

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 業務委託報告書)

2002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)
2002

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 業務委託報告書)

前村庸之*, 細野高康*

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、物質移行特性が変わる可能性があるため、その範囲を定量的に把握することが重要である。しかし、そのような手法は未だ十分に確立されていない。

本研究は、岩盤の不飽和領域を原位置で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、パッカー式プローブを実用的な計測手法として確立させるため、1) パッカー式プローブの原位置試験への適用、2) パッカー式プローブの改良、3) 岩石コアの比誘電率と含水量のキャリブレーション、4) TDR 波形の自動解析手法の適用および改良の検討、を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 原位置で計測された TDR 波形は、反射波の立ち上がりがきわめて不鮮明であり、得られた比誘電率の信頼性が低いと判断された。
- 2) パッカー式プローブの構造上の問題を解決した改良型のプローブを作製した。また、プローブ電極にコーティングを施すことにより、反射波の立ち上がりが改善され、より信頼性の高い波形が得られた。
- 3) 泥質凝灰岩のキャリブレーション曲線は、良好なものが得られなかった。原因として電極と孔壁間のすきまの存在、コア内の水分の不均一性、不適切な同軸ケーブル長に起因する定位置反射の存在が考えられた。
- 4) 波形解析プログラムは、室内試験の TDR 波形には有効であったが、原位置試験のものに対しては適用性が低かった。プログラムに対話的処理、ノイズ除去、データ補間の機能を加えることが必要である。

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との契約により実施した研究成果に関するものである。

契約番号：1306A00663

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 地質環境長期予測研究グループ 松井裕哉

* 株式会社ダイヤコンサルタント

A study on in-situ method for measuring unsaturated zone

Tsuneyuki Maemura* and Takayasu Hosono*

Abstract

It is generally considered an unsaturated zone can be generated in the vicinity of a drift after excavation. In such a zone, invasion of oxygen-contained air possibly changes the geochemical environments (e.g. redox condition) and the mass transfer characteristics of the rock mass. Thus, methods for measuring the extent of such unsaturated zone are quite important. However, such methods have not been fully developed at this moment.

This study aims to develop the quantitative methods for measuring unsaturated zone, and to bring those methods into practical level. In this year, studies were conducted focusing on following points: 1) Application of the packer-type probe to in-situ measurements of rock, 2) Improvement on the structure of the packer-type probe, 3) Calibration tests of dielectric constants of rock to its water contents, 4) Evaluations of the automatic TDR wave analysis methods. Conclusions were obtained as below:

- 1) TDR waveforms measured with the packer-type probe had very unclear reflection parts, and calculated dielectric constants were not reliable.
- 2) The new design of the packer-type probe solved some structural problems in the old one. Unclearness in the reflective TDR waveforms was improved by surface coating of TDR waveguides.
- 3) The calibration data of muddy tuff was not reliable, possibly due to the air gap between TDR waveguides and hole surfaces, inhomogeneous distribution of water within the specimens, and inappropriate lengthed coaxial cables.
- 4) The TDR waveform analysis program was applicable to most of laboratory test data, but not so applicable to in-situ test data. For bringing the program into practical use, some features should be added such as improved user interfaces, noise cancelation and data interpolation.

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

JNC Liaison: Hiroya Matsui

Neotectonics Research 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 過去の研究概要.....	1
1.4 研究委託の内容.....	2
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
2.1.1 平成5年度研究.....	3
2.1.2 平成6年度研究.....	3
2.1.3 平成7年度研究.....	3
2.1.4 平成8年度研究.....	4
2.1.5 平成9年度研究.....	5
2.1.6 平成10年度研究.....	6
2.1.7 平成11年度研究.....	6
2.1.8 平成12年度研究.....	7
2.2 平成13年度の実施内容.....	8
3. パッカー式プローブの原位置試験への適用.....	9
3.1 パッカー式プローブの概要.....	9
3.2 原位置試験.....	11
3.2.1 試験孔と原位置試験実施時期.....	11
3.2.2 孔壁観察.....	11
3.2.3 TDR計測.....	15
3.3 考察.....	25
3.3.1 同軸ケーブル長と比誘電率との関係.....	25
3.3.2 比誘電率の深度分布.....	28
3.3.3 パッカー式プローブの構造上の問題点.....	29
3.4 まとめ.....	31
4. パッカー式プローブの改良.....	32
4.1 パッカー式プローブの問題点と改良方法.....	32
4.2 高導電率岩盤に適用するためのパッカー式プローブの改良検討.....	40

4.3	パッカー式プローブの性能試験	49
4.3.1	目的	49
4.3.2	試験装置	49
4.3.3	試験方法	51
4.3.4	試験結果	51
4.3.5	考察	55
4.4	まとめ	56
5.	岩石コアの比誘電率と含水率のキャリブレーション	57
5.1	目的	57
5.2	供試体	57
5.3	プローブ電極設置方法	58
5.4	試験装置	58
5.5	測定方法	59
5.5.1	凝灰質泥岩	59
5.5.2	コンクリート	59
5.6	実験結果	64
5.7	考察	73
5.7.1	泥質凝灰岩	73
5.7.2	コンクリート	80
5.8	まとめ	81
6.	改良型パッカー式プローブの適用試験	82
6.1	目的	82
6.2	原位置試験	82
6.2.1	試験孔と試験実施時期	82
6.2.2	実施項目	82
6.2.3	TDR 計測	83
6.2.4	試験結果	83
6.2.5	考察	94
6.3	室内試験	96
6.3.1	試験方法	96
6.3.2	試験結果	96
6.3.3	考察	97
6.4	プローブの総合的な評価	98
6.5	まとめ	98

7. TDR 波形の自動解析手法の適用と改良	100
7.1 目的	100
7.2 岩石の TDR 波形への適用	100
7.2.1 波形の分類	100
7.2.2 各分類の波形の例	101
7.3 波形解析プログラムの改良点	108
7.4 まとめ	109
8. まとめ	111
8.1 本年度の研究成果	111
8.1.1 パッカー式プローブの原位置測定への適用	111
8.1.2 パッカー式プローブの改良	111
8.1.3 岩石コアの比誘電率と含水率のキャリブレーション	111
8.1.4 改良型パッカー式プローブの適用試験	111
8.1.5 TDR 波形の自動解析手法の適用と改良	112
8.2 今後の課題	112
謝辞	115
参考文献	115

付録

1. 孔壁画像
2. TDR 波形データ

表目次

表 3.1-1 パッカー式プローブの試作機の仕様	10
表 3.2-1 試験孔の概要	11
表 3.2-2 TDR 計測に用いた機材	15
表 4.2-1 プローブの改良検討項目および内容	40
表 4.2-2 プローブの組合せ	42
表 5.2-1 コア供試体の一覧表および主要物性値	57
表 5.6-1 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1001）	65
表 5.6-2 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1002）	66
表 5.6-3 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1003）	67

表 5.6-4	比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1101）	68
表 5.6-5	比誘電率測定結果一覧表（コンクリート C1201）	69
表 5.6-6	比誘電率測定結果一覧表（コンクリート C1202）	70
表 6.2-1	TDR 計測に用いた機材（変更分）	83
表 6.4-2	プローブの総合的な評価	98
表 8.2-1	今年度の研究成果と今後の課題	114

図目次

図 3.1-1	パッカー式プローブによる測定概念図	9
図 3.1-2	パッカー式プローブの試作機の構造	10
図 3.2-3	パッカー式プローブによる TDR 波形計測の手順図	16
図 3.2-4	同軸ケーブル長を変化させたときの TDR 波形	22
図 3.2-5	同軸ケーブル長を変化させたときの比誘電率	23
図 3.2-6	深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔）	24
図 3.2-7	深度方向の比誘電率分布（01SI-11 孔）	24
図 3.3-8	電磁波伝搬におけるひずみの分類	26
図 3.3-9	同軸ケーブル長の違いによる入射波の立ち上がりの変化	26
図 3.3-10	微分法の概要	27
図 4.1-1	改良型パッカー式プローブの構造	33
図 4.3-1	パッカー式プローブの性能確認試験の概念図	49
図 4.3-2	パッカー式プローブの圧力の違いによる比誘電率の違い	52
図 4.3-3	標準に対し項目を変化させたときの TDR 波形の変化	53
図 4.3-4	各種プローブで測定した飽和したコンクリート円管の比誘電率	54
図 4.3-5	内壁を水で濡らしたコンクリート円管の比誘電率測定値	55
図 5.3-1	空隙を残さないプローブ電極の設置方法	58
図 5.4-2	室内コアキャリブレーション試験の模式図	59
図 5.6-1	飽和度と比誘電率との関係（泥質凝灰岩）	71
図 5.6-2	体積含水率と比誘電率との関係（泥質凝灰岩）	71
図 5.6-3	飽和度と比誘電率との関係（コンクリートコア）	72
図 5.6-4	体積含水率と比誘電率との関係（コンクリートコア）	72
図 5.7-1	飽和度 100%の試料の TDR 波形	76
図 5.7-2	M1001 の TDR 波形（一部）	77
図 5.7-3	実測キャリブレーション曲線と推定値との比較（泥質凝灰岩）	79
図 5.7-4	実測キャリブレーション曲線と推定値との比較（コンクリート）	80

図 6.2-1	パッカー圧を変化させたときの TDR 波形（プローブ No.1）	84
図 6.2-2	パッカー圧を変化させたときの TDR 波形（プローブ No.4）	84
図 6.2-3	パッカー圧を変化させたときの TDR 波形（プローブ No.8）	85
図 6.2-4	パッカー圧の変化に対する比誘電率の変化（プローブ 1, 4）	86
図 6.2-5	各種プローブで得られた TDR 波形（その 1）	87
図 6.2-6	各種プローブで得られた TDR 波形（その 2）	88
図 6.2-7	各種プローブで得られた岩盤の比誘電率	89
図 6.2-8	プローブ長を変化させたときの TDR 波形の変化	90
図 6.2-9	岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔）	91
図 6.2-10	岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔，プローブ No.7）	92
図 6.2-11	岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔，プローブ No.15）	93
図 6.2-12	岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔，プローブ No.16）	93
図 6.3-1	パッカー式プローブの性能確認試験の概念図	96
図 6.3-2	パッカー式プローブで測定したコンクリート円管の比誘電率	97
図 7.2-1	岩石の TDR 波形の分類	101
図 7.2-2	コンクリートコアの TDR 波形例（C1201）	102
図 7.2-3	コンクリート円管の TDR 波形例（プローブ No.7, No.16）	102
図 7.2-4	泥質凝灰岩コアの TDR 波形例（M1001）	104
図 7.2-5	原位置岩盤の TDR 波形例（プローブ No.1, No.4）	104
図 7.2-6	泥質凝灰岩およびコンクリートの TDR 波形例（M1001, C1201）	105
図 7.2-7	飽和した泥質凝灰岩の TDR 波形（M1001, M1002）	107
図 7.2-8	原位置岩盤の TDR 波形例（プローブ No.7, No.12）	108

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、空洞周辺の岩盤に不飽和領域が発生する可能性がある。不飽和領域が生じるのは、空洞壁面からの水の蒸発速度が、岩盤内から空洞壁面へ向かう水の移動速度を上回る場合である。このような場合、不飽和領域の拡大とともに空洞内の酸素を含んだ空気が岩盤へ侵入し、地下水の酸化還元電位が変化することにより岩盤中の物質移行特性が変化すると考えられる。また、空洞の埋め戻し等により周辺岩盤が再び水で飽和した後も、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ある。したがって、岩盤に空洞を掘削して地下施設を建設する際には、地下施設の性能を評価する上で不飽和領域の広がりを定量的に把握する必要があると考えられる。

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および解析手法の開発を目的として、平成5年度から計測手法に関する室内試験および原位置試験と、解析手法に関する研究を実施してきた。その結果、不飽和領域の計測手法に関しては、電磁波を利用した計測手法を用いることにより、原位置岩盤の飽和・不飽和状態をある程度推定できる見通しを得た。そして、平成12年度には原位置測定用のパッカー式プローブを試作し、室内におけるキャリブレーション試験や、TDR波形読み取りおよび解析プログラムと組み合わせることで、岩盤の含水率測定システムを構築できる可能性を示した。

今年度は、これまでに実施した研究成果を基礎におきながら、パッカー式プローブを用いた岩盤の含水率測定システムについて、実用的な計測手法としての確立と信頼性の向上を目指し、適用性の検討を通じて問題点を抽出し、改良を行うものとする。

1.2 研究委託の範囲

平成13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 過去の研究概要

昨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) TDR (Time Domain Reflectometry: 時間領域反射法) などの方法を用いて岩石の比誘電率を測定することにより、その含水率を推定することができる。さらに、その岩石の有効間隙率が既知であれば、飽和度の算出も可能である。
- 2) 岩石コアを対象とした TDR については、プローブ電極の設置方法を改良する

ことにより、岩石の正確な比誘電率が測定できるようになった。

- 3) 原位置計測手法として TDR および孔間レーダー法を試行し、これらの計測手法の適用性を確認した。TDR については、岩盤にロッド式プローブを設置することは困難であり、これに代わる方法としてパッカー式プローブを考案した。孔間レーダー法は、プローブの大きさの制約から壁面近傍（壁面から 1 m 以内）の測定が困難であることが分かった。
- 4) パッカー式プローブの実用化を目指して、その構造および計測手法に関する詳細な検討を行い、試作機を作製した。
- 5) TDR 波形データの自動解析手法として、微分法に基づく反射点の解析プログラムを作成した。これを室内試験データに適用し、より客観的に反射点を検出することができ、マニュアル法と同等以上の精度が期待できることを確かめた。

一方、これまでの研究において以下のような課題が残されている

- 1) 現状のパッカー式プローブを用いた岩盤の含水率測定システムは、室内ならびに原位置における適用性の検討が十分でない。
- 2) 前述の理由から、同システムの問題点の抽出も十分でなく、更なる改良が必要と考えられる。

1.4 研究委託の内容

平成 13 年度は以下の研究を実施した。

- ① パッカー式プローブの原位置測定への適用
- ② パッカー式プローブの改良と改良効果を確認するための室内試験
- ③ 比誘電率と含水率とのキャリブレーション試験
- ④ 波形データの自動解析手法の原位置試験データへの適用および改良
- ⑤ パッカー式プローブを用いた岩盤の含水率測定システムの適用性の評価

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

岩盤を対象とした不飽和領域の計測手法に関して、平成 5 年度から平成 12 年度までに文献調査、室内試験および原位置試験による研究を実施してきた。以下に、これまでの研究経緯を示す。なお、これと並行して、平成 5 年度から平成 10 年度までは、不飽和領域のメカニズムに関して、モデル化手法と解析パラメータの取得方法および解析手法に関する研究を実施してきた。その成果については平成 10 年度研究報告書を参照されたい。

2.1.1 平成 5 年度研究

文献調査の結果、坑道周辺岩盤に形成される不飽和領域の広がり把握する方法として、センサーを用いて直接測定した物理量を、岩石の含水量とキャリブレーションする方法が最も妥当と考えられた。岩石の含水量と関連する物理量として弾性波速度（超音波速度）、比抵抗、比誘電率（電磁波速度）が挙げられた。

2.1.2 平成 6 年度研究

測定対象として多胡砂岩を取り上げ、室内試験により 10cm スケールのコアの物理量（超音波速度、比抵抗、比誘電率）と含水量のキャリブレーションを行い、より大きな岩石ブロック中の含水量分布を推定することを試みた。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 超音波速度と比抵抗については、飽和度の変化に伴う有意な変化は見られなかった。このため、ブロック中の含水量分布の推定には不向きであった。
- 2) 比誘電率については含水量との間に有意な関係があり、ブロック中の不飽和領域の分布が精度良く推定できた。
- 3) 比誘電率計測上の問題点として、TDR プローブと岩石との隙間が波形に与える影響や、波形の読み取りにおける個人差などを検討する必要があることがわかった。

2.1.3 平成 7 年度研究

代表的な岩石について、室内試験により物理量（超音波速度、比抵抗、比誘電率）と含水量のキャリブレーションデータを取得し、不飽和領域計測への適用性を検討した。測定対象として、来待砂岩、白浜砂岩、白河熔結凝灰岩、稲田花崗岩の 4 岩種を選択した。その結果、比誘電率が岩種によらず、かつ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、岩盤の不飽和領域の計測する際の物理量として最も有望であることが示された。

また、比誘電率の測定手法として TDR を取り上げ、プローブの設置方法について検討を行い、次の結果を得た。

- 1) ロッド式プローブ（棒状の電極を測定対象物に挿入する形態のプローブ。後出の図 5.4-2 参照）の本数は、2 本より 3 本の方が反射波の立ち上がりがより明瞭であるため、波形読み取りの点で有利であるが、2 本でも実用上問題ない。
- 2) 測定範囲となる電磁波の影響範囲は、ロッド 3 本の場合、両側ロッドの間隔の 1.4 倍程度である。
- 3) ロッドの設置方法として、ロッド周囲の隙間がないように計測孔径と同サイズのロッドを直接に計測孔に打ち込むことが理想的である。
- 4) ロッド周囲の隙間を充填するためのケラチンクリーム（導電性材料の一種）の影響は波形の立ち上がりが鈍る傾向として認められる。

2.1.4 平成 8 年度研究

平成 8 年度からは、不飽和領域の測定における対象物理量を比誘電率に絞りこみ、測定手法として TDR と孔間レーダー法を取り上げ、原位置試験への適用性を検証していくこととした。

TDR については、代表的な岩石の含水量と比誘電率の関係を求める室内試験を実施した。岩石として、明世累層凝灰質細粒砂岩、田下凝灰岩、荻野凝灰岩、白河熔結凝灰岩、多胡砂岩および Westerly Granite の 7 岩種を選択した。また、原位置での TDR プローブの設置方法を検討するため、室内試験により数種類の充填材の比較試験を行うとともに、孔壁の表面に帯状のプローブを貼り付ける方法（表面プローブ）の有効性についても検討した。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 比誘電率は飽和度 100% 付近で急激な変化を示すものの、岩種によらず含水率とほぼ直線的な関係が認められた。よって、比誘電率の測定による含水量の推定の可能性が示された。
- 2) 石膏、セメントおよびベントナイトを充填材として用いた場合は、充填剤なしでロッド式プローブを打ち込んだ場合と比較して、比誘電率に差が生じた。
- 3) 表面プローブによる測定結果は、ロッド式プローブによる測定結果とよく一致し、有力な設置方法である可能性が示された。

孔間レーダー法については、東濃鉱山第 2 立坑第 1 計測坑道における原位置測定を実施した。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 原位置計測から得られた電磁波減衰特性はコア試験のものよりも大きく、電磁波は減衰の少ない箇所を透過したものが受信されていることが予想できた。
- 2) 深度方向の体積含水率には深度依存性は確認されず、全体にほぼ飽和していることが示された。

- 3) 坑道壁面近傍では、レーダープローブの一部が孔壁からはみ出すため、岩盤内を通過する電磁波伝搬速度を計測できない。

2.1.5 平成9年度研究

TDR については、供試体を用いた室内試験と、東濃鉱山第2立坑第1計測坑道における原位置測定を実施した。室内試験では、明世累層凝灰質細粒砂岩、田下凝灰岩、白河熔結凝灰岩、白浜砂岩の4岩種と、セメントモルタル、豊浦標準砂について含水量と比誘電率の関係を調べた。原位置試験ではロッド式プローブと表面プローブの2種類を試行し、プローブ設置方法に関する問題点を抽出した。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 飽和度100%付近での比誘電率の急激な変化は、プローブと孔壁との間に隙間が生じており、飽和時にこの隙間に存在した水が、飽和度のわずかな変化で消失することが原因と考えられた。
- 2) 上記の対策として、プローブ周面を導電性材料で塗布してから設置すると、隙間の影響をある程度軽減できる。
- 3) ボーリングコアを採取し、体積含水率と飽和度の深度分布を求めた。平均値は体積含水率0.536、飽和度100.0%を示し、全深度ほぼ一定と言って良く、ベンチレーション前後で変化は認められなかった。
- 4) ロッド式プローブで測定された岩盤の比誘電率は、プローブ設置後の経時変化および深度方向の変化はあるものの、概ね26~36程度の範囲にあり、平均的には30程度であった。この値はボーリングコア試料による室内測定で得られた飽和度100%での比誘電率に近い値であった。
- 5) ロッド式プローブを岩盤に設置することは困難である。これに対し、岩盤の表面に貼付する表面プローブは、ロッド式プローブと同等の測定結果を与えながらも、設置がより容易である。

孔間レーダー法については、東濃鉱山第2立坑第1計測坑道における原位置測定を実施した。この際、ベンチレーションを行って孔壁に強制的に不飽和領域を生じさせることを試みた。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 孔からはベンチレーション中も水が少量ずつ流出し続け、不飽和領域を発生させるのは難しい状況であった。この原因として透水性の高い細かな亀裂の存在が考えられた。
- 2) レーダーによる測定値からは、不飽和域の広がりをつかえることはできなかった。
- 3) 電磁波の伝搬速度は、多くの箇所ではベンチレーション後の方がベンチレーション前のものより遅くなる、すなわち見かけ上比誘電率が大きくなる傾向がみられた。したがって、測定の再現性について検討する余地が残された。

2.1.6 平成 10 年度研究

TDR については、供試体を用いた室内試験と、東濃鉱山第 2 立坑第 1 計測坑道における原位置測定を実施した。室内試験では、岩石に対するプローブ設置方法の改良を行い、明世累層凝灰質細粒砂岩、多胡砂岩、白河熔結凝灰岩の 3 岩種と左官砂について含水量と比誘電率の関係を調べた。原位置試験では、室内試験で検証した改良方法によりロッド式プローブを再設置するとともに、ボーリング孔を用いる新たな表面プローブの設置方法を考案し、両手法の適用性の検討を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) ロッドと計測孔径との間に隙間が生じないようにする方法として、2 重管ロッドを用いて隙間に導電性材料（導電性シリコン）を充填する方法（後出の図 5.4-1 参照）を新たに考案した。
- 2) 上記の方法を室内試験に適用したところ、飽和度 100% 付近での比誘電率の急激な変化がなくなり、隙間を残さないプローブの設置方法として有効であることが確認された。原位置測定では、0.5m 以浅に再設置したロッド式プローブによる比誘電率測定値が、飽和岩石コアのそれとほぼ同程度の値を示し、設置方法の有効性が確かめられた。
- 3) 岩盤の深度方向にプローブを設置する方法として、ボーリング孔壁にパッカーを用いて表面プローブを密着させる方法（パッカー式プローブ）を新たに考案した。
- 4) パッカー式プローブによる原位置での測定値は、孔軸方向プローブについては想定される値に比較的近い値となったが、円周方向プローブでは鮮明な反射波が得られず、測定誤差が大きくなった。

孔間レーダー法については、含水量の制御が容易な人工砂地盤を対象として含水量の異なる条件下での測定を行い、有効性の検討を行った。また、同時に比較のため間隙水圧測定と、ADR（Amplitude Domain Reflectmetry：振幅領域反射法）と TDR による比誘電率測定を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 孔間レーダー計測の結果は、他の計測手法による結果とも調和的であり、不飽和領域を計測可能と考えられる。
- 2) 孔間レーダー計測による体積含水率の推定値は、TDR、ADR による推定値よりも時間的な遅れを生じるとともに、変化の絶対量も小さかった。これは、孔間レーダーが TDR、ADR よりも広い範囲を計測対象とすることに起因すると考えられた。

2.1.7 平成 11 年度研究

平成 11 年度からは、岩盤の不飽和領域計測手法として TDR による比誘電率測定を中心に据え、原位置測定方法の実用化を目指して、これまでに開発した手法の信頼性

の向上、計測原理および問題点の再検討を行うこととした。

平成 11 年度は、2 重管ロッド式プローブにより来待砂岩、白浜砂岩、稲田花崗岩、田下凝灰岩、荻野凝灰岩の 5 岩種のキャリブレーション試験を行い、設置方法の有効性を更に確認するとともに、パッカー式プローブに関しては、室内実験により計測手法の問題点や構造等に関する検討を行った。このほか、TDR 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方法の提案と、低比抵抗性岩盤を対象としたロッド式プローブの改良方法の検討を行った。その結果、以下のような成果が得られた。

- 1) 新たに検証した岩種についても、飽和度 100%付近での比誘電率の変化が緩やかになる結果が得られ、2 重管ロッド式プローブの有効性がさらに確かめられた。
- 2) 円周方向プローブの場合、電磁波の影響範囲は、最大でプローブ間隔と同程度であり、プローブ間隔が大きくなると測定される比誘電率は小さくなる。なお、プローブ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り、具体的な手順として波形のス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) 低比抵抗性岩盤を対象とする場合、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である。

2.1.8 平成 12 年度研究

パッカー式プローブの実用化を目指して、室内試験により、電磁波の影響範囲の測定とプローブ貼付方向の検討、電磁波影響範囲等を考慮した緩衝材の評価、計測された読み取り値を対象媒質の比誘電率に換算する手法の検討を行い、これまでの知見と併せてパッカー式プローブの試作機を完成させた。また、TDR 波形データの自動読み取りの試行を行い、有効性の確認を行った。その結果、以下のような成果が得られた。

- 1) 孔軸プローブの中心軸が形成する面に垂直な方向の影響範囲は、周面外側、内側のいずれに対しても、最大でプローブ間隔と同程度である。
- 2) 孔軸方向プローブを用いて測定される比誘電率は、無限遠平面の場合と同じく、周面内部の物質と周面外部の物質との単純平均にほぼ等しい。また、円周方向プローブと比較して、比誘電率の計算方法が容易であるため、より望ましい。
- 3) 試作したパッカー式プローブを塩ビパイプに挿入して動作確認をしたところ、得られる比誘電率は真の比誘電率値よりも 17～19%高い値であったが、ほぼ妥当な測定値が得られると判断された。
- 4) 微分法に基づく反射点の解析プログラムを作成して、これを室内試験データに適

用したところ、より客観的に反射点を検出することができ、かつマニュアル法と同等以上の精度が期待できることを確かめた。

この他に、平成 5 年度以降に実施された岩盤中の含水量の計測手法についての文献調査を実施し、国際的な技術動向を把握するとともに、今後の研究方向を展望した。その結果、岩盤の不飽和領域の計測手法として FDR などの他の測定法も研究されつつあるが、いずれも現時点において確立したとは言い難く、TDR が先行している状況であることが示された。

2.2 平成 13 年度の実施内容

平成 13 年度は以下の研究を実施した。

(1) パッカー式プローブの原位置測定への適用

昨年度作製したパッカー式プローブを、東濃鉱山第 2 立坑第 2 計測坑道における岩盤の原位置比誘電率測定に適用し、各種測定条件の検討を行うとともに、測定上の問題点の抽出を行った。

(2) パッカー式プローブの改良

原位置試験により抽出された問題点について、その解決方法を検討し、パッカー式プローブの改良を行った。また、室内試験および原位置試験により改良効果を確認した。

(3) 岩石コアの比誘電率と含水率のキャリブレーション

原位置試験を行った地点の岩石コアについて、比誘電率と含水率との関係を室内試験により求めた。また、各種の検討を目的とした室内試験用のコンクリートについても、コアを用いて同様の試験を行った。

(4) TDR 波形の自動解析手法の適用および改良

TDR 波形の自動解析手法を、室内試験および原位置試験で取得した波形データに適用し、その有効性を確認するとともに、解析上の問題点について検討を行った。

(5) パッカー式プローブを用いた岩盤の含水率測定システムの評価

改良を経たパッカー式プローブを用いた岩盤の含水率測定システムについて、その適用性を評価し、実用的な計測手法としての基礎的な資料として取りまとめた。

3. パッカー式プローブの原位置試験への適用

3.1 パッカー式プローブの概要

パッカー式プローブは、パッカーで表面プローブをボーリング孔の孔壁に圧着させて測定する装置である。図3.1-1にパッカー式プローブによる測定概念図を示す。

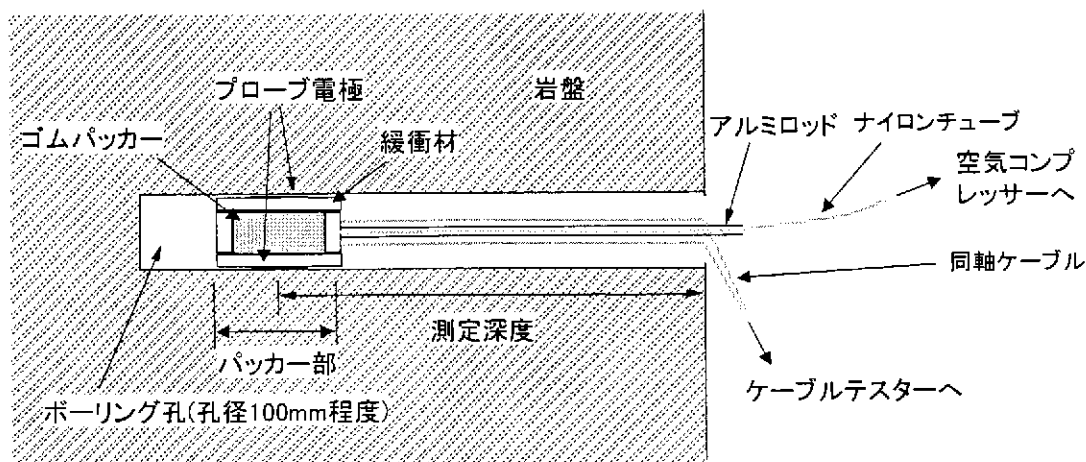


図3.1-1 パッカー式プローブによる測定概念図

パッカー式プローブの構造は、ゴムパッカーに被せた緩衝材の表面に、孔軸方向に沿って表面プローブの電極を貼り付けたものとなっている。測定時には、パッカーを測定対象となる深度まで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プローブ電極を圧着させ、TDRによりプローブ近傍の地盤の比誘電率測定を行う。

昨年度の研究で試作したパッカー式プローブの仕様を表3.1-1に示す。プローブ電極は銅製で、軸対称となる位置に2対配置されている。同軸ケーブルの長さは、最大深度20mまでの測定を想定して30mとした。

図3.1-2に、パッカー式プローブの構造を示す。径φ60mmのパッカーに、厚さ1.5cmの発泡ポリエチレンの半割円筒を被せ、その上に2本の電極からなるプローブを軸対称に2個配置した構造となっている。同軸ケーブルの先端はパッカー内で心線と網導線に分岐し、ゴム、緩衝材を通して、プローブ電極の端にはんだ付けされている。

