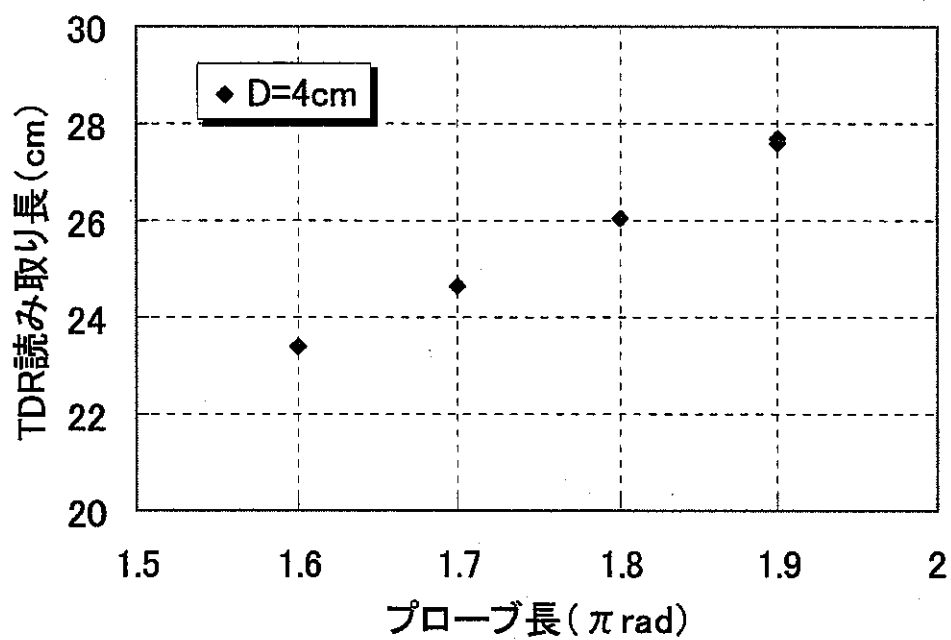


図 A4.2-9 円周プローブ長とTDR読み取り長との関係（間隔 4cm，空中）

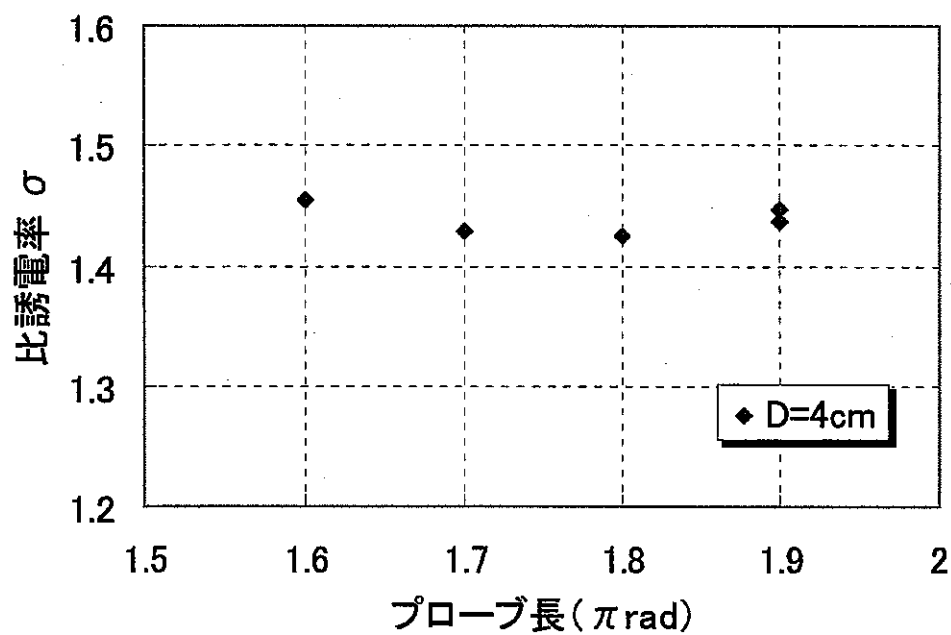


図 A4.2-10 円周プローブ長と比誘電率との関係（間隔 4cm，空中）

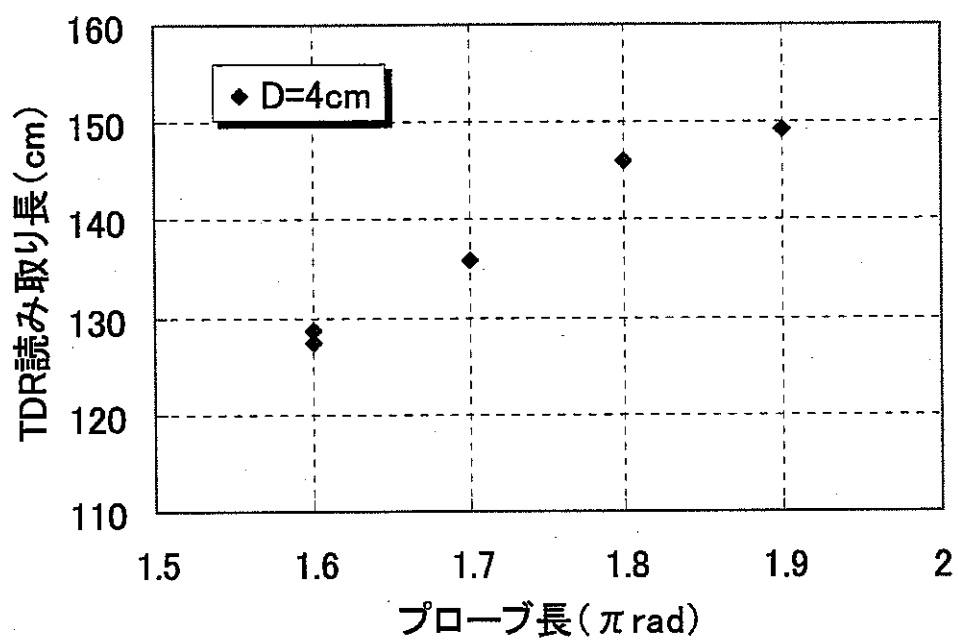


図 A4.2-11 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 4cm, 水中)

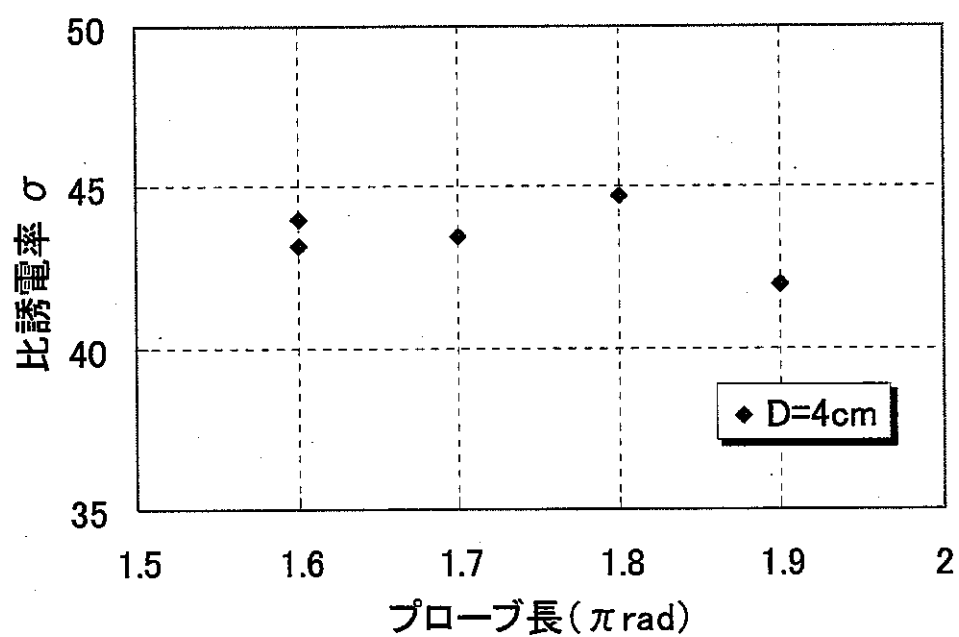


図 A4.2-12 円周プローブ長と比誘電率との関係 (間隔 4cm, 水中)

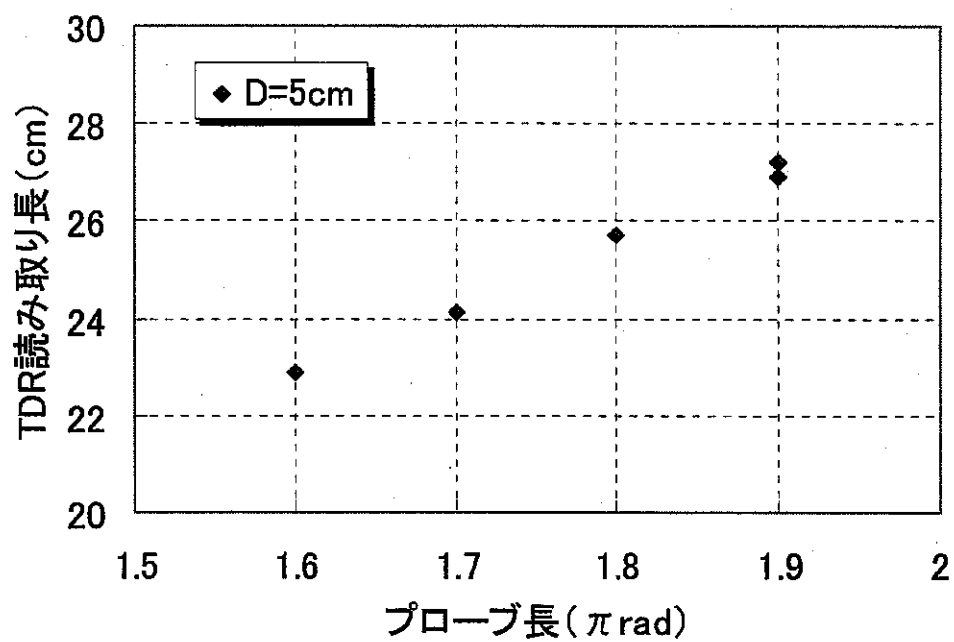


図 A4.2-13 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 5cm, 空中)

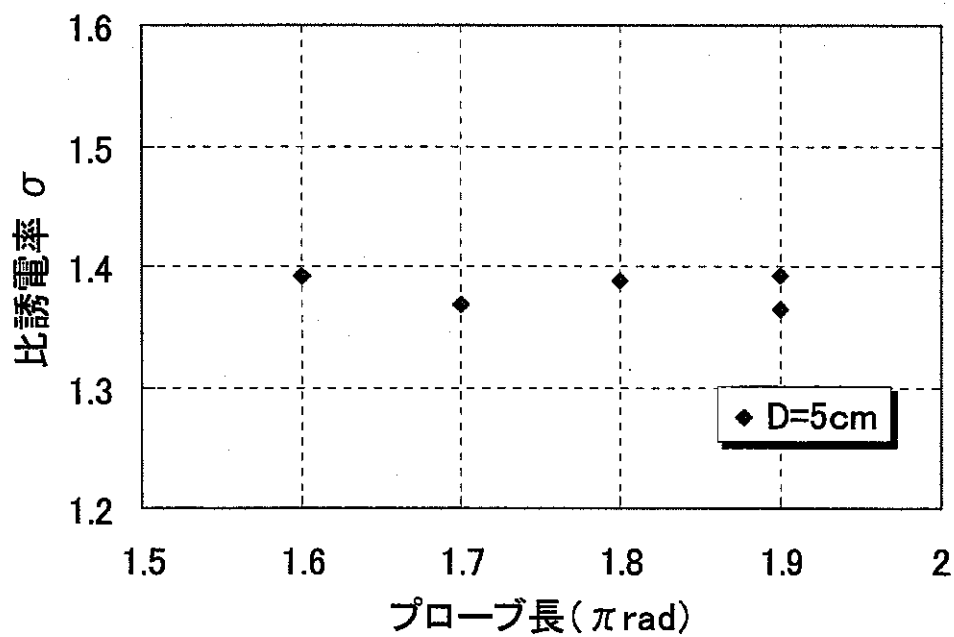


図 A4.2-14 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 5cm, 空中)

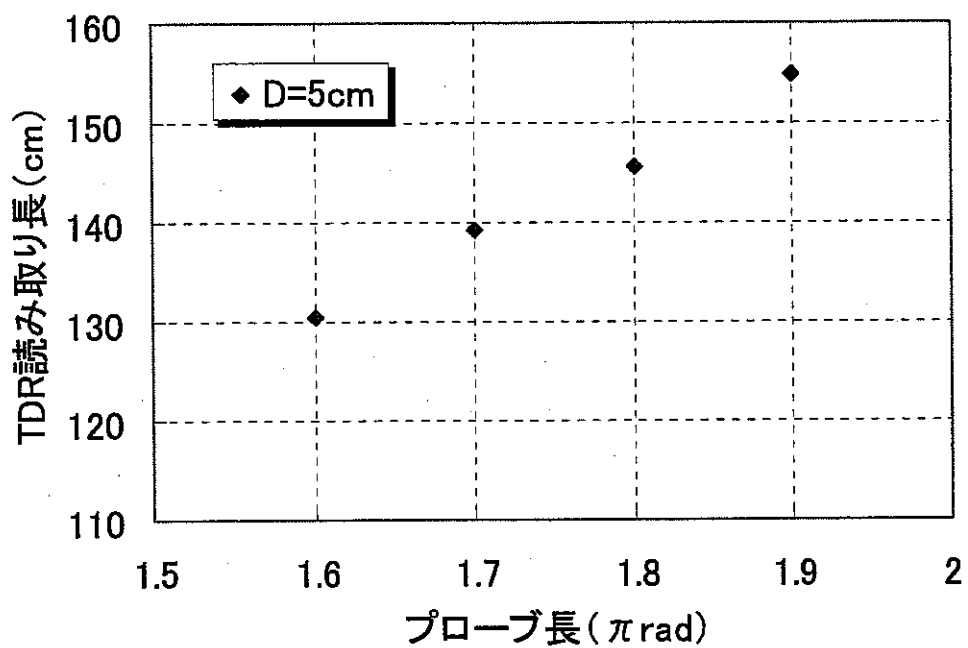


図 A4.2-15 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 5cm, 水中)

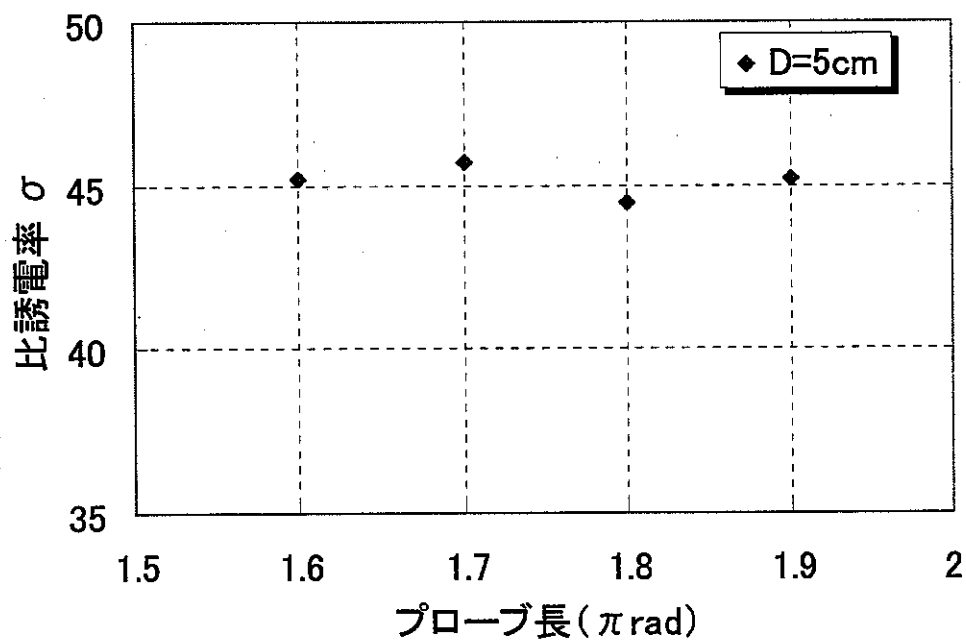


図 A4.2-16 円周プローブ長と比誘電率との関係 (間隔 5cm, 水中)

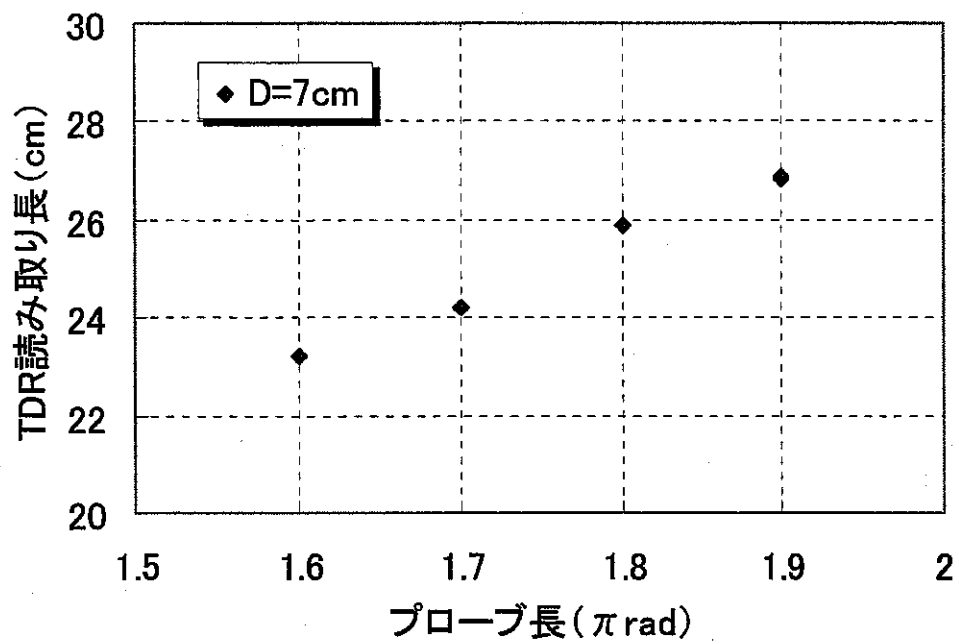


図 A4.2-17 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 7cm, 空中)

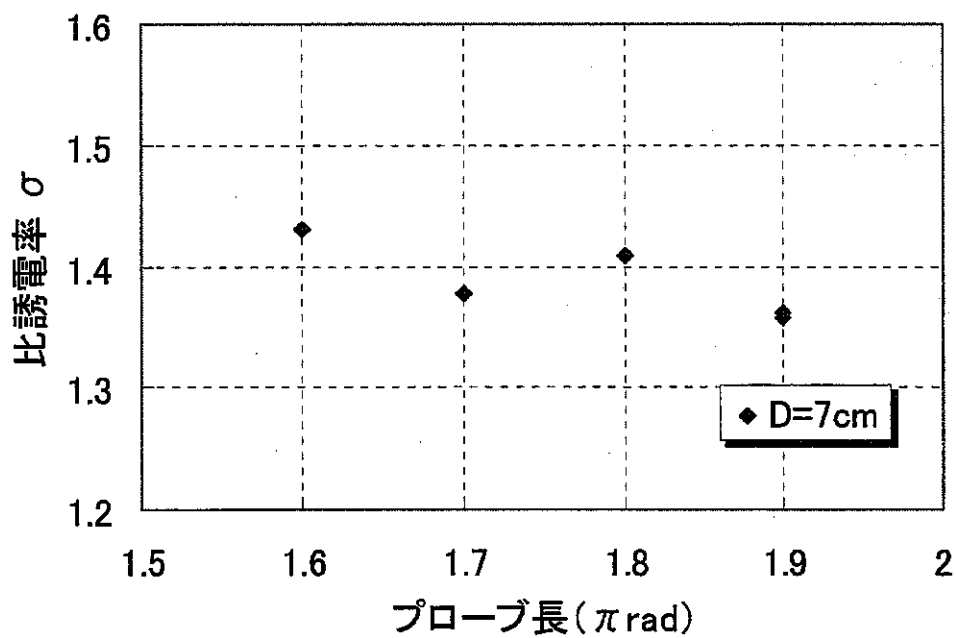


図 A4.2-18 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 7cm, 空中)

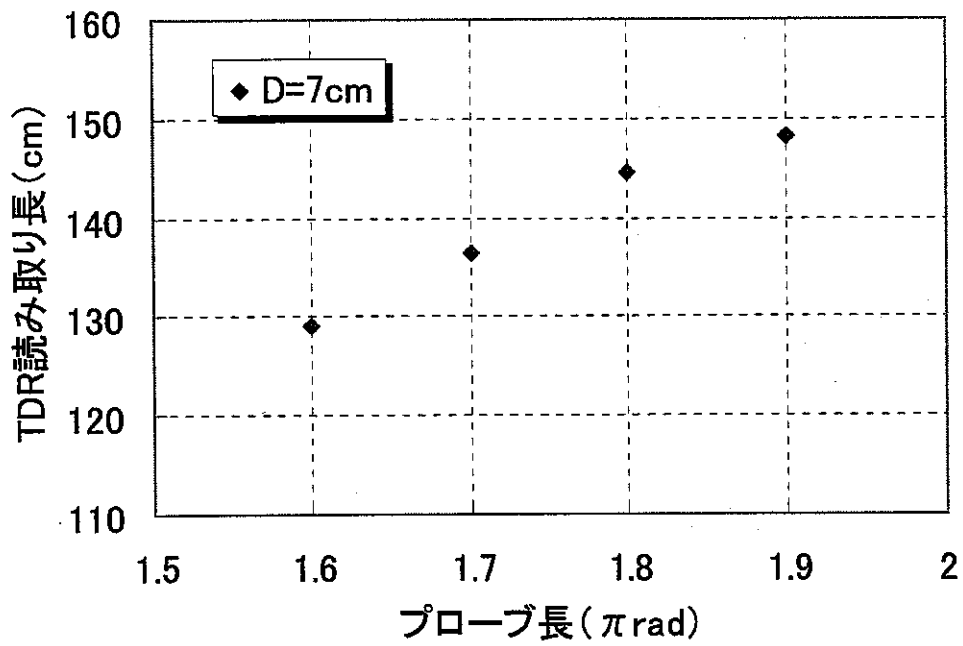


図 A4.2-19 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 7cm, 水中)

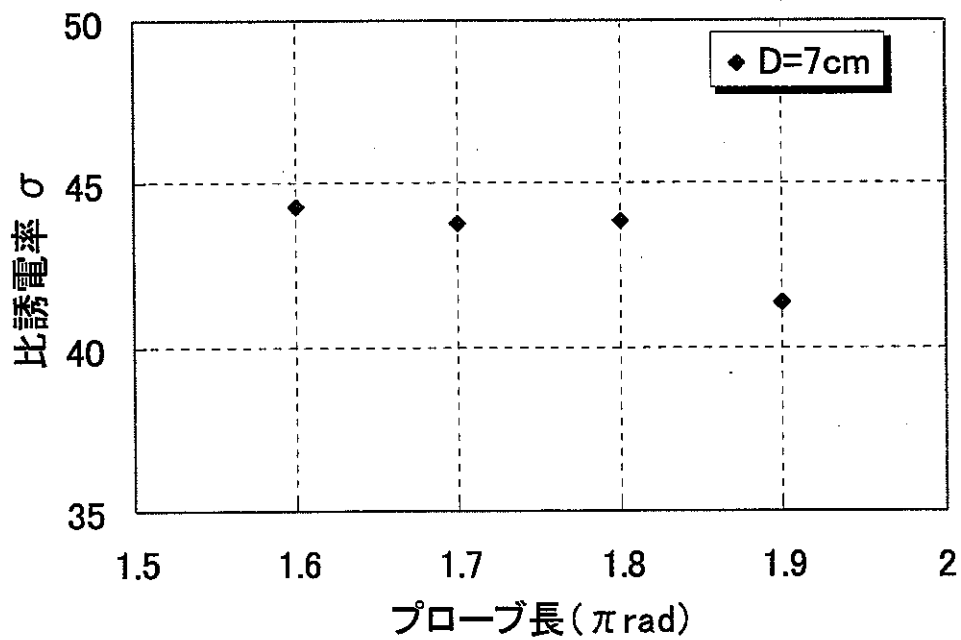


図 A4.2-20 円周プローブ長と TDR 読み取り長との関係 (間隔 7cm, 水中)