表3.1-1 パッカー式プローブの試作機の仕様

項目	主な仕様	仕様の根拠とした事項	備考
本体	寸法 $\phi 60\text{mm} \times \text{L } 1000\text{mm}$ (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	軽量化および構造的制約(ケーブルを中に通すため)	
パッカー膨張部	寸法 $\phi 60\text{mm} \times \text{L } 600\text{mm} \times 1\text{mm t}$ 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	H12報告 p.29 " H11報告 p.39 H12報告 p.29	
外部緩衝材	寸法 $\phi 92\text{mm} \times \text{L } 700\text{mm} \times 15\text{mm t}$ 材質 発泡ポリエチレン製 見かけ密度 0.072g/cm^3 圧縮硬度 110kPa	H12報告 p.25 H12報告 p.22 " "	
表面プローブ (電極2本タイプ)	寸法 $\text{W } 6\text{mm} \times \text{L } 300\text{mm} \times 0.1\text{mm t}$ 数量 2個(軸対称に配置) プローブ間隔 2.4cm (プローブと孔軸の成す角 30°) 材質 銅製(緩衝材には粘着剤で付着)	H12報告 p.28 - H12報告 p.28 -	
適用範囲	ボーリング径 $\phi 96 \sim 110\text{mm}$ 程度 (HQ以上) 測定深度 0.5m~20m程度 比誘電率 1~81 (空気~水)	H12報告 p.27	測定精度は対象物に依存

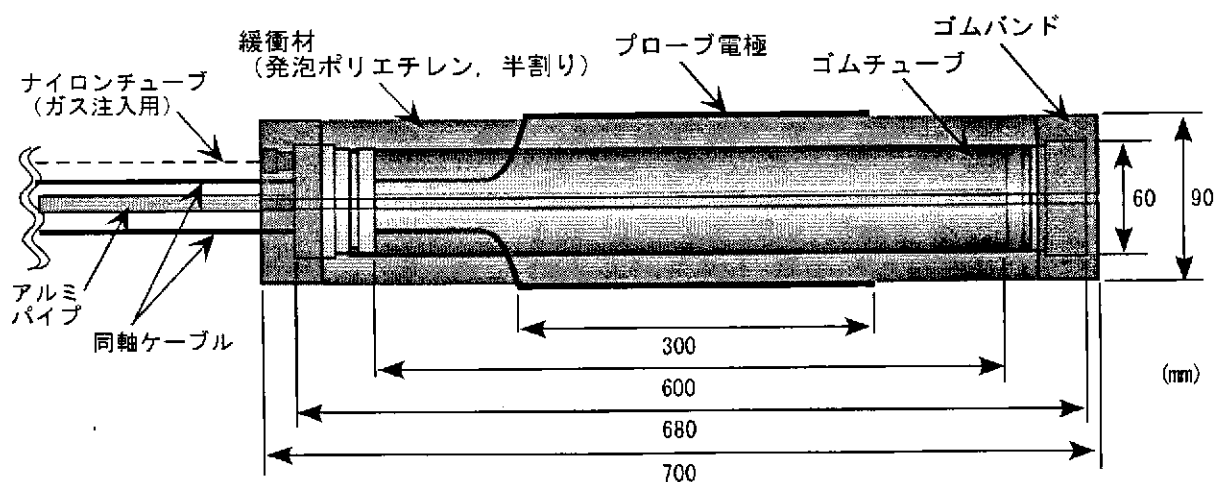


図3.1-2 パッカー式プローブの試作機の構造

本章では、このパッカー式プローブを東濃鉱山第2立坑第2計測坑道における原位試験に適用した結果について解説する。

3.2 原位置試験

3.2.1 試験孔と原位置試験実施時期

試験孔は、東濃鉱山第2立坑第2計測坑道に掘削された01SI-10, 01SI-11の2つの横孔である。第2計測坑道の全景を写真3.2-1に示す。2つの試験孔は写真3.2-1の向かって右側の孔壁にあり、土岐夾炭層上部累層の泥質凝灰岩中に掘削された。01SI-10孔はコンクリート矢板の上から、01SI-11孔は、坑道壁面の露岩部から直接掘削されている。掘削前の露岩部は、写真3.2-2に示すように乾いた状況であった。試験孔の概要は表3.2-1の通りである。

表3.2-1 試験孔の概要

孔 番	掘進長	仰角	試験可能深度*	掘削時期	湧水状況
01SI-10	20m	1 deg	1.00m～9.00m	2001.7～8	無し
01SI-11	20m	1 deg	0.50m～3.00m	2001.8	微量

* ボアホールカメラによる孔壁観察結果から判断された区間

原位置試験は2001年9月25～28日に実施した。これは01SI-10孔、01SI-11孔の掘削終了日から、それぞれ約50日後、30日後にあたる。

3.2.2 孔壁観察

パッカー式プローブを用いたTDR計測に先立って、ボアホールカメラによる試験孔の孔壁観察を実施し、試験可能な深度を決定した。孔壁観察に用いた機材を写真3.2-3から写真3.2-5に、カメラゾンデの挿入状況を写真3.2-6に示す。観察区間は、孔が断層破砕物やスライムで埋まっている深度の直前までとした。なお、01SI-10孔、01SI-11孔の孔壁画像を巻末の付録-1に示した。

01SI-10孔は、深度約9.5m以深に断層の破砕物と考えられるものが堆積しており、孔口からこの深度に至るまでは単一の地質となっている。明瞭な開口亀裂は孔壁からの深度1.6m, 1.8m, 6.5m, 8.3m付近にあり、その他の深度には認められない。孔内は下端に少量の水とスライムがあるものの、それ以外の周面には付着物はほとんどないことがわかった。以上から、試験可能な深度をケーシングパイプの端から断層破砕物の手前までの1.00m～9.00mと判断した。

01SI-11孔は、深度約3.5m深度にスライムが多く堆積しており、孔口からこの深度に至るまでは単一の地質となっている。明瞭な開口亀裂は認められない。孔内には下端に01SI-10孔より多くの水とスライムがあるが、孔壁の上半分には付着物はほとんどないことがわかった。以上から、試験可能な深度をケーシングパイプの先端からスライムの堆積箇所の手前までの0.50m～3.00mと判断した。



写真3.2-1 第2計測坑道の全景（立坑側から）



写真3.2-2 掘削前の露岩部の状況（01SI-11 孔地点）

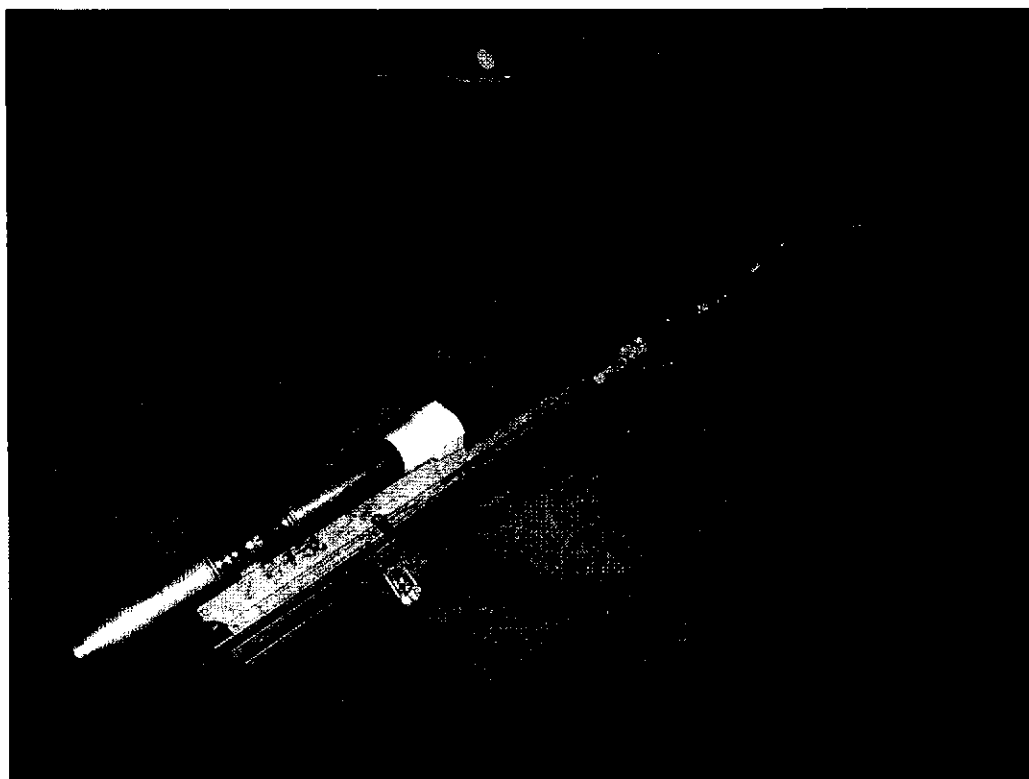


写真3.2-3 ポアホールカメラゾンデ

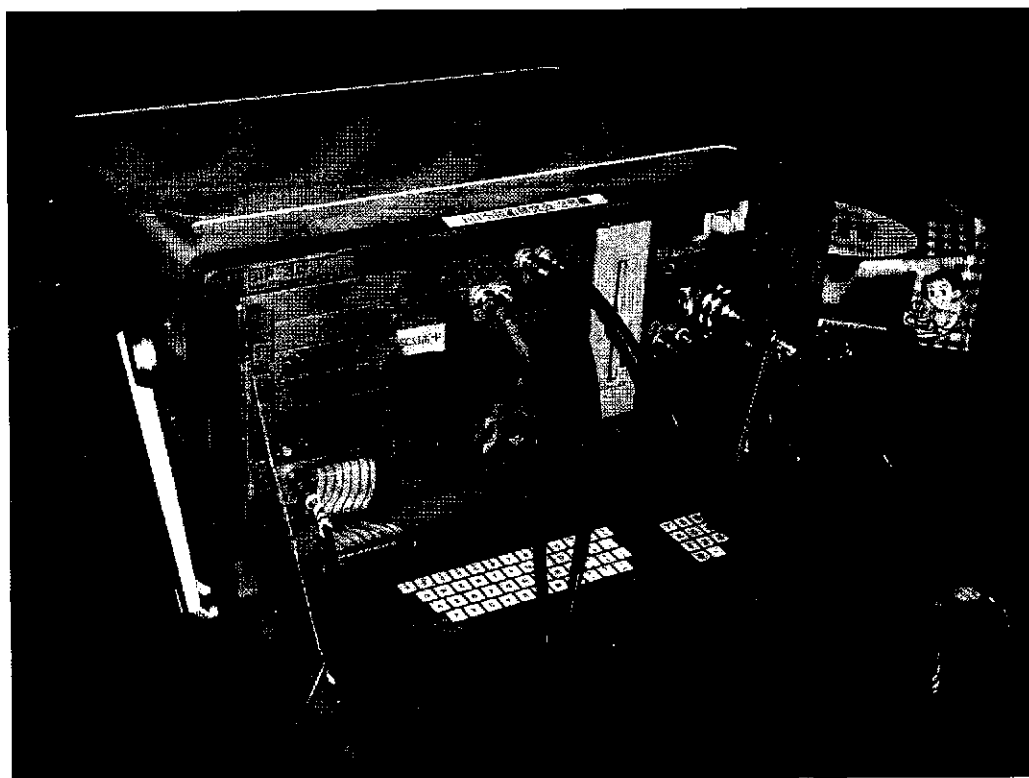


写真3.2-4 ポアホールカメラコントローラー式



写真3.2-5 ポアホールカメラ用ウインチ式

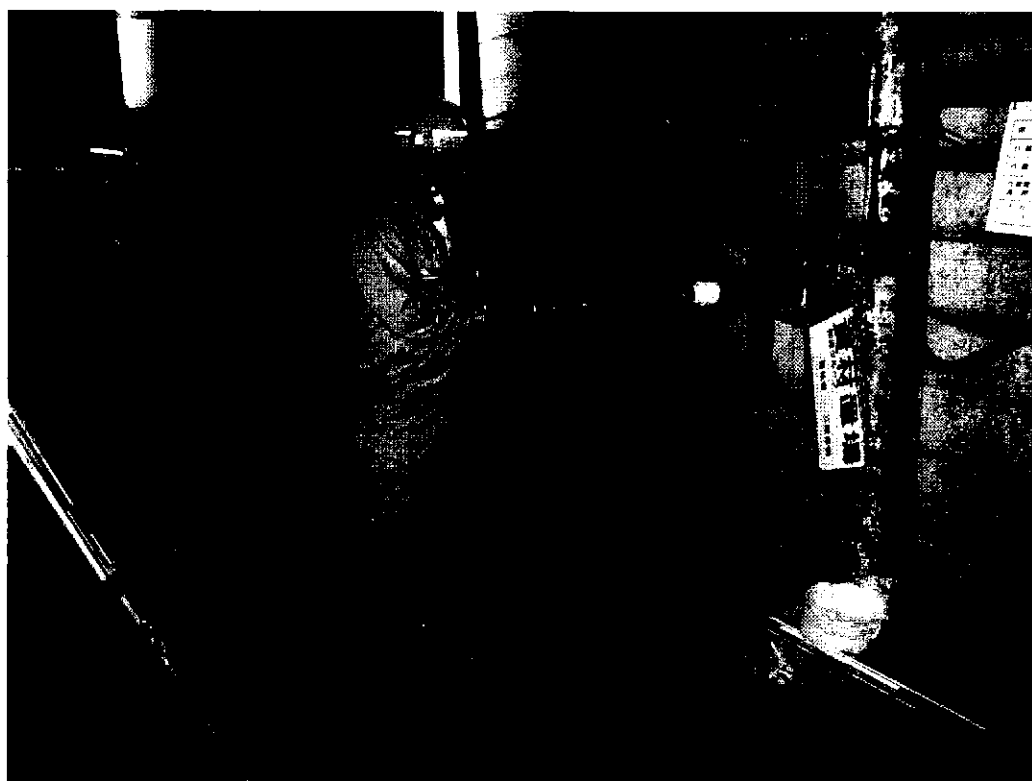


写真3.2-6 ポアホールカメラゾンデ挿入状況
(挿入中の孔は 01SI-10 孔)

3.2.3 TDR 計測

TDR 計測に用いた機材を表3.2-2に示す。

表3.2-2 TDR 計測に用いた機材

名称及びメーカー	型式名	数量	主な仕様	備 考
TDRケーブルテスター SONY-TEKTRONIX	1502B	1	出力インピーダンス $50\Omega \pm 1\%$ 垂直軸 感度 $0.5 \sim 500m\mu / Div.$ 精度 フルスケールの $\pm 3\%$ 水平軸 距離カーソル分解能 $0.004 ft.$ 感度 $0.025 \sim 50m / Div$ レンジ $2.5 \sim 500m$ スペクトル最高周波数 $1.75GHz$ (計算値) ステップ波立ち上がり時間 $200ps$ 以内($10\% \sim 90\%$) Vp $0.30 \sim 0.99$ 可変 (Vp:真空中を1.0としたときの伝送線路の伝搬速度) RS232Cインターフェース内蔵 電源 AC100Vおよび内臓電池	
パソコン	NB-466VLD	1	i486DX2(66MHz), 8MBメモリ, 200MB HDD MS-DOS6.2	
パッカー式プローブ		1	外径 $\phi 92mm$, パッカー部の長さ:700mm 本体アルミ製, ゴムパッカー, ポリエチレン緩衝材付属 銅製プローブ $\times 2$, 同軸ケーブル $30m \times 2$ 付属	
プローブ用ロッド		15	アルミ製, $2m / 1本$	
空気コンプレッサー		1	電源:AC100V, 出力:1.5HP, タンク容量:3L 最大圧力:790kPa	
降圧用トランス		1	200V AC三相 $\rightarrow$ 100V AC	
ドラムキャプタイヤコード		2	コード長:30m, 防滴仕様, ブレーカー付	
組立式棚		1	3段, 幅 $90cm \times$ 奥行 $45cm \times$ 高さ $140cm$ プラスチック製	
ライト		2	電源:AC100V, 消費電力:500W	
その他			空圧レギュレータ エアコンプレッサー用ナイロンチューブ 工具類、テープ、ロープ	

表3.2-2に示す機材は、パッカー式プローブとアルミロッドを除けば、これまでの原位位置測定で用いられてきたものと同一である。

パッカー式プローブを用いた TDR 波形の計測の手順を図3.2-3に示す。

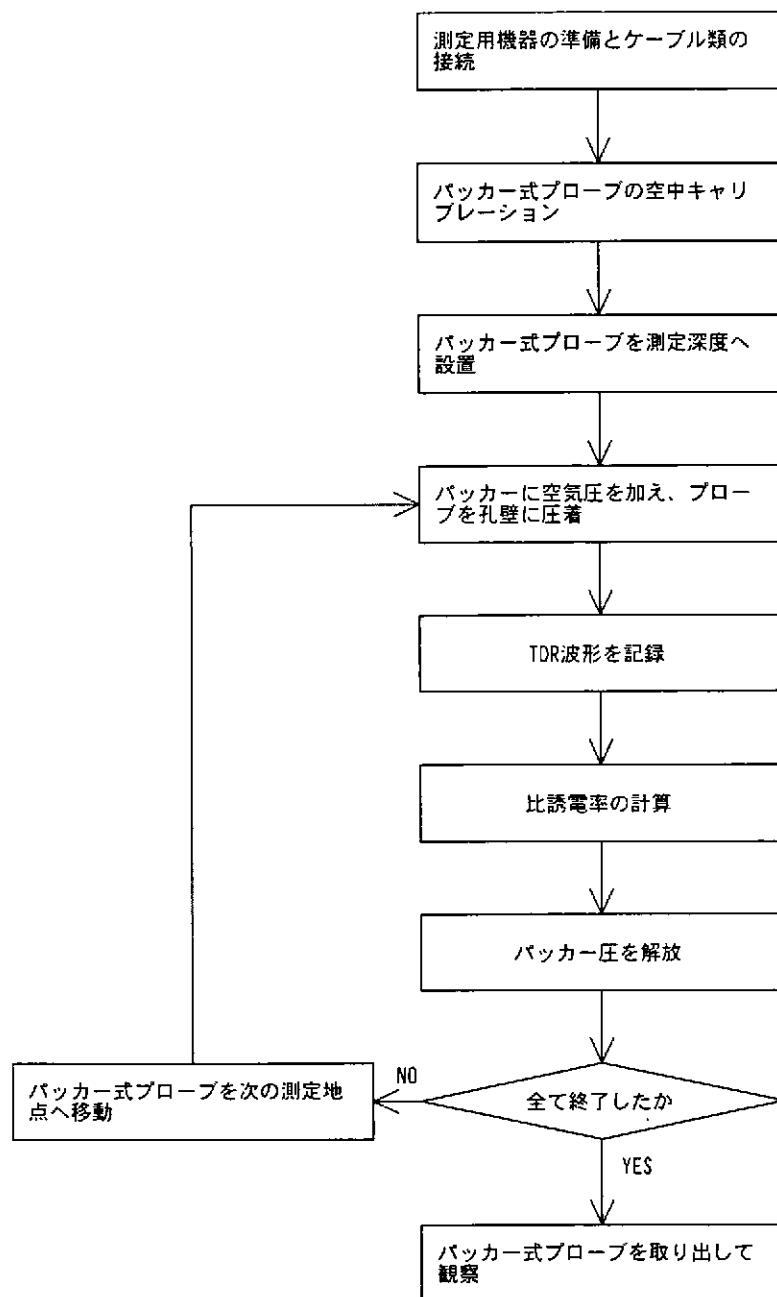


図3.2-3 バックカー式プローブによる TDR 波形計測の手順図

図3.2-3中の各段階での具体的な作業内容を以下に説明する。

(1) 測定用機器の準備とケーブル類の接続

エアコンプレッサー，TDR ケーブルテスター，パソコンに通電して動作を確認したのち，バックカー式プローブに付属するナイロンチューブと同軸ケーブルを，エアコンプレッサー，TDR ケーブルテスターにそれぞれ接続する。

(2) バックカー式プローブの空中キャリブレーション

バックカー式プローブを立てて，空中における比誘電率測定を行い，プローブ定数を求める。なお，プローブ定数を求める作業は，原位置測定前にあらかじめ行

っていても良い。

(3) パッカー式プローブを測定深度へ設置

パッカー式プローブにアルミロッドを装着し、孔に沿って真っ直ぐにパッカー式プローブを差し入れ、アルミロッドを押し込んでゆっくりと測定対象深度まで移動させる。

(4) パッカーに空気圧を付加

TDR ケーブルテスターの LCD 画面で波形を確認しながら、空圧レギュレータを操作して、パッカーに加える圧力をゆっくりと上昇させる。パッカーに空気圧が加わり始めたことは、ナイロンチューブ内を空気が流れる音や、パッカーの設置深度が浅い場合には、パッカー内に空気が流れ込む音で確認できる。パッカーが膨らみ TDR プローブが孔壁に接触すると、ケーブルテスターの LCD 画面で波形の減衰として確認できる。出力波形がほぼ変わらなくなるまで空気圧を上昇させていく。なお、安全のため空気圧の上限を 80kPa とした。

(5) TDR 波形を記録

データ収録変換ソフトウェアを用いて、パソコンにより TDR 波形を記録する。記録した波形にプローブ端部での反射波が確認されない場合は、距離分解能やデータ取得数を変更して再度測定を行う。また、明らかに異常な反射波が認められた場合には、パッカー圧を解放してプローブ位置をわずかに移動させた後に、再度測定を試みる。今回の測定では、標準的な測定で距離分解能を 2mm、データ取得数を 2000 程度（すなわち、TDR 波形上では 400cm 程度に相当する）とした。

(6) 比誘電率の計算

波形解析プログラムを用いて、TDR 波形から反射点の位置を求め、先に求めたプローブ定数と、既知の緩衝材の比誘電率から岩盤の比誘電率を計算する。ただし、反射波が不鮮明な場合にはデータ解析に時間を要するため、測定すべき点数が多い場合など時間的な制約がある場合には、この作業を後で行っても良い。

(7) パッカー式プローブの移動

空圧レギュレータを操作してパッカー圧を解放し、TDR プローブが孔壁からほぼ離れた後、パッカー式プローブを次の測定点へ移動させる。TDR プローブが孔壁から離れたかどうかの判断は、TDR ケーブルテスターの LCD 画面で波形がパッカー圧をかける前の形状へ戻っていき、ほぼ変化しなくなることを確認することにより行う。

(8) 測定終了後のパッカー式プローブの状態を観察

全ての測定が終了したら、パッカー式プローブをゆっくりと移動させて孔から引き出す。この後、パッカー式プローブに破損がないか、泥や水が付着していないかを観察して記録し、測定値を評価する上での判断材料とする。

原位置測定の実施状況を写真3.2-7から写真3.2-10に示す。

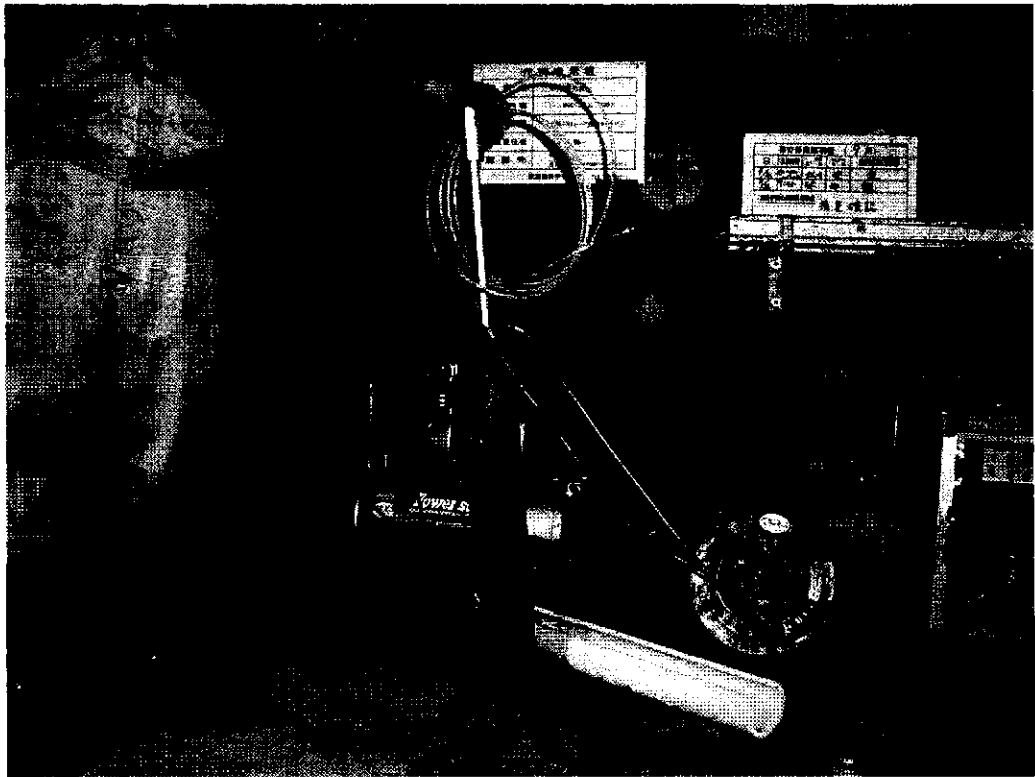


写真3.2-7 パッカー式プローブ
(背後にあるのは空気コンプレッサー)

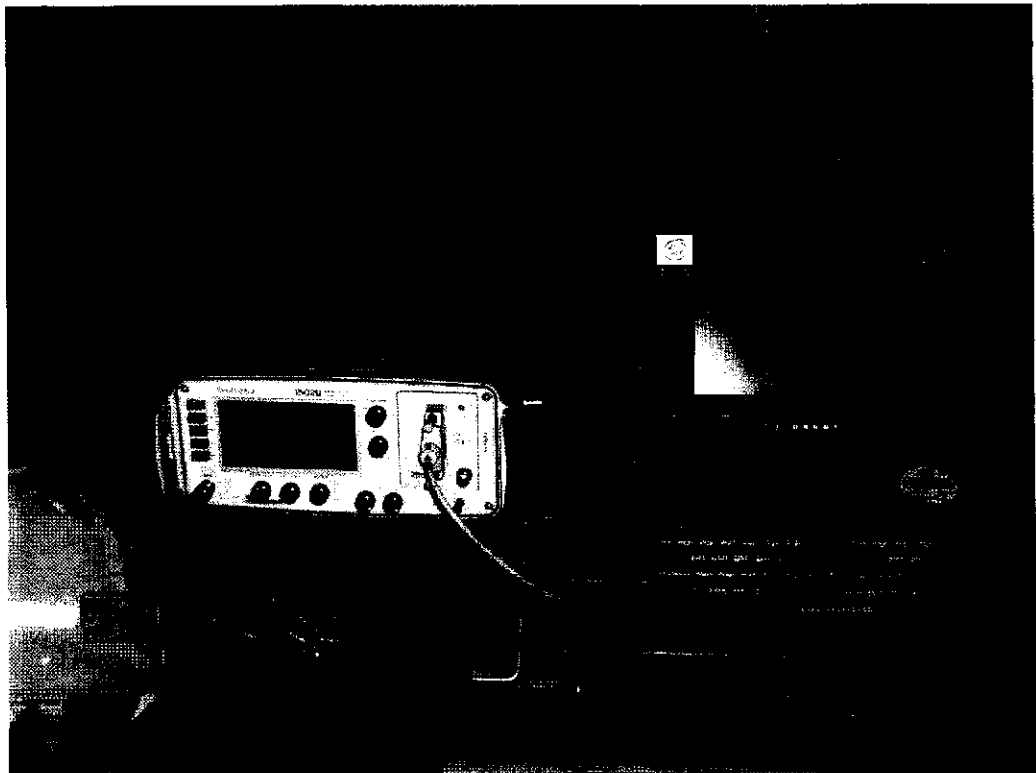


写真3.2-8 TDR ケーブルテスターとデータ回収用 PC

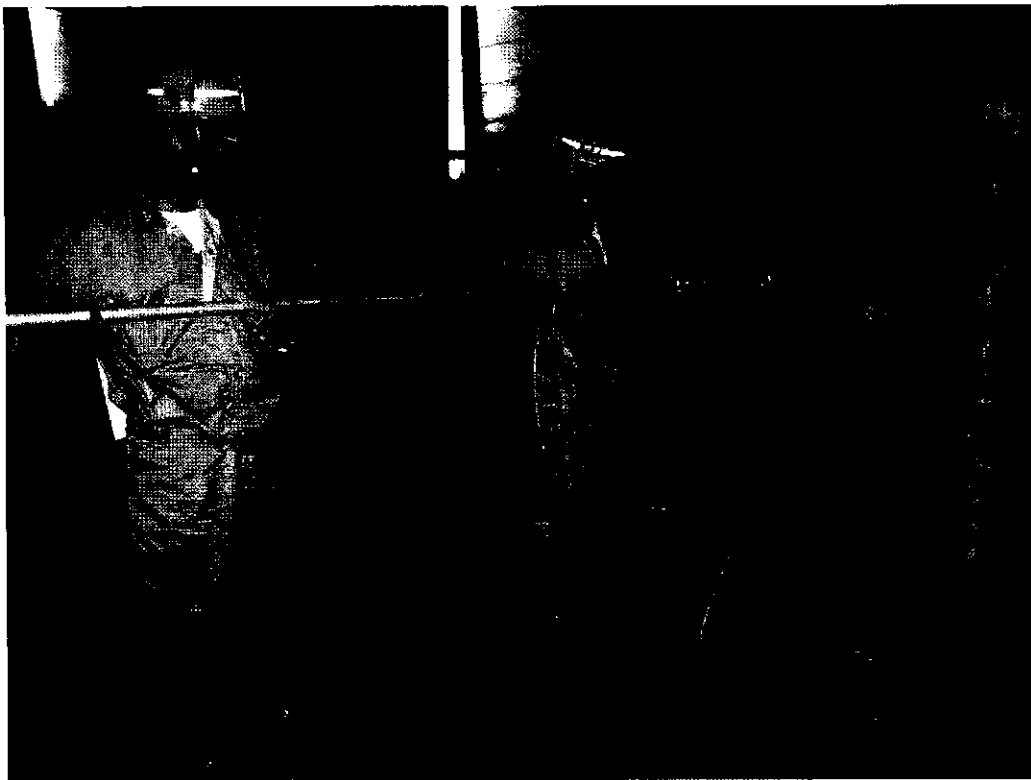


写真3.2-9 パッカー式プローブの挿入状況
(挿入中の孔は 01SI-10 孔)



写真3.2-10 パッカー式プローブ挿入状況 2
(白いチューブは空気注入用, 灰色の 2 線は同軸ケーブル)

原位置測定では、まず 01SI-10 孔の深度 1.5m を対象とし、軸対称の位置にある 2 つのプローブを孔壁の側面にバツカー圧 40kPa で圧着させて、TDR による比誘電率測定を行った。その結果、プローブ終端での反射波の立ち上がりがきわめて不鮮明であったため、読み取られた反射点の信頼性が低いと判断された。