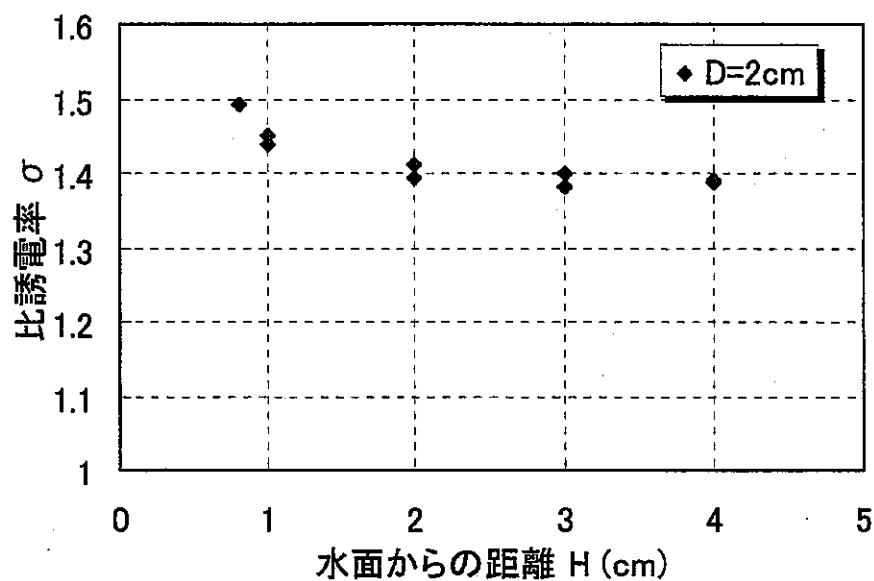


図 A4.3-1 水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ，間隔 3cm）

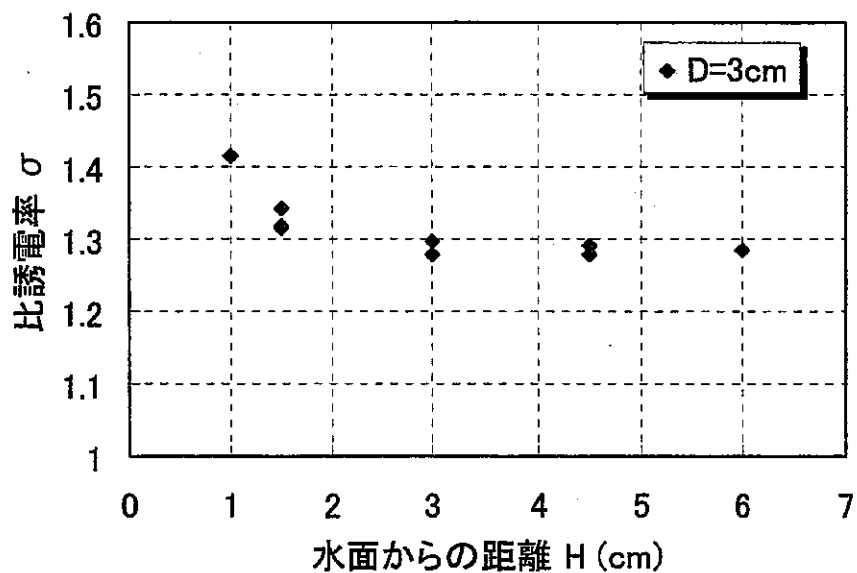


図 A4.3-2 水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ，間隔 3cm）

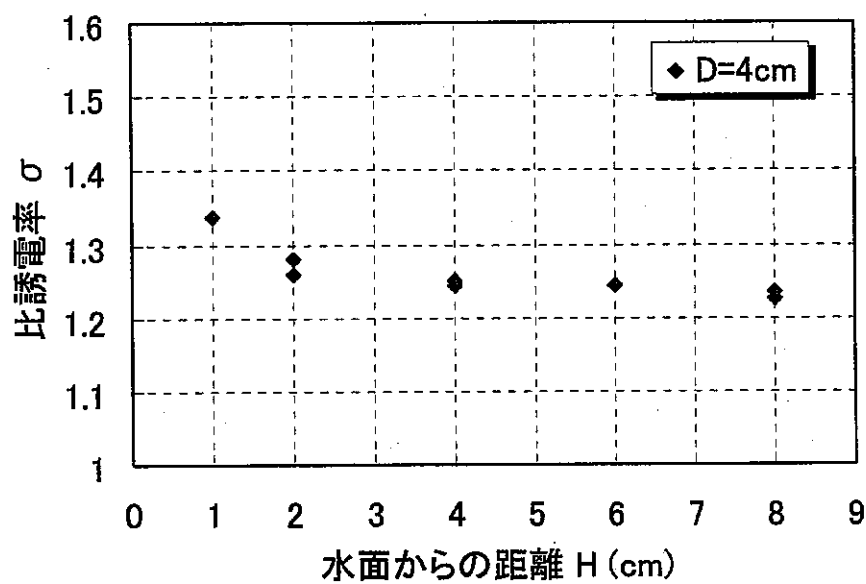


図 A4.3-3 水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ，間隔 3cm）

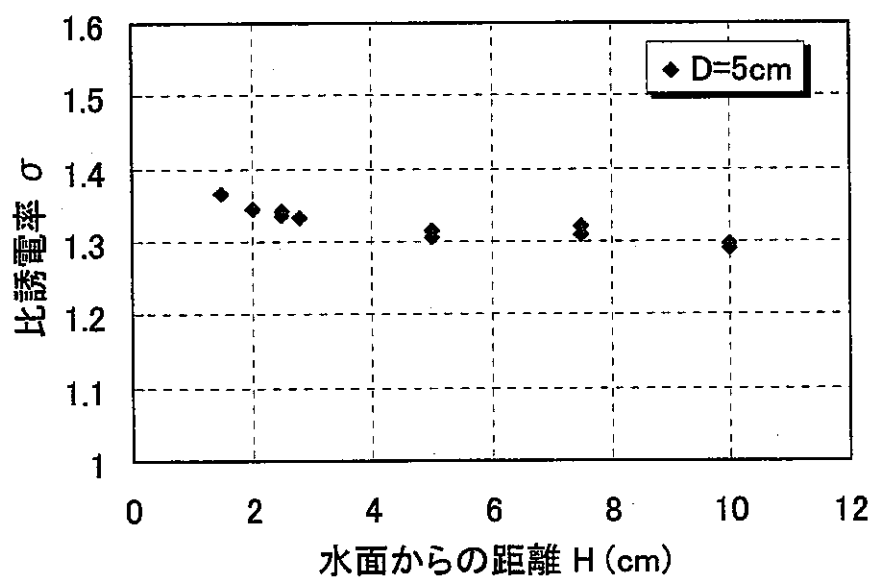


図 A4.3-4 水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ，間隔 5cm）

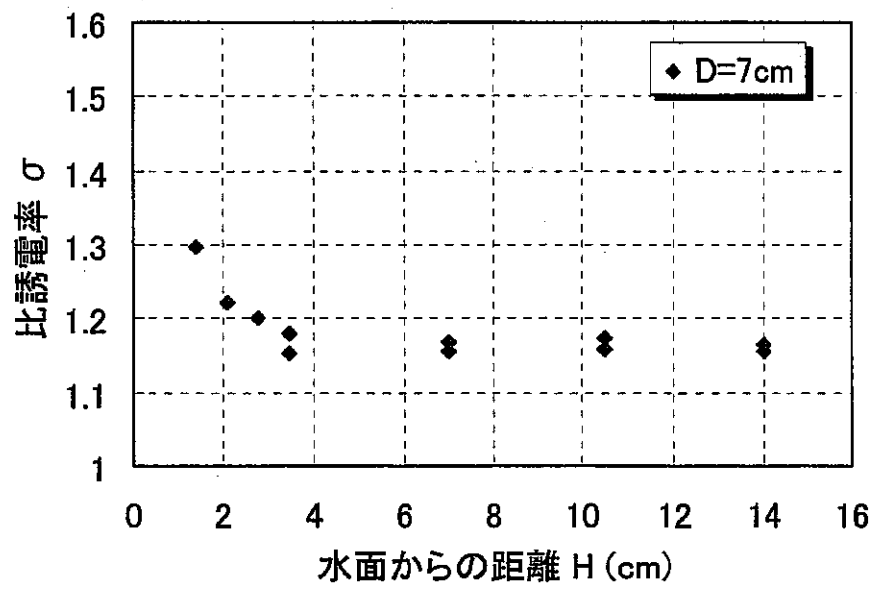


図 A4.3-5 水面からの距離と比誘電率との関係（軸方向プローブ，間隔 7cm）

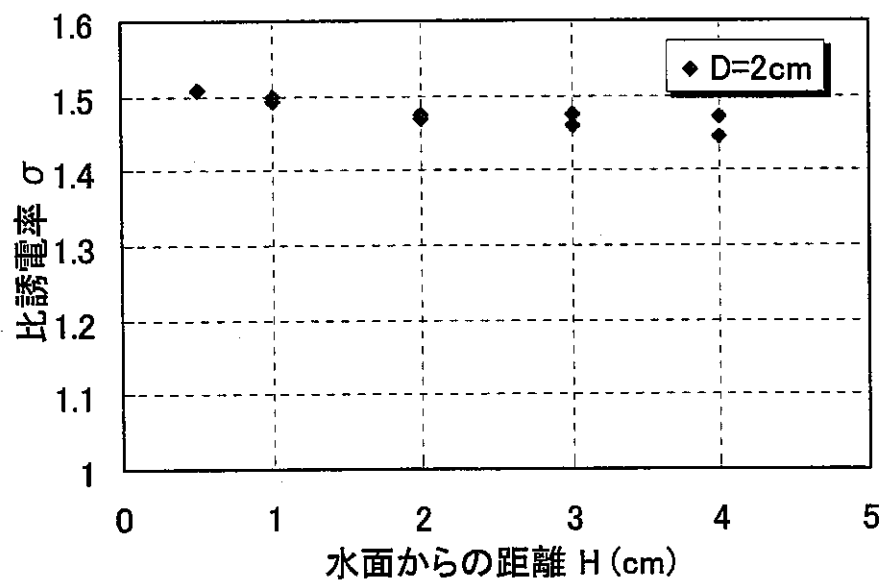


図 A4.3-6 水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ，間隔 2cm）

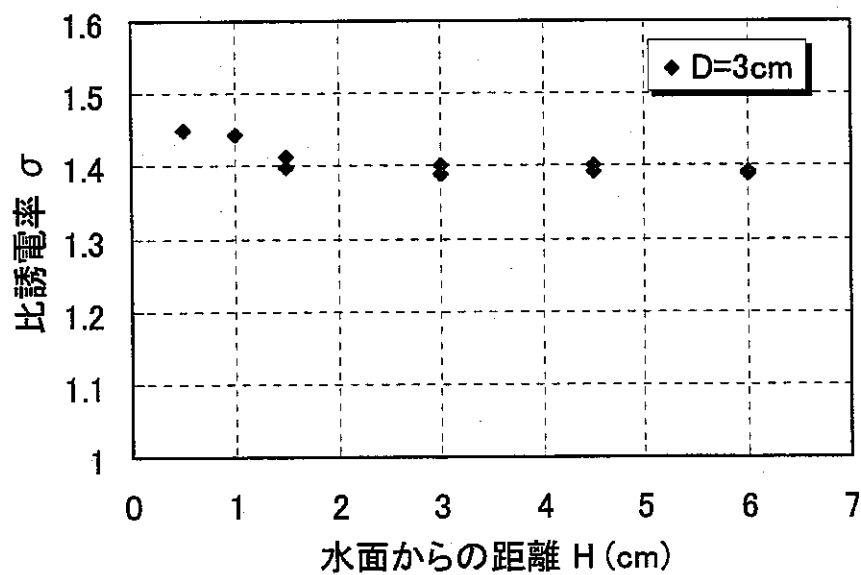


図 A4.3-7 水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ，間隔 3cm）

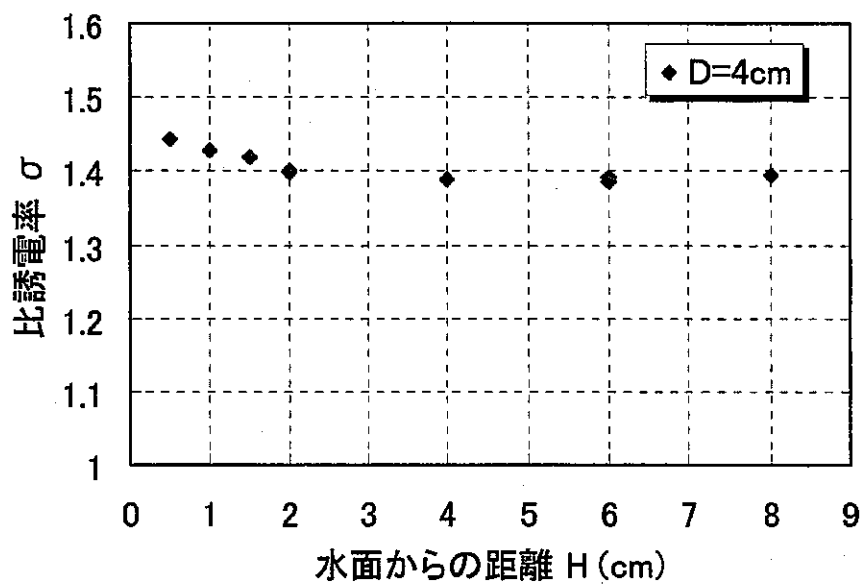


図 A4.3-8 水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ，間隔 4cm）

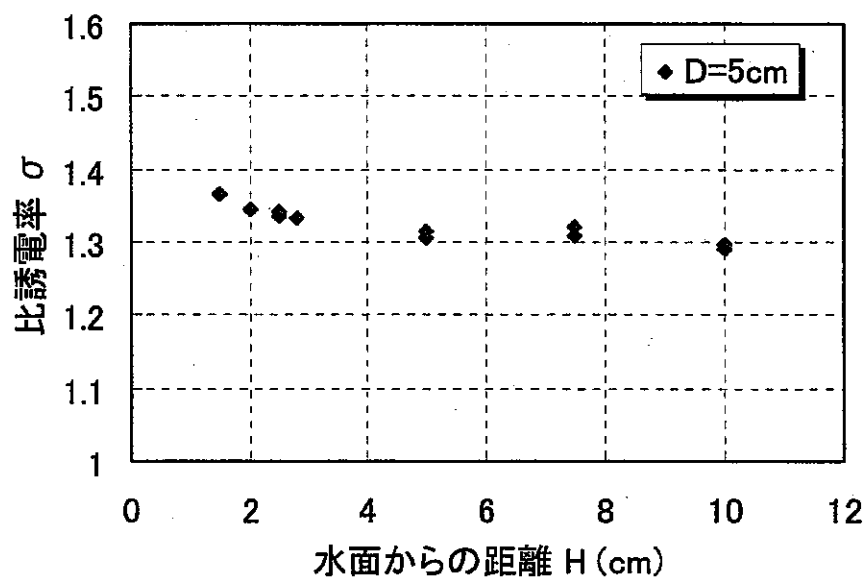


図 A4.3-9 水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ，間隔 5cm）

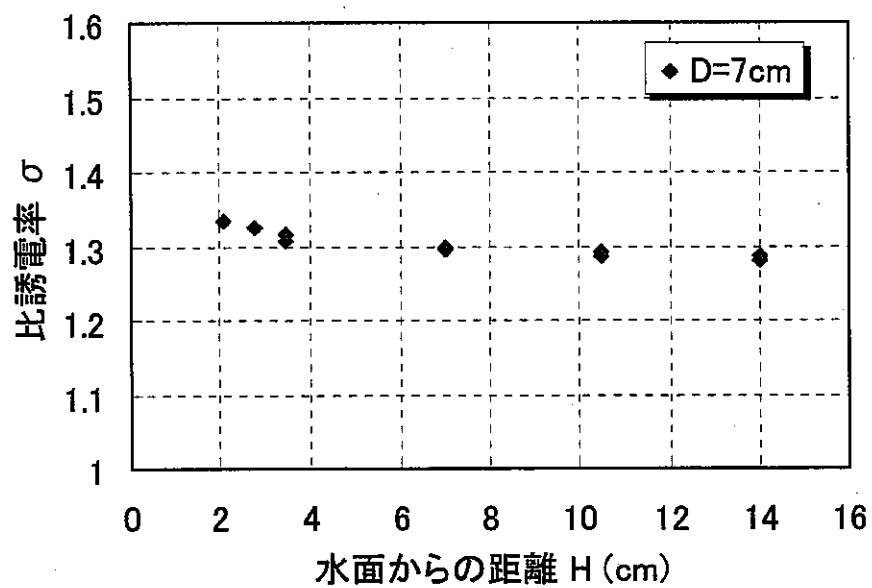
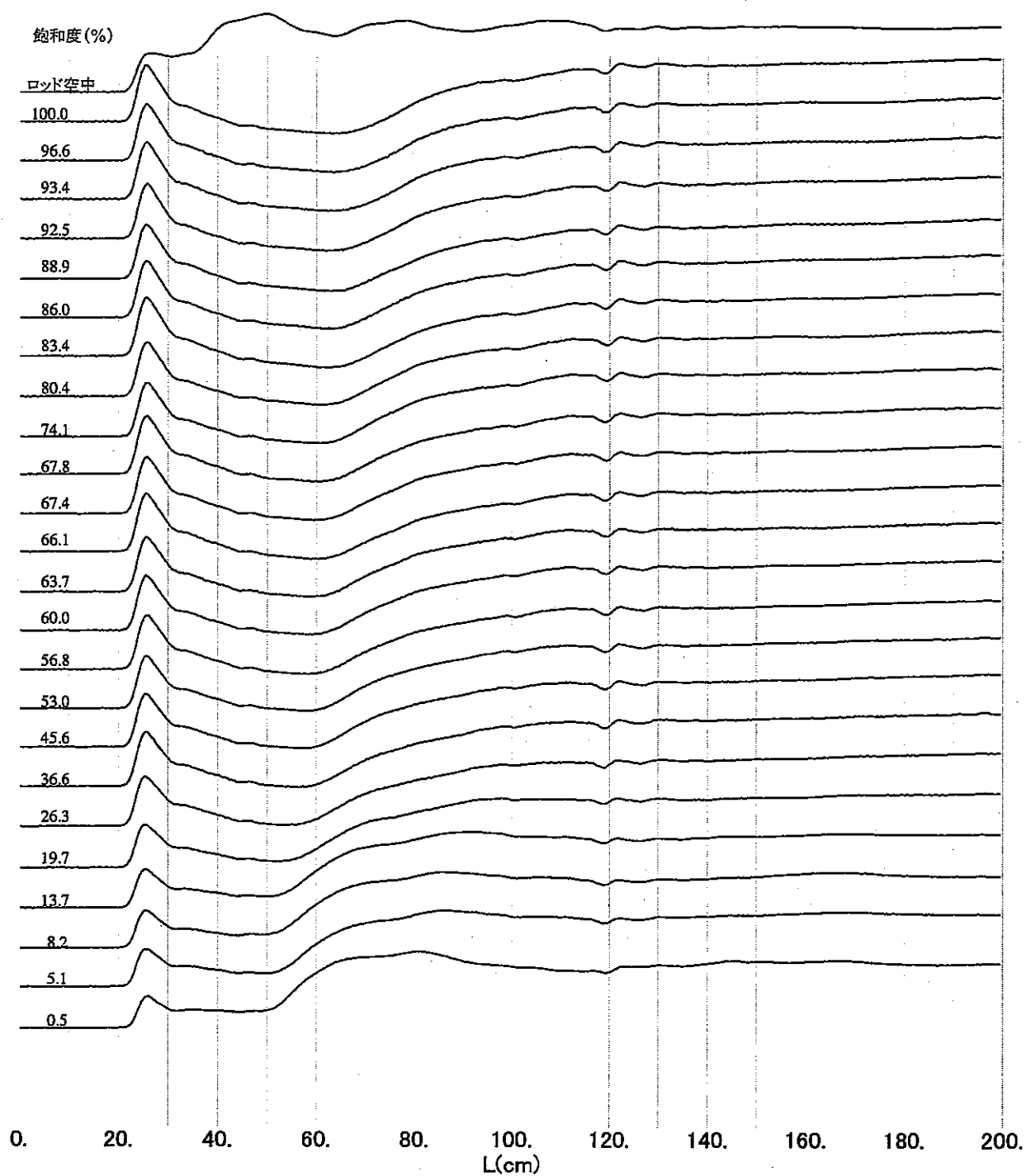


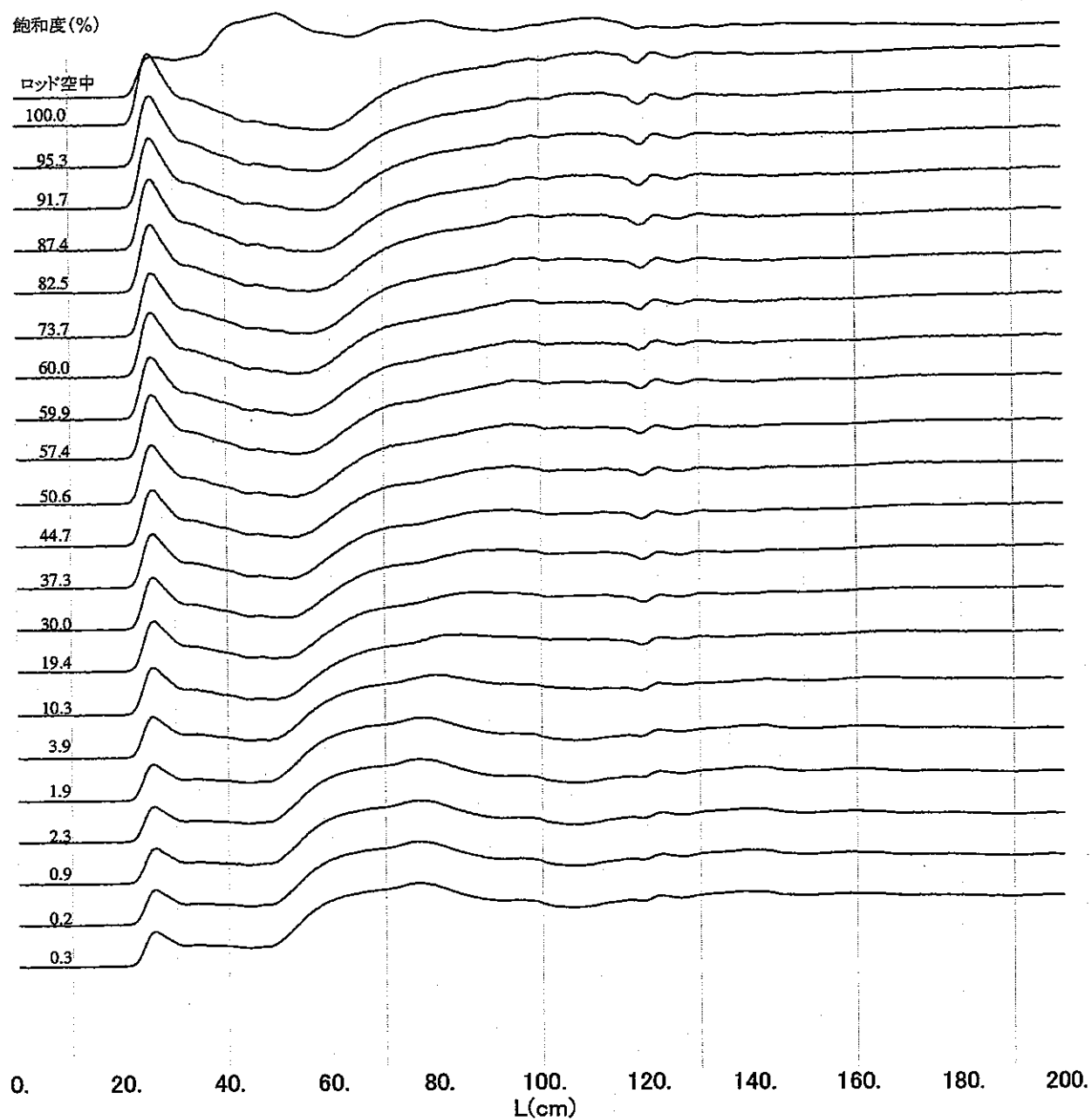
図 A4.3-10 水面からの距離と比誘電率との関係（円周方向プローブ，間隔 7cm）

2.TDR波形データ



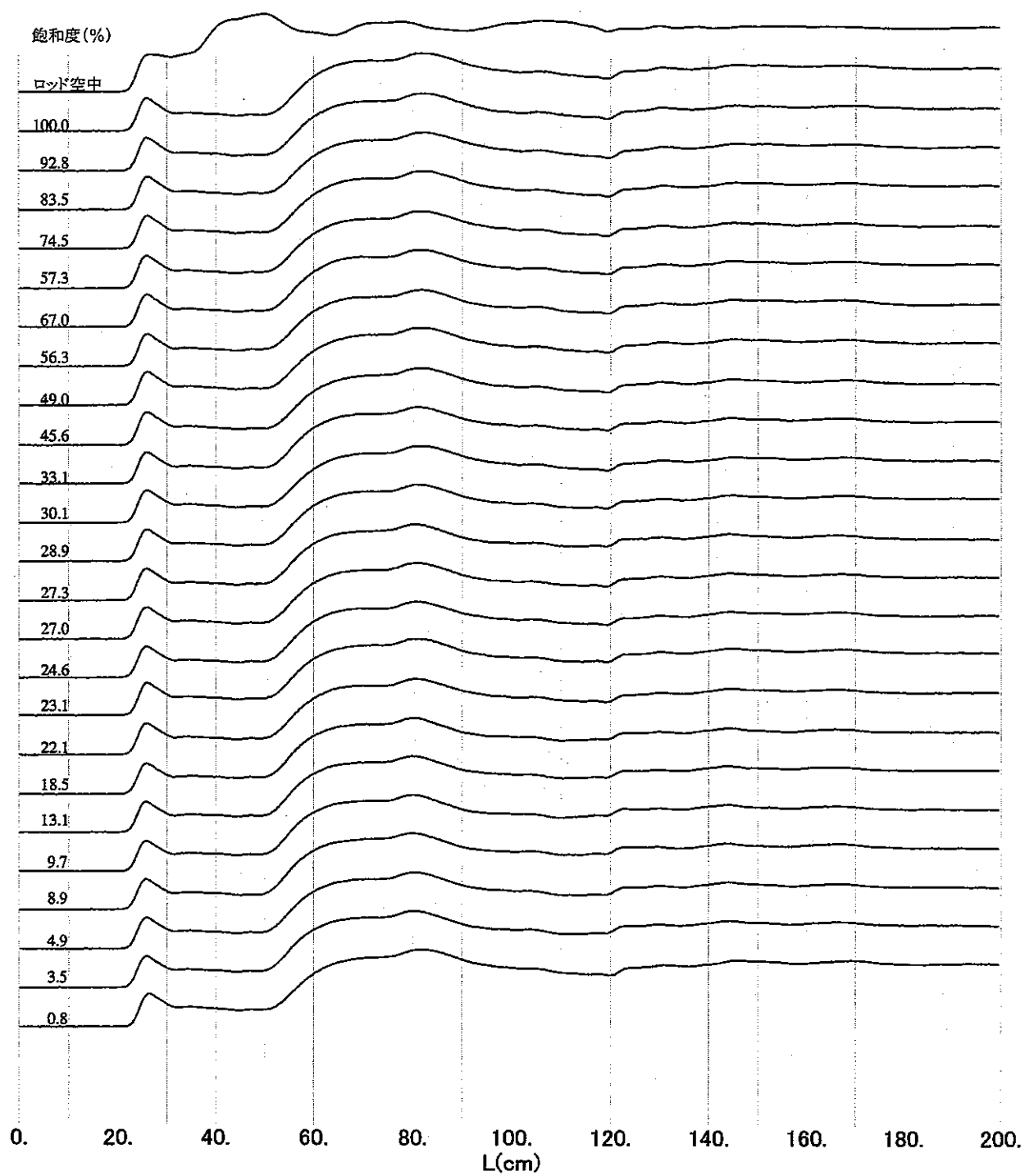
C:\TEMP\TDR\H11\CORECAL\MAY2000\KS10-5.TXT

図 A3.4-6 来待砂岩 KS10-5 の各含水状態における TDR 波形



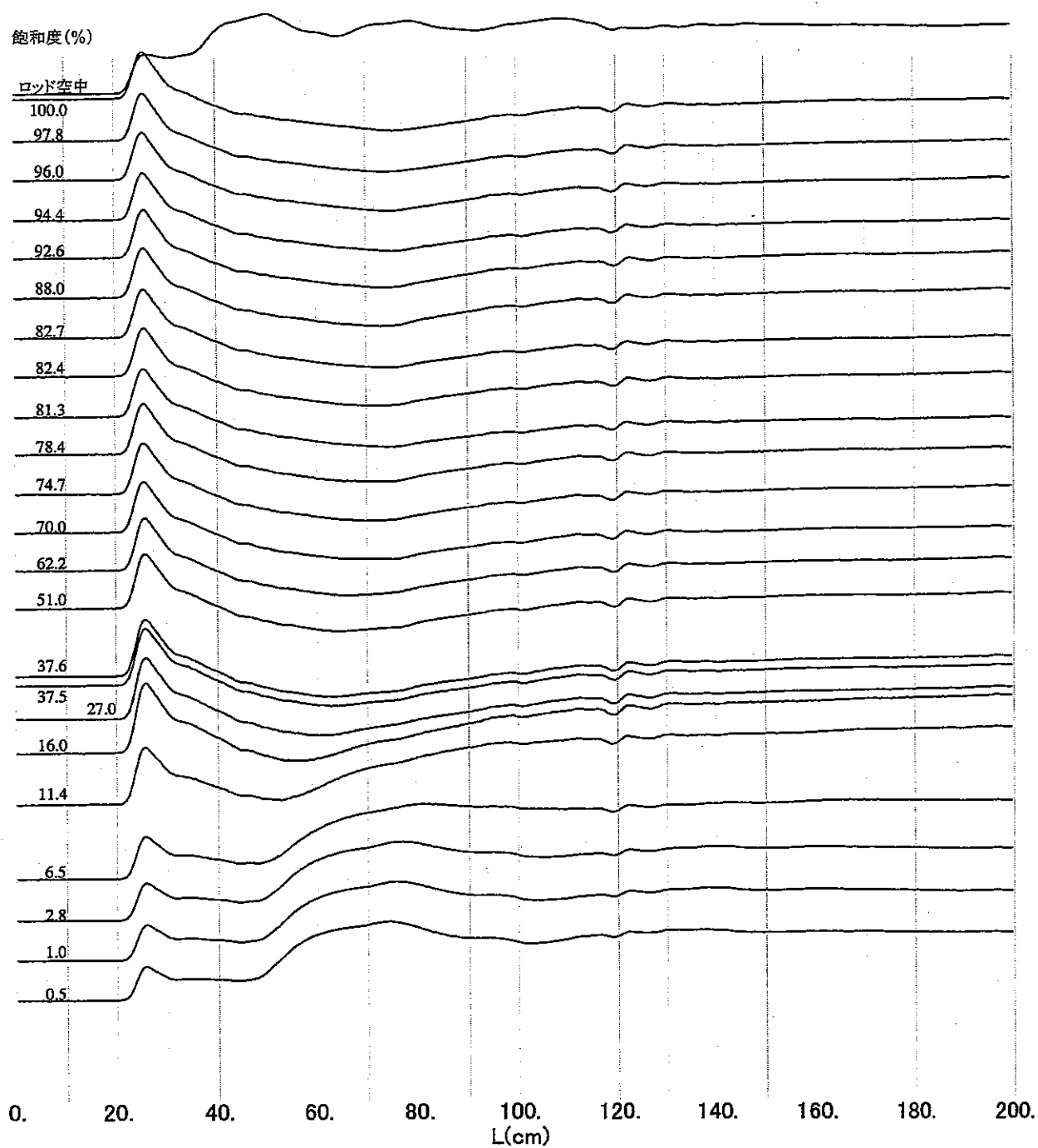
C:\TEMP\TDR\H11\CORECAL\MAY2000\SS10-4.TXT

図 A3.4-7 白川砂岩 SS10-4 の各含水状態における TDR 波形



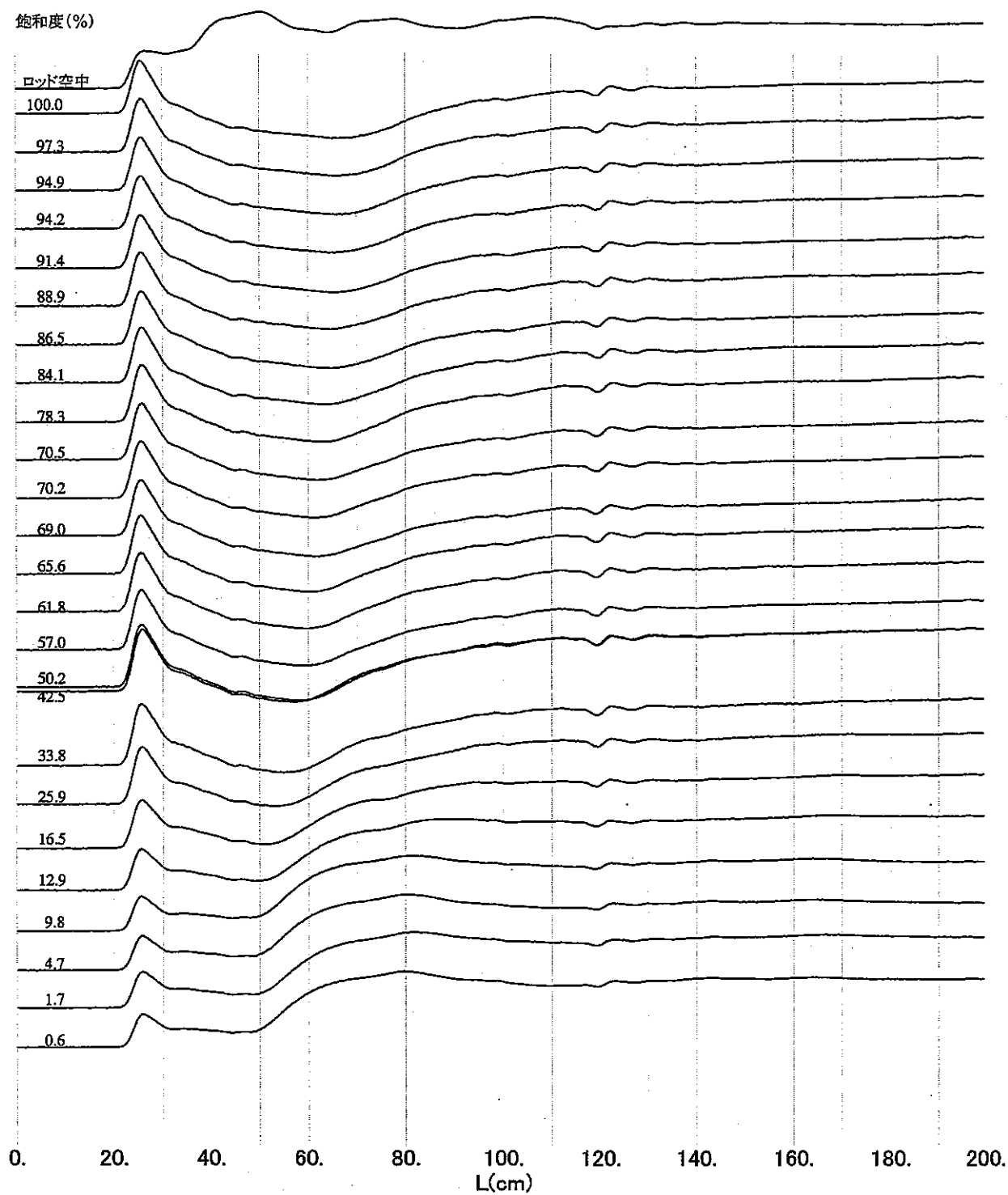
C:\TEMP\TDR\H11\CORECAL\MAY2000\IG10-3R.TXT

図 A3.4-8 稲田花崗岩 IG10-3 の各含水状態における TDR 波形



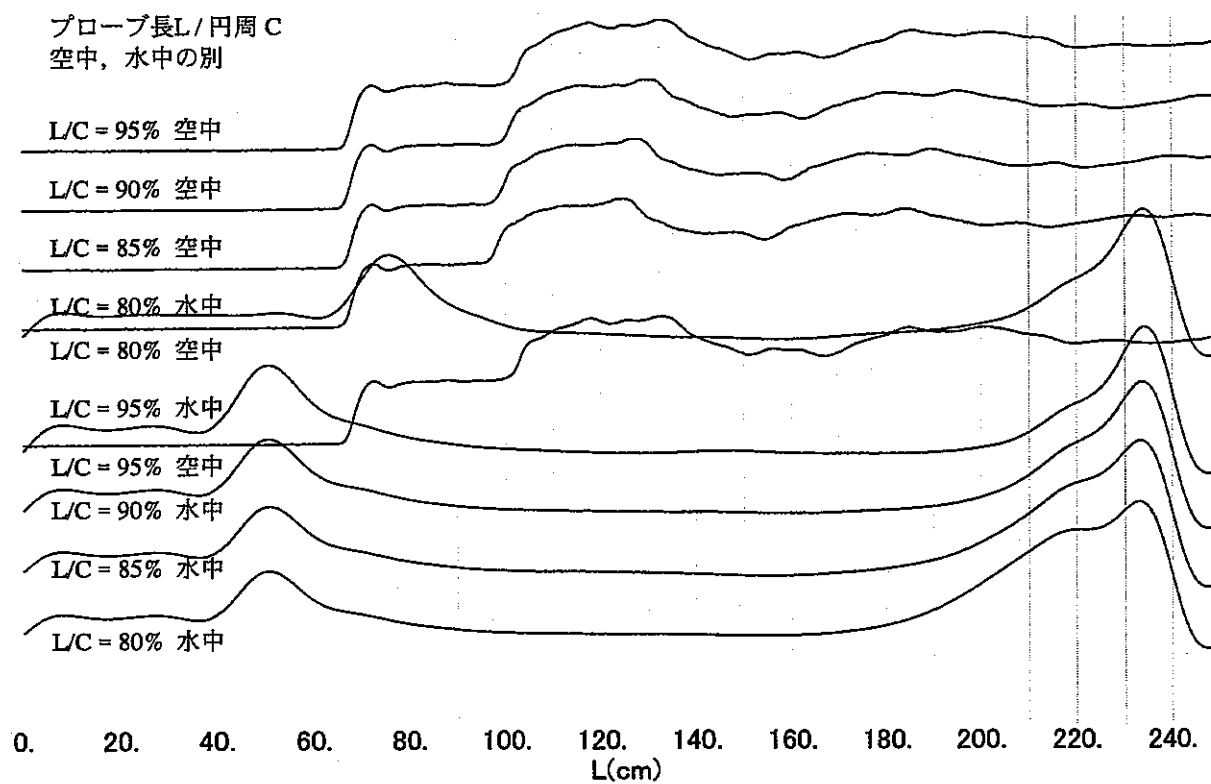
C:\TEMP\TDR\H11\CORECAL\MAY2000\TT10-4.TXT

図 A3.4-9 田下凝灰岩 TT10-4 の各含水状態における TDR 波形



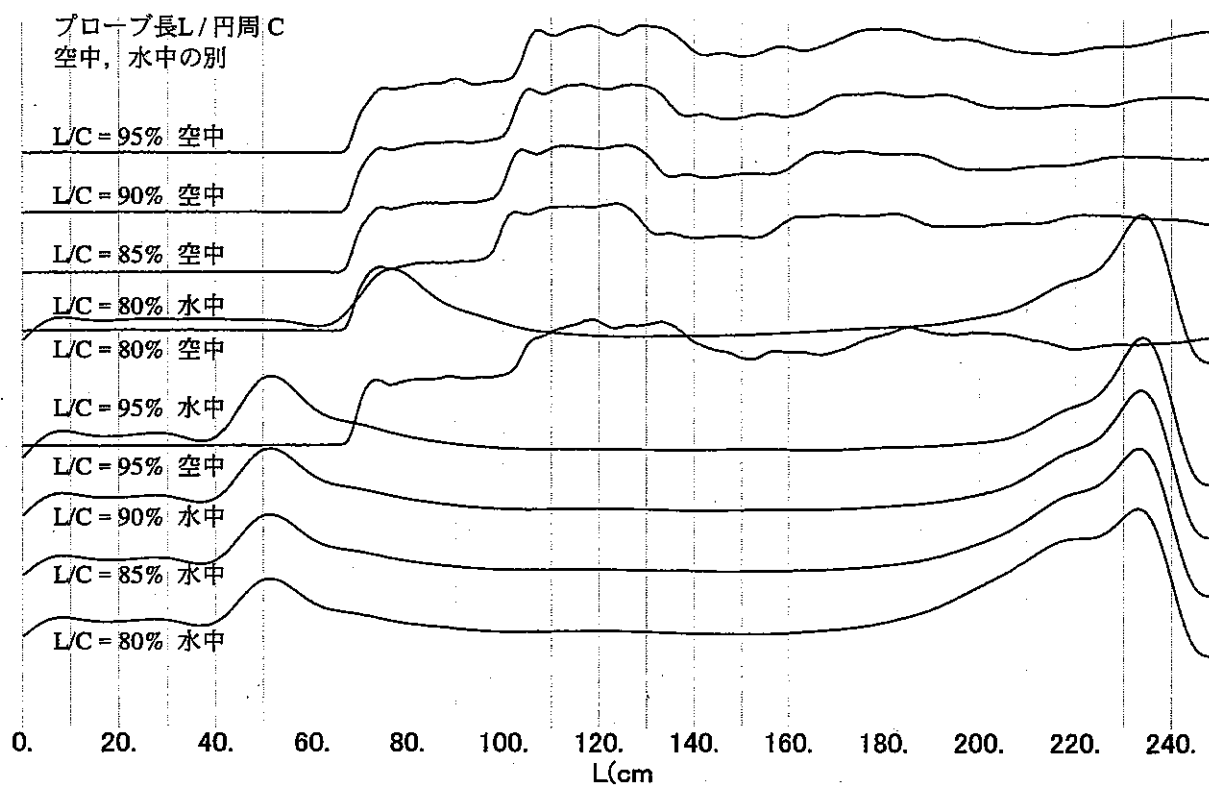
C:\TEMP\TDR\H11\CORECAL\MAY2000\OT10-3.TXT

図 A3.4-10 荻野凝灰岩 OT10-3 の各含水状態における TDR 波形



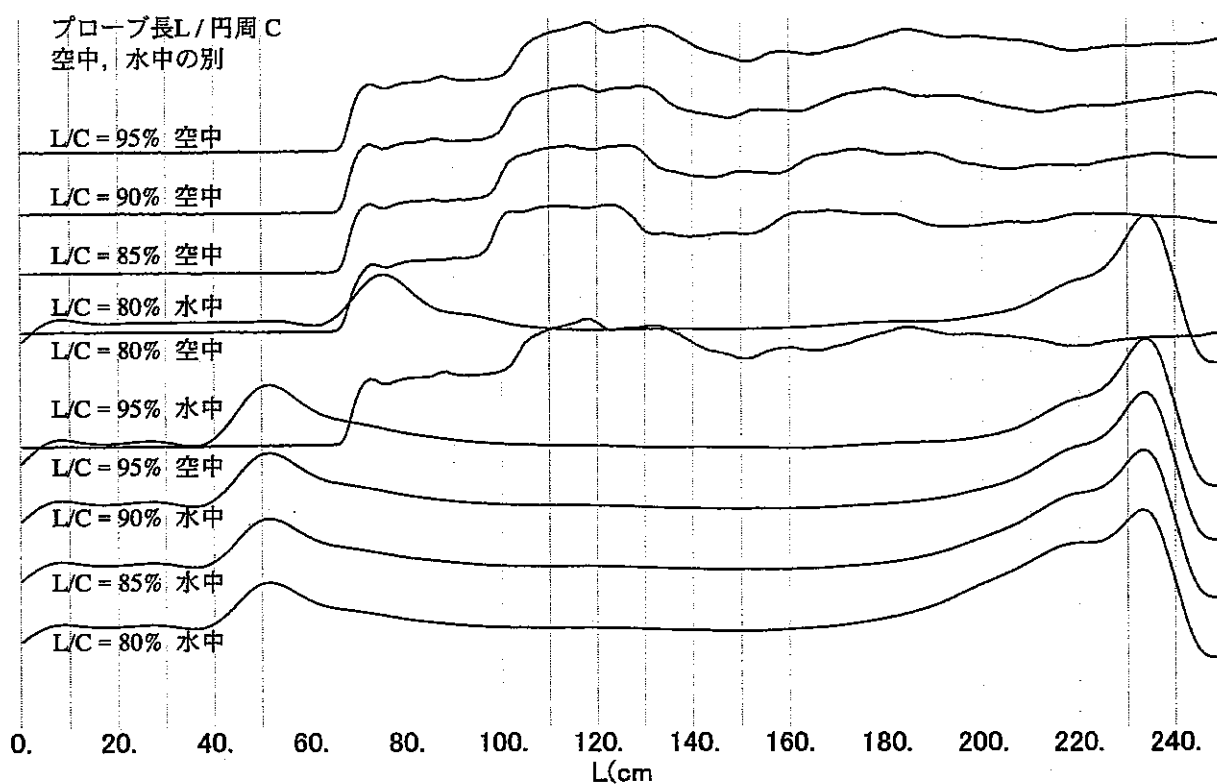
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-2\TP20R-1F.TXT

図 A4.2-1 プローブ長と波形、および読み取り値の変化を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 2.0cm)



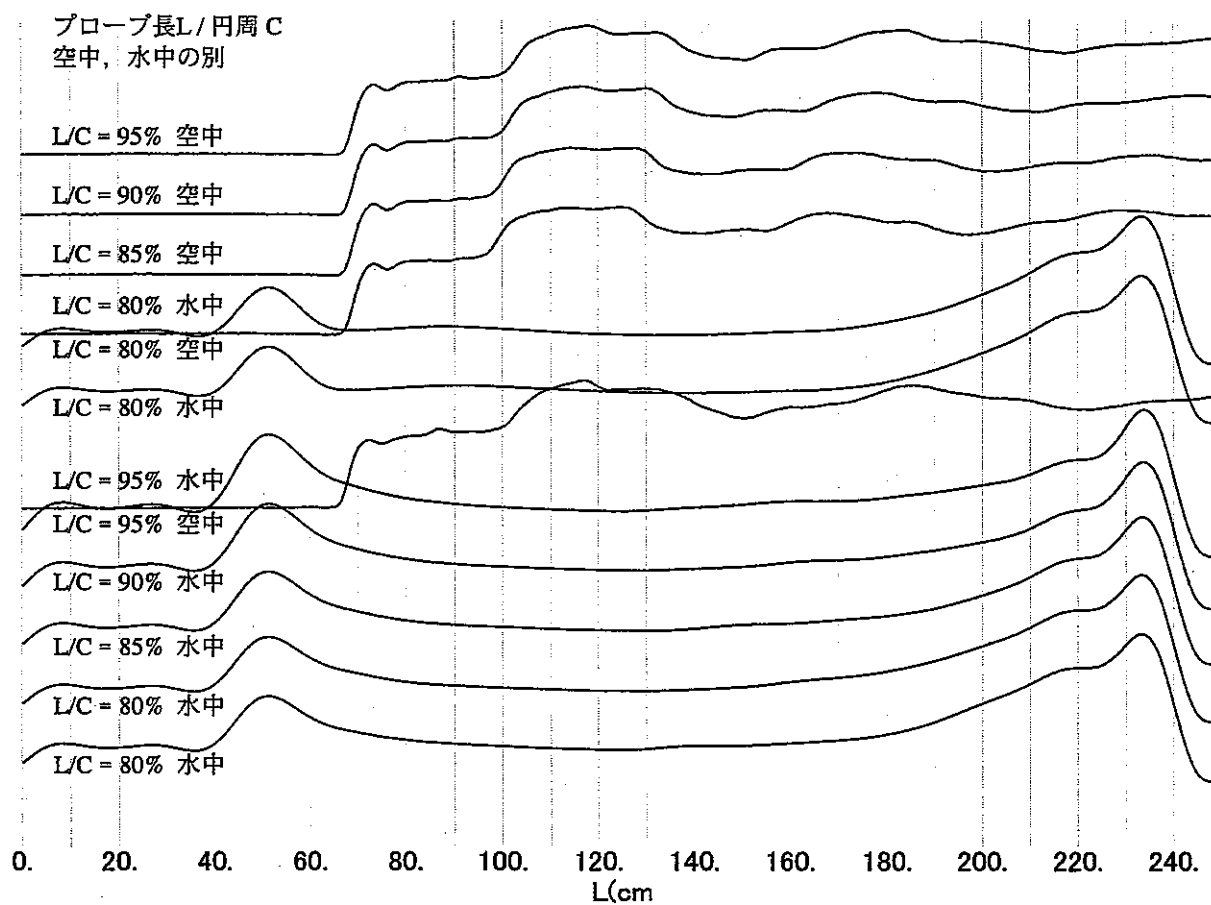
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-2\TP30R-1F.TXT

図 A4.2-2 プローブ長と波形、および読み取り値の変化を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 3.0cm)