反射波の立ち上がりを鮮明にする手段として、同軸ケーブルを短くすることによってプローブへの入射波の減衰による鈍りを小さくし、反射波の改善に期待する方法がある。そこで、同軸ケーブル 30m から 15m まで 5m 単位で短くしたときの、反射波の立ち上がりの変化を検討した。

図3.2-4に同軸ケーブル長を変化させて計測した TDR 波形を示す。

ケーブル長を短くしていくと、同軸ケーブルの分岐部分で生じる最初の反射波の立ち上がり（図3.2-4中の区間 R_1 ）がより鮮明になった。これは、入射波の減衰が小さくなったことを反映していると考えられる。これに伴って、プローブ先端の反射波の立ち上がり（図3.2-4中の区間 R_2 ）も比較的鮮明になった。このように、同軸ケーブル長を短くすることで反射波の立ち上がりが改善されることがわかった。しかし、立ち上がりの絶対的な傾きの大きさは依然小さく、反射点の信頼性を根本的に改善するには至っていないと判断される。

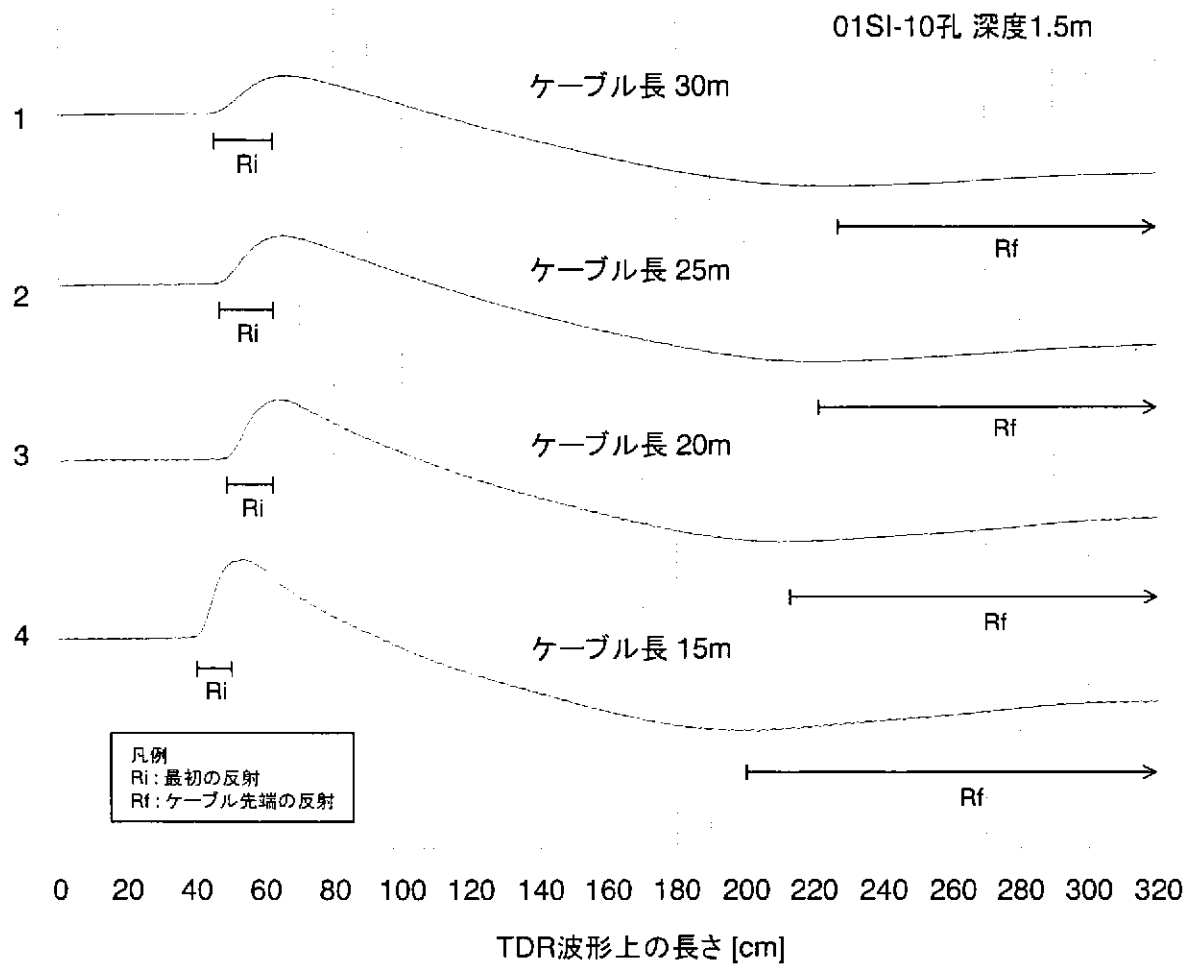


図3.2-4 同軸ケーブル長を変化させたときの TDR 波形

図3.2-4に示した波形から得られた岩盤の比誘電率と、同軸ケーブル長との関係を図3.2-5に示す。ここでプローブ A は図3.2-4に示した波形を取得したプローブであり、B は A と軸対象の位置にあるもう 1 つのプローブのことである。両者は基本的に同一の特性を持つ。岩盤の比誘電率 ε は次式により算出した。

$$\varepsilon = 2 \times \left(\frac{L_{app}}{L_{probe}} \right)^2 - \varepsilon \quad (3.1)$$

ここに、 ε は緩衝材の比誘電率、 L_{probe} はプローブ電極の長さ、 L_{app} は TDR 波形上のプローブの電氣的な長さ（見かけのプローブ長）である。

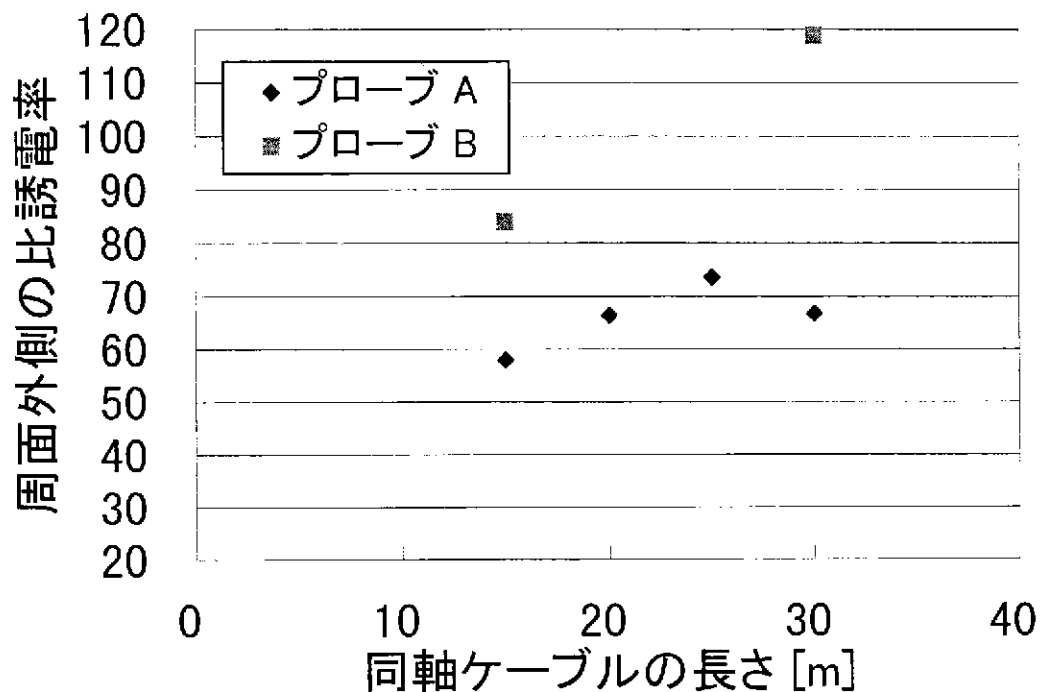


図3.2-5 同軸ケーブル長を変化させたときの比誘電率

TDR 波形から得られた比誘電率は、同一箇所の測定値であるにもかかわらず、プローブ A、B とともに同軸ケーブル長が短くなるとともに小さくなる傾向を示した。これは、同軸ケーブル長を短くすることによって、プローブ先端での反射波の立ち上がりが鮮明になり、反射波の最大勾配を与える点が最初の反射波の方により近付いたためと考えられる。この点については、3.3.1 項で詳しく解説する。

また、プローブ A、B で得られた比誘電率の値は、同軸ケーブル長が 15m のときにそれぞれ 58, 84 となっている。これらの値は、通常の岩石で得られる値よりもはるかに大きく、特に後者は水の比誘電率（81）をも上回っていた。

同軸ケーブル長を 15m としたプローブ A、B を用いて、01SI-10 孔、01SI-11 孔における深度方向の比誘電率分布を測定した結果をそれぞれ図3.2-6、図3.2-7に示す。01SI-10 孔での比誘電率の測定値は、プローブ A で 64～80、プローブ B で 75～91 の範囲にあった。また、比誘電率は深度 3.0m～6.0m の範囲でプローブ A、B とともにほぼ一定となり、それ以外の深度では値がばらつく傾向を示した。

01SI-11 孔での比誘電率の測定値は深度 1.5m と 3.0m でそれぞれ 69, 54 となり、通常の岩石で得られる値よりもはるかに大きい値であった。

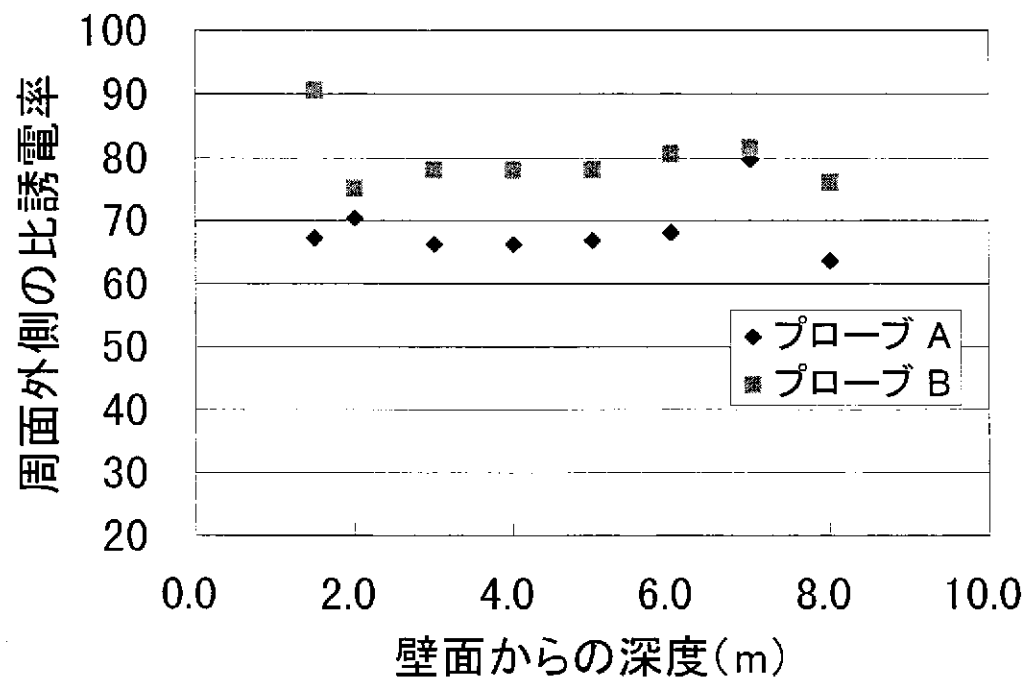


図3.2-6 深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔）

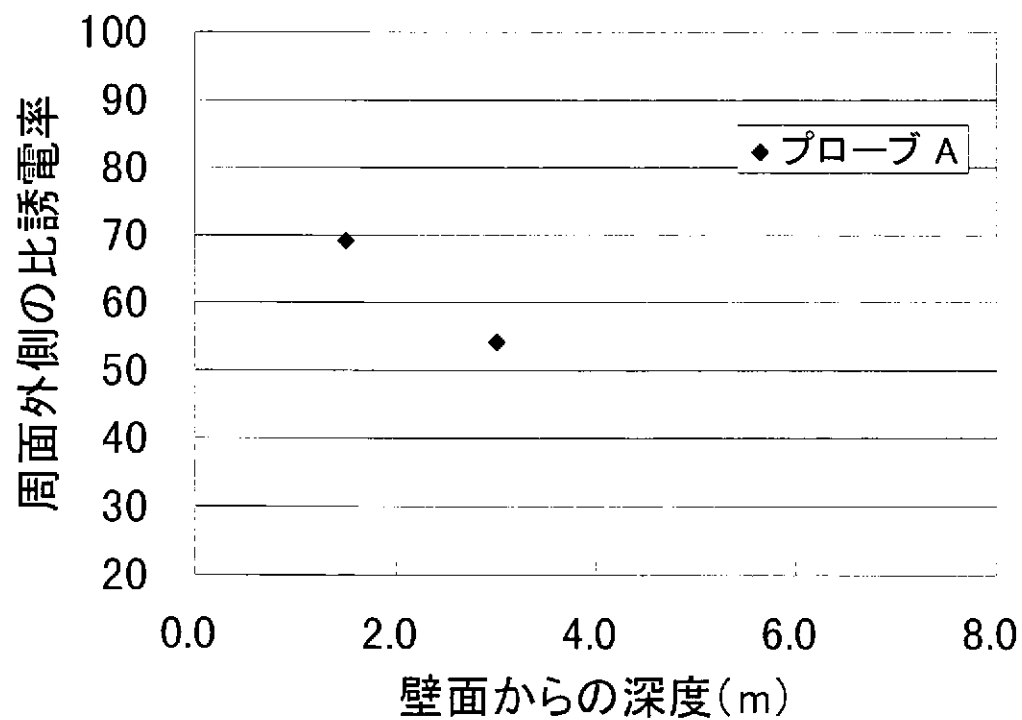


図3.2-7 深度方向の比誘電率分布（01SI-11 孔）

3.3 考察

3.3.1 同軸ケーブル長と比誘電率との関係

同軸ケーブル長を短くして入射波の減衰を小さくすると、測定対象が同一であるにも関わらず、比誘電率がより小さくなった。これは、同軸ケーブルの減衰ひずみによる入射波の鈍りと、岩盤中の減衰ひずみによる反射波の鈍り、そして比誘電率を求める際の反射点の検出方法に起因すると考えられる。以下にそれぞれの要因について検討する。

(1) 同軸ケーブルの減衰ひずみ

伝送線理論によると、同軸ケーブルの伝搬定数は次式で与えられる。

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3.2)$$

ここに、 R , L , G , C はそれぞれ同軸ケーブルの単位長あたりの抵抗、インダクタンス、コンダクタンス、キャパシタンスであり、 $\omega = 2\pi f$ は角周波数、 j は虚数単位である。 α は減衰定数と呼ばれ、電磁波の振幅が伝送線路の単位長あたりどれだけ減衰するかを表す。また、 β は位相定数であり、電磁波の位相が伝送線路の単位長あたりどれだけ移動するかを表し、電磁波の位相速度（伝搬速度） V_p と以下のような関係にある。

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (3.3)$$

高周波の伝送においては、 $R \ll \omega L$, $G \ll \omega C$ が成り立つため、 α , β は次式で近似できる。

$$\alpha \cong \frac{1}{2} \left(R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}} \right) \quad (3.4)$$

$$\beta \cong \omega \sqrt{LC} \quad (3.5)$$

伝搬定数は、伝搬する電磁波の全ての周波数成分に対して同一であることが理想である。しかし、実際の高周波伝送においては、式(3.4)中の L , C に周波数依存性はないものの、 R が周波数の平方根に比例して増大し、 G が誘電体損により周波数に比例するため、減衰定数 α は周波数に大きく依存する。このため、電磁波の減衰は周波数成分によって異なることとなり、波形にひずみを生じさせる。これを減衰ひずみという。一方、位相定数 β は周波数にほぼ比例するため、電磁波の位相速度は周波数によらず一定となり、位相速度の違いによる波形のひずみ（位相ひずみ）は生じない。すなわち、同軸ケーブルによる高周波伝送では、図3.3-8に示したひずみのうち減衰ひずみがより重要となる。

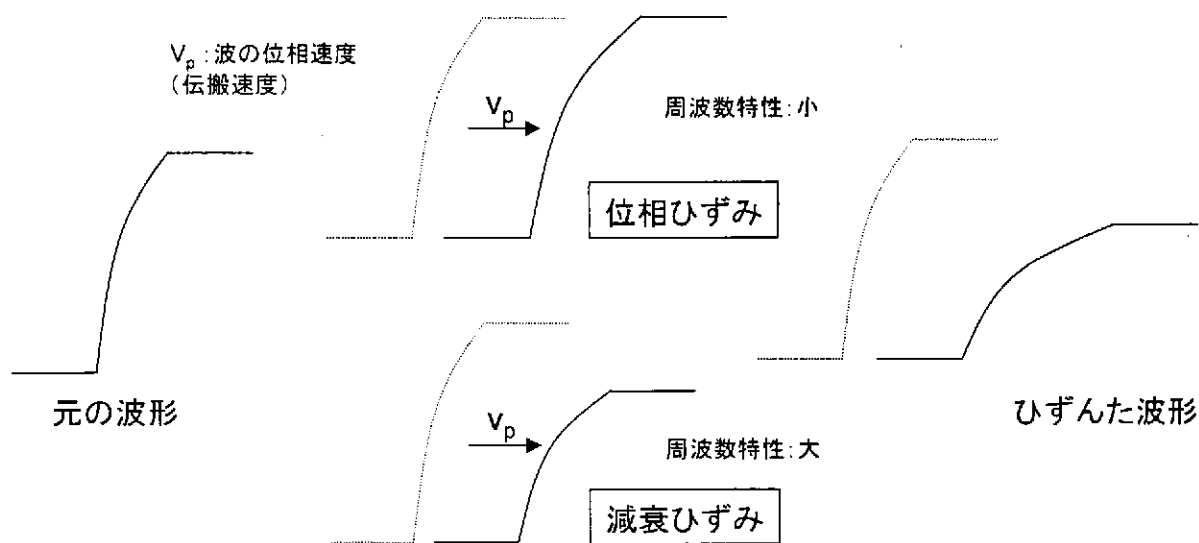


図3.3-8 電磁波伝搬におけるひずみの分類

TDR 波形の計測では、立ち上がり時間が 200ps 以内のステップパルスを使用している。このパルスの周波数成分のうち、波形の形状に大きな影響を与える最高周波数は 1.75GHz というきわめて高いものであるため、TDR 波形の計測は高周波計測の一種と考えられる。したがって、ステップパルスが同軸ケーブルを伝搬するとき、それぞれの周波数成分に対して異なる割合の減衰が生じるため、同軸ケーブル長の違いによって、通過したパルスの形状に差が生じることとなる。具体的には図3.3-9に示すように、同軸ケーブル長が長くなるほど、高周波数成分によって構成されている急峻な立ち上がり部分の減衰が相対的に大きくなるため、入射波の立ち上がりが鈍ると考えられる。

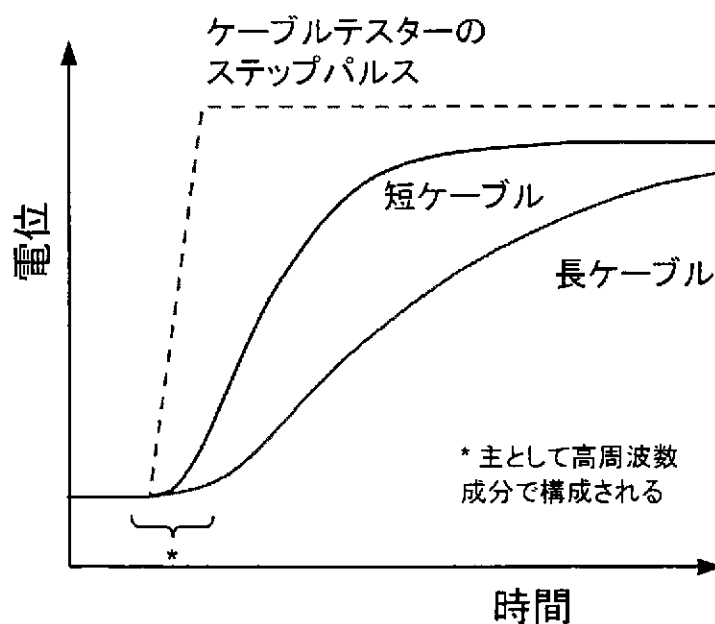


図3.3-9 同軸ケーブル長の違いによる入射波の立ち上がりの変化

(2) 岩盤中を伝搬する電磁波の減衰ひずみ

岩盤中の電磁波の伝搬についても、同軸ケーブルの場合と同様に前掲式(3.2)～(3.5)が成り立つ。ただし、岩盤の比誘電率や導電率が大きい場合、式(3.4)中のコンダクタンス G の寄与が相対的に大きくなり、減衰定数 α に周波数依存性が生じるとともに、その大きさも非常に大きくなる。

ここで、前掲図3.3-9に示した同軸ケーブル長の異なる TDR プローブへの入射波が、プローブ先端でどのように変化しているかを考える。入射波が岩盤中を伝搬すると、周波数に依存する大きな減衰を受けて、波形のひずみはさらに大きくなっていると予想される。プローブ先端に達した波は、反射して再度岩盤と同軸ケーブルを伝搬し、TDR ケーブルテスターで反射波として計測される。以上のことから、プローブ先端での反射波の立ち上がりは、プローブへの入射波の鈍りが大きいほど、すなわちケーブル長が長いほどなだらかなになると考えられる。

なお、岩盤の導電率が大きい場合は、位相定数 β と角周波数 ω との関係が比例関係から外れてくるため、伝搬速度 V_p の周波数依存性も無視できなくなってくる。すなわち位相ひずみが生じる可能性がある。TDR は、媒体の比誘電率が一定であれば V_p も一定であることを前提としているので、位相ひずみが生じることは TDR の前提が崩れることを意味する。この点は議論の余地があるところであるが、本研究の課題の範囲を大きく超えるため、ここでは位相ひずみが TDR 計測に与える影響はないものと考えた。

(3) 反射点の検出方法

本測定では、TDR 波形からの反射点の検出に微分法を用いている。微分法は、図 3.3-10に示すように、TDR 波形で1階微分の極大値を与える点に接線を引き、これとその直前の基線との交点を反射点とする方法である。微分法の詳細については、平成 11 年度研究報告書を参照されたい。

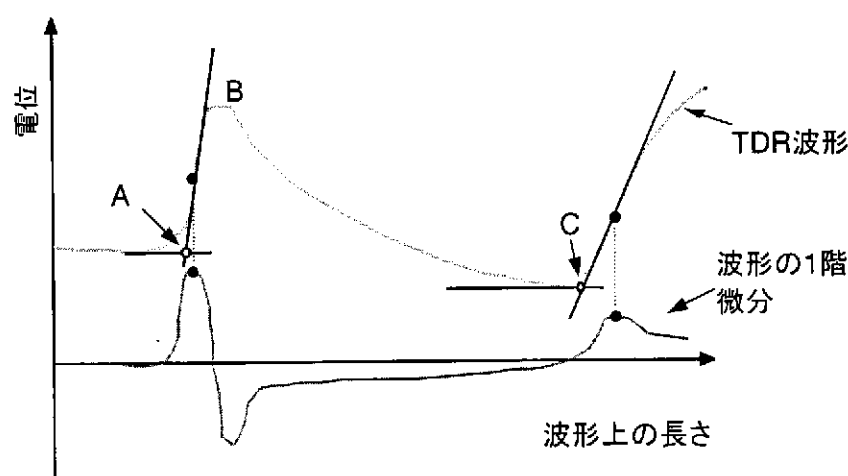


図 3.3-10 微分法の概要

先に述べたように、ケーブル長が異なるプローブでは入射波形に差が生じており、これにより TDR 波形中の反射波の形状も変化する。したがって、図3.3-10中の A 点と C 点の位置が変化すると考えられる。TDR 波形の計測においては、ケーブル長を変えた各プローブについて空気中でのキャリブレーションを実施しているため、もしケーブル長の違いによる A 点、C 点の位置の変化が、空気中でのそれと同程度であれば、測定される比誘電率に変化は生じないことになる。しかし、先に述べたように、プローブへの入射波のひずみは、岩盤を伝搬することで強調される傾向にあるため、ケーブル長の違いによる C 点の位置の変化は、空気中での位置の変化よりも大きくなる。具体的には、ケーブル長が長いほど反射波の鈍りが大きくなるため、C 点の位置は A 点から遠ざかり、得られる比誘電率は大きくなる。

以上の考察により、同軸ケーブル長を短くすることで比誘電率の測定値がより小さくなることが示された。

3.3.2 比誘電率の深度分布

今回用いたパッカー式プローブでは、きわめて大きな比誘電率が測定された。水の比誘電率が 81、岩石固相の比誘電率が一般に 4~7 程度であることを考慮すると、測定値はいずれも異常値であると判断される。これは、以下の 2 つの要因によるものと考えられる。

- 1) 岩盤が粘土鉱物を多く含んでおり、比誘電率と導電率が大きいいため、プローブ電極間のコンダクタンスが大きい。これによりプローブを伝搬する電磁波の減衰ひずみが非常に大きくなり、反射波の立ち上がりが不明瞭になった。
- 2) 孔内に水が残っているような状況であったため、プローブを孔壁に圧着した際にプローブ電極間に泥水が入り込み、水の影響を強く受けた測定値になった。

したがって、得られた比誘電率の絶対値の信頼性は低いと考えられるが、このような場合でも、測定値の相対的な差は意味を持つと期待される。01SI-10 孔の比誘電率分布を示した前掲図3.3-6によれば、一部に高い値があるものの、プローブ A、B ともに、比誘電率はいずれの深度でもほぼ同程度の値である。このことから、01SI-10 孔の比誘電率は深度方向にほぼ一定の値であり、第 2 計測坑道の湿度が高いこと、掘削後から日数があまり経過していないことを考慮すると、岩盤は全ての深度でほぼ飽和状態にあると考えられる。なお、一部の比誘電率が飛び抜けて高い値になっているのは、上記 2)の影響によるものと考えられる。

3.3.3 パッカー式プローブの構造上の問題点

パッカー式プローブによる原位置測定において、以下の問題が生じ、改善を要することが明らかとなった。

(1) 機械的な耐久性の不足

- ・ パッカーへの加圧と圧力解放を繰り返すことにより、パッカーゴムを留めている鉄線が緩み、エア漏れを生じた。現場では、増し締めにより対処した。
- ・ 電極に厚さ 0.1mm の銅製の導電性テープを使用したため、緩衝材との強い粘着性が得られなかったため、孔内に挿入・移設する際にケーシングパイプや孔壁と干渉し、位置のずれや剥離が生じた。また、柔らかい素材であるため、ねじれや縮みが起こった。現場では、新品に貼替えて対処した。
- ・ 緩衝材を固定するゴムバンドは、孔内に挿入・移設する際にケーシングパイプや孔壁と干渉して、**写真3.3-11**に示すように頻繁に脱落した。現場では、ビニールテープで固定する処置をした。
- ・ 同軸ケーブルとプローブ電極との接合部分が、緩衝材の周面からやや突起しているため、この部分がパッカー式プローブを孔内に挿入・移設する際に孔壁と干渉し、はんだ付けの部分でプローブ電極が破断した。現場では、TDR 波形を観察することにより破断の有無を確認し、プローブ電極が破断した場合は新品に交換して対処した。

(2) 孔への出し入れが困難

- ・ 緩衝材の端部の処理を行っていないため、孔内に挿入時ケーシングパイプに干渉し、移設が困難になることがあった。

(3) パッカー故障の際の部品交換が困難

- ・ 緩衝材の周面外側への突起をなるべく少なくするために、緩衝材内側にあるパッカーゴムの下からプローブ端部に向かって同軸ケーブルを引き出す構造となっている。この構造では、パッカーに故障が発生した際に、同軸ケーブルと電極のはんだを取る作業必要になり、交換に時間を要する。

(4) 緩衝材が吸水し、測定値に影響する可能性がある

- ・ 緩衝材は吸水性の低い材質であるが、無数の気泡があるため、孔内に水が溜まっているような状況では、パッカーへの加圧によって**写真3.3-12**に示すように若干吸水し、測定値に影響を与える可能性がある。

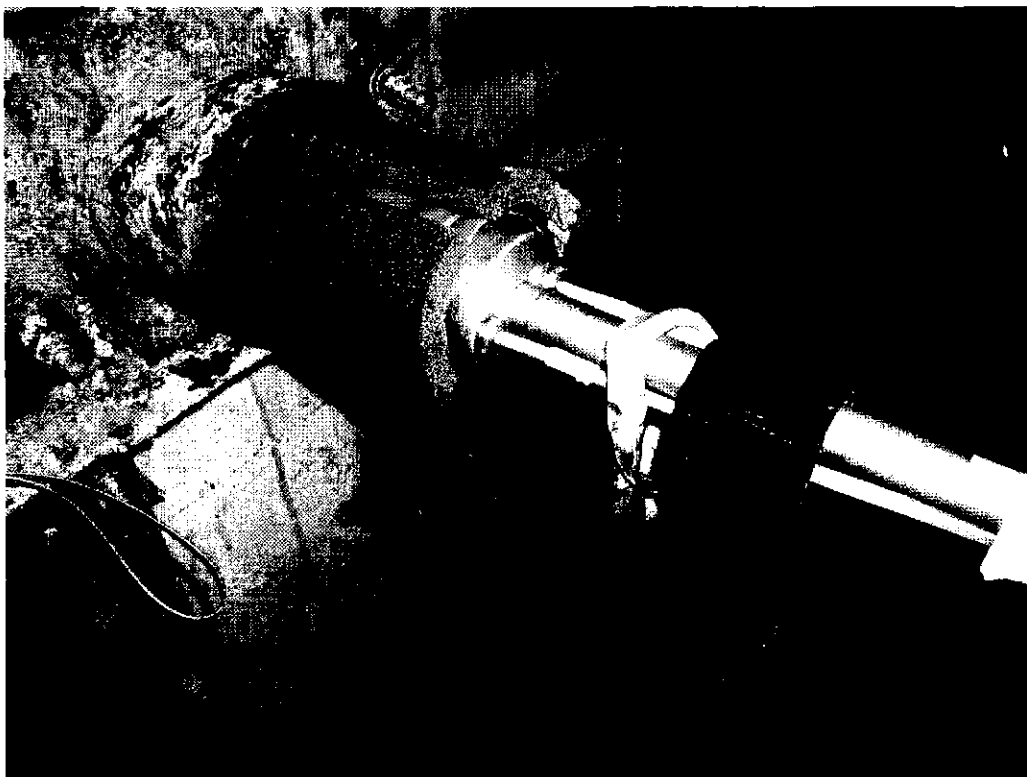


写真3.3-11 パッカー式プローブ引き出し状況 1
(孔壁との摩擦で緩衝材固定用バンドが外れた)