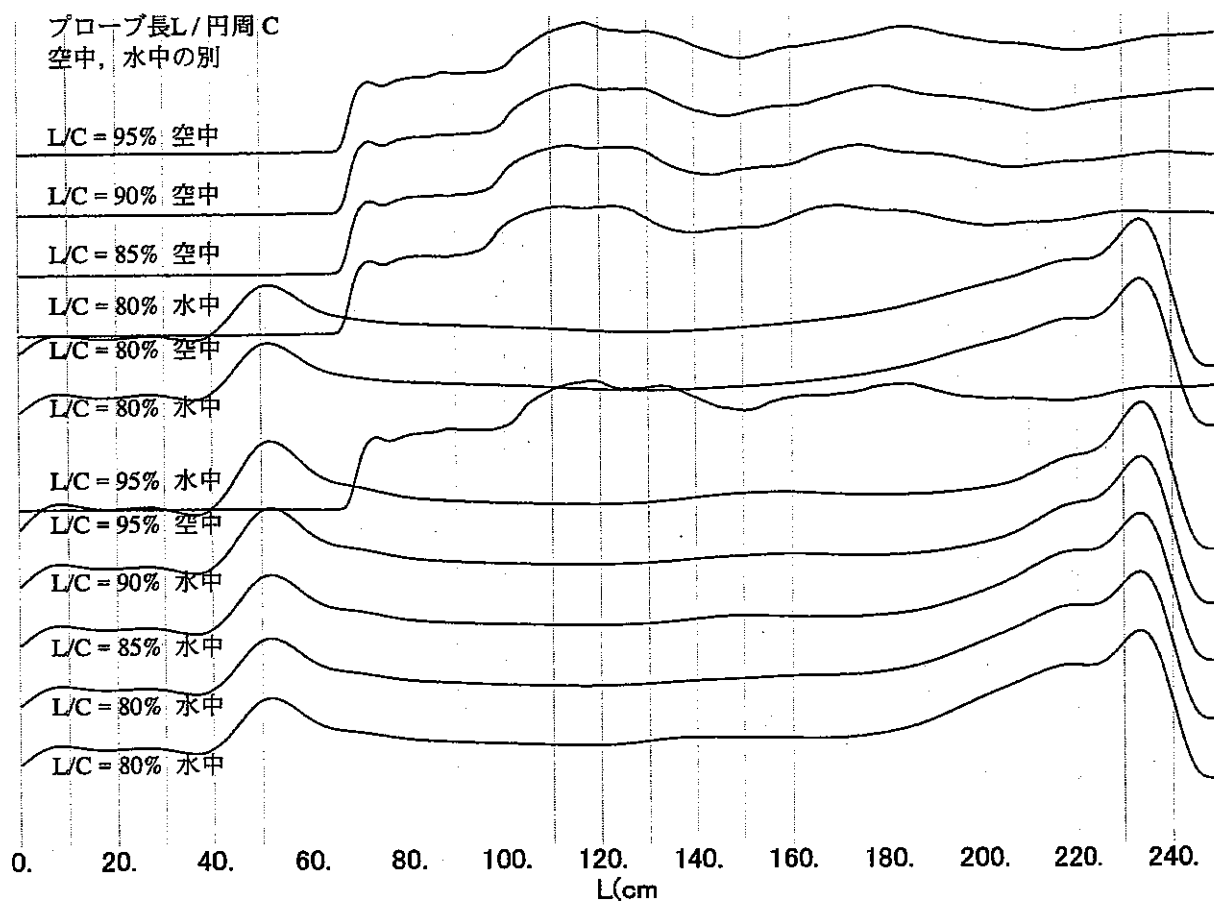
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-2\TP40R-1F.TXT

図 A4.2-3 プローブ長と波形、および読み取り値の変化を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 4.0cm)



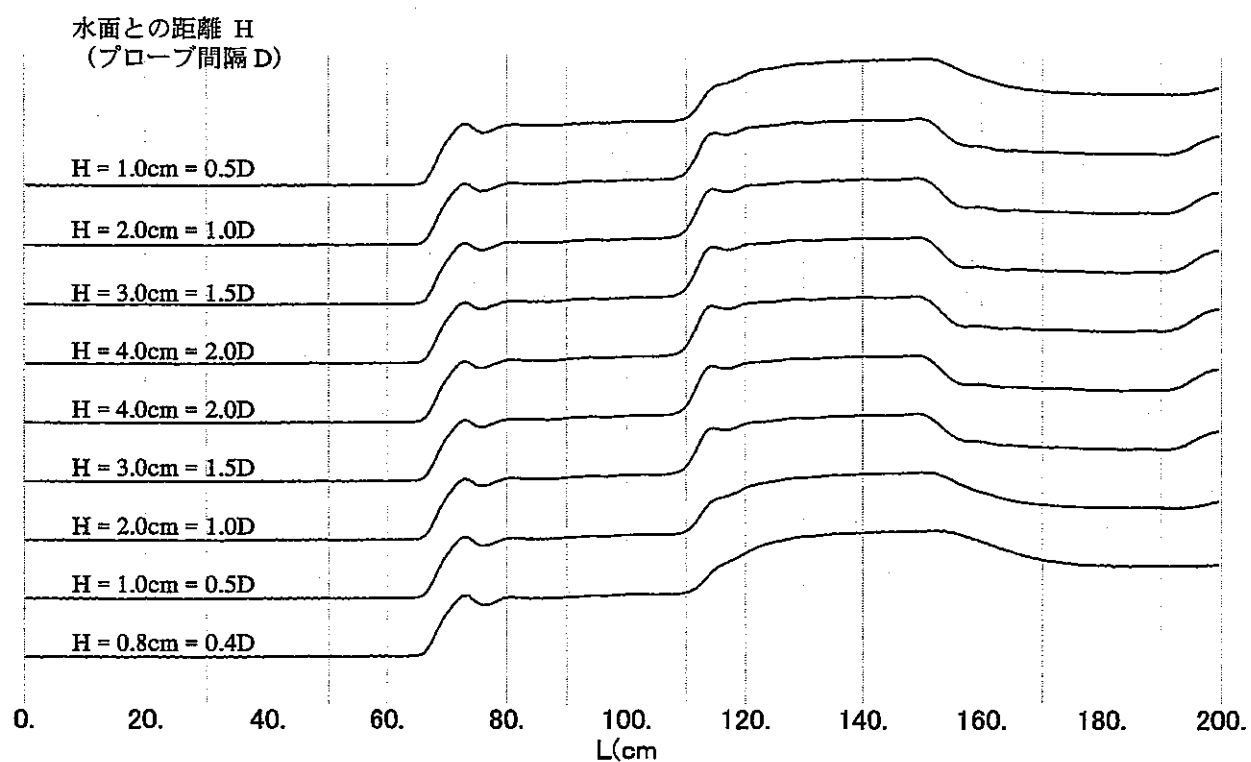
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-2\TP50R-1F.TXT

図 A4.2-4 プローブ長と波形、および読み取り値の変化を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ、プローブ間隔 5.0cm)



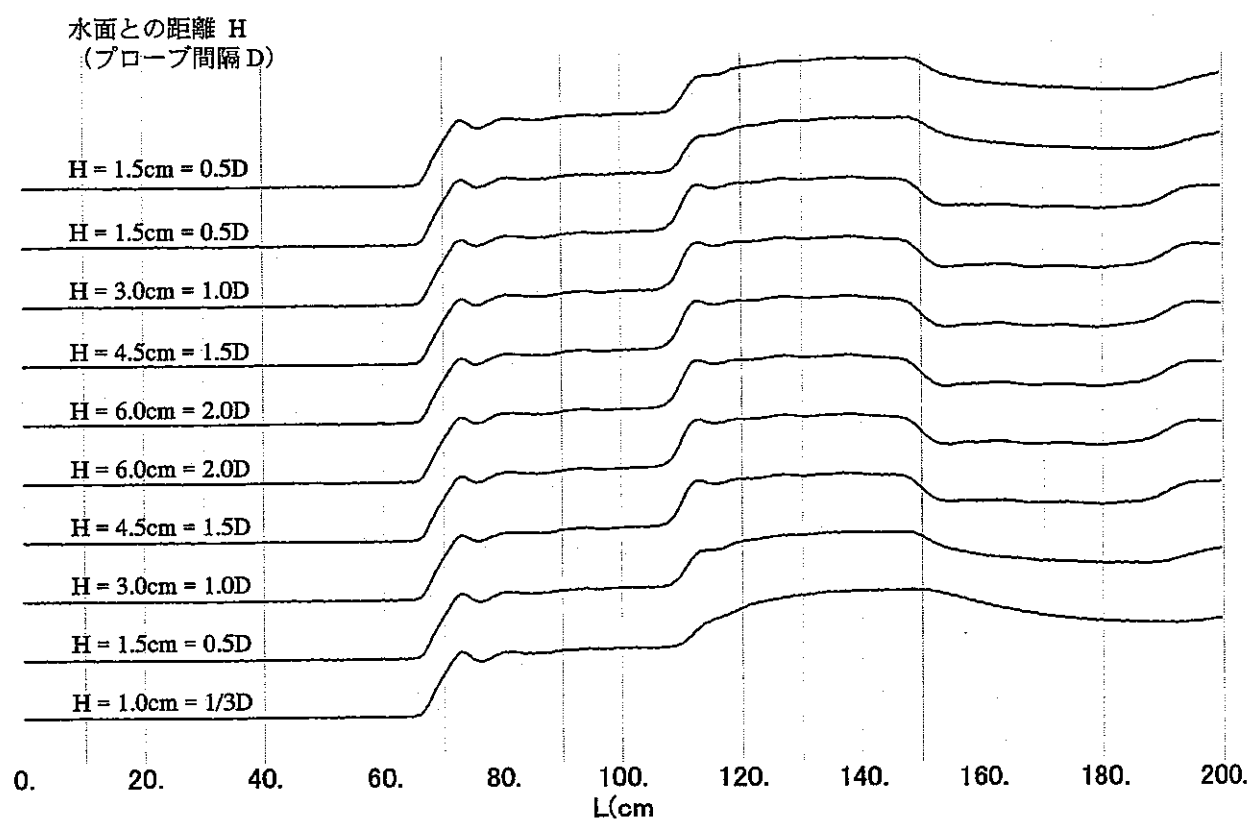
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-2\TP70R-1F.TXT

図 A4.2-5 プローブ長と波形、および読み取り値の変化を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 7.0cm)



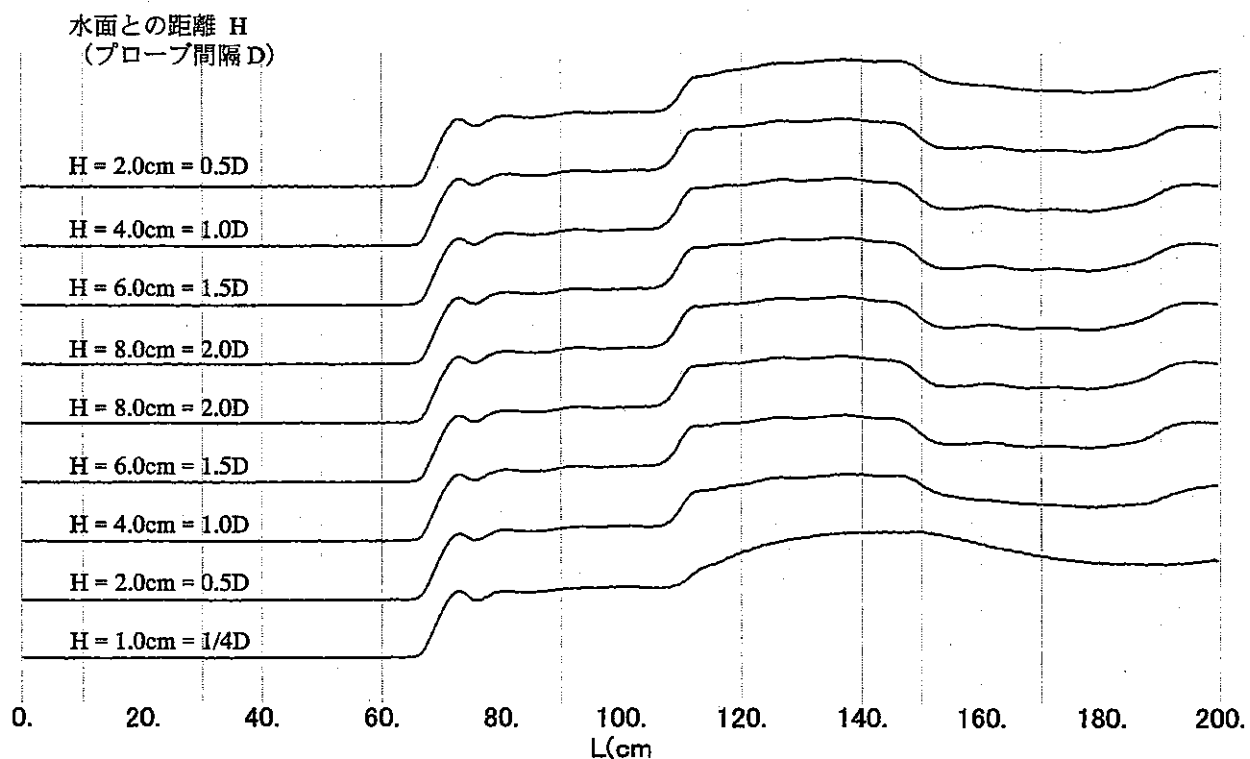
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1B\TP20S-1E.TXT

図 4.3-1 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(軸方向プローブ, プローブ間隔 2.0cm, 空気中で測定)



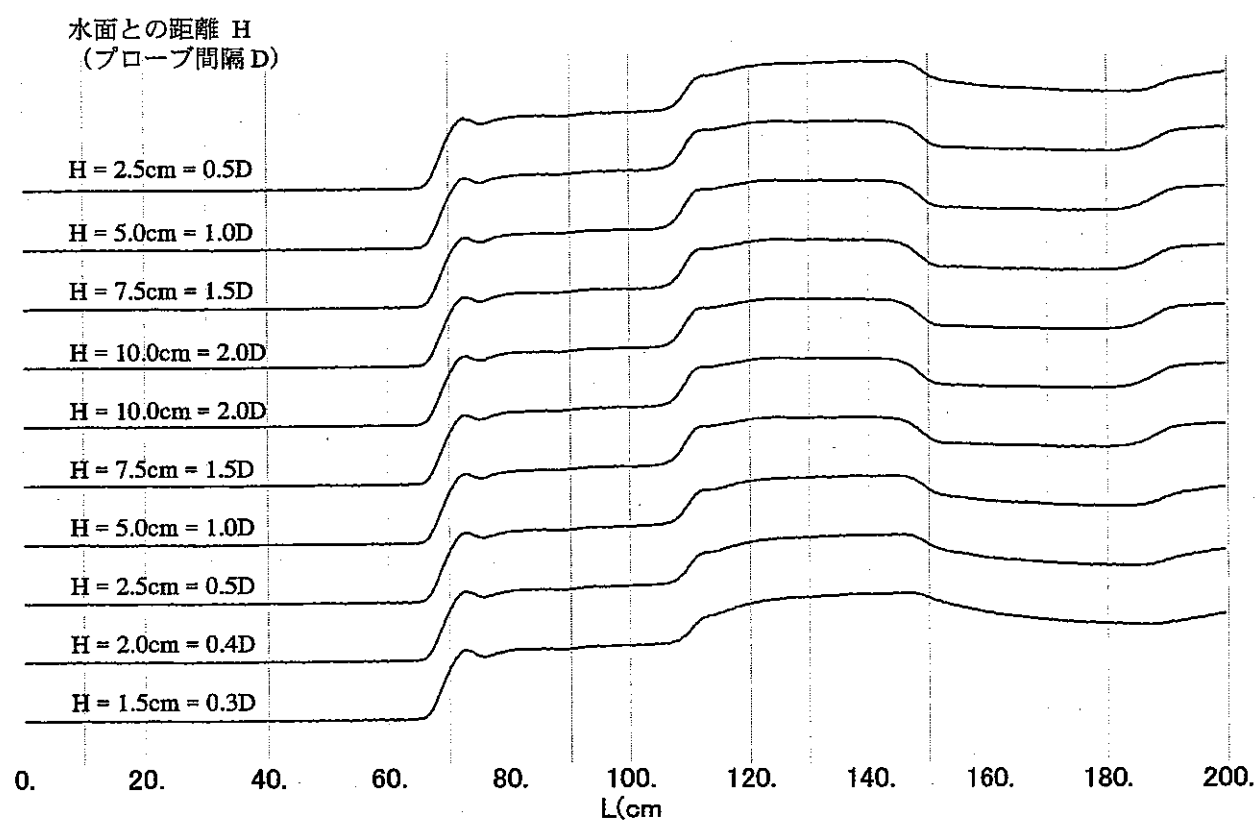
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1B\TP30S-1E.TXT

図 A4.3-2 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(軸方向プローブ, プローブ間隔 3.0cm, 空気中で測定)



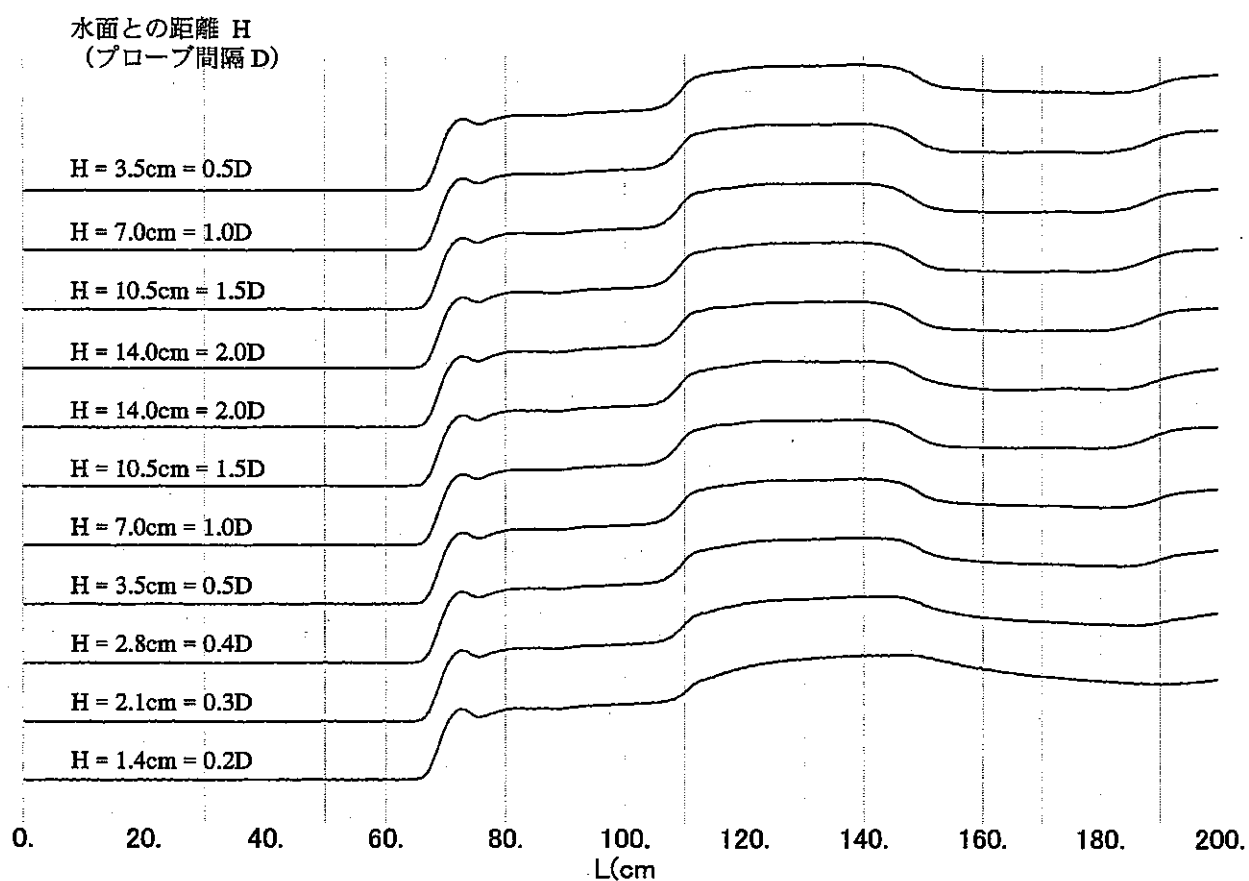
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1B\TP40S-1E.TXT