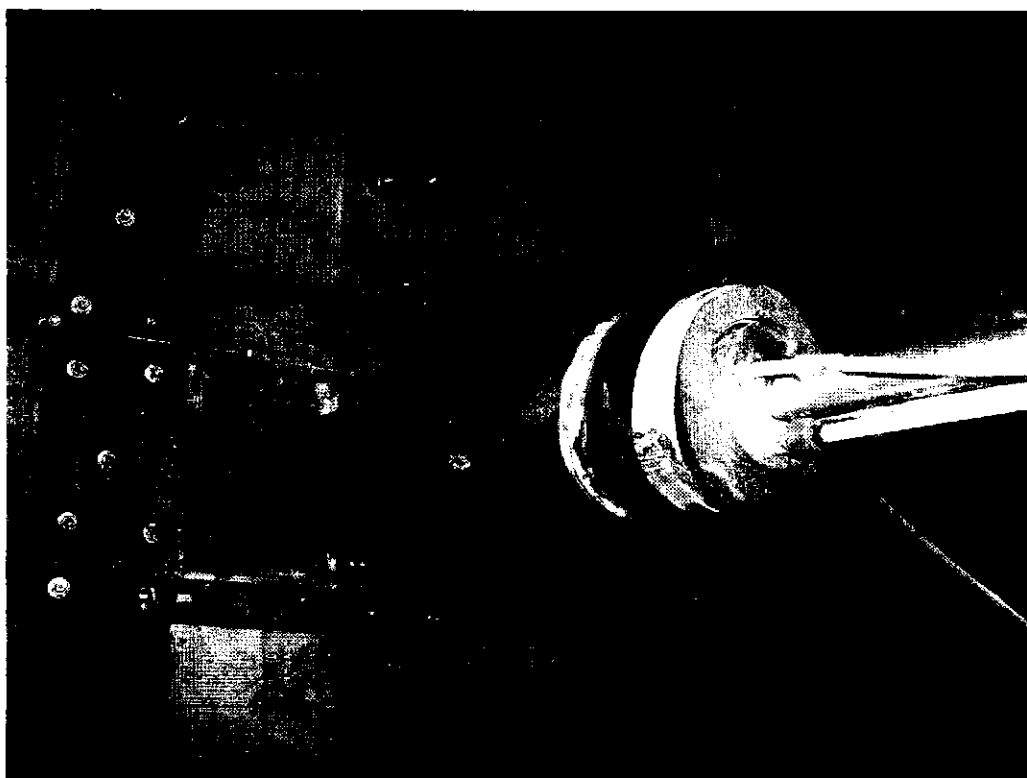


写真3.3-12 パッカー式プローブ引き出し状況 2
(プローブの周りの緩衝材が孔内水により濡れている)

3.4 まとめ

平成 12 年度に作製したパッカー式プローブを、東濃鉱山第 2 立坑第 2 計測坑道における岩盤の原位置比誘電率測定に適用し、以下の結果が得られた。

- 1) 得られた TDR 波形は、プローブ先端での反射波の立ち上がりがきわめて不鮮明であり、検出された反射点の信頼性が低かった。同軸ケーブル長を短くすることで反射波の立ち上がりが改善されたが、絶対的な傾きの大きさは依然小さく、プローブ先端での反射点の信頼性を根本的に改善することはできなかった。
- 2) 同軸ケーブル長を短くすると、比誘電率の測定値が小さくなる現象が見られた。これは、ケーブル長が長いほどプローブへの入射波の鈍りが大きく、岩盤中を伝搬する間に鈍りがさらに強調されるため、結果的にプローブ先端での反射波の立ち上がりがなだらかとなって、プローブの電氣的な長さが長くなるためであると考えられた。
- 3) 比誘電率の測定値は、通常の岩石で得られる値よりもはるかに大きい異常値を示し、絶対値の信頼性は低いと考えられた。これは、岩盤が粘土鉱物を多く含んでおり、比誘電率と導電率が大きいため、電磁波の減衰ひずみが大きく、反射波の立ち上がりが不明瞭になったことに起因すると考えられる。また、孔内に水が残っているような状況であったため、プローブを孔壁に圧着した際にプローブ電極間に泥水が入り込み、水の影響を強く受けた測定値になったことも考えられる。
- 4) 01SI-10 孔内の比誘電率は、深度方向にほぼ一定であり、岩盤は全ての深度でほぼ飽和状態にあると考えられる。

また、原位置測定で明らかとなったパッカー式プローブの問題点は以下のとおりである。

- 1) パッカーゴムの固定部分、プローブ電極、緩衝材を留めるバンドの強度が不足している。
- 2) 装置の前後端にある緩衝材の端部処理を行っていないため、孔内へ挿入する際にケーシングパイプに干渉し、移動が困難になることがある。
- 3) パッカーゴム内を同軸ケーブルが通る構造のため、パッカーに故障が発生した際に、同軸ケーブルと電極のはんだを取る作業が必要になり、交換に時間を要する。
- 4) 緩衝材がパッカーへの加圧により吸水し、測定値に影響する可能性がある。
- 5) 高導電率岩盤を対象とする場合、減衰が大きいため反射波の読み取りが困難である。よって、高導電率岩盤に適用するための改良が必要である。

4. パッカー式プローブの改良

4.1 パッカー式プローブの問題点と改良方法

第3章で述べたように、原位置試験に適用する場合、パッカー式プローブには以下のような問題点があることがわかった。

- 1) 機械的な耐久性の不足
- 2) 孔への出し入れが困難
- 3) パッカー故障の際の部品交換が困難
- 4) 緩衝材が吸水し、測定値に影響する可能性が大
- 5) 導電率の高い岩盤を対象とする場合、反射波の読み取りが困難

そこで、上記のうち主として構造面に起因する問題 1)～3)を解決するために、以下のような点について改良を行い、図4.1-1に示すような新しいパッカー式プローブを製作した。

(1) 剛性の高い電極の採用

銅製の導電性テープに代えて、より厚みがあり剛性の高い真鍮板を採用した。材質を真鍮にすることで、導電性は銅の46%に低下するが、そもそも銅の導電性が極めて高いため、TDR波形への影響は小さいと考えられる。

(2) 強力な接着剤の使用

電極が孔壁との干渉により剥れないように、ポリオレフィン（ポリエチレンなどの総称）用ホットメルト接着剤を用いて緩衝材に強力に接着した。

(3) パッカーの両端にカバーを装備

プローブ全体のガイドと保護のために、緩衝材の両端をアルミカバーで挟み込む構造とした。また、パッカーのエア漏れ対策として、テーパー組合せ構造でパッカーゴムを挟み込み、それをネジ止めすることによりエア漏れを改善した。

(4) 同軸ケーブルとプローブ電極の接合部分の改善

同軸ケーブルの心線と接地線を、プローブ電極の裏側にはんだ付けする構造とし、孔壁側への突起物を無くした。また、同軸ケーブルが分岐して緩衝材を通過する部分をシリコンゴムで充填し、ケーブルの分岐部分に水や泥が入り込まないようにした。

(5) 組立、分解、部品の交換が容易な構造

同軸ケーブルを緩衝材とパッカーゴムの間を通すような構造にした。これによ

って個々の部品の独立性が高まり、保守が容易となった。各部品はネジで組み立てられており、分解してプローブの交換を容易に行うことができる。

(6) プローブ電極と同軸ケーブル、緩衝材のユニット化

プローブ電極と同軸ケーブル、緩衝材を一体のユニットとし、これを交換することにより様々な形態のプローブを用いることができるようにした。

写真4.1-1から写真4.1-11には、改良型のパッカー式プローブの外観を、旧型と比較して示した。

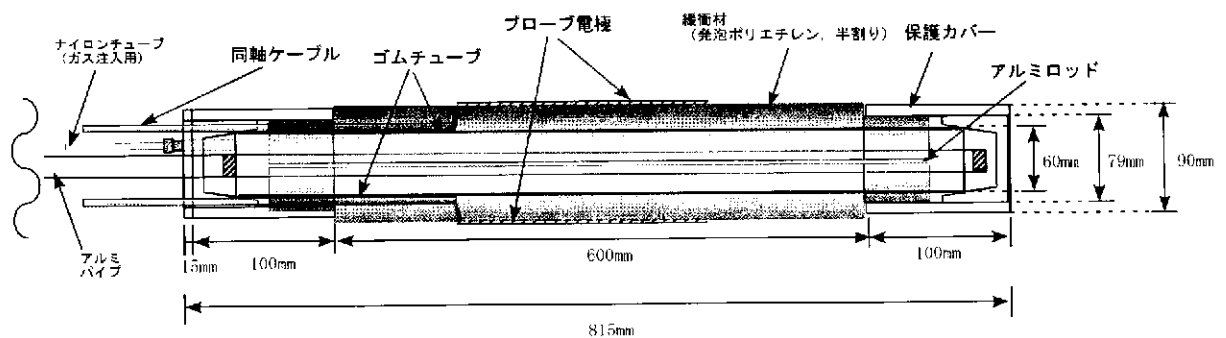


図4.1-1 改良型パッカー式プローブの構造

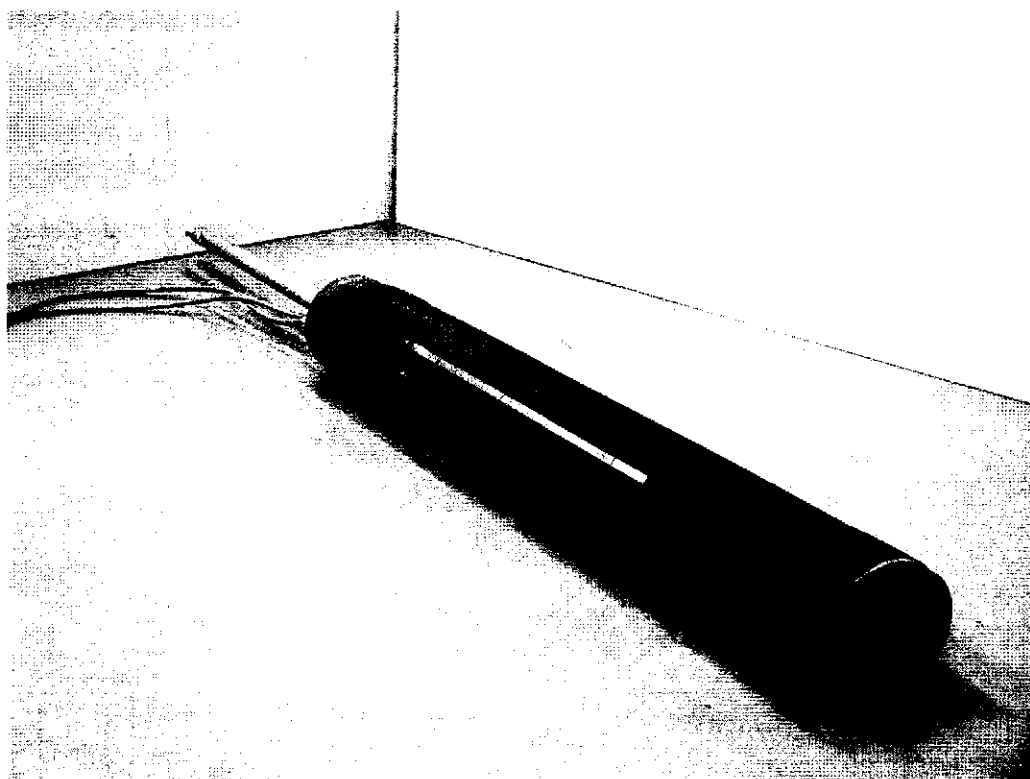


写真4.1-1 旧型パッカー式プローブ
(空気注入用のナイロンチューブは外されている)

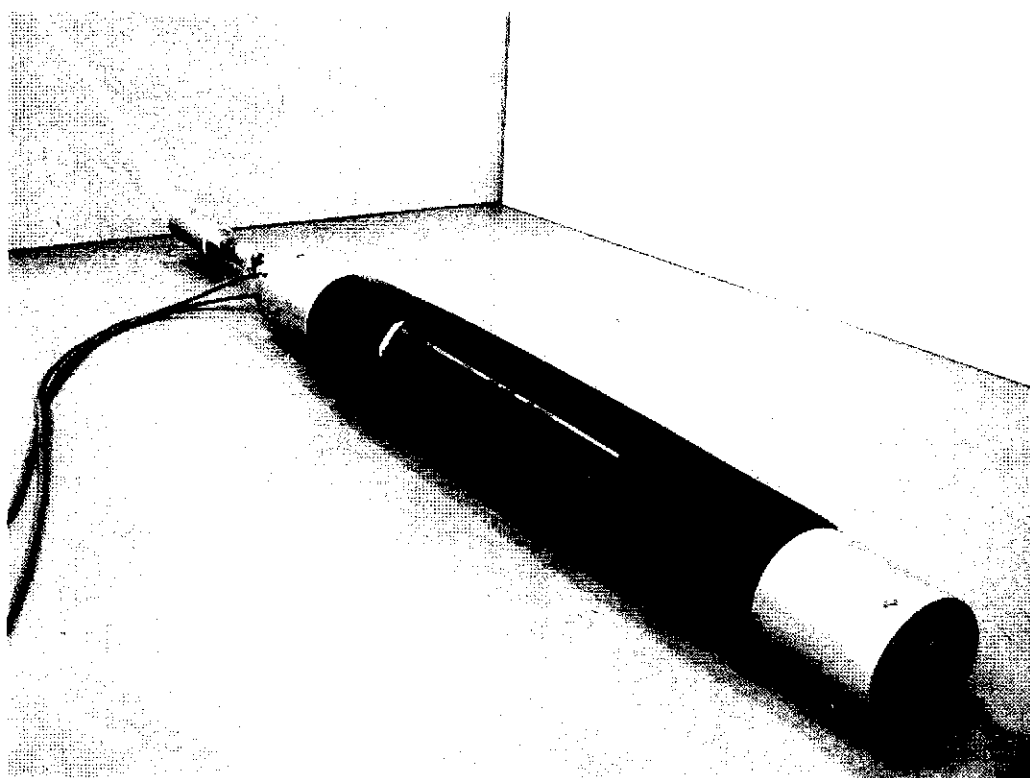


写真4.1-2 改良型パッカー式プローブ

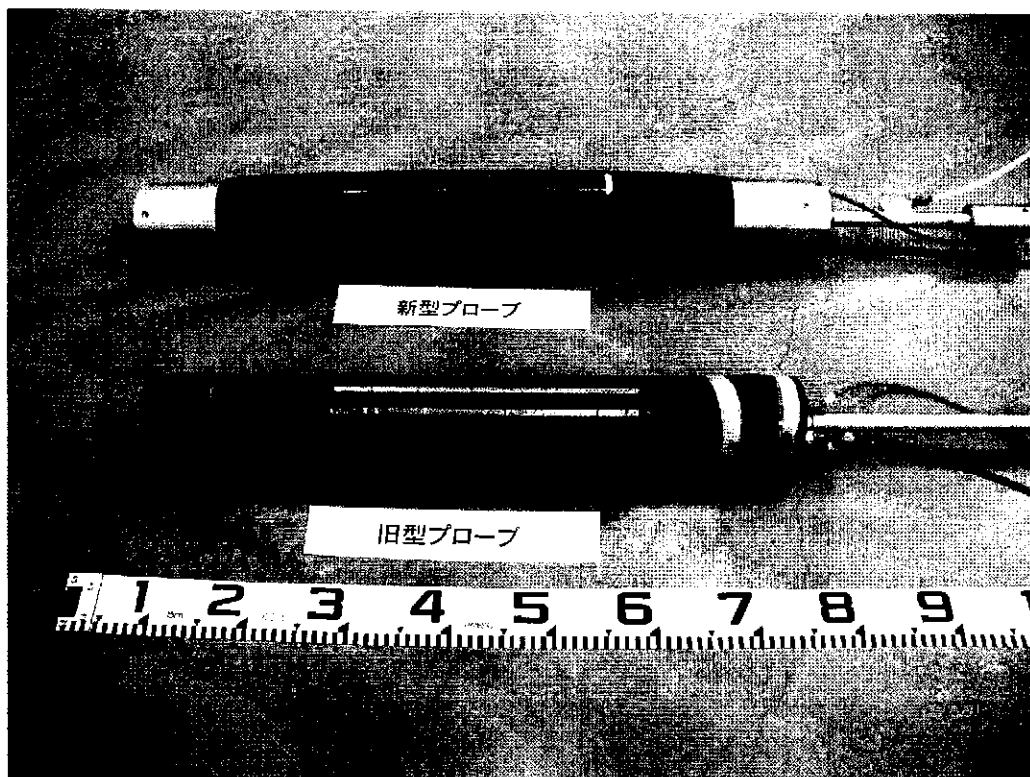


写真4.1-3 改良型パッカー式プローブと旧型パッカー式プローブの比較

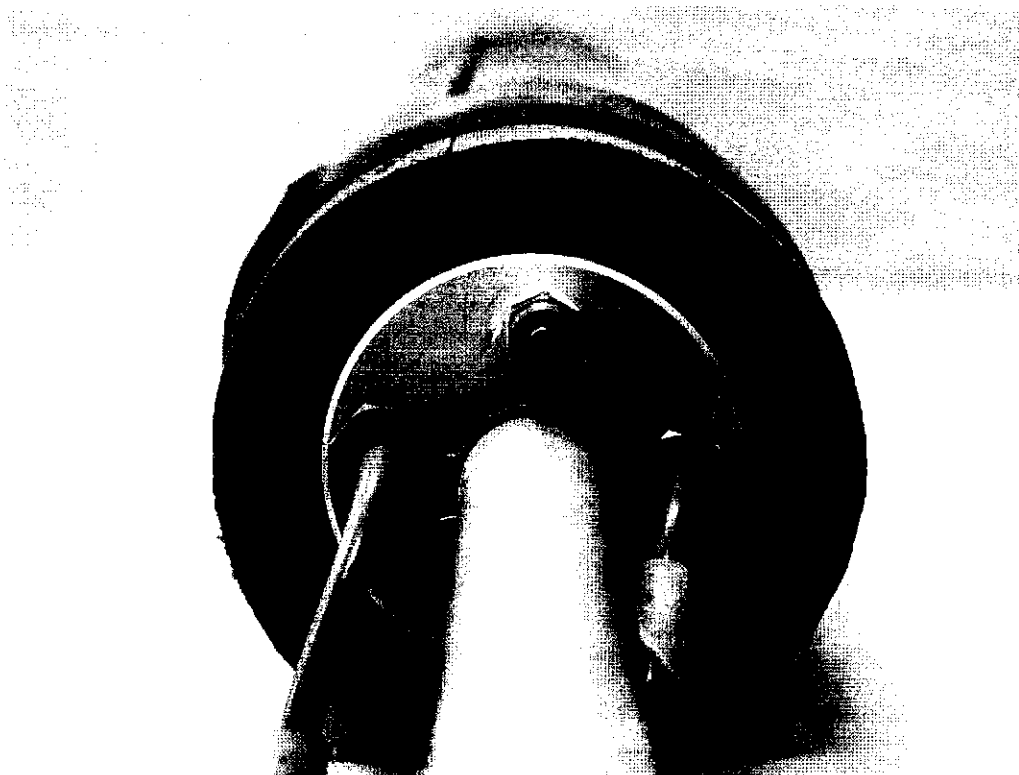


写真4.1-4 旧型パッカー式プローブ（背面）



写真4.1-5 改良型パッカー式プローブ（背面）

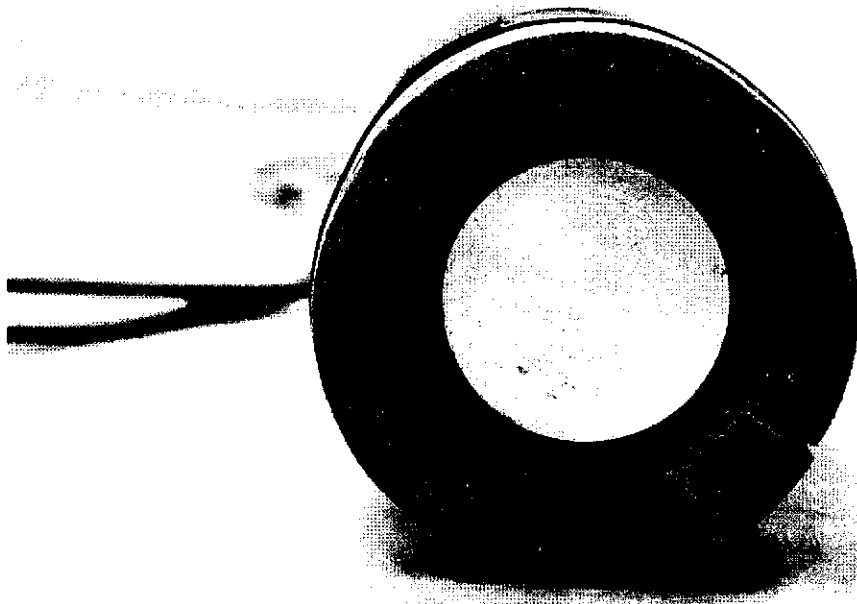


写真4.1-6 旧型パッカー式プローブ（先端部）



写真4.1-7 改良型パッカー式プローブ（先端部）

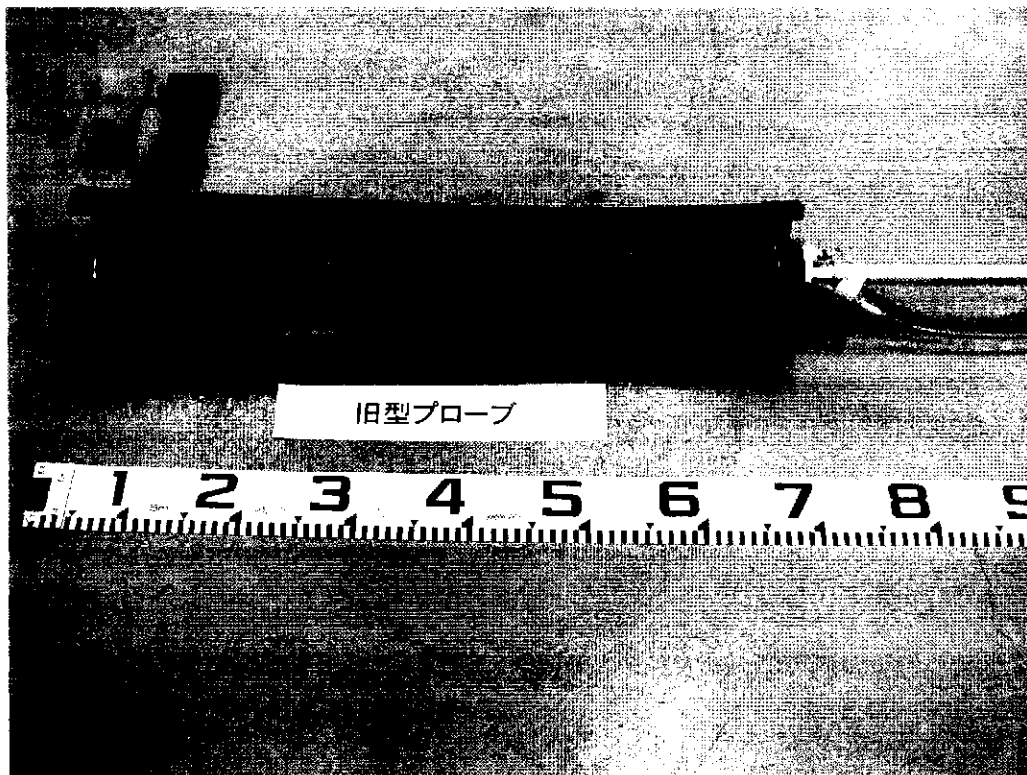


写真4.1-8 旧型パッカー式プローブを分解した状況
(同軸ケーブルがパッカーと緩衝材を貫通しているため分解が困難)



写真4.1-9 改良型パッカー式プローブを分解した状況

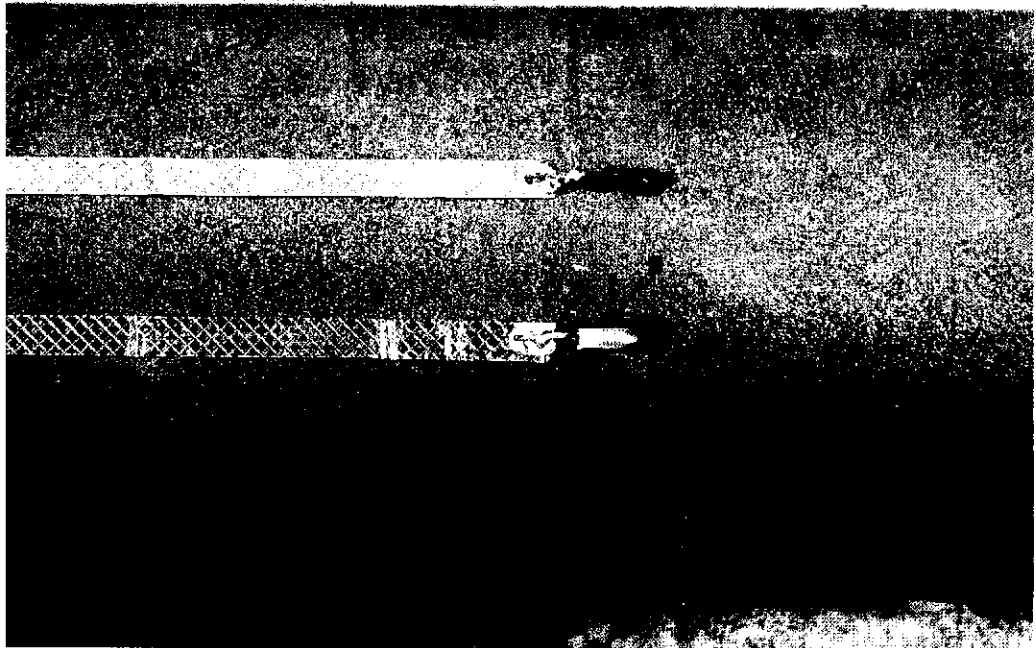


写真4.1-10 旧パッカー式プローブの同軸ケーブルと電極の接合部分
（同軸ケーブルの心線，網線が緩衝材の表面より外に出ている）

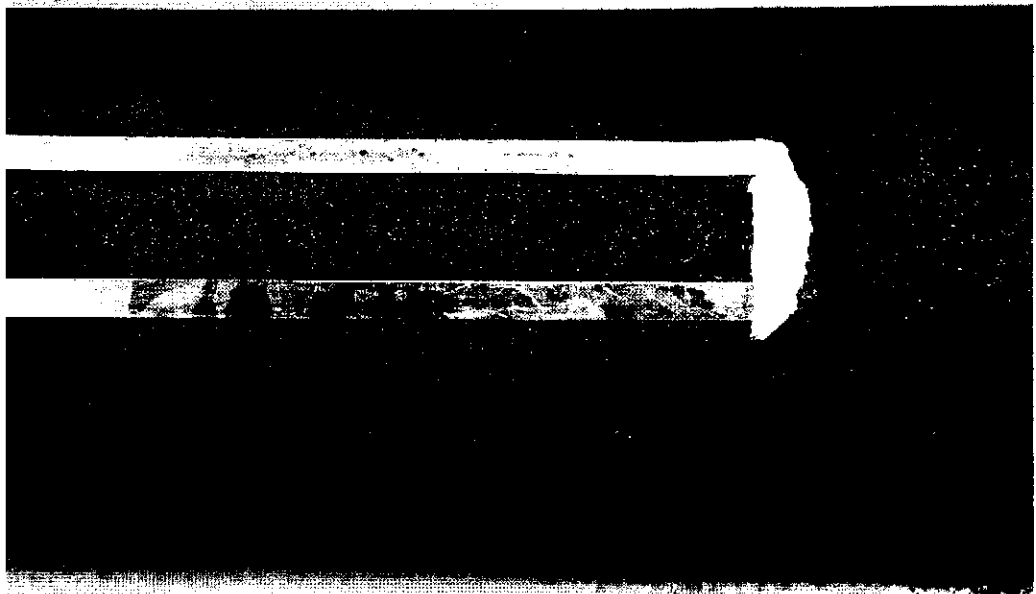


写真4.1-11 改良型パッカー式プローブの同軸ケーブルと電極の接合部分
（同軸ケーブルの分岐部はシリコンゴムで緩衝材中に封入されている）

4.2 高導電率岩盤に適用するためのパッカー式プローブの改良検討

高導電率岩盤の比誘電率を TDR により計測する場合、反射波が著しく減衰して立ち上がりが不鮮明になるため、プローブ先端の反射点の読み取り誤差が大きくなる問題がある。この解決方法として、平成 11 年度研究においてはプローブ電極へのコーティングが検討され、立ち上がり波形改善の効果があることが示された。このほか、平成 8 年度研究では、プローブ電極の幅を狭くすることによっても波形の読み取りやすさが向上することが示された。しかし、これらはいずれもロッド式プローブについて検討されたものであり、パッカー式プローブでは検討されていない。

そこで、パッカー式プローブを高導電率岩盤に適用するための改良点として、緩衝材の厚さとコーティングの有無、プローブ電極の幅、厚さおよびコーティングの有無を取り上げ、これらの効果について検討することとした。表4.2-1に、検討項目と内容を示す。

表4.2-1 プローブの改良検討項目および内容

構成部品	検討項目	目的	内容	設定値
緩衝材	厚さ	電磁波の影響範囲の検討	平成12年度研究では15mmを採用したが、厚い緩衝材の使用が可能となったため、25mmについても検討する。	15mm 25mm
	コーティング	TDR波形の改善	緩衝材の吸水による影響を検討する。	無処理 シリコン塗布
プローブ電極	幅	TDR波形の改善	反射波の立ち上がりを明瞭にする目的で、幅を狭くした場合の効果について検討する。	3mm 6mm
	厚さ	電極の強度改善	孔壁に圧着した際に、電極の間に空隙ができる可能性があるため、その影響について検討する。	0.3mm 0.5mm
	コーティング	TDR波形の改善	電極と岩盤との直接接触による電磁波エネルギーの散逸を防ぐ効果を検討する。	無処理 シリコン塗布 テフロン塗布

以下にそれぞれの検討項目と、比較に用いた設定値について説明する。

(1) 緩衝材の厚さ

平成 12 年度研究で行った電磁波の影響範囲の検討では、緩衝材の厚さはプローブ電極間隔以上にすることが望ましいとしていたが、構造上の制約から、実用上測定値に問題が生じない厚さとして 15mm を採用した。今回、パッカーの構造変更によってより厚い緩衝材を用いることができるようになったため、電極間隔より大きい 25mm についても検討を行った。