図 A4.3-3 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(軸方向プローブ，プローブ間隔 4.0cm，空气中で測定)



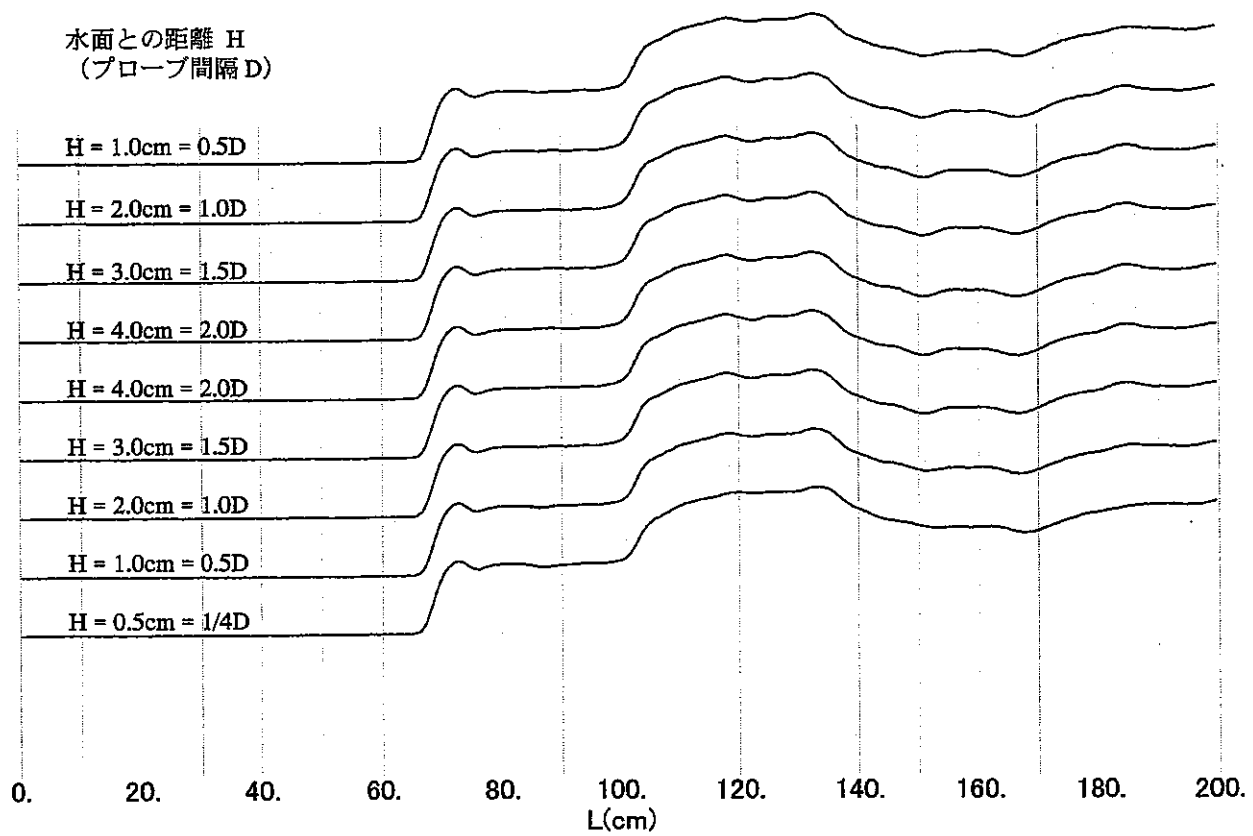
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1B\TP50S-1E.TXT

図 A4.3-4 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(軸方向プローブ, プローブ間隔 5.0cm, 空気中で測定)



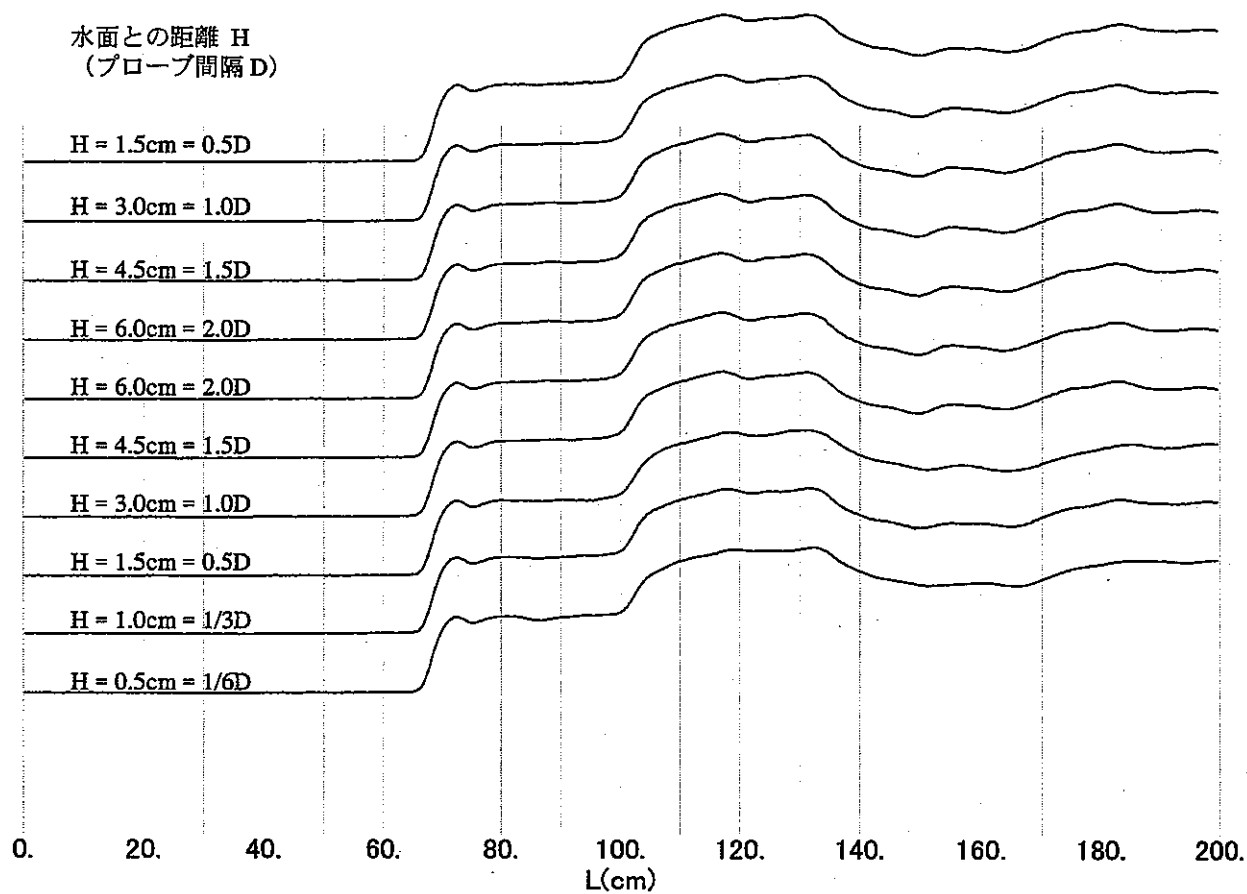
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1B\TP70S-1E.TXT

図 A4.3-5 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(軸方向プローブ，プローブ間隔 7.0cm，空气中で測定)



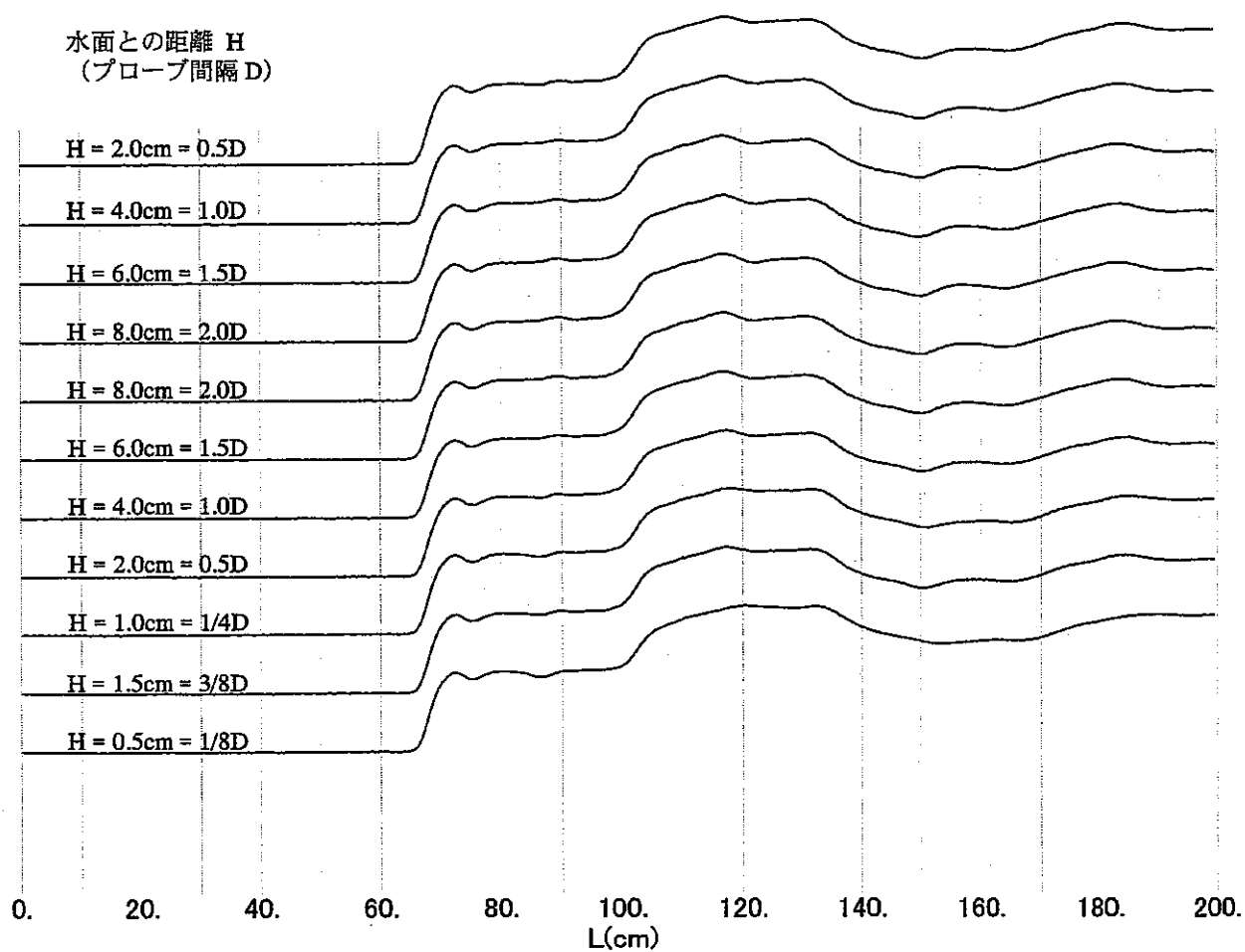
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1A\TP20R-2E.TXT

図 A4.3-6 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ，プローブ間隔 2.0cm，空気中で測定)



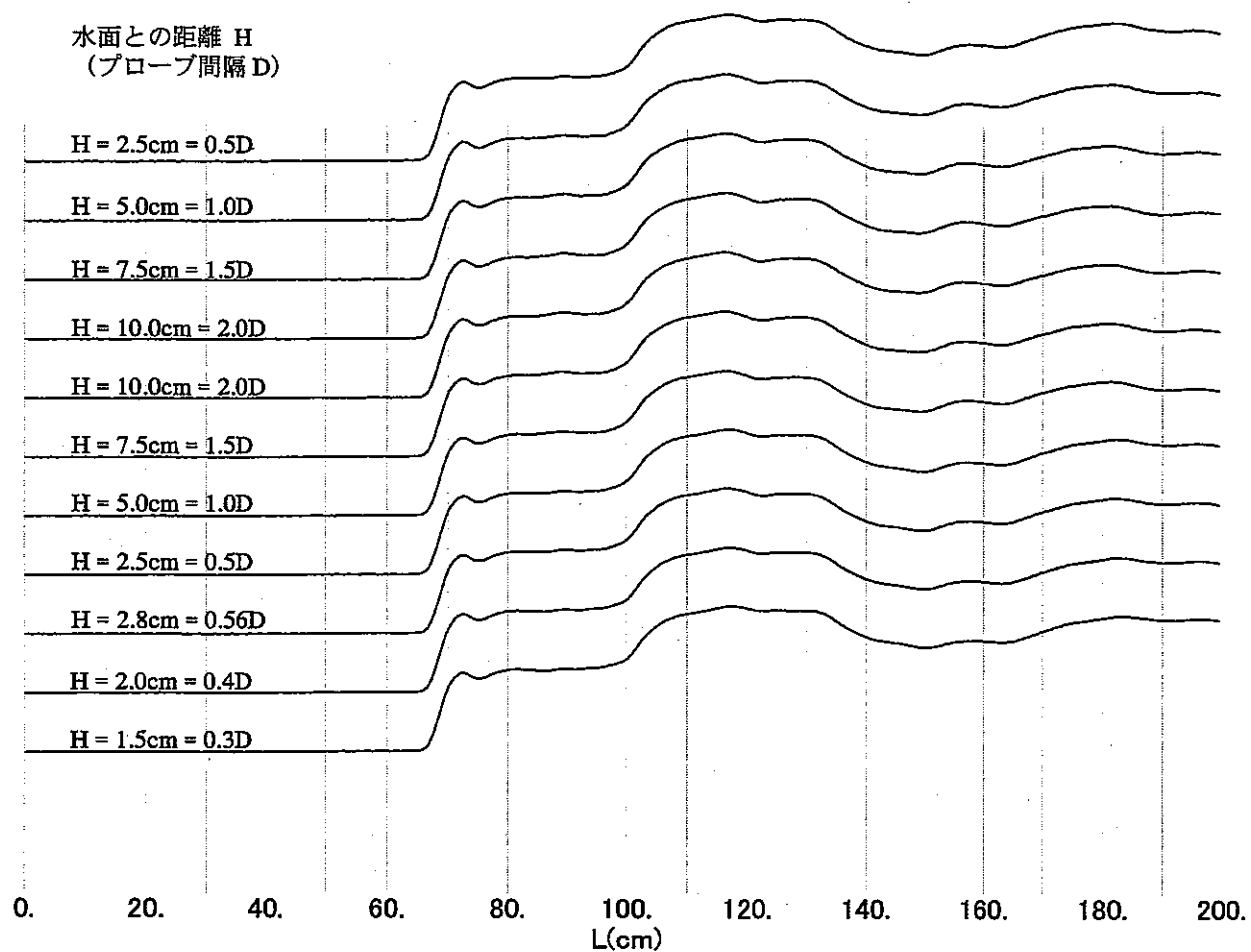
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1A\TP30R-2.TXT

図 A4.3-7 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 3.0cm, 空気中で測定)



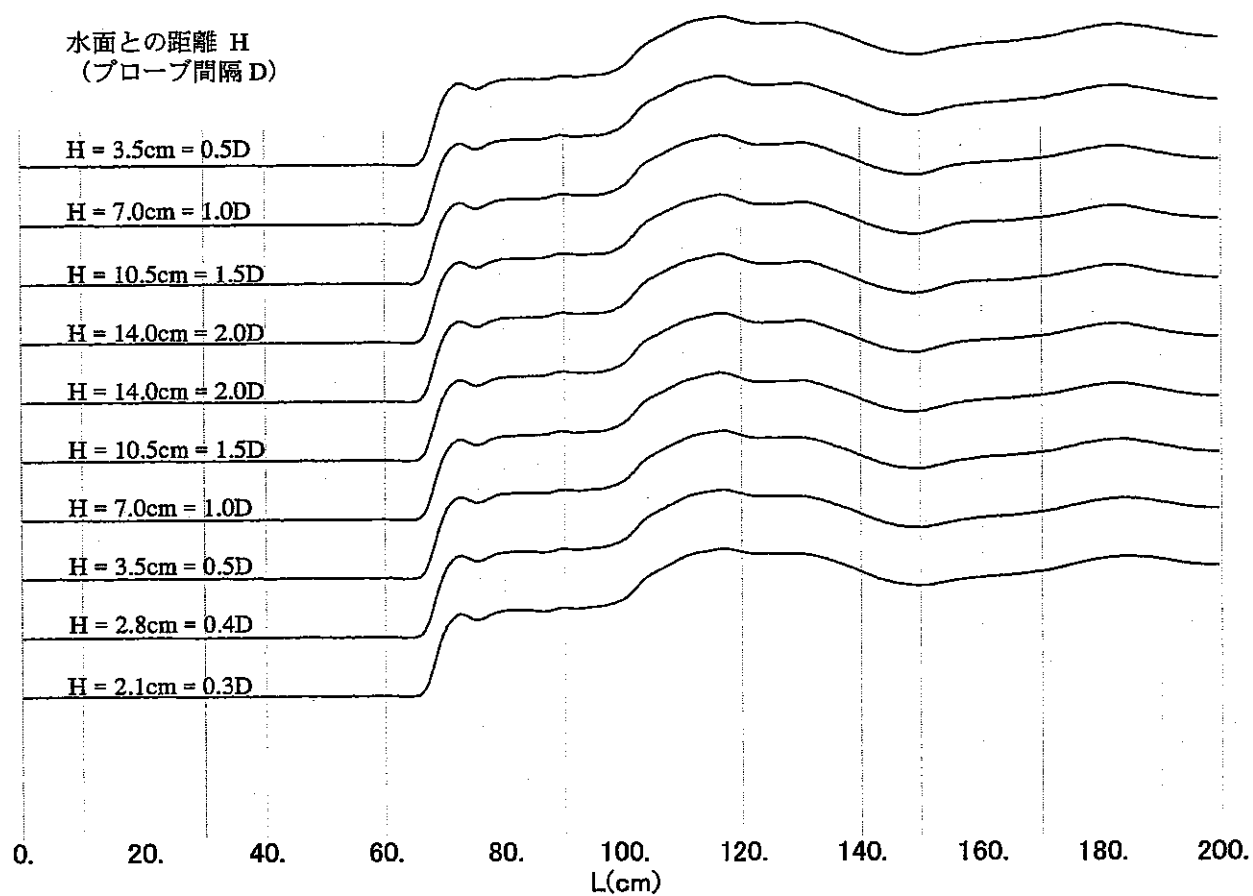
C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1A\TP40R-2.TXT

図 A4.3-8 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 4.0cm, 空気中で測定)



C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1A\TP50R-2.TXT

図 A4.3-9 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ, プローブ間隔 5.0cm, 空気中で測定)