(2) 緩衝材のコーティング

緩衝材の吸水により、比誘電率変動している可能性があるため、はっ水コーティングを施して、無処理との違いを調べた。コーティング剤には信越シリコン社製シリコン KE42S を用いた。

(3) 電極の幅

伝送線路理論によれば、電極の幅を小さくすることにより減衰量を低下させることが可能になる。そこで、電極幅が 6mm と 3mm の場合について TDR 波形の改善効果を検討した。

なお、平成 12 年度研究報告では TDR 波形に違いはないとしていたが、これは減衰の小さい材料の場合であって、今回のような導電性の高い岩盤を測定対象とする場合には改善効果が期待できる。

(4) 電極の厚さ

強度的にはなるべく厚い方が望ましいが、厚い電極をパッカーで圧着した場合、電極の間の緩衝材と孔壁との間に空隙ができる可能性があるため、厚さ 0.3mm と 0.5mm についてその影響がないことを確かめた。なお、電気的には両者に違いはないと予想される。

(5) 電極のコーティング

電極と岩盤との直接接触による電磁波エネルギーの散逸を防ぐ目的で、電極に絶縁物質によるコーティングを施し、無処理との違いを調べた。コーティング材には緩衝材のコーティングにも用いたシリコン系の KE42S と、より電気的特性に優れるテフロン塗料の 2 種類を使用した。なお、電極にコーティングを施すと比誘電率の測定値が真の値と異なってくるが、コーティング厚さが薄くなれば、その影響は小さくなると考えられる。

比較検討に使用したプローブ電極を写真 4.2-1 と写真 4.2-2 に、緩衝材を写真 4.2-3 に、そして緩衝材へのコーティングの状況を写真 4.2-4 に示した

比較検討を行うために、表 4.2-2 に示すような組合せのプローブを作製し、室内や原位における TDR 波形の計測を行った。

表4.2-2 プローブの組合せ

番号	緩衝材		電極				同軸ケーブル長
	厚み	表面処理	幅	厚さ	表面処理	間隔*3	
1	15mm	なし	6mm	0.3mm	なし	24mm	15m
2	25mm	なし	6mm	0.3mm	なし		
3	15mm	あり	6mm	0.3mm	なし		
4	15mm	なし	3mm	0.3mm	なし		
5	15mm	なし	6mm	0.5mm	なし		
6	15mm	なし	6mm	0.3mm	あり*1		
7	15mm	あり	3mm	0.3mm	なし		
8	15mm	なし	3mm	0.5mm	なし		
9	15mm	なし	3mm	0.3mm	あり*1		
10	25mm	なし	3mm	0.3mm	なし		
11	25mm	あり	3mm	0.3mm	なし		
12	25mm	あり	3mm	0.5mm	なし		
13	25mm	あり	3mm	0.3mm	あり*1		
14	25mm	あり	3mm	0.5mm	あり*1		
15	25mm	あり	3mm	0.5mm	あり*2		
16	25mm	あり	6mm	0.5mm	あり*2		

*1 シリコンコーティング(緩衝材のコーティングに使うものと同じ)

*2 テフロンコーティング

*3 電極の中心軸の間隔

なお、これらプローブの外観を写真4.2-5から写真4.2-12に示した。

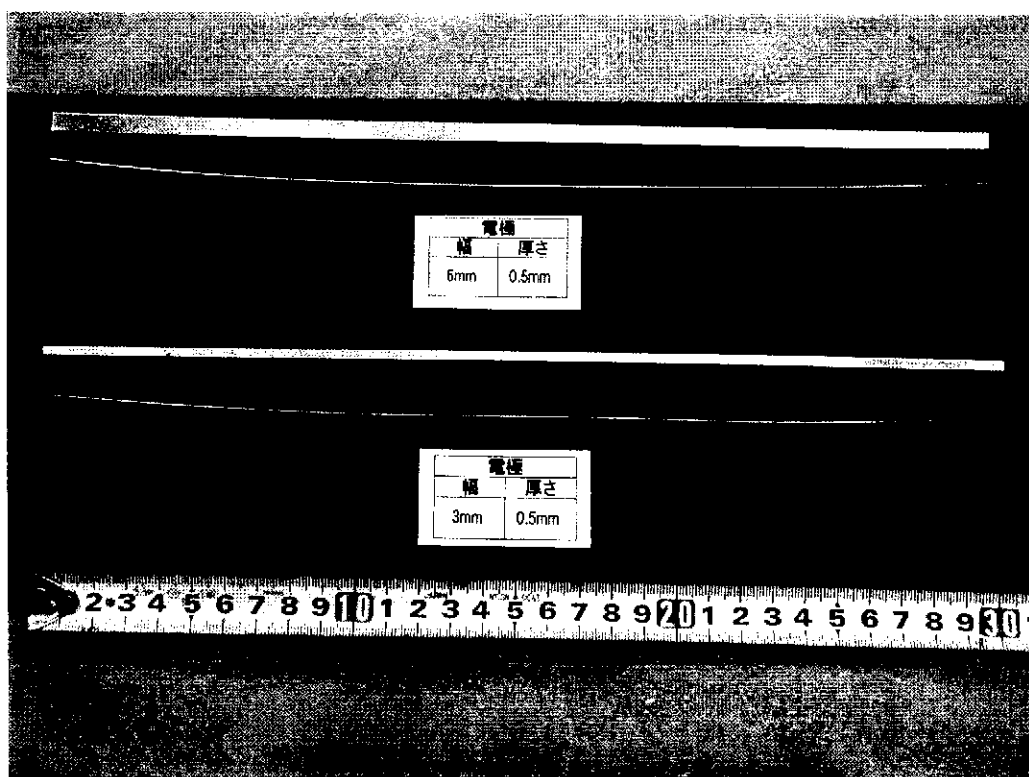


写真4.2-1 新パッカー式プローブの電極（その 1）
（幅 6mm×厚さ 0.5mm，幅 3mm×厚さ 0.5mm）

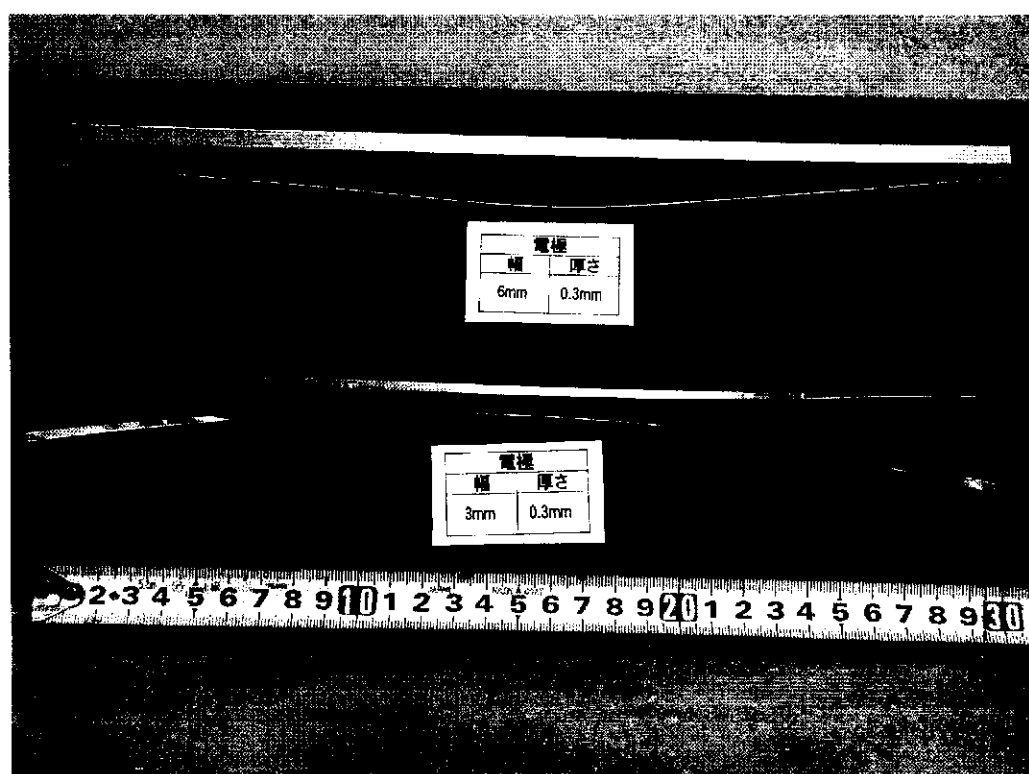


写真4.2-2 新パッカー式プローブの電極（その 2）
（幅 6mm×厚さ 0.3mm，幅 3mm×厚さ 0.3mm）



写真4.2-3 改良型パッカー式プローブの緩衝材
(厚さ 25mm (左)・厚さ 15mm (右))



写真4.2-4 緩衝材のコーティングの状況
(奥：コーティング無・手前：シリコンコーティング)

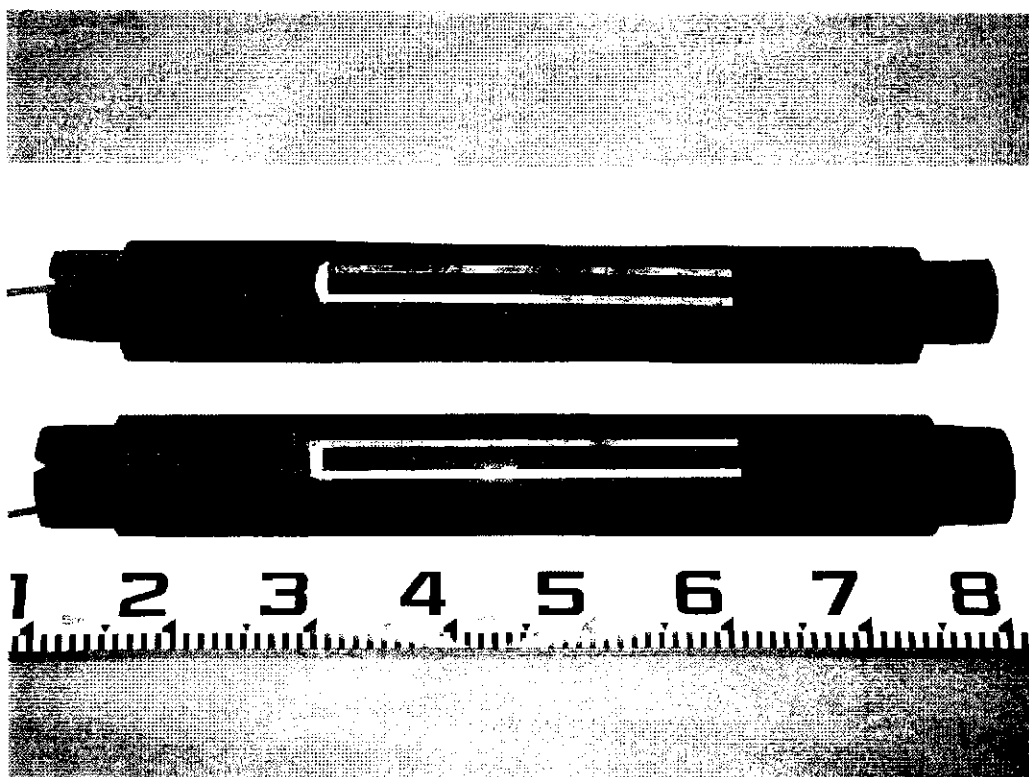


写真4.2-5 プローブ No.1 と No.2 (上から)

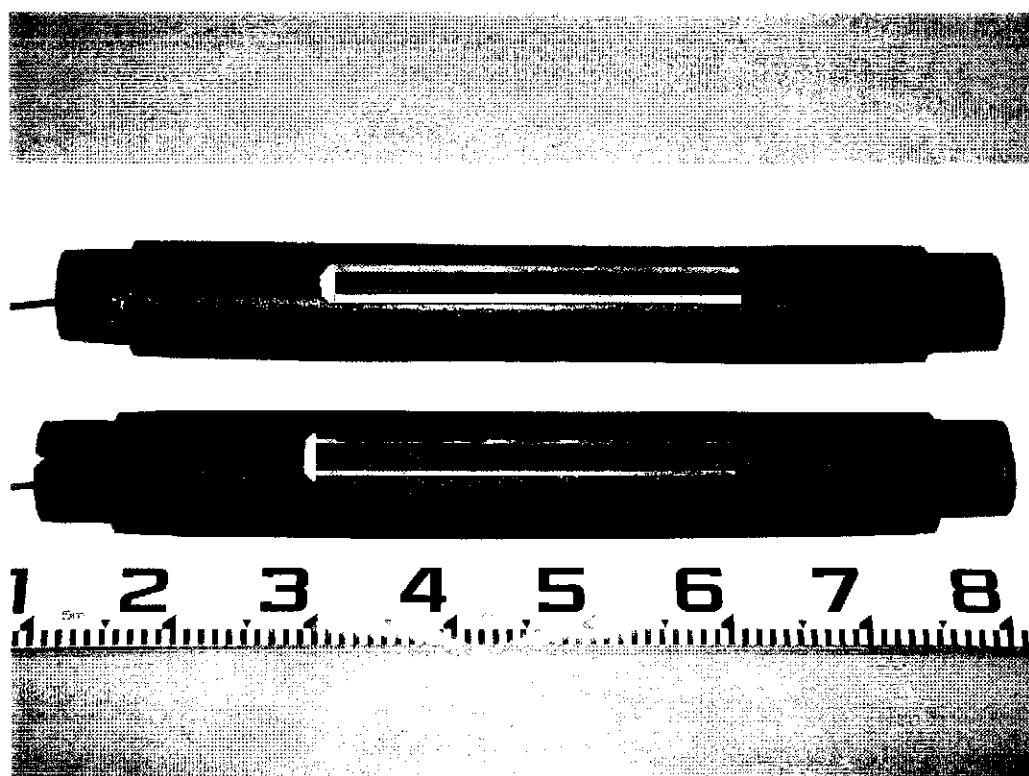


写真4.2-6 プローブ No.3 と No.4 (上から)

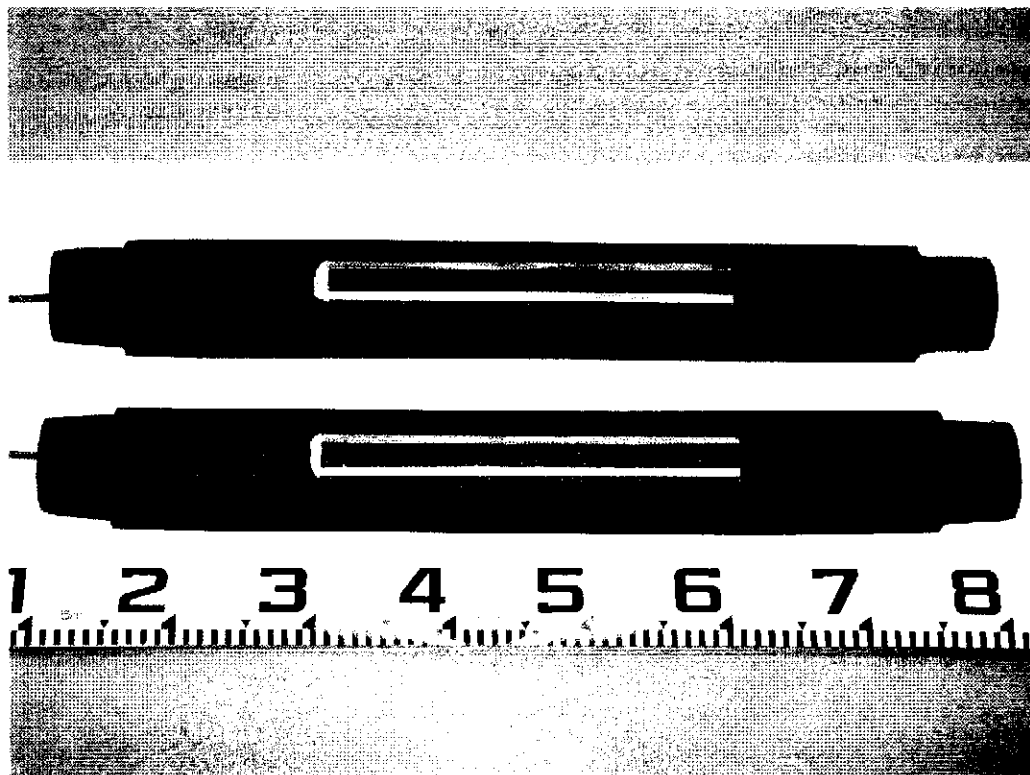


写真4.2-7 プローブ No.5 と No.6（上から）

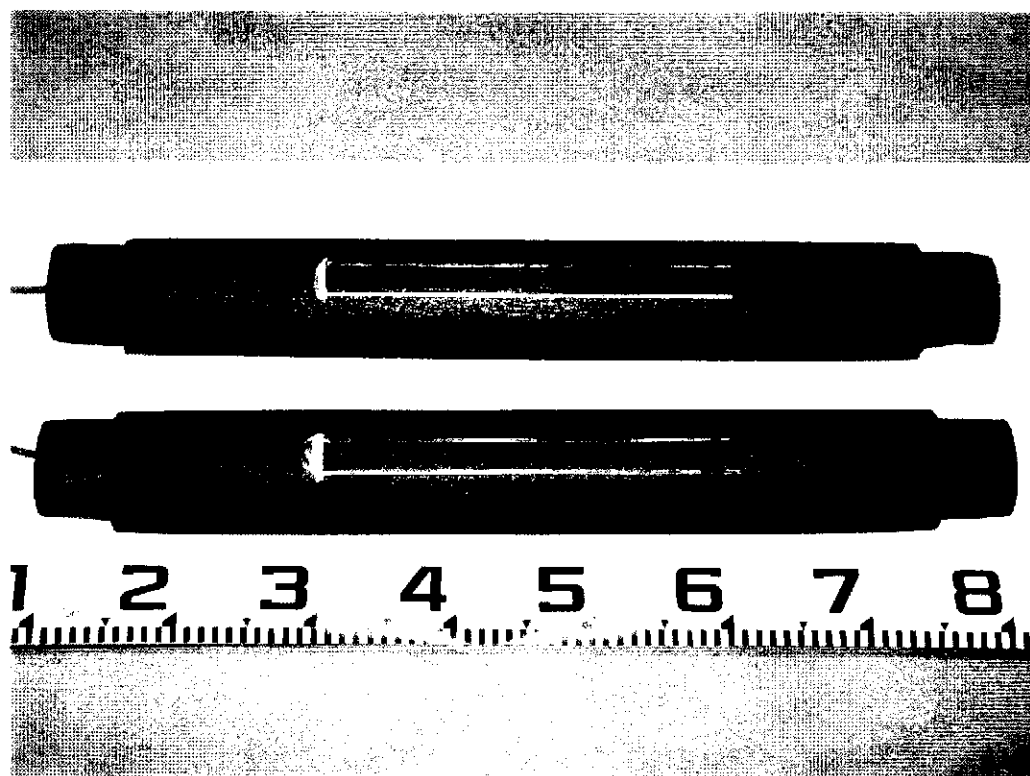


写真4.2-8 プローブ No.7 と No.8（上から）

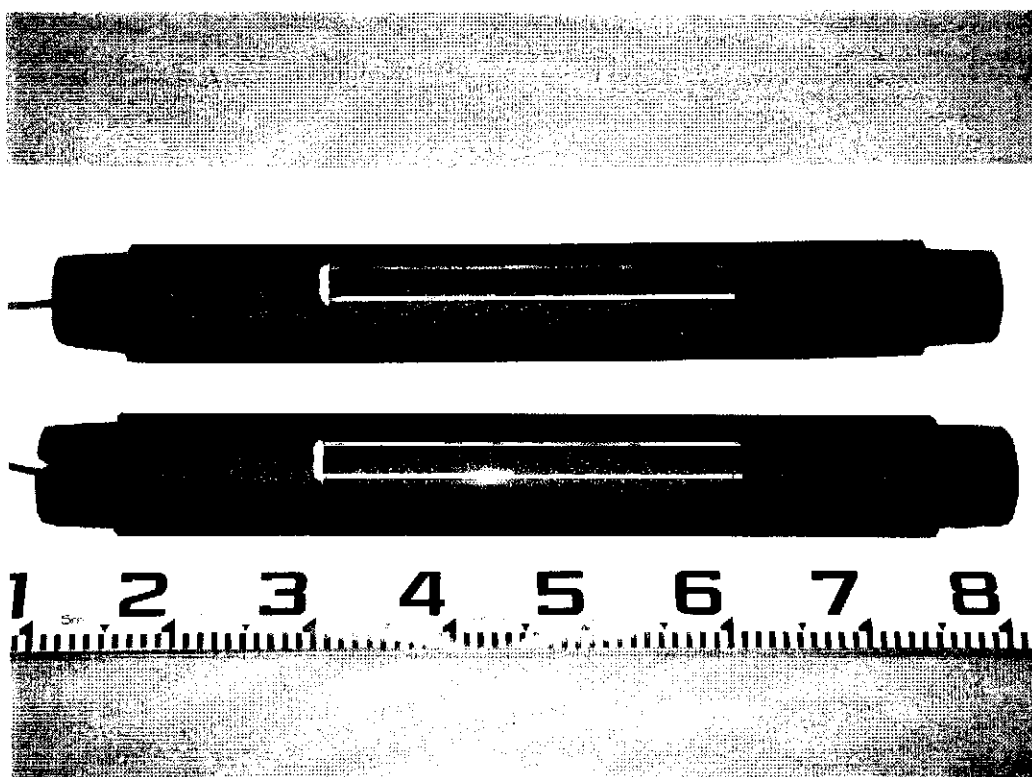


写真4.2-9 プローブ No.9 と No.10（上から）

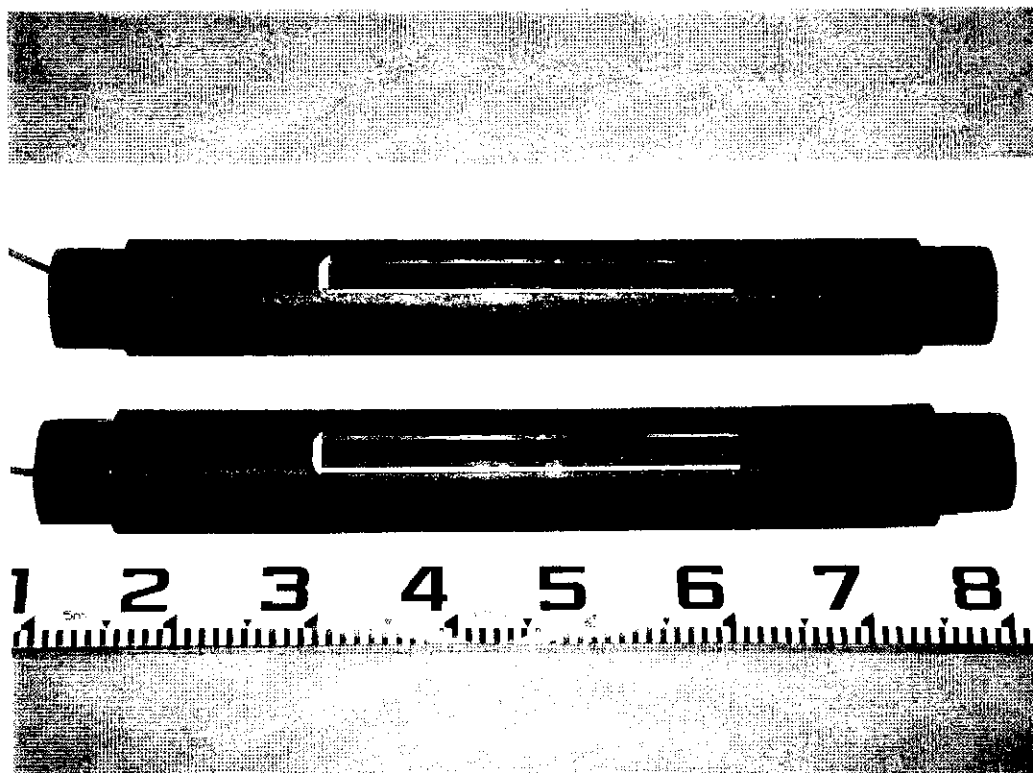


写真4.2-10 プローブ No.11 と No.12（上から）

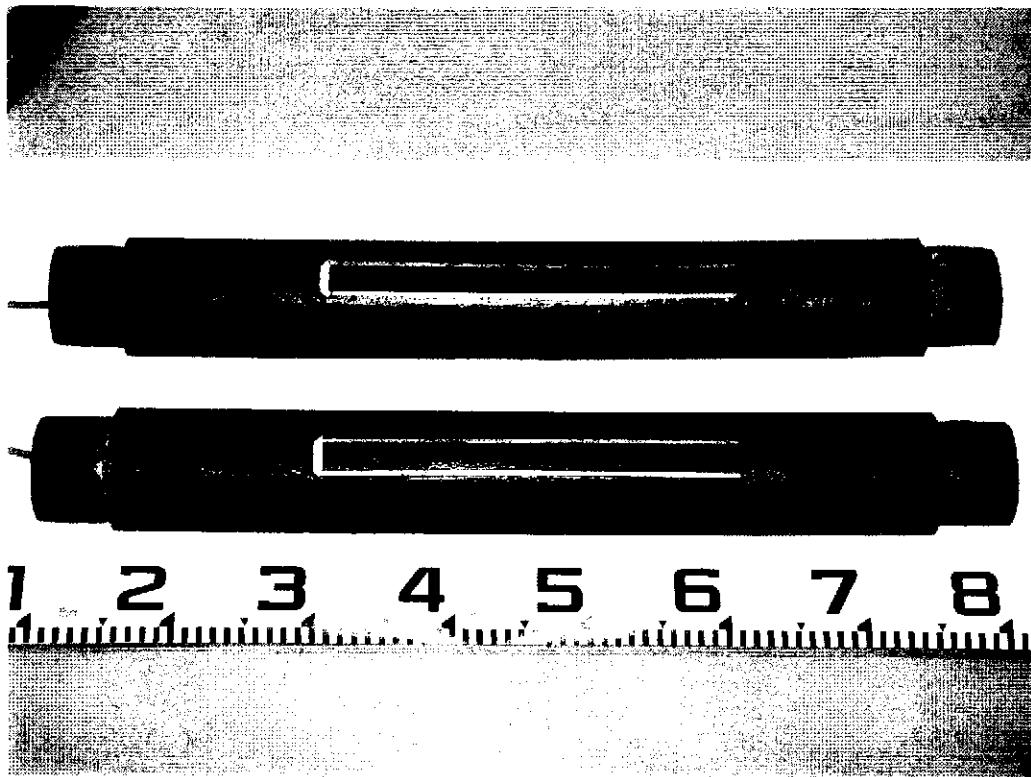


写真4.2-11 プローブ No.13 と No.14 (上から)

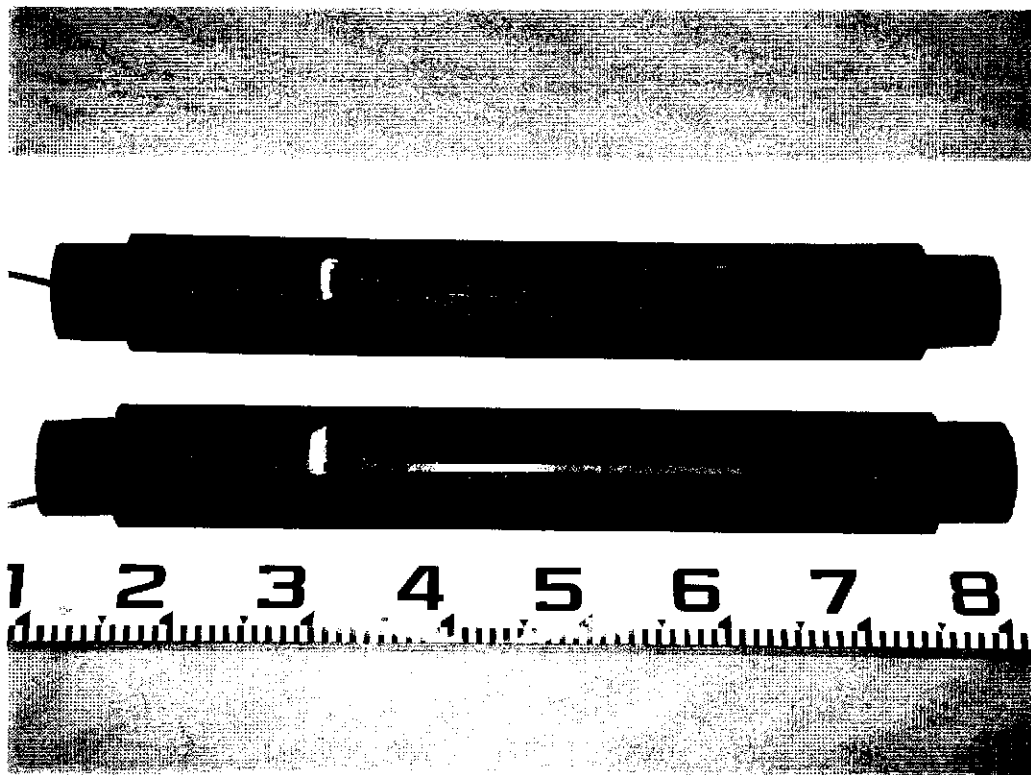


写真4.2-12 プローブ No.15 と No.16 (上から)
(緑色の物質がテフロン塗料)

4.3 パッカー式プローブの性能試験

4.3.1 目的

4.2 節で挙げたプローブの改良効果を確かめるために、コンクリート円管を測定対象として、パッカー式プローブによる室内試験を実施し、測定時のパッカー圧の検討、各種のプローブによる TDR 波形および比誘電率の比較、および壁面に付着した水が比誘電率の測定値に与える影響の検討を行った。

4.3.2 試験装置

図4.3-1に試験装置の模式図を示す。

コンクリート円管は、左官砂を骨材として、普通ポルトランドセメントを砂セメント比 1.84、水セメント比 0.6 で混合し、これを塩ビ管で作った型枠に流し込んで、湛水下で養生固化させることにより作製したものである。水中で固化させたため、作製したコンクリート円管は水で飽和した状態にあると考えられる。

パッカー式プローブは、4.2 節で解説したものであり、測定時には 2 種類のプローブを同時に装着し、プローブ電極をコンクリート円管の中央部に設置した。

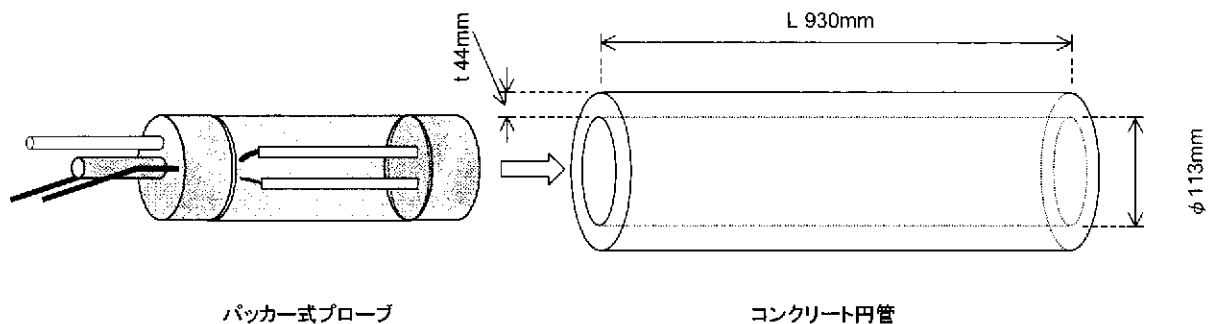


図4.3-1 パッカー式プローブの性能確認試験の概念図

写真4.3-1にコンクリート円管の外観を、また写真4.3-2に、コンクリート円管にパッカー式プローブを挿入して TDR 波形の計測を行っている状況を示す。



写真4.3-1 測定対象としたコンクリート円管
（表面の緑色はコンクリート打設時に塗布したグリス）

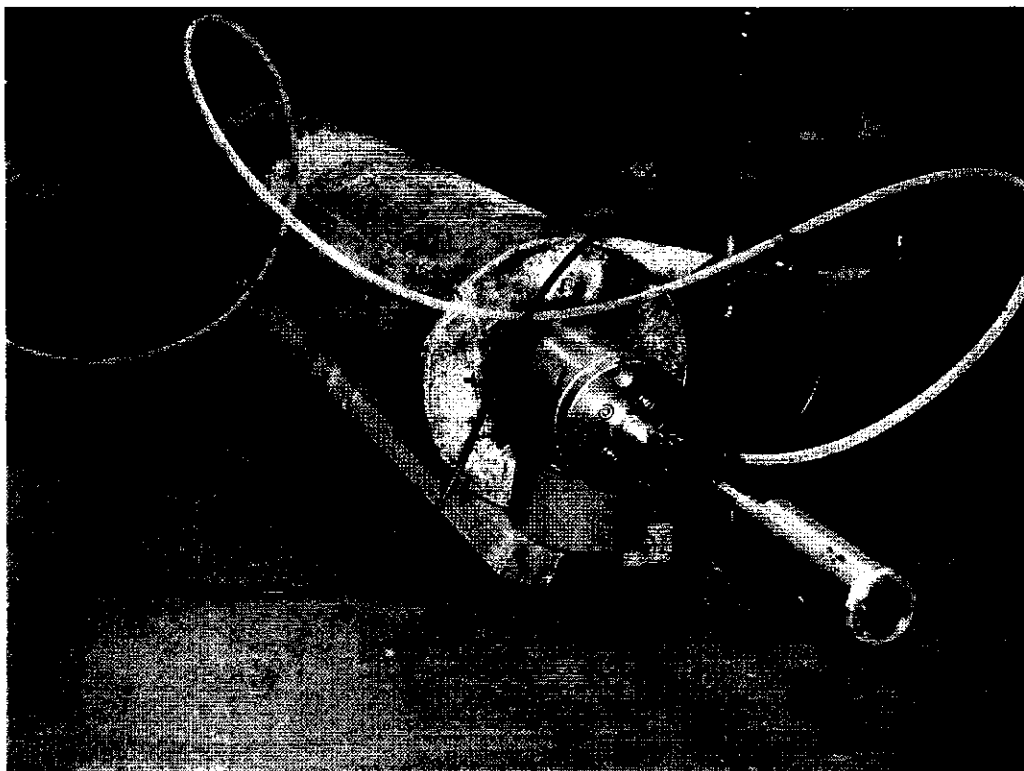


写真4.3-2 コンクリート円管の TDR 波形の計測状況
（右後部のデシケーターの中身は、水分調整中のコア試料）

4.3.3 試験方法

(1) 測定時のパッカー圧の検討

コンクリート円管はほぼ理想的な円筒形であるため、プローブ電極を内壁に十分に圧着させるのに必要なパッカー圧は、プローブが違って大きく変わらないと考えられる。そこで、前掲表 4.2-2 中のプローブ No.1 と No.4 を用いて、プローブ電極が内壁に十分に圧着されるようなパッカー圧について検討し、これを測定時の標準的なパッカー圧とした。具体的には、パッカー式プローブを飽和したコンクリート円管に入れ、パッカー圧を段階的に上昇させて TDR 波形の計測を行い、比誘電率の変化を調べた。

(2) 各種のプローブによる TDR 波形および比誘電率の比較

前掲表 4.2-2 中のプローブ No.2～No.3, No.5～No.14 を用いて、標準的なパッカー圧でコンクリート円管の TDR 波形の計測を行い、比誘電率を測定した。

(3) 壁面に付着した水が比誘電率の測定値に与える影響

内壁に水滴が付着している場合の測定値への影響と、緩衝材コーティングの効果について検討するため、内壁を水で濡らした状態にして、プローブ No.4（緩衝材コーティングなし）と No.7（緩衝材コーティングあり）による TDR 波形の計測を行い、比誘電率を比較した。

4.3.4 試験結果

(1) 測定時のパッカー圧の検討

図4.3-2に、前掲表プローブ No.1（電極幅 6mm, 厚さ 0.3mm）と No.4（電極幅 3mm, 厚さ 0.3mm）を用いて、パッカー圧力を段階的に上昇させて測定したときの比誘電率を示す。いずれのプローブも、比誘電率は 30kPa 以上でほぼ一定となっており、これ以上の圧力であれば十分に内壁に圧着されていると考えられる。以上の結果から、測定時のパッカー圧の標準を 40kPa とした。なお、その他のプローブでの測定時においても、TDR ケーブルテスターの LCD で確認する限り、30kPa 以上のパッカー圧では反射波の立ち上がりはほとんど変わらなかった。

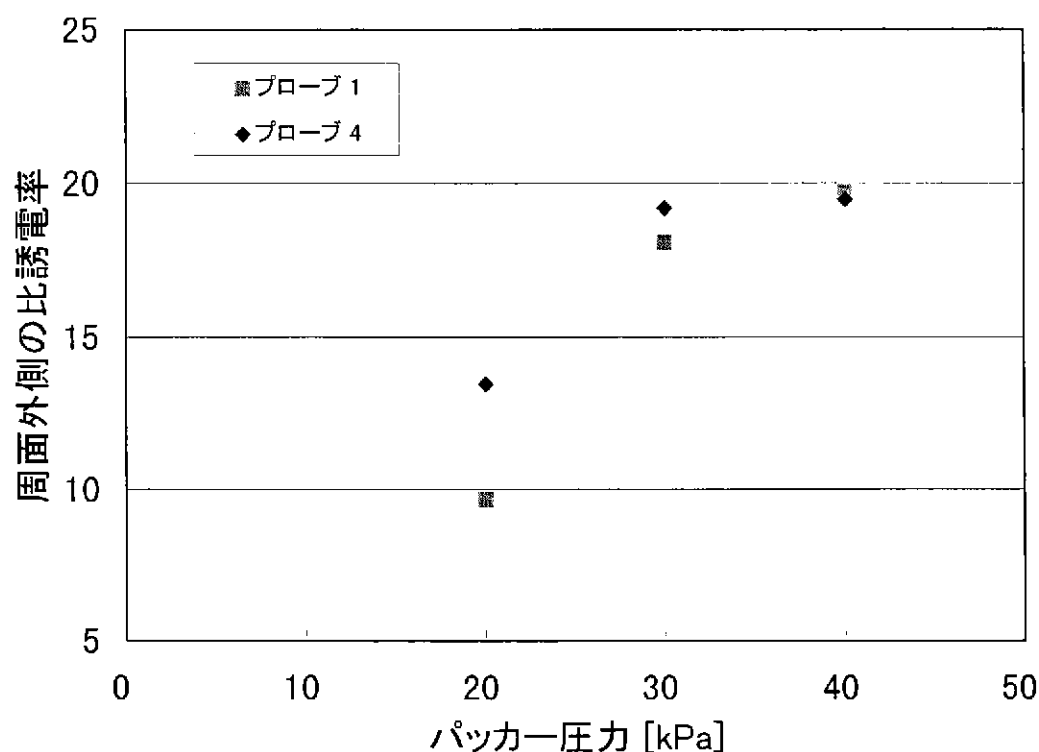


図4.3-2 パッカー式プローブの圧力の違いによる比誘電率の違い

(2) 各種のプローブによる TDR 波形および比誘電率の比較

飽和コンクリート円管について測定された TDR 波形のうち、プローブ No.1～No.6 によるものを図4.3-3に示す。図中の波形右側の項目は、プローブ No.1 を基準としたときに、それぞれのプローブがどの点で異なっているかを示す。

前掲図 3.2-4 と比較すると、いずれのプローブもプローブ先端での反射波の立ち上がりは明瞭であった。なお、電極幅、電極の厚さ、緩衝材の厚さを変化させても波形に大きな変化は見られなかったが、電極や緩衝材にコーティングした場合には、わずかながら立ち上がりが明瞭になった。

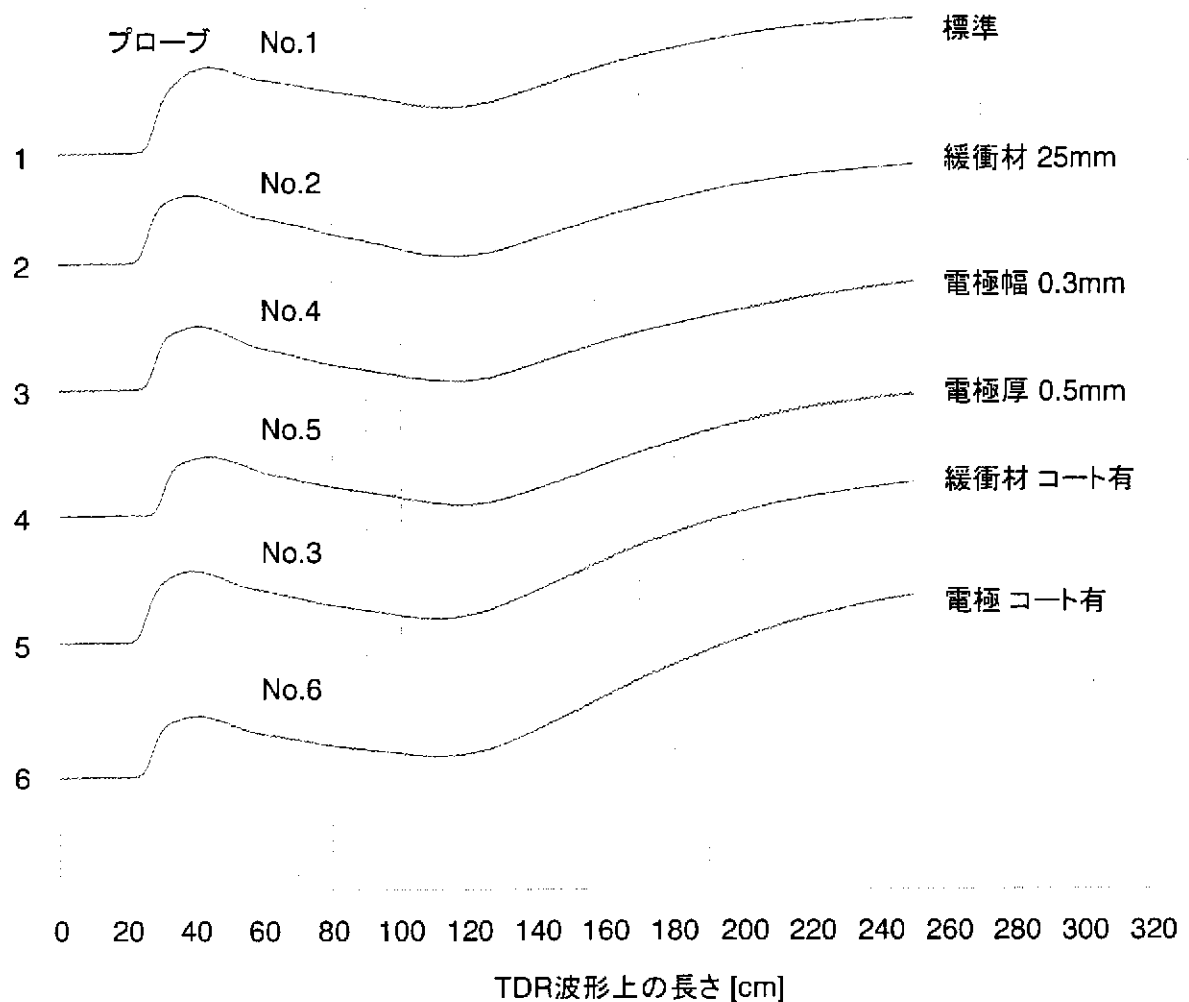


図4.3-3 標準に対し項目を変化させたときの TDR 波形の変化

プローブ No.1～No.14 を用いて測定したコンクリートの比誘電率を図4.3-4に示す。電極をシリコンコーティングしていないプローブによる比誘電率は、いずれも 20 前後の値であった。これは、5.6 節に示す飽和コンクリートコアの比誘電率値に近い値であった。なお、プローブ No.8 だけはコアの測定値よりもやや高い比誘電率であった。

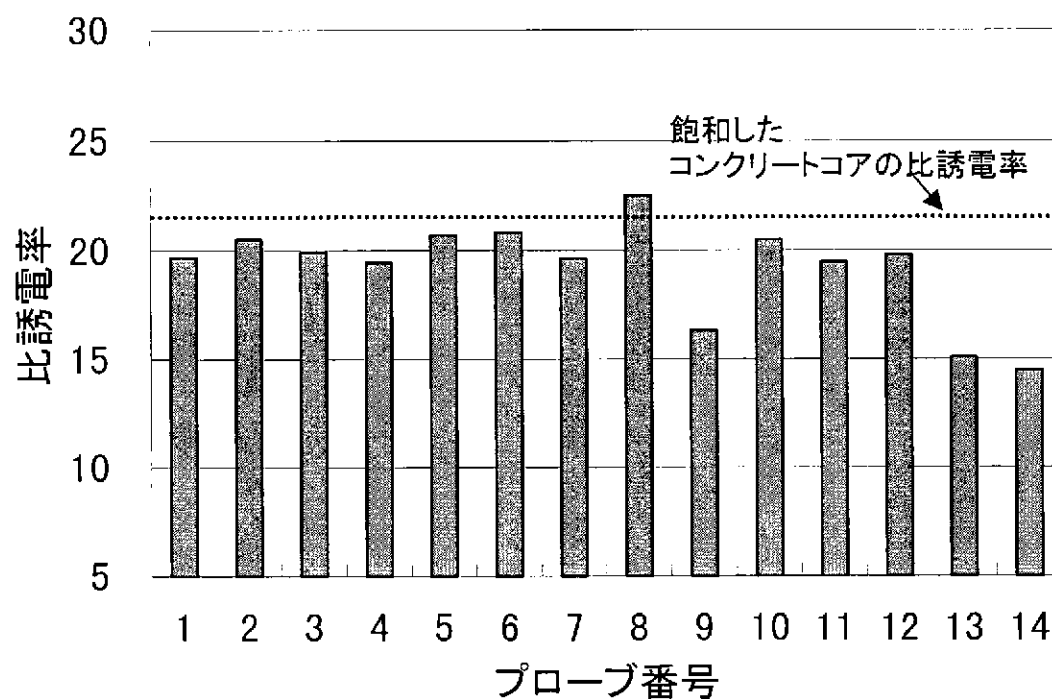


図4.3-4 各種プローブで測定した飽和したコンクリート円管の比誘電率

電極をシリコンコーティングしたプローブによる比誘電率は、No.6を除いていずれも15前後の値であり、飽和コンクリートコアの75%程度であった。

(3) 壁面に付着した水が比誘電率の測定値に与える影響

図4.3-5に、内壁を水で濡らしたコンクリート円管の比誘電率が、パッカー圧をかけてからの時間の経過と共に変化した様子を示す。内壁に水滴がついていない状態での比誘電率（前掲図4.3-4）と比較すると、プローブ No.4 では約19が29に、プローブ No.7 では19程度が26へと大きくなった。また、プローブ No.4 では時間の経過とともにわずかに比誘電率が増加する傾向を示したが、プローブ No.7 では一定の値であった。

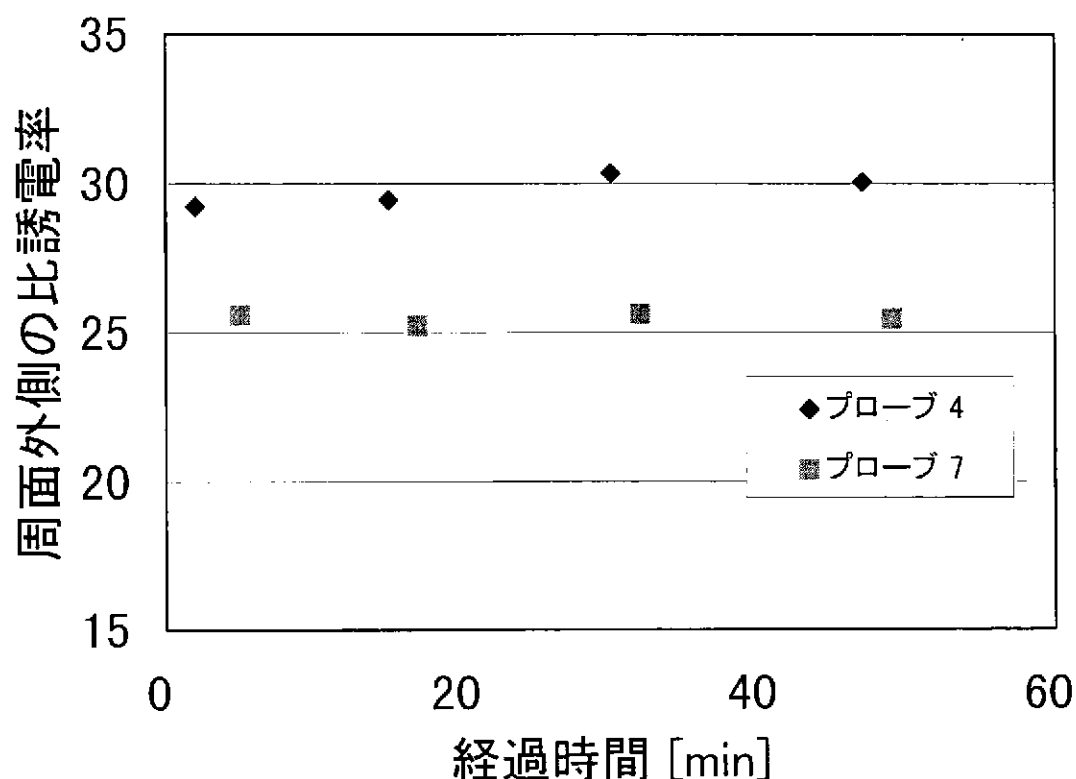


図4.3-5 内壁を水で濡らしたコンクリート円管の比誘電率測定値

4.3.5 考察

いずれのプローブもプローブ先端の反射点の立ち上がりが明瞭であったことから、コンクリートを測定対象とする場合、反射波の減衰に起因する読み取り誤差は小さいと考えられる。

電極をシリコンコーティングしていないプローブによる測定値は、いずれもコアでの値とほぼ一致しており、また電極幅、電極の厚さ、緩衝材の厚さによる違いも小さかった。したがって、これらのプローブはコンクリートの比誘電率測定に用いることができ、岩石の測定にも適用できる可能性が高いと考えられる。

一方、電極をシリコンコーティングしたプローブによる測定値は、No.6を除いてコアでの値よりも小さくなった。これは測定時に比誘電率の小さいシリコンゴムが電極とコンクリートの間に存在するためであり、定性的には予想された結果である。真の比誘電率を求めるには、別途キャリブレーションを行う必要がある。プローブ No.6の測定値が未コーティングのものとほぼ同等であった理由としては、コーティングの厚さが薄かったことが考えられる。

また、電極へのシリコンコーティングによって、プローブ先端の反射点の立ち上がりはあまり大きく改善されなかった。以上のことから、少なくともコンクリートを測

定対象とする場合は、電極をシリコンコーティングしたプローブの優位性はないと考えられる。

コンクリートは、原位置試験で測定対象とした泥質凝灰岩よりも比誘電率、導電率ともに小さい材料であるため、TDR 波形の計測は比較的容易であったと考えられる。したがって、各プローブのコンクリートへの適用性がそのまま泥質凝灰岩についても当てはまるわけではない。泥質凝灰岩については別途検討する必要がある。

4.4 まとめ

原位置測定により明らかとなったパッカー式プローブの問題点を解決するため、パッカー式プローブの改良を行った。改良された点は、以下のとおりである。

- 1) 銅製の導電性テープに代えて、より剛性の高い真鍮板を採用した。また、電極が孔壁との干渉により剥れないように、ポリオレフィン接着剤を用いて緩衝材に強力に接着した。
- 2) パッカーの両端に保護用のアルミカバーを装備し、プローブ全体のガイドと保護の機能を持たせた。また、パッカーゴムはテーパー組合せで挟み込んだ上にネジ止めする構造として、エア漏れを改善した。
- 3) 同軸ケーブルをプローブ電極の裏側にはんだ付けする構造とし、孔壁側への突起物を無くした。また、同軸ケーブルが分岐して緩衝材を通過する部分をシリコンゴムで充填し、ケーブルの分岐部分に水や泥が入り込まないようにした。
- 4) 同軸ケーブルが緩衝材とパッカーゴムの間を通る構造とし、組立、分解、部品の交換を容易にした。
- 5) プローブ電極と同軸ケーブル、緩衝材を一体のユニットとし、これを交換することにより様々な形態のプローブを用いることができるようにした。

また、パッカー式プローブを導電率の高い岩盤に適用するため、改良検討項目として緩衝材の厚さとコーティングの有無、プローブ電極の幅、厚さおよびコーティングの有無を取り上げ、比較検討用のプローブを作製した。これらを用いて、飽和コンクリート円管を測定対象とした室内試験を実施し、以下の結論が得られた。

- 1) コンクリートを測定対象とする場合、いずれのプローブも反射波の減衰に起因する読み取り誤差は小さいと考えられる。
- 2) 電極をシリコンコーティングしていないプローブは、いずれもコンクリートの比誘電率測定に適用でき、岩石の測定にも適用できる可能性が高いと考えられる。
- 3) 電極にシリコンコーティングしたプローブは、真の比誘電率を求めるために別途キャリブレーションを実施する必要がある、優位性はないと考えられる。なお、

泥質凝灰岩については別途検討する必要がある。

4) 改良型パッカー式プローブは、耐久性、取扱いやすさ共に良好であった

5. 岩石コアの比誘電率と含水率のキャリブレーション

5.1 目的

原位置測定で得られた比誘電率から体積含水率を推定するため、01SI-10, 01SI-11の各孔のボーリング岩石コアについて、比誘電率と体積含水率のキャリブレーション測定を行った。また、4.3節で述べたコンクリート円管と等配合のコンクリートコアについても、比誘電率と体積含水率のキャリブレーションを行った。

5.2 供試体

01SI-10, 01SI-11 孔のボーリング岩石コアのうち、表5.2-1に示したものを供試体とした。供試体は、原位置で比誘電率の測定を行った深度が含まれることが望ましいが、該当する深度のコアの破損、亀裂の存在、あるいは試料整形の段階での破損等の理由により、表5.2-1には測定実施深度でないものも含まれる。また、4.3節で述べたコンクリート円管と等配合の2つのコアを作製し、供試体とした。表5.2-1には各コアの主要な物性値も併せて示した。

表5.2-1 コア供試体の一覧表および主要物性値

岩種	供試体 番号	採取孔および 深度	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 [%]
土岐夾炭層 上部累層 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
	M1101	01SI-11孔 2.85～2.98m	φ6×H13	1.72	1.16	57.4	49.7
コンクリート	C1201	-	φ6.5×H13	2.19	1.94	26.1	13.5
	C1202	-	φ6.5×H13	2.19	1.95	25.9	13.4

供試体の形状は円柱状で、直径は採取したコアの大きさである 60mm 程度、高さは従来のキャリブレーション試験と同様に 130mm とした。ロッド式プローブ電極の長さとは本数は、これまでと同様にそれぞれ 100mm, 2 本とした。プローブ設置用の孔は、泥質凝灰岩の場合は 5.5mm, コンクリートの場合は 5.0mm のドリルを用い、孔の中心間隔を 1.8cm とし、供試体の高さ方向に 10cm の深さで削孔した。なお、供試体 M1001 だけは高さを 110mm とし、プローブ電極の長さを 90mm とした。

5.3 プローブ電極設置方法

プローブ電極として外径 5mm の真鍮製パイプと、その中に挿入する内径 4mm の真鍮製の丸棒を組み合わせたものを用いた。電極の設置方法を図5.3-1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する。充填剤には導電性シリコン KE4576（信越シリコン製）を使用した。

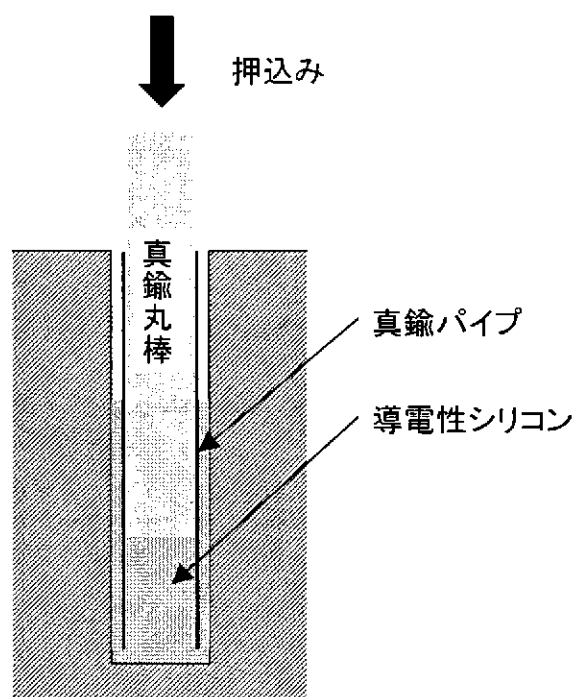


図5.3-1 空隙を残さないプローブ電極の設置方法

5.4 試験装置

試験装置の模式図を図5.4-2に示す。TDR プローブの同軸ケーブルの長さは 50cm である。ケーブルテスターは、PC と接続されており、TDR 波形はデータ取得プログラムによりデジタルデータとして記録される。

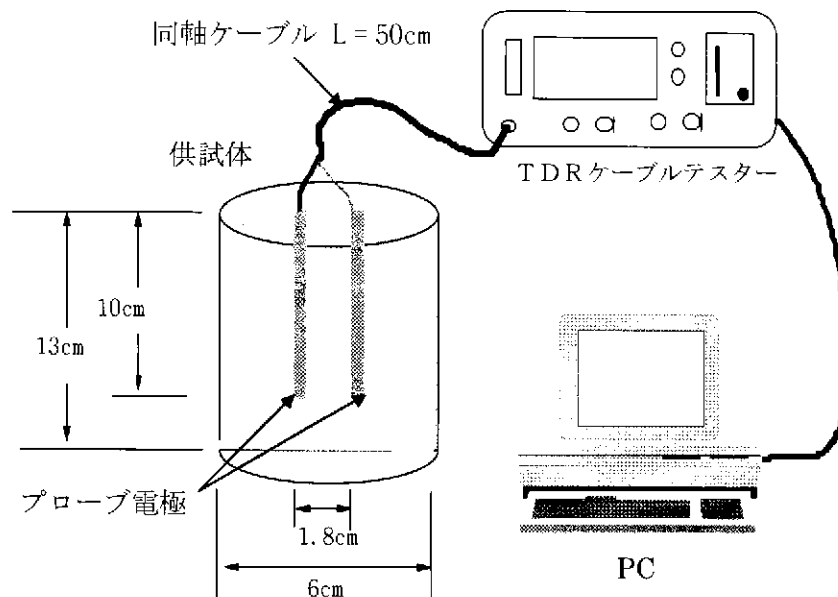


図5.4-2 室内コアキャリブレーション試験の模式図

5.5 測定方法

5.5.1 凝灰質泥岩

水浸して脱気飽和させた供試体に、5.3 節で述べた方法でプローブ電極を設置し、再び一昼夜水浸したものを飽和度 100%の供試体として、TDR 波形の計測を開始した。その後、飽和度約 50%までは空気中で、それ未満は乾燥機を用いて供試体を段階的に乾燥させていき、順次 TDR 波形の計測を行った。1 段階あたりの乾燥量は、空気中の場合は飽和度換算で 4～5%相当量を目標とし、乾燥機の場合は飽和度換算で 10～15%相当量を目標とした。なお、乾燥量は重量法で測定した。

1 段階の乾燥が終わった後は、供試体内での水分の再分布を考慮して、供試体をビニール袋に入れて一晩放置してから TDR 波形の計測を行った。供試体は最終的に乾燥機で絶乾させ、乾燥質量を求めて、各乾燥段階での正確な含水率を逆算した。

5.5.2 コンクリート

泥質凝灰岩の場合と同様の方法により測定した。ただし、供試体の乾燥は飽和度約 70%までを空気中で、それ未満は乾燥機を用いて行った。1 段階あたりの乾燥量は、空気中の場合は飽和度換算で 2～4%相当量を目標とした。乾燥機の場合は、飽和度約 70～55%の間は 5%相当量を目標とし、それ未満は飽和度約 35%と 0%のみ測定した。

写真5.5-1と写真5.5-2に、TDR 波形の計測開始時の泥質凝灰岩供試体、コンクリート供試体の外観を示す。また、写真5.5-3から写真5.5-8には、空気乾燥終了時点の各供試体の外観を示す。泥質凝灰岩の供試体は、乾燥の進行とともに収縮し、亀裂の発生や破片の脱落が多く生じた。