C:\TEMP\TDR\H11\TEST-1A\TP70R-2.TXT

図 A4.3-10 電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形
(円周方向プローブ，プローブ間隔 7.0cm，空気中で測定)

3. 写真

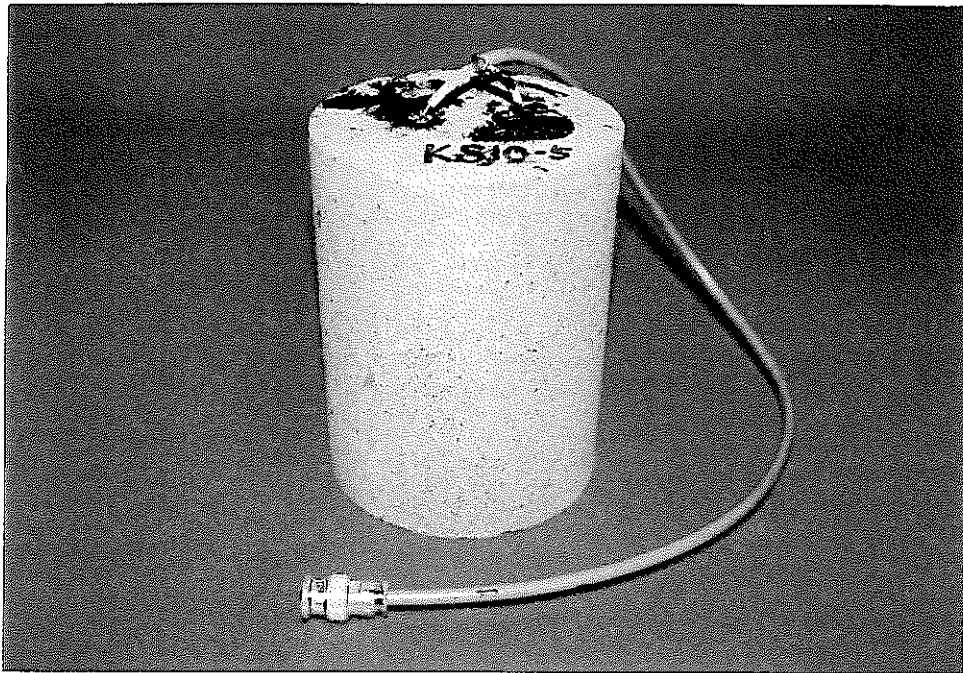


写真 3-1 比誘電率測定に用いた供試体（来待砂岩, KS10-5）



写真 3-2 比誘電率測定に用いた供試体（白川砂岩, SS10-4）

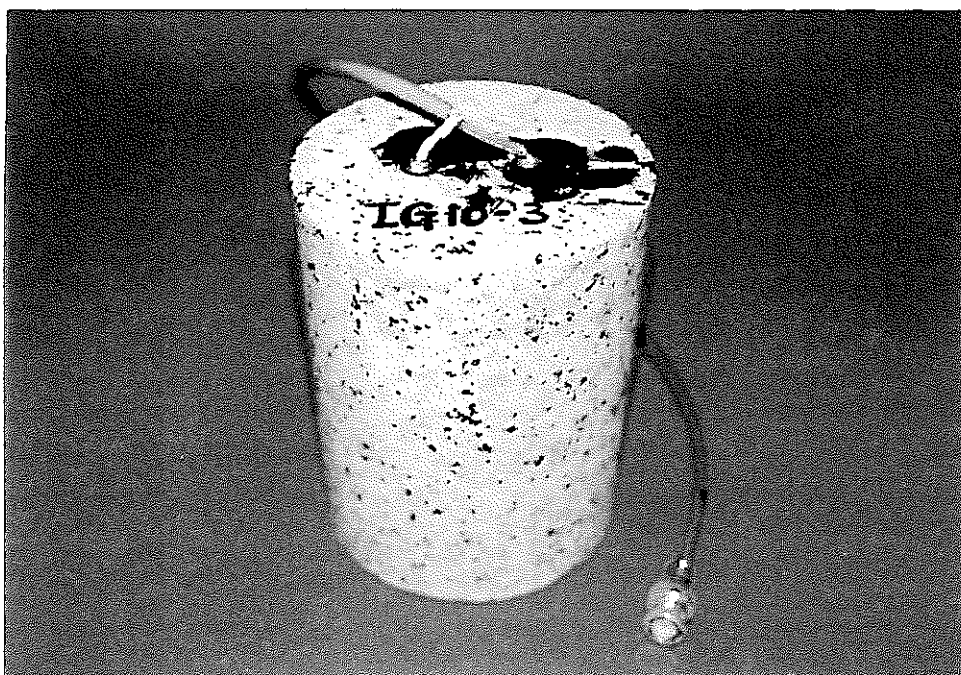


写真 3-3 比誘電率測定に用いた供試体（稲田花崗岩，IG10-3）

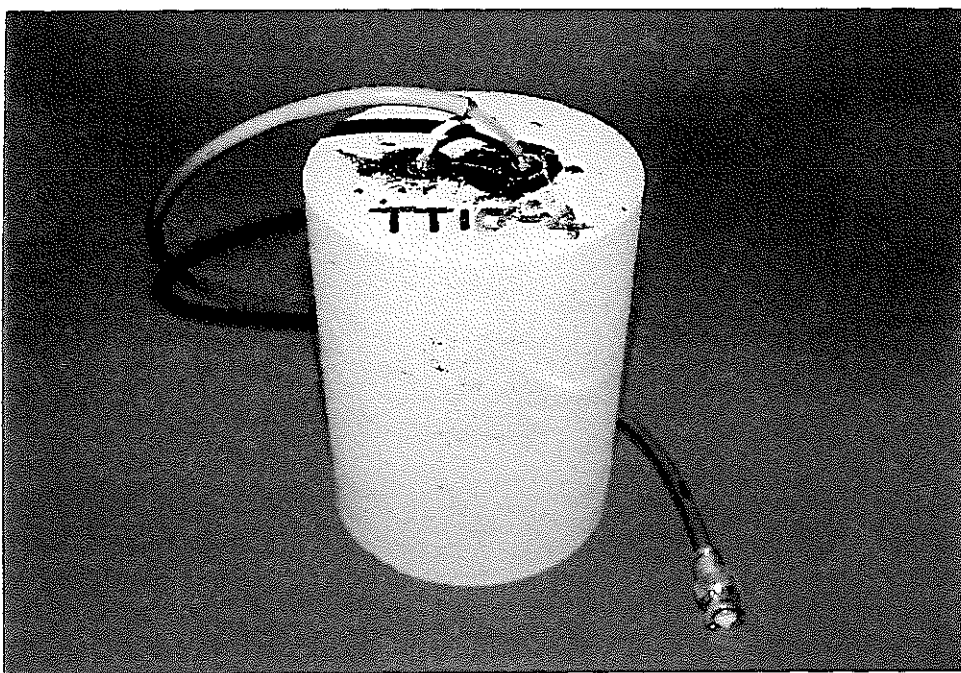


写真 3-4 比誘電率測定に用いた供試体（田下凝灰岩，TT10-4）

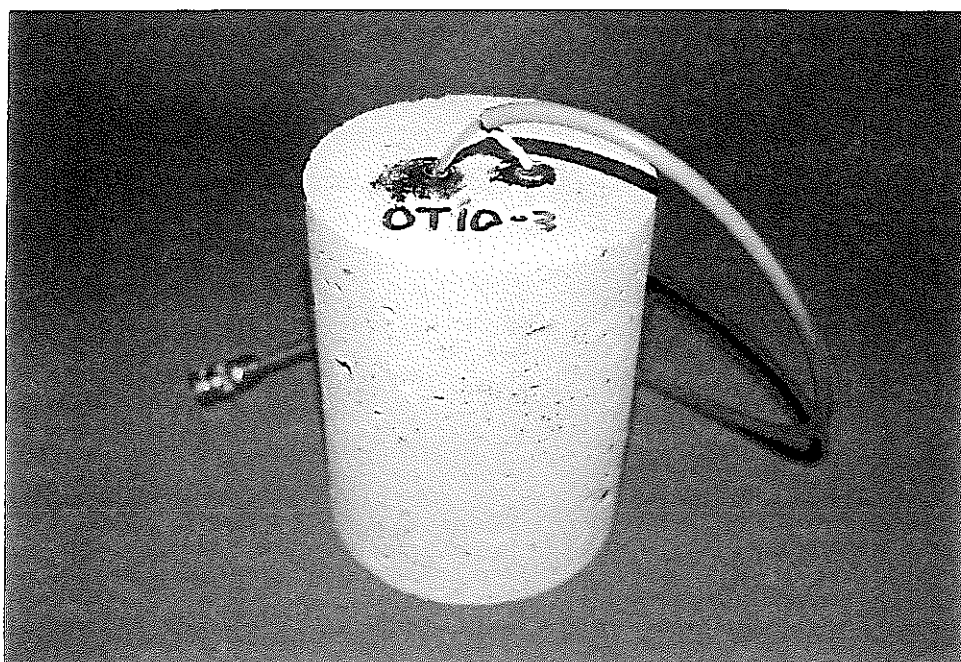


写真 3-5 比誘電率測定に用いた供試体（荻野凝灰岩，OT10-3）

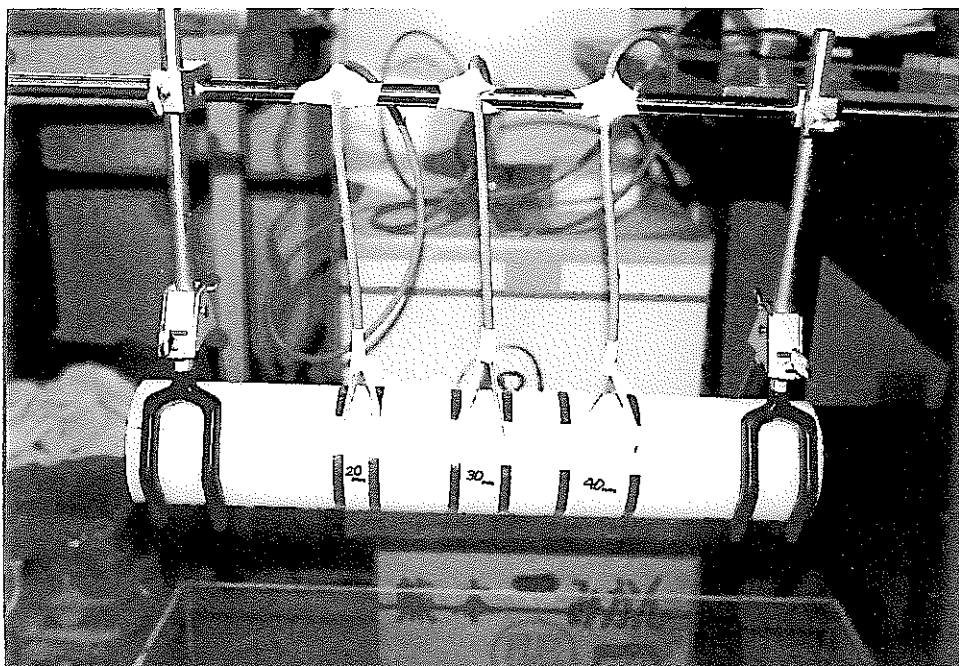


写真 4-1 プローブ長を変化させたときの TDR 波形の変化を調べる試験の状況
(空中での測定, プローブ間隔 2.0cm, 3.0cm, 4.0cm)

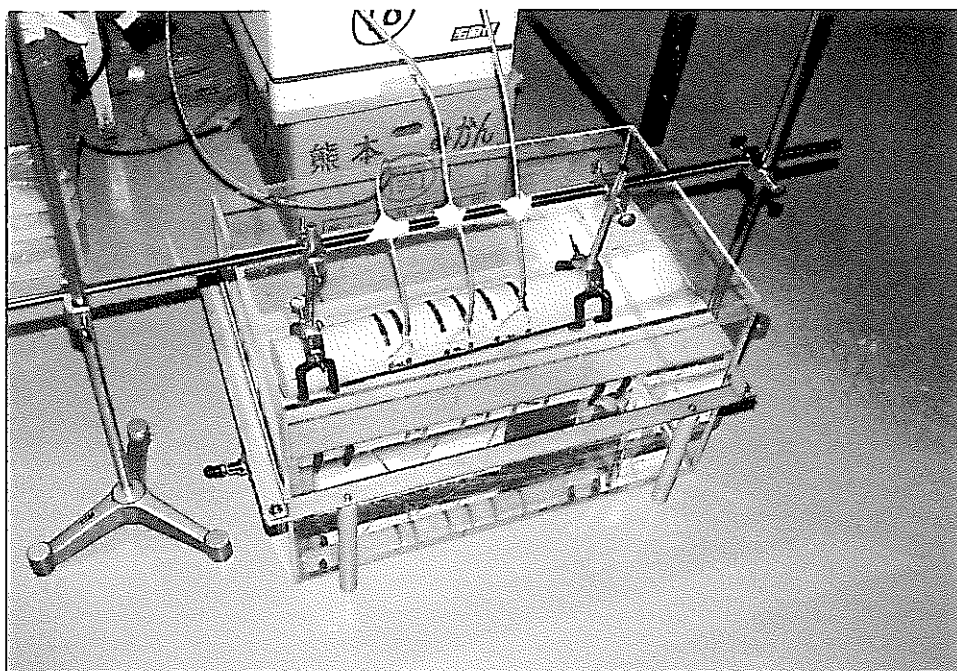


写真 4-2 プローブ長を変化させたときの TDR 波形の変化を調べる試験の状況
(水中での測定, プローブ間隔 2.0cm, 3.0cm, 4.0cm)

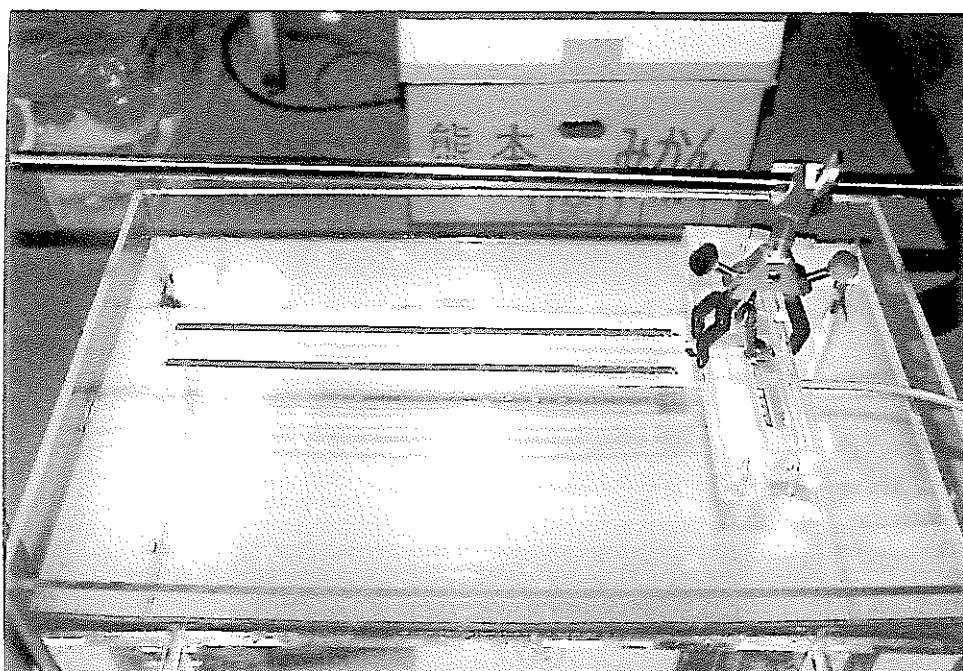


写真 4-3 電磁波の影響範囲を調べる試験の状況
(軸方向プローブ, プローブ間隔 3.0cm)

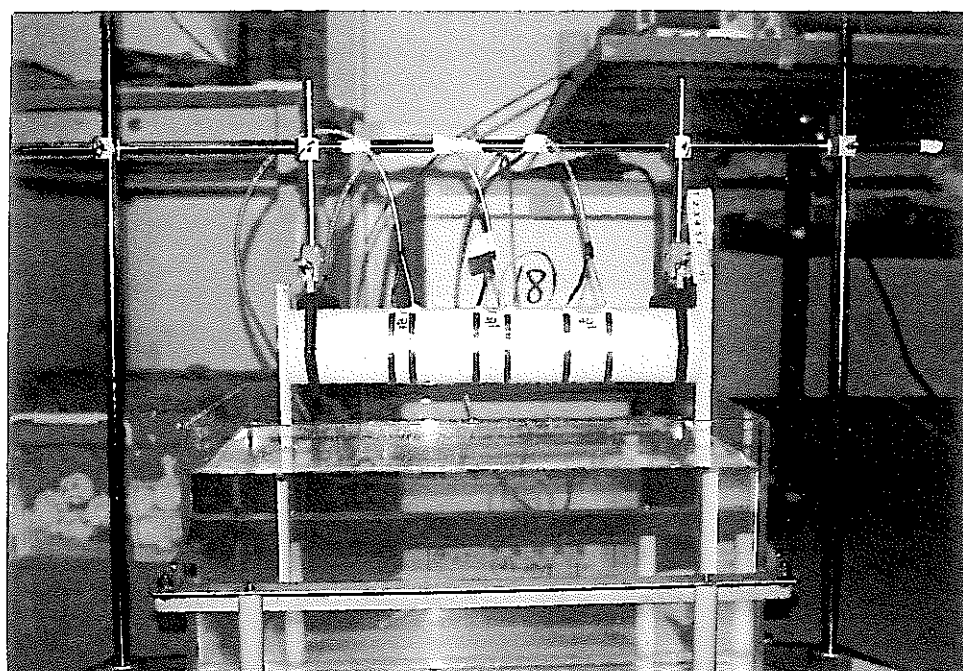


写真 4-4 電磁波の影響範囲を調べる試験の状況
(円周方向プローブ, プローブ間隔 2.0cm, 3.0cm, 4.0cm)