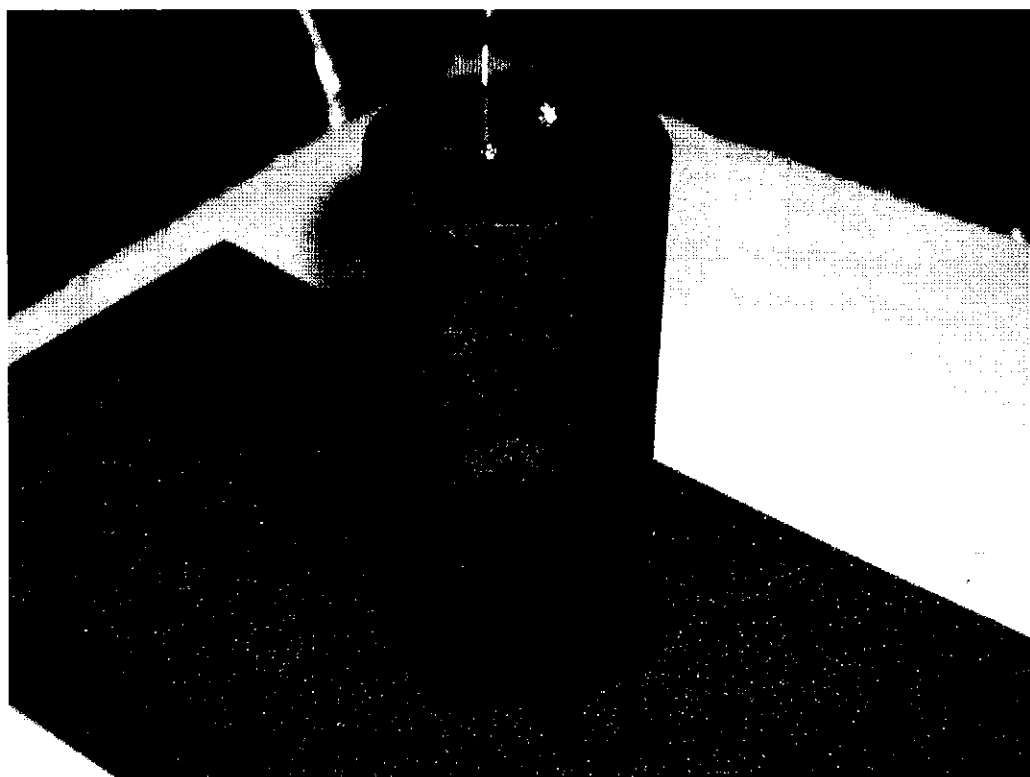


写真5.5-1 計測開始時の泥質凝灰岩コア (M1003)

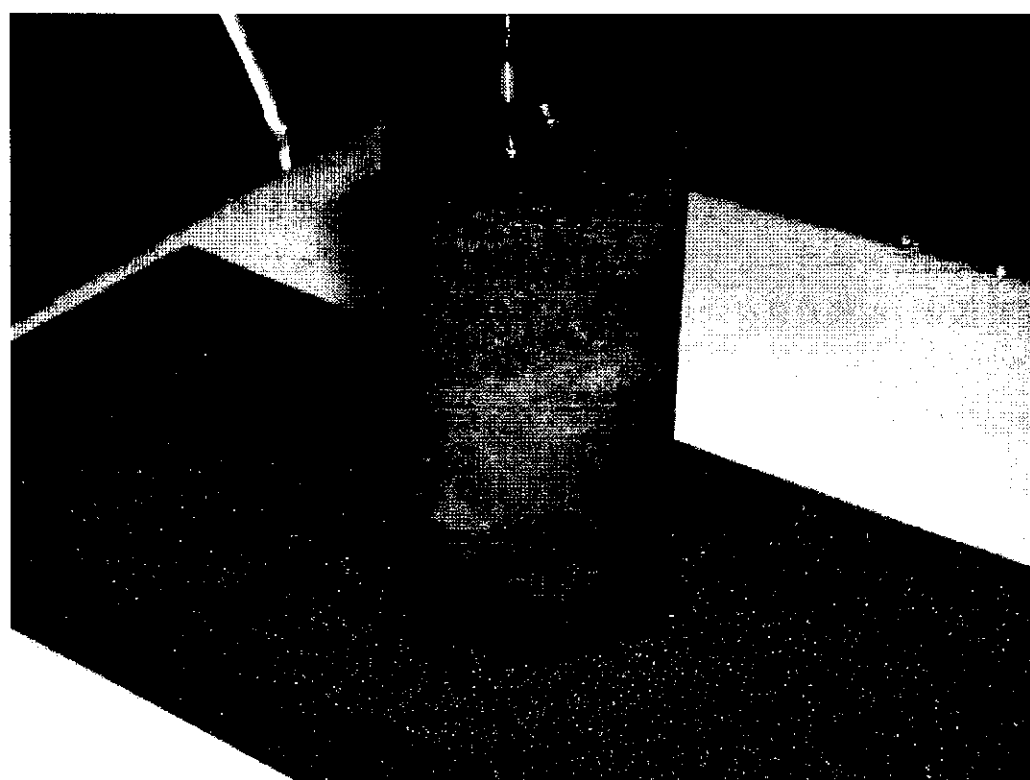


写真5.5-2 計測開始時のコンクリートコア (C1201)

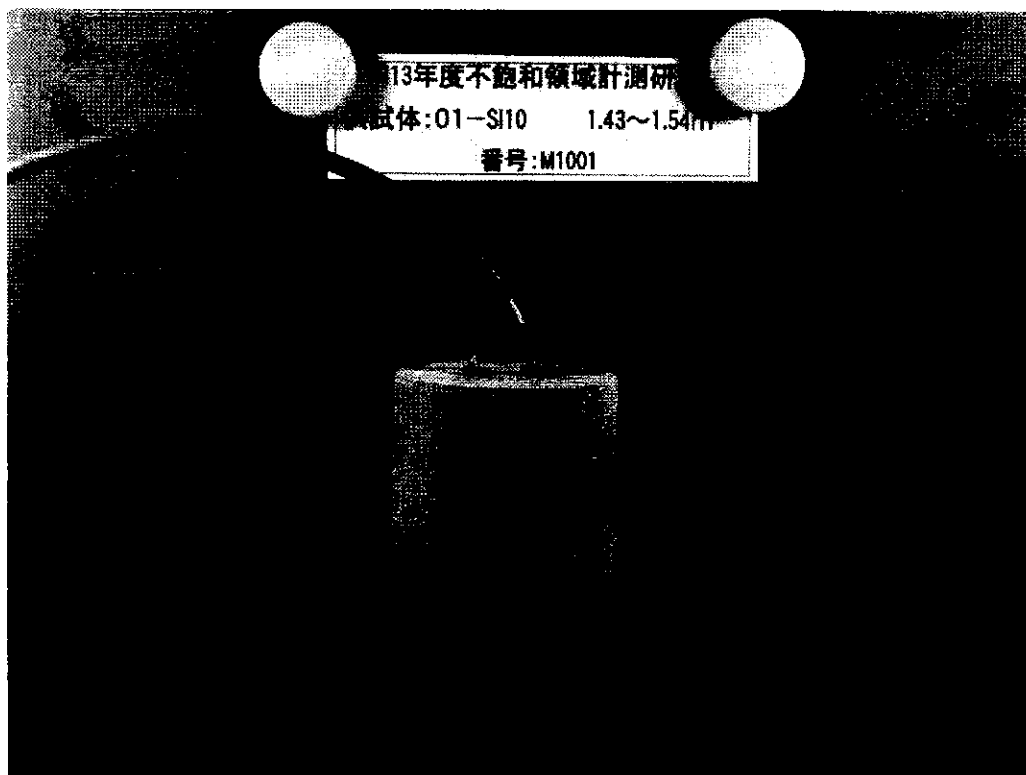


写真5.5-3 空気乾燥終了時の泥質凝灰岩コア (M1001)

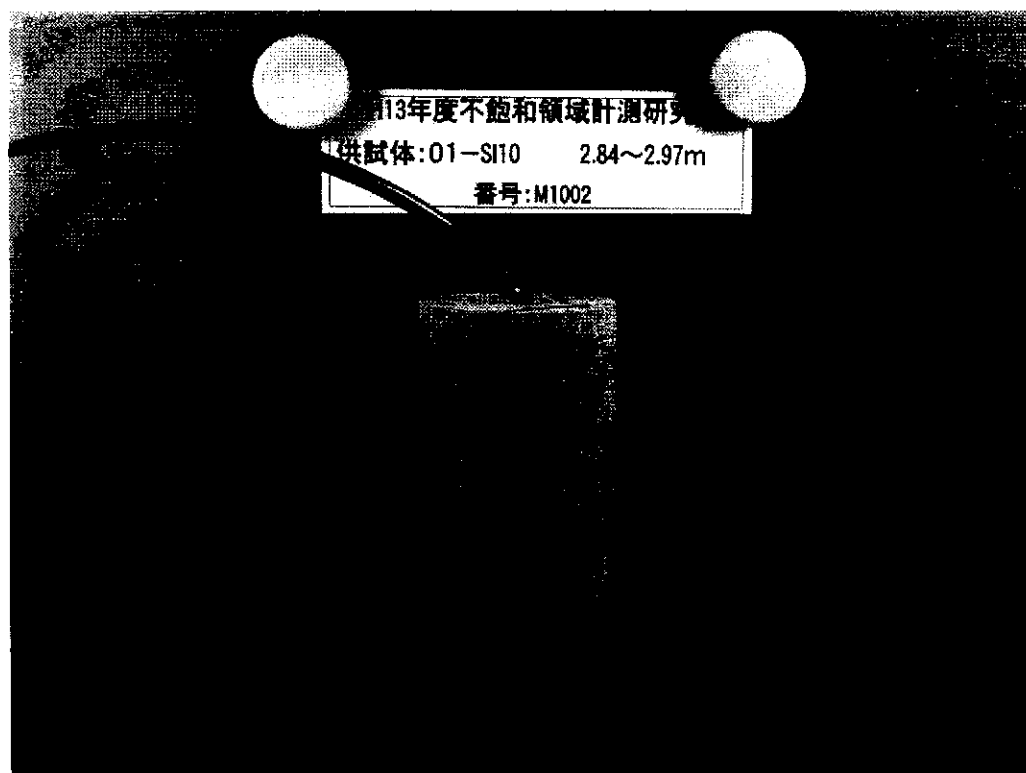


写真5.5-4 空気乾燥終了時の泥質凝灰岩コア (M1002)



写真5.5-5 空気乾燥終了時の泥質凝灰岩コア (M1003)



写真5.5-6 空気乾燥終了時の泥質凝灰岩コア (M1101)

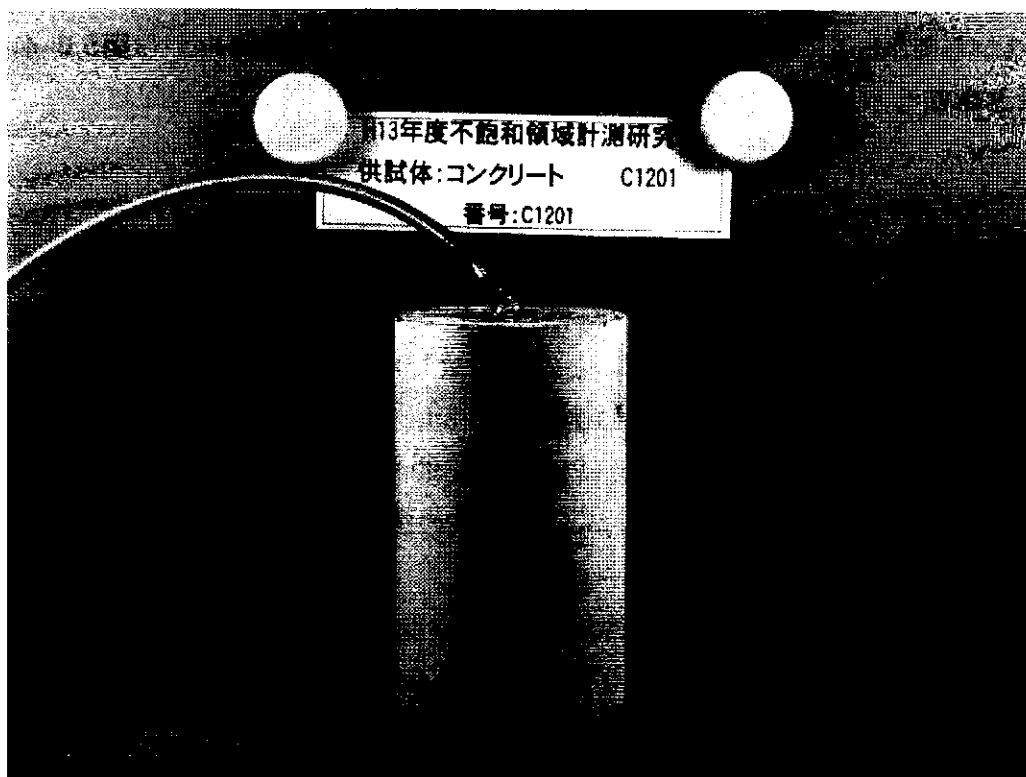


写真5.5-7 空気乾燥終了時のコンクリートコア (C1201)



写真5.5-8 空気乾燥終了時のコンクリートコア (C1202)

5.6 実験結果

表5.6-1から表5.6-6に比誘電率の測定結果を示す。また、図5.6-1から図5.6-4には、比誘電率と体積含水率および飽和度との関係をグラフで示す。

泥質凝灰岩のキャリブレーション曲線の特徴は以下のとおりであった。

- 1) M1002, M1003, M1101 のキャリブレーション曲線はほぼ一致した。M1001 は、飽和度 60～100%の範囲で他の 3 試料よりも高い比誘電率を示したが、飽和度 60%未満の範囲では、他の 3 試料とほぼ一致した。
- 2) 飽和度 100%での比誘電率は、M1001 で約 39, 他の 3 試料で約 32 であった。また、飽和度 100%付近で大きな比誘電率の変化が認められた。
- 3) 飽和度が 60～93%, 体積含水率が 35～55%の範囲では比誘電率がほぼ一定であった。
- 4) 飽和度 50%付近でも大きな比誘電率の変化が認められた。これは、飽和度 50%付近で試料の乾燥を一旦停止したにもかかわらず、比誘電率が下がり続けたことによる。
- 5) 飽和度 40%未満では、体積含水率と比誘電率はほぼ直線的な関係を示し、飽和度 0%での比誘電率は約 3 であった。

また、コンクリートのキャリブレーション曲線の特徴は以下のとおりであった。

- 1) 2 つの試料のキャリブレーション曲線は良い一致を示した。
- 2) 飽和度 100%, 0%での比誘電率は、それぞれ約 21, 5 であった。
- 3) 飽和度もしくは体積含水率と比誘電率は、ほぼ直線的な関係を示した。

表5.6-1 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1001）

試料 M1001 土岐夾炭層上部累層 泥質凝灰岩 プローブ2本

強制湿潤重量*	682.53 (g)	プローブ重量	68.56 (g)
水中重量*	275.92 (g)	湿潤密度	1.68 (g/cm ³)
強制乾燥重量*	444.54 (g)	乾燥密度	1.09 (g/cm ³)
有効間隙率	0.585	吸水率	0.535

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	682.53	0.585	100.0	55.7	39.20	H13.12.24	
2	672.51	0.561	95.8	52.9	35.38	H13.12.16	
3	671.58	0.558	95.4	53.0	35.45	H13.12.26	
4	661.74	0.534	91.3	52.0	34.11	H13.12.28	
5	654.98	0.518	88.4	51.9	33.96	H13.12.30	
6	646.43	0.497	84.8	51.6	33.64	H14.1.3	
7	634.24	0.467	79.7	51.8	33.86	H14.1.5	
8	624.97	0.444	75.8	51.5	33.48	H14.1.7	
9	616.11	0.422	72.1	51.5	33.52	H14.1.8	
10	605.91	0.397	67.8	51.5	33.50	H14.1.9	
11	597.24	0.376	64.2	51.3	33.26	H14.1.10	
12	587.56	0.352	60.1	51.2	33.08	H14.1.11	
13	578.26	0.329	56.2	41.5	21.72	H14.1.14	
14	568.77	0.306	52.2	40.9	21.11	H14.1.15	
15	559.19	0.282	48.2	39.7	19.91	H14.1.16	
16	559.19	0.282	48.2	39.1	19.33	H14.1.17	
17	558.61	0.281	47.9	38.2	18.43	H14.1.18	
18	557.73	0.278	47.6	37.0	17.31	H14.2.4	
19	516.99	0.178	30.4	34.3	14.87	H14.2.6	
20	493.63	0.121	20.6	25.1	7.98	H14.2.11	
21	469.59	0.062	10.5	21.4	5.77	H14.2.14	
22	444.54	0.000	0.0	16.0	3.24	H14.2.20	

*) :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5mm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5.6-2 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1002）

試料 M1002 土岐夾炭層上部累層 泥質凝灰岩 プローブ2本

強制湿潤重量*：	652.02 (g)	プローブ重量：	72.28 (g)
水中重量*：	264.46 (g)	湿潤密度	1.68 (g/cm ³)
強制乾燥重量*：	426.63 (g)	乾燥密度	1.10 (g/cm ³)
有効間隙率：	0.582	吸水率	0.528

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	652.02	0.582	100.0	55.6	31.53	H13.12.24	
2	643.73	0.560	96.3	53.1	28.73	H13.12.16	
3	642.77	0.558	95.9	53.3	28.94	H13.12.26	
4	635.53	0.539	92.7	52.1	27.70	H13.12.28	
5	629.09	0.522	89.8	52.1	27.72	H13.12.30	
6	620.31	0.500	85.9	52.0	27.59	H14.1.3	
7	611.14	0.476	81.9	52.1	27.71	H14.1.5	
8	602.26	0.453	77.9	52.0	27.56	H14.1.7	
9	593.88	0.432	74.2	51.8	27.43	H14.1.8	
10	582.97	0.403	69.4	51.7	27.25	H14.1.9	
11	574.76	0.382	65.7	51.2	26.77	H14.1.10	
12	565.50	0.358	61.6	50.8	26.29	H14.1.11	
13	556.49	0.335	57.6	49.2	24.70	H14.1.14	
14	548.24	0.314	54.0	46.6	22.19	H14.1.15	
15	539.41	0.291	50.0	43.5	19.34	H14.1.16	
16	539.26	0.291	50.0	42.3	18.27	H14.1.17	
17	538.64	0.289	49.7	42.1	18.12	H14.1.18	
18	537.52	0.286	49.2	40.5	16.74	H14.2.4	
19	494.01	0.174	29.9	35.6	12.96	H14.2.6	
20	472.15	0.117	20.2	27.1	7.49	H14.2.11	
21	450.71	0.062	10.7	23.0	5.41	H14.2.14	
22	426.63	0.000	0.0	17.9	3.28	H14.2.20	

*): 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5mm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5.6-3 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1003）

試料 M1003 土岐夾炭層上部累層 泥質凝灰岩 プローブ2本

強制湿潤重量*	681.07 (g)	7°ロ-7°重量：	72.08 (g)
水中重量*	283.77 (g)	湿潤密度	1.71 (g/cm ³)
強制乾燥重量*	461.85 (g)	乾燥密度	1.16 (g/cm ³)
有効間隙率：	0.552	吸水率	0.475

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	681.07	0.552	100.0	55.9	31.57	H13.12.24	
2	675.30	0.537	97.4	52.9	28.28	H13.12.16	
3	674.28	0.535	96.9	53.0	28.41	H13.12.26	
4	667.06	0.517	93.6	51.7	27.01	H13.12.28	
5	659.26	0.497	90.1	51.6	26.94	H13.12.30	
6	651.11	0.476	86.3	51.7	27.02	H14.1.3	
7	642.13	0.454	82.2	52.5	27.85	H14.1.5	
8	633.11	0.431	78.1	51.4	26.68	H14.1.7	
9	625.33	0.411	74.6	51.4	26.66	H14.1.8	
10	616.17	0.388	70.4	51.2	26.45	H14.1.9	
11	608.23	0.368	66.8	50.7	25.97	H14.1.10	
12	599.17	0.346	62.6	50.5	25.79	H14.1.11	
13	590.78	0.325	58.8	50.1	25.35	H14.1.14	
14	582.05	0.303	54.8	49.5	24.76	H14.1.15	
15	573.49	0.281	50.9	45.3	20.68	H14.1.17	
16	573.07	0.280	50.7	43.3	18.96	H14.1.18	
17	572.05	0.277	50.3	41.7	17.54	H14.2.4	
18	539.15	0.195	35.3	40.0	16.19	H14.2.6	
19	517.06	0.139	25.2	32.2	10.45	H14.2.11	
20	497.33	0.089	16.2	28.1	7.96	H14.2.14	
21	487.26	0.064	11.6	25.6	6.63	H14.2.17	
22	461.85	0.000	0.0	18.2	3.34	H14.2.20	

*) : 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5mm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5.6-4 比誘電率測定結果一覧表（泥質凝灰岩 M1101）

試料 M1101 土岐夾炭層上部累層 泥質凝灰岩 プローブ2本

強制湿潤重量*：	636.77 (g)	プローブ重量：	72.13 (g)
水中重量*：	268.15 (g)	湿潤密度	1.72 (g/cm ³)
強制乾燥重量*：	425.33 (g)	乾燥密度	1.15 (g/cm ³)
有効間隙率：	0.574	吸水率	0.497

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	636.77	0.574	100.0	56.7	32.11	H13.12.24	
2	630.08	0.555	96.8	52.9	28.01	H13.12.16	
3	628.98	0.552	96.3	53.1	28.16	H13.12.26	
4	621.29	0.532	92.7	52.0	27.01	H13.12.28	
5	614.01	0.512	89.2	53.4	28.54	H13.12.30	
6	604.66	0.486	84.8	51.7	26.73	H14.1.3	
7	595.88	0.463	80.7	52.6	27.64	H14.1.5	
8	586.54	0.437	76.2	52.1	27.13	H14.1.7	
9	578.36	0.415	72.4	51.9	26.94	H14.1.8	
10	568.67	0.389	67.8	52.0	27.00	H14.1.9	
11	560.69	0.367	64.0	51.5	26.50	H14.1.10	
12	551.01	0.341	59.4	50.8	25.85	H14.1.11	
13	542.51	0.318	55.4	50.3	25.34	H14.1.14	
14	533.96	0.295	51.4	50.0	24.98	H14.1.15	
15	524.44	0.269	46.9	41.0	16.79	H14.1.17	
16	524.12	0.268	46.7	42.7	18.24	H14.1.18	
17	523.14	0.265	46.3	41.2	17.00	H14.2.4	
18	493.43	0.185	32.2	37.7	14.21	H14.2.6	
19	476.50	0.139	24.2	32.1	10.31	H14.2.11	
20	456.77	0.085	14.9	27.9	7.77	H14.2.14	
21	438.97	0.037	6.5	20.8	4.34	H14.2.17	
22	425.33	0.000	0.0	18.2	3.33	H14.2.20	

*): 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5mm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5.6-5 比誘電率測定結果一覧表（コンクリート C1201）

試料 C1201 コンクリート（水セメント比 0.60）プローブ2本

強制湿潤重量*	1071.47 (g)	プローブ重量	71.88 (g)
水中重量*	582.32 (g)	湿潤密度	2.187 (g/cm ³)
強制乾燥重量*	943.86 (g)	乾燥密度	1.926 (g/cm ³)
有効間隙率	0.261	吸水率	0.135

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	1071.47	0.261	100.0	45.0	20.56	H13.12.24	
2	1070.19	0.258	99.0	44.3	19.91	H13.12.26	
3	1065.63	0.249	95.4	44.0	19.63	H13.12.28	
4	1061.33	0.240	92.1	41.7	17.66	H13.12.30	
5	1057.79	0.233	89.3	41.7	17.63	H14.1.3	
6	1053.65	0.224	86.0	40.8	16.88	H14.1.5	
7	1049.71	0.216	82.9	41.0	17.08	H14.1.7	
8	1046.10	0.209	80.1	39.9	16.16	H14.1.9	
9	1042.11	0.201	77.0	38.7	15.22	H14.1.11	
10	1036.67	0.190	72.7	37.8	14.50	H14.1.15	
11	1034.21	0.185	70.8	37.4	14.20	H14.1.18	
12	1033.32	0.183	70.1	36.3	13.39	H14.2.4	
13	1026.34	0.169	64.6	36.4	13.44	H14.2.6	
14	1020.18	0.156	59.8	35.2	12.57	H14.2.8	
15	1012.86	0.141	54.1	34.2	11.88	H14.2.12	
16	1012.60	0.141	53.9	33.9	11.64	H14.2.13	
17	990.91	0.096	36.9	31.1	9.83	H14.2.17	
18	943.86	0.000	0.0	23.3	5.53	H14.2.20	

*) :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5mm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5.6-6 比誘電率測定結果一覧表（コンクリート C1202）

試料 C1202 コンクリート（水セメント比 0.60）プローブ2本

強制湿潤重量*：	1075.69 (g)	プローブ重量：	71.94 (g)
水中重量*：	585.82 (g)	湿潤密度	2.192 (g/cm ³)
強制乾燥重量*：	948.96 (g)	乾燥密度	1.934 (g/cm ³)
有効間隙率：	0.259	吸水率	0.134

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	1075.69	0.259	100.0	45.2	20.47	H13.12.24	
2	1074.48	0.256	99.0	45.4	20.62	H13.12.26	
3	1070.00	0.247	95.5	45.0	20.22	H13.12.28	
4	1065.60	0.238	92.0	43.6	19.00	H13.12.30	
5	1062.08	0.231	89.3	41.8	17.44	H14.1.3	
6	1057.94	0.222	86.0	40.3	16.26	H14.1.5	
7	1053.92	0.214	82.8	40.8	16.65	H14.1.7	
8	1050.22	0.207	79.9	40.3	16.23	H14.1.9	
9	1046.24	0.199	76.8	39.5	15.58	H14.1.11	
10	1040.84	0.188	72.5	38.1	14.51	H14.1.15	
11	1038.36	0.182	70.5	37.3	13.91	H14.1.18	
12	1037.58	0.181	69.9	36.6	13.41	H14.2.4	
13	1030.44	0.166	64.3	36.7	13.44	H14.2.6	
14	1024.30	0.154	59.4	35.4	12.53	H14.2.8	
15	1017.09	0.139	53.8	34.5	11.92	H14.2.12	
16	1016.85	0.139	53.6	34.1	11.63	H14.2.13	
17	995.75	0.096	36.9	31.0	9.62	H14.2.17	
18	948.96	0.000	0.0	23.6	5.55	H14.2.20	

*)：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5mm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) %