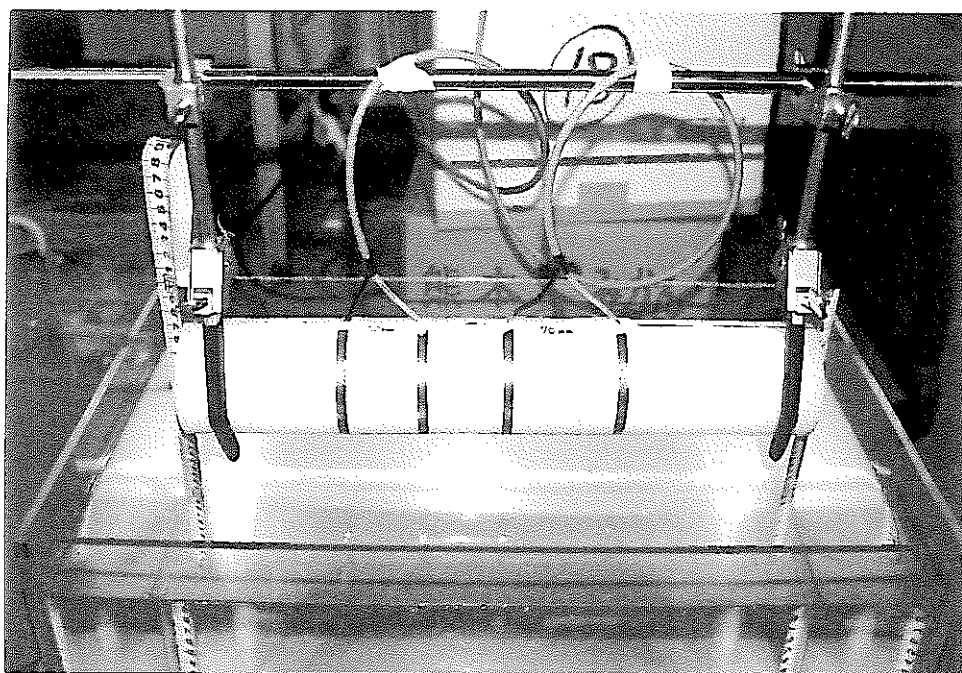


写真 4-5 電磁波の影響範囲を調べる試験の状況
(円周方向プローブ, プローブ間隔 5.0cm, 7.0cm)

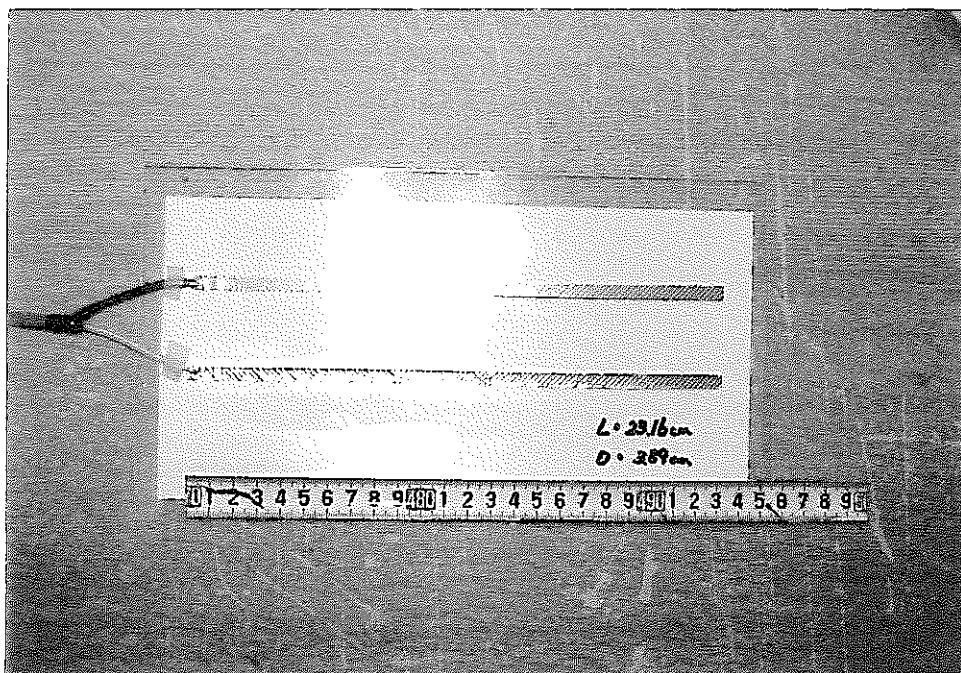


写真 4-6 プラスチック板に貼り付けた TDR テーププローブ

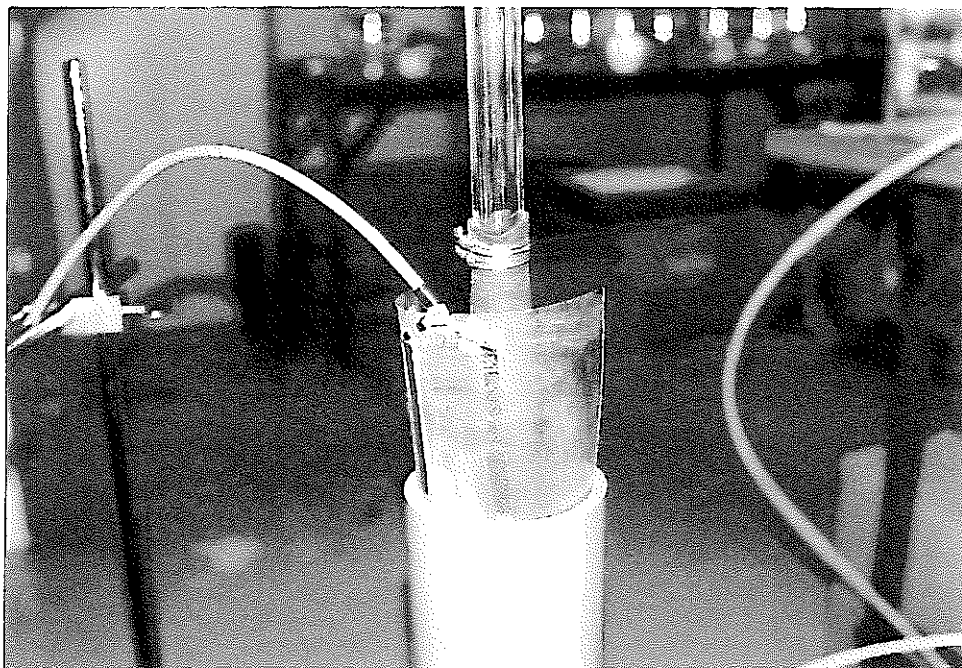


写真 4-7 パッカーの構造と加圧媒体の影響を調べる試験の状況
(軸方向プローブを挿入するところ、空気パッカーを使用)

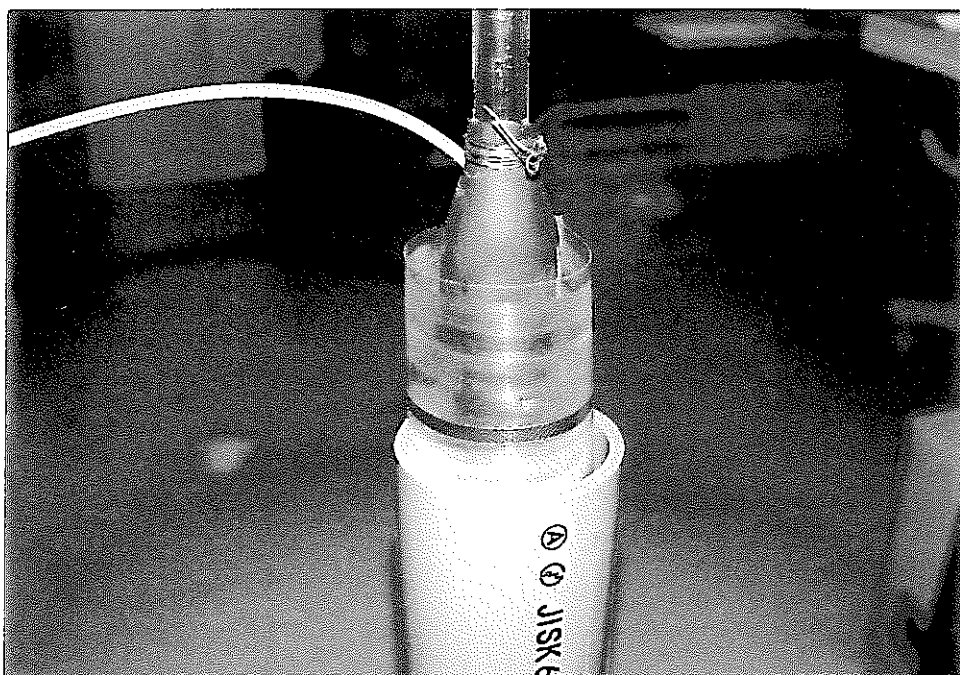


写真 4-8 パッカーの構造と加圧媒体の影響を調べる試験の状況
(円周方向プローブを挿入するところ、水パッカーを使用)

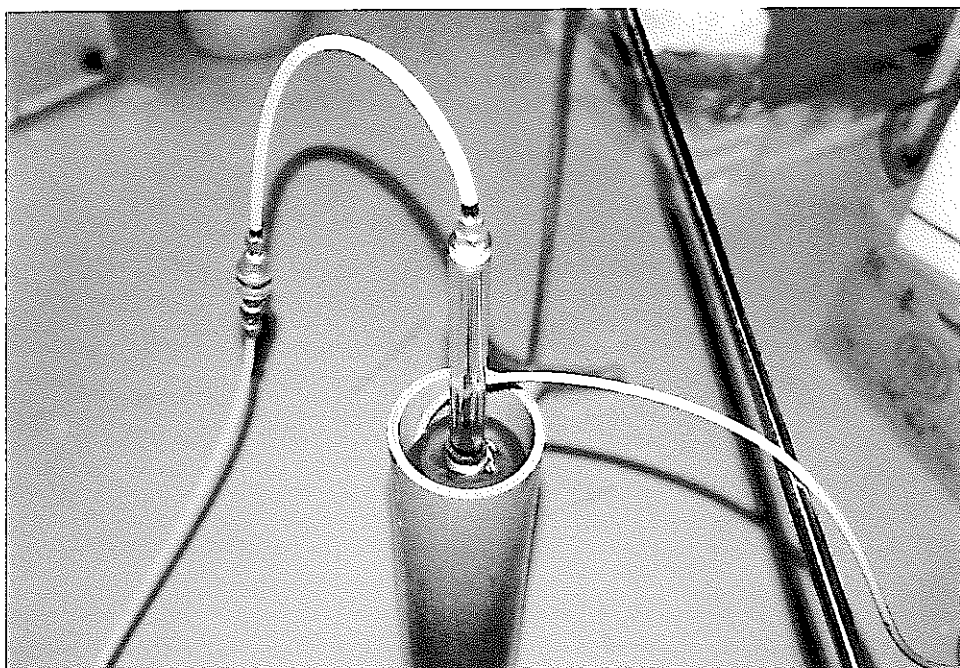


写真 4-9 パッカーの構造と加圧媒体の影響を調べる試験の状況
(空気パッカーを膨らませたところ)

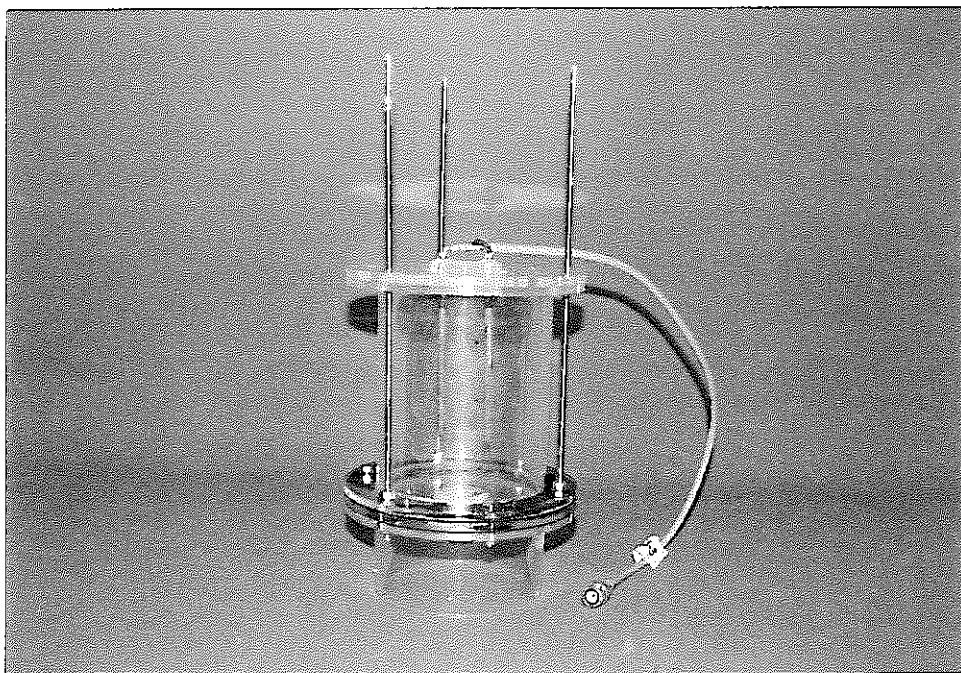


写真 6-1 低比抵抗岩盤への TDR 適用性試験で用いた試験装置

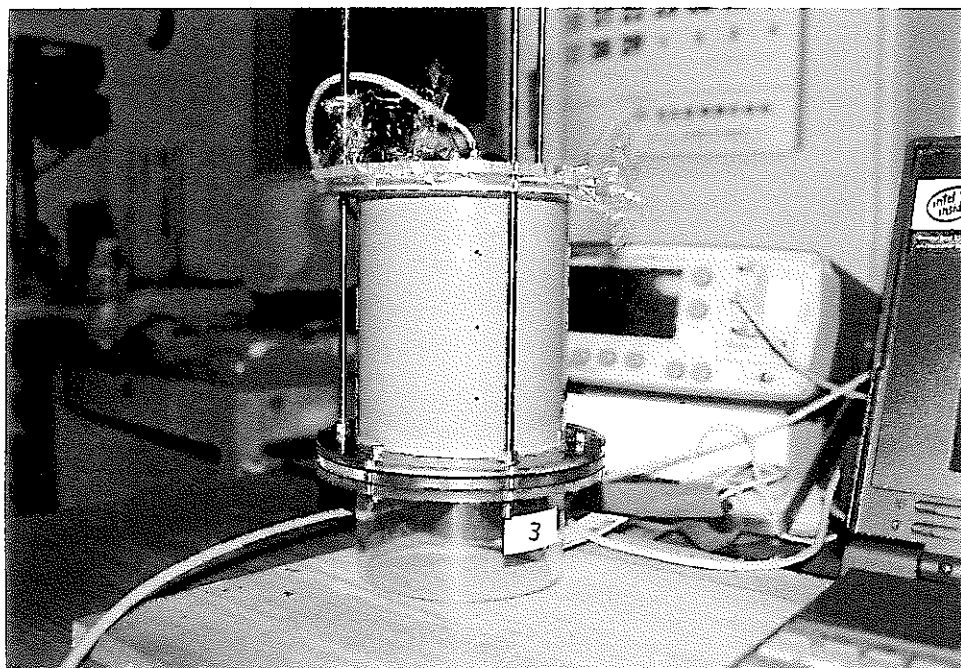


写真 6-2 ベントナイト混合土を充填して測定している状況

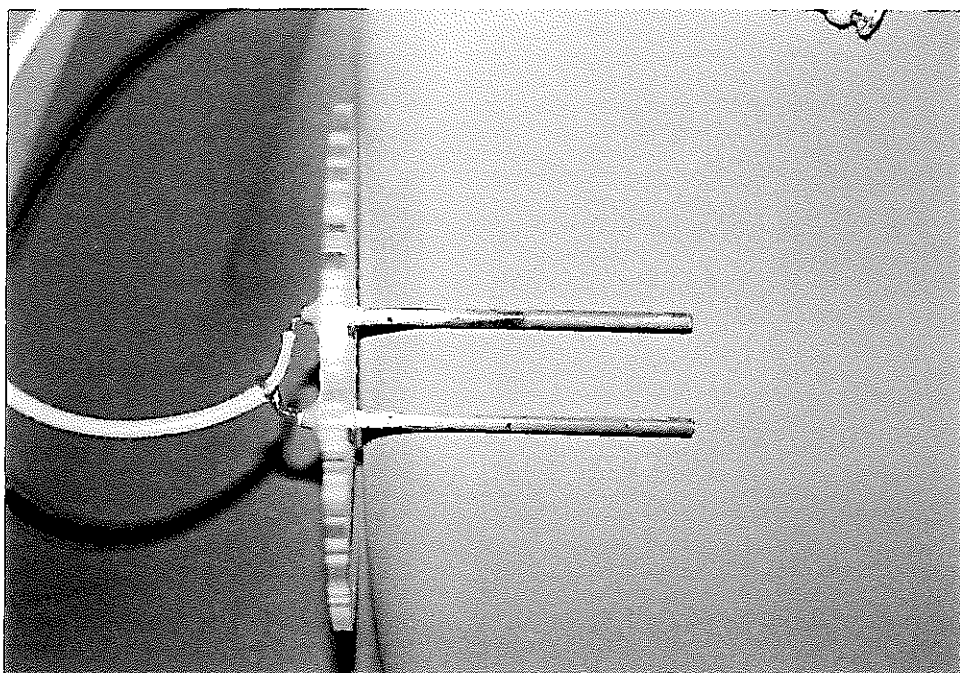


写真 6-3 コーティングを施した TDR プロブ（挿入前）

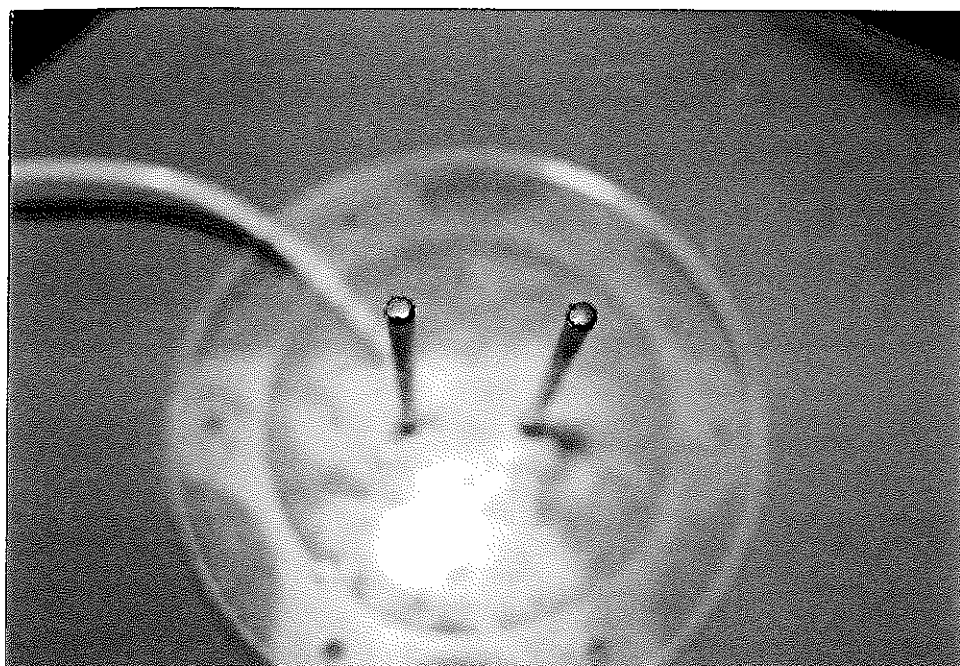


写真 6-4 ゴム片を TDR プロブの先端に貼り付けた状況（挿入前）