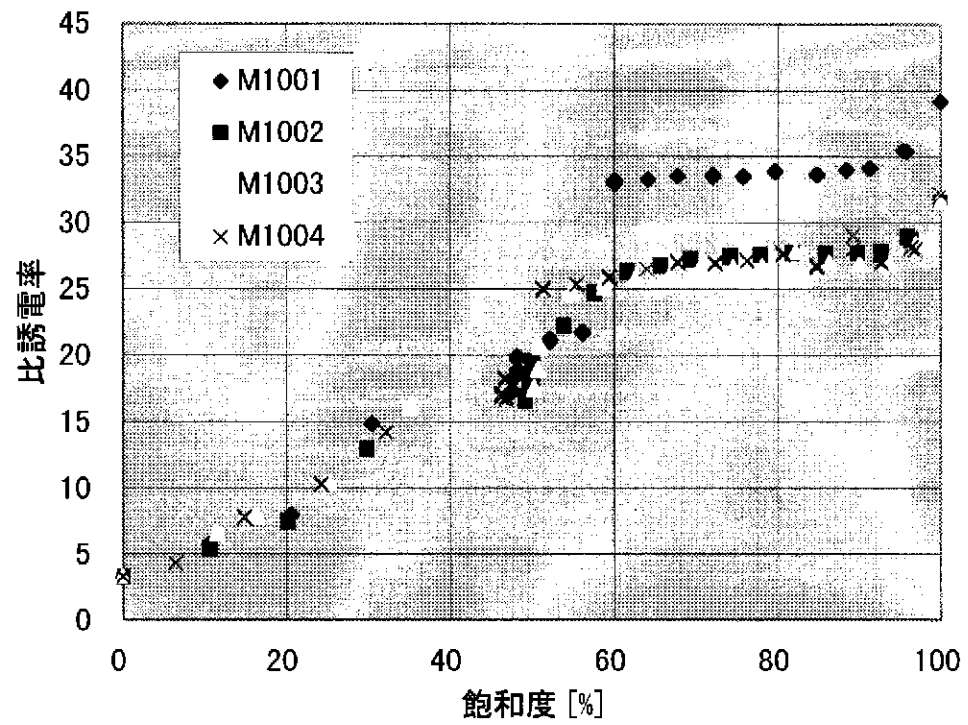


図5.6-1 飽和度と比誘電率との関係（泥質凝灰岩）

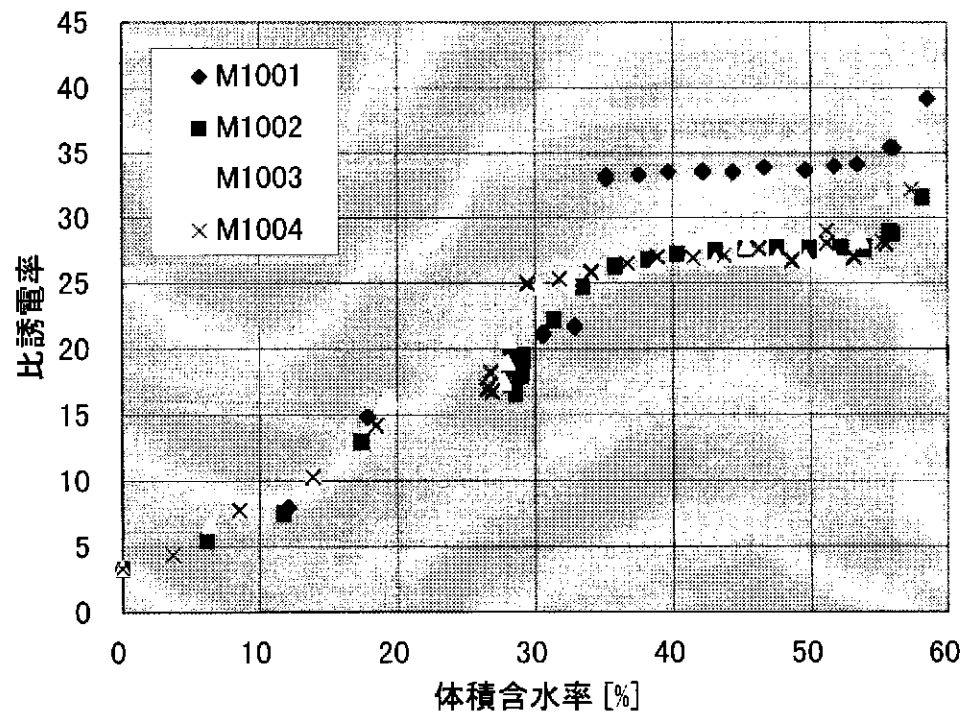


図5.6-2 体積含水率と比誘電率との関係（泥質凝灰岩）

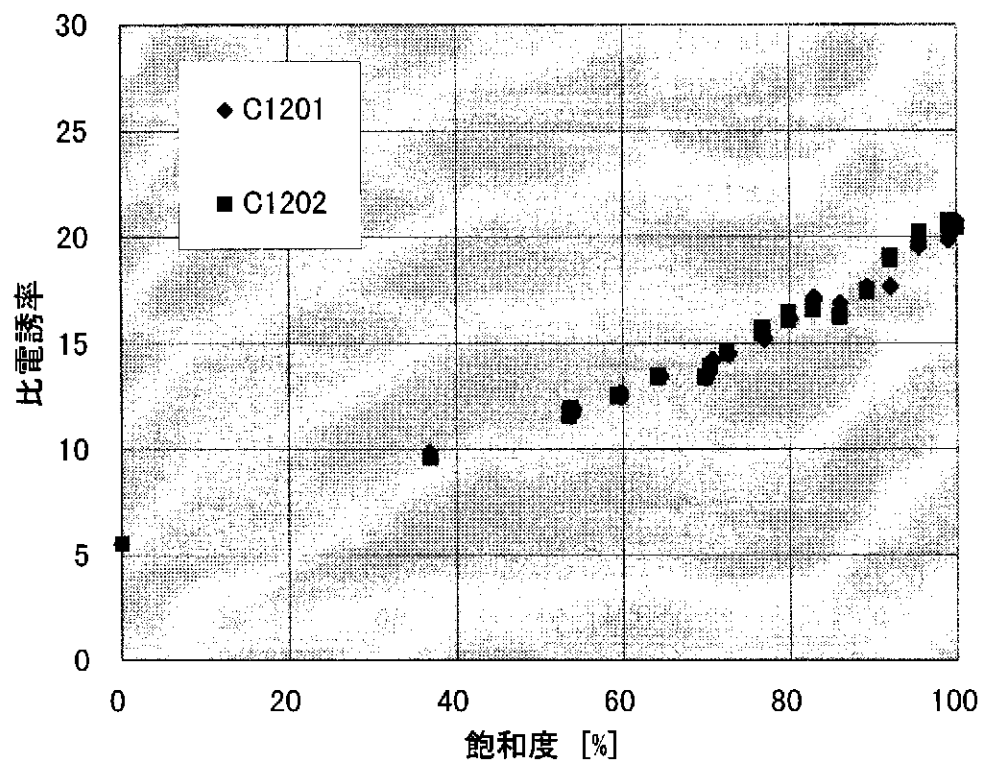


図5.6-3 飽和度と比誘電率との関係（コンクリートコア）

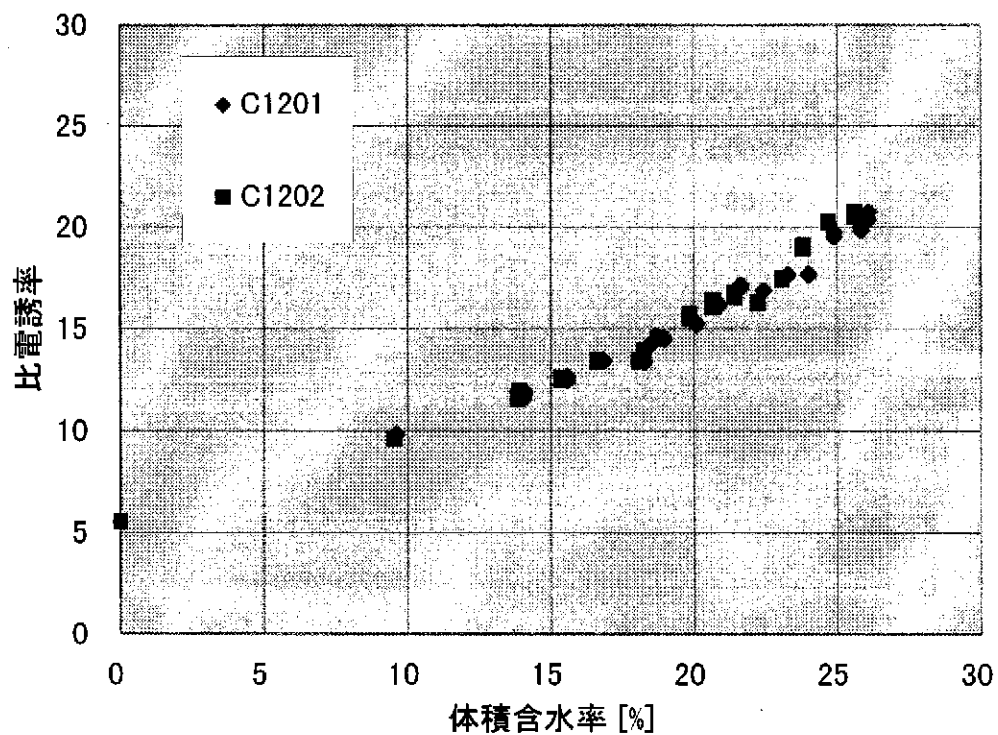


図5.6-4 体積含水率と比誘電率との関係（コンクリートコア）

5.7 考察

5.7.1 泥質凝灰岩

得られたキャリブレーション曲線は、① 飽和度 100%付近と 50%付近で比誘電率が大きく変化すること、② M1001 だけが飽和度 60~100%の範囲で他の 3 試料よりも高い比誘電率を示すこと、③ 飽和度 60~93%の範囲で比誘電率がほぼ一定となること、などの点で問題のあるものであった。これらの要因について以下で考察する。

(1) プローブ電極と孔壁の間のすきま

飽和度 100%付近で比誘電率が大きく変化する現象は、過去に実施されたキャリブレーション試験でも発生している。これは、プローブ電極と孔壁の間のすきまに存在した水の影響であると結論付けられている。

プローブ電極設置の際に充填剤として用いた導電性シリコンは、粘性の高いものであったため、電極径と孔径の差が小さいときには、プローブ電極を設置する際に孔壁に応力がかかり、供試体の破損が度々生じた。これを避けるため、電極径 5.0mm に対して孔径を 6.0mm 程度まで大きくする必要があった。このため、真鍮パイプに入れた充填剤の量が空隙の大きさに対して不十分となり、充填剤が電極の周りに均一に行き渡らなくなるなどの現象が起こり、電極と孔壁の間にすきまが生じた可能性がある。

これを確認するため、キャリブレーション試験の終了後に、試料を壊してプローブ電極への導電性シリコンの付着状況を観察した。すると、**写真5.7-9**、**写真5.7-10**のように、電極表面に導電性シリコンが付着していない部分が確認された。導電性シリコン未付着の部分は、泥質凝灰岩試料に挿入した電極対の全てに認められ、M1002 に挿入されたものが最も未付着部分の面積が大きかった。

また、プローブ電極を設置する前には、孔内に残った水を十分に除去するよう試みたが、孔径が小さかったためにうまく除去できず、充填剤と孔壁の間に水が溜まった可能性も考えられる。

以上から、飽和度 100%付近での大きな比誘電率の変化は、プローブ電極もしくは充填剤と孔壁の間にすきまが存在したために生じたものと判断される。

このほか、飽和度 60~93%の範囲で比誘電率がほぼ一定となったのも、プローブ電極と孔壁の間のすきまが要因の一つと考えられる。これについては後述する。

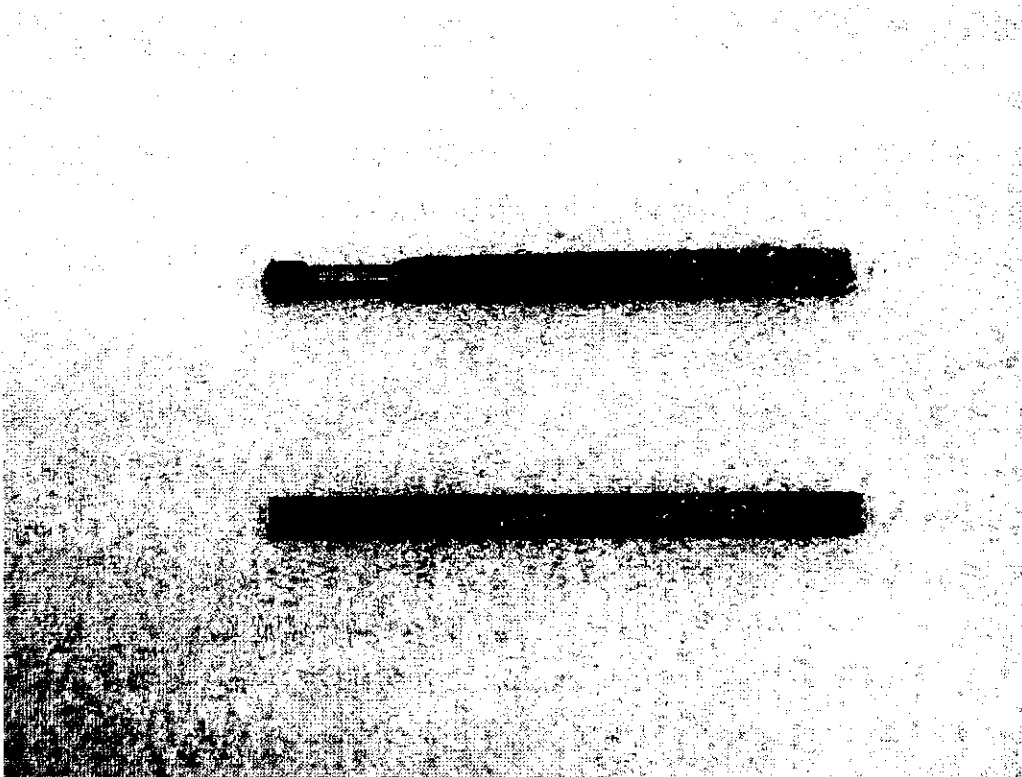


写真5.7-9 炉乾後の泥質凝灰岩コア M1001 から採取したプローブ電極
（黒い物質は導電性シリコン。上の電極には付着していない箇所がある）

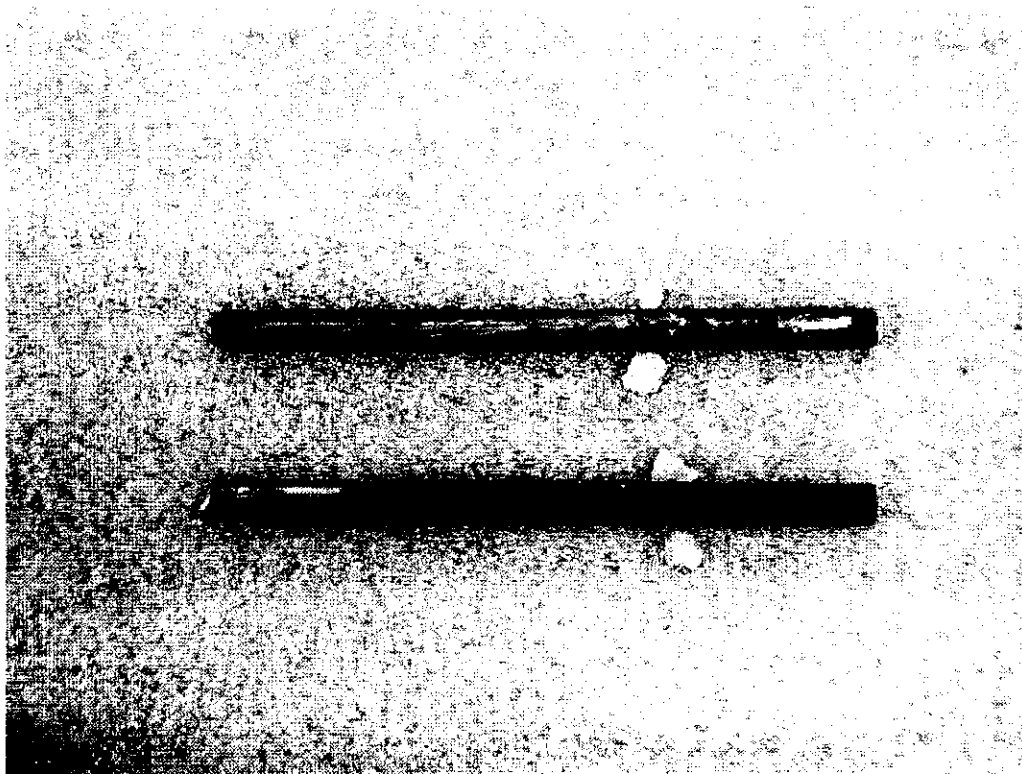


写真5.7-10 炉乾後の泥質凝灰岩コア M1002 から採取したプローブ電極
（黒い物質は導電性シリコン。付着していない箇所がある）

(2) 定位置反射波の存在

試料はいずれも同一と見られる岩盤から採取されたもので、前掲表 5.2-1 に示したように有効間隙率がほぼ一致していることから、キャリブレーション曲線はほぼ同一であると期待される。しかし、実際には M1001 だけが飽和度 60～100%の範囲で他の 3 試料よりも高い比誘電率を示した。また、飽和度 60～93%の範囲では、比誘電率はほぼ一定であった。

これは、上記飽和度の範囲で見かけのプロープ長（表 5.6-1～表 5.6-4 中の TDR-L）が全ての試料で同一であったためである。M1001 には他の 3 試料よりも短いプロープ電極を使用したため、見かけのプロープ長が同じであれば、比誘電率はプロープ電極長の比の逆数の 2 乗、すなわち $(10/9)^2 = 1.23$ 倍になる。

今回の測定では、全ての試料の測定に同じ長さの同軸ケーブルを使用したため、見かけのプロープ長が等しいことは、プロープ先端の反射点が一致していたことを意味する。以下に、この要因の一つが TDR 波形中の定位置反射波の存在であることを示す。

飽和度 100%の試料について得られた TDR 波形を図 5.7-1 に示す。全ての試料の波形には、A～C と a～c の位置に電磁波の反射を示す小さい凸部（正確には、凸部に向かう立ち上がり）が見られる。これらの反射は、コンクリートの TDR 波形にもほぼ同位置に認められることから、測定装置の構成に起因する定位置の反射であると考えられる。

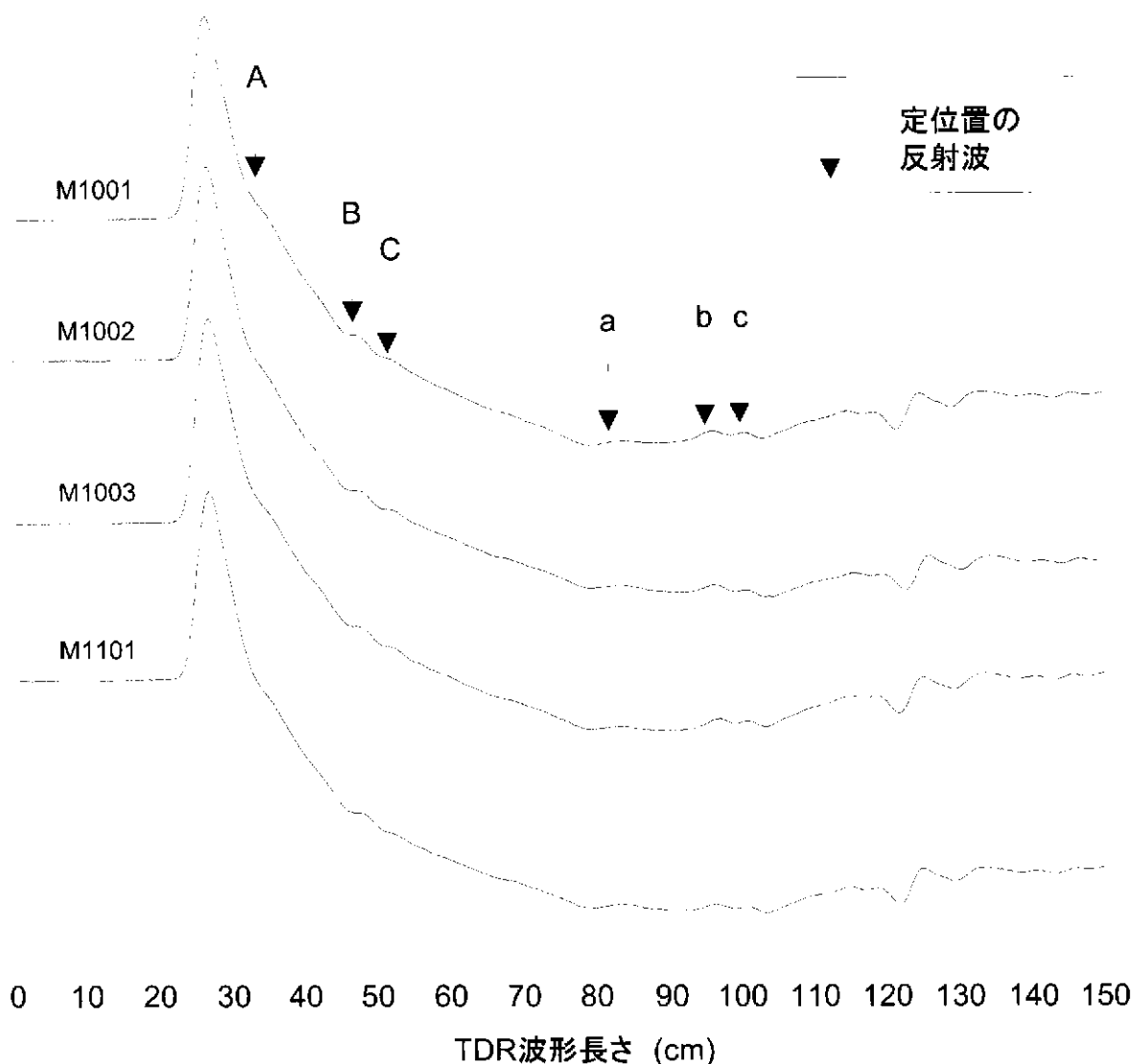


図5.7-1 飽和度 100%の試料の TDR 波形

まず A と a, B と b, C と c の波形上の距離に着目すると、これらはいずれも約 50cm であり、同軸ケーブルの長さに等しい。このことから、a～c の反射波は、A～C の反射波が同軸ケーブルを往復して再び観測されたものであると考えられる。

次に、A は同軸ケーブルの分岐部分に相当する反射波の立ち上がりから約 10cm の距離にあり、これはプローブ電極長にほぼ等しい。よって、A はプローブ電極への入射波の一部が電極のみを伝搬して、先端で反射したものと考えられる。B, C が何に起因するものかは明らかでないが、プローブ電極への入射波の一部が導電性シリコンを伝搬して反射したものに起因する可能性がある。

図5.7-1の TDR 波形では、プローブ先端の反射点の位置に a～c の定位置の反射が重なっており、反射点の読み取りが非常に困難であった。そこで、波形の全体的な傾向から接線を図のように引き反射点を読み取った。反射波の立ち上がりは C の直後が最も明瞭であるため、接線もこの影響を強く受けている。したがって、飽和度 100%

のときの見かけのプロープ長は、C の定位置反射の影響を受けていると判断され、これにより全ての試料で見かけのプロープ長が同程度の値になったと考えられる。

次に、比誘電率が変化しない飽和度における TDR 波形の変化を検討する。図5.7-2 は M1001 について、飽和度 100%と、比誘電率が変化しない飽和度 91.3%, 79.7%, 64.2%の TDR 波形を示したものである。

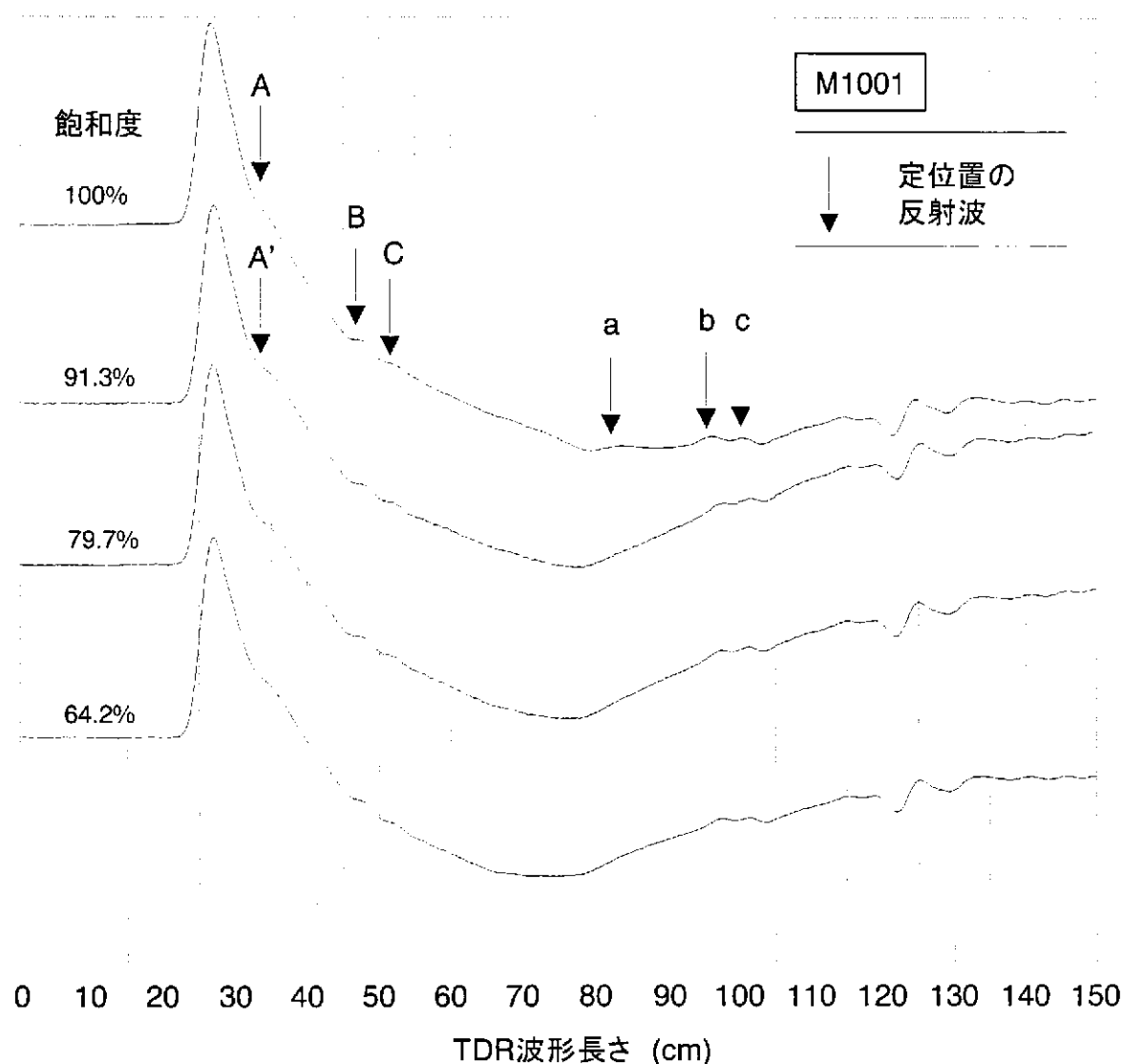


図5.7-2 M1001 の TDR 波形（一部）

これを見ると、飽和度 91.3%～64.2%の波形において、プローブ先端の反射波の立ち上がりと考えられる位置は、いずれも a の定位置反射の付近である。また、飽和度 100%と 91.3%の波形で、A の反射の立ち上がりを比較すると、飽和度 91.3%の方がより大きくなっている。これらの現象を説明できる仮説として次のようなものが考えられる。すなわち、プローブ電極と孔壁との隙間が生じて、プローブ電極のみを伝搬する電磁波エネルギーが増えたことにより、A の反射の立ち上がりが大きくなった。これに伴い、同軸ケーブルを往復して観測される a の反射も大きくなり、明瞭な定位置

反射としてあらわれた、というものである。

しかしながら、a 付近の反射波の立ち上がりは、同軸ケーブル内を往復した反射波に起因するものとしてはやや大きい。したがって、この反射波の主要因は別に存在し、a の定位置反射は付随的な要因と判断するのが妥当である。考えられる他の要因としては、プローブ電極と孔壁の間にすきまが生じたことによる比誘電率の低下が挙げられる。

なお、a～c の定位置反射の影響は、同軸ケーブルを 1.0m 程度に延長すれば除去できたものと考えられる。

(3) 乾燥による試料の収縮

再び前掲図5.7-2に着目すると、飽和度が 91.3%から 64.2%に低下するにしたがって、反射波の立ち上がりが全体的に緩やかになるとともに、a の手前で波形の勾配が緩やかになっている。これは、飽和度が低下するにしたがってプローブへの入射波の減衰が大きくなっていることを示唆している。

泥質凝灰岩は含水量の低下と共に収縮しているため、この現象は、プローブ電極あるいは充填剤と孔壁の間に生じたすきまが試料の収縮と共に狭まっていき、プローブ電極と孔壁との密着性が増した影響によるものと考えられる。

(4) 試料内の水分分布の不均一性

5.6 節で述べたように、飽和度 50%付近で試料の乾燥を 18 日間にわたって中断し、比誘電率の変化を調べたところ、飽和度はほとんど変化しなかったにもかかわらず、比誘電率は下がり続けた。これは、飽和度 60%未満で使用した乾燥炉による試料の乾燥が急速であったため、試料内の水分分布が不均一となり、この水分の再分布に時間を要したためと考えられる。室内乾燥の場合は乾燥速度が遅いため、乾燥炉を用いた場合ほどの不均一性は生じていないと考えられるが、影響がないとは言い切れない。この影響を解決するには、乾燥後の水分の再分布に十分な時間をかける必要があると考えられ、キャリブレーション曲線を取得するには長い時間を要すると予想される。

以上の検討から、泥質凝灰岩のキャリブレーション曲線が良好でなかった要因として、プローブ電極あるいは充填剤と孔壁の間にすきまが存在したこと、同軸ケーブル長が不適切であったこと、乾燥後の水分再分布にかかる時間が十分でなかったこと、試料の収縮の影響があったことが挙げられる。

泥質凝灰岩については、信頼できる体積含水率 θ_v と比誘電率 K_a との関係が得られなかったことから、これを既存のモデルにより求めることを試みた。これまでの研究から、土壌については Topp et al. (1980) の経験式が有効であるが、岩石については適合性が低いことが分かっている。そこで、ここではやはり土壌について用いられる α mixing model と呼ばれる半経験式を用いた。これは次式で表される。

$$K_a^\alpha = (n - \theta_v) K_{air}^\alpha + \theta_v K_{water}^\alpha + (1 - n) K_{solid}^\alpha \quad (5.1)$$

ここで、 K_{air} 、 K_{water} 、 K_{solid} はそれぞれ空気 (=1)、水 (=81)、土粒子 (=4~7) の比誘電率、 n は有効空隙率である。これは、土は気相、液相、固相の 3 相からなる混合体であり、各相の比誘電率が、それらの体積の割合に応じて土の見かけの比誘電率に寄与すると考えるものである。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。

(5.1) 式を岩石に適用した例は平成 12 年度報告書に挙げられており、それによると岩石の $K_a \sim \theta_v$ 関係が概ね把握できること、有効空隙率が大きい場合には含水率が高い範囲で実測値を上回る傾向があることが示されている。よって、泥質凝灰岩の場合も、含水率が高い範囲を除けば (5.1) 式が当てはまるものと考えられる。

(5.1) 式で、 $\alpha=0.5$ 、 $K_{solid} = 7$ として泥質凝灰岩の体積含水率と比誘電率との関係を推定した結果を図 5.7-3 に示す。ここで $K_{solid} = 7$ としたのは、岩石が粘土鉱物を多く含んでおり、固相の比誘電率が高いと考えられるためである。

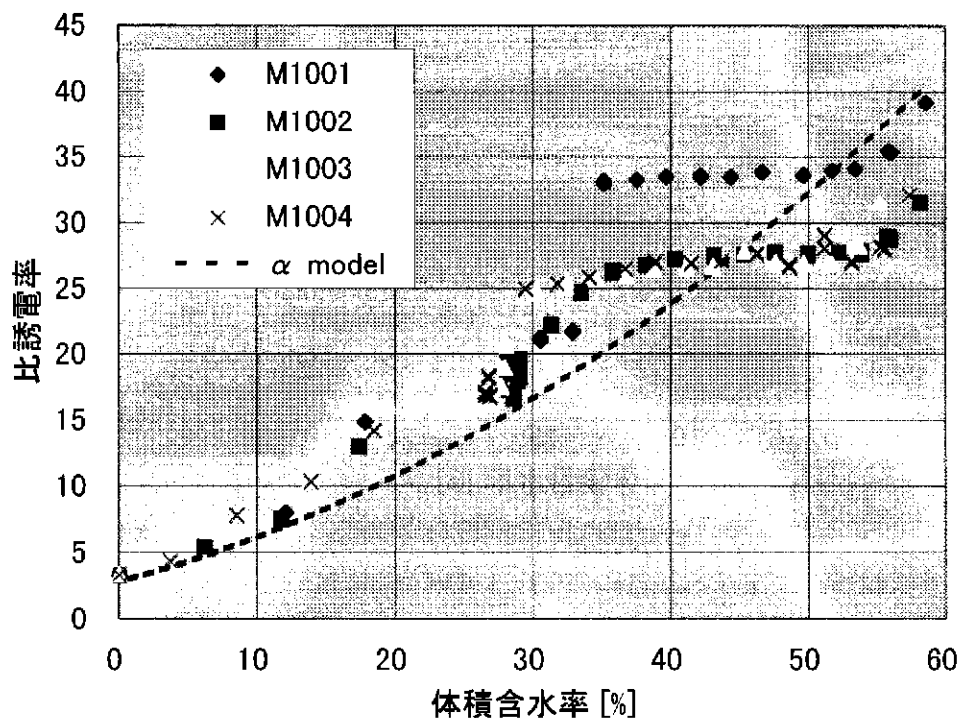


図 5.7-3 実測キャリブレーション曲線と推定値との比較（泥質凝灰岩）

これによれば、実測値は α mixing model による推定値から大きく乖離することはないが、体積含水率 45%以上では測定値が推定値よりも低く、体積含水率 20~80%にかけては、測定値が推定値よりも高い結果となっている。また、飽和時の推定比誘電率は 40 であり、3 つの試料の実測値である 32 よりも高い値となっている。

今回の測定では、飽和時の比誘電率の信頼性は低いものの、岩石の有効間隙率が大きことから、 α mixing model による推定値も大きめの値を与えていると考えられる。よって、飽和時の比誘電率は実測値と α mixing model による推定値の中間の 36 程度と予想される。

5.7.2 コンクリート

体積含水率と比誘電率はほぼ直線的な関係にあり、良好なキャリブレーション曲線が得られたと判断される。 $\alpha=0.5$, $K_{solid} = 7$ として α mixing model により体積含水率と比誘電率との関係を推定した結果を図5.7-4に示す。実測値は推定値とほぼ一致しており、得られたキャリブレーション曲線の妥当性が示されたものと考えられる。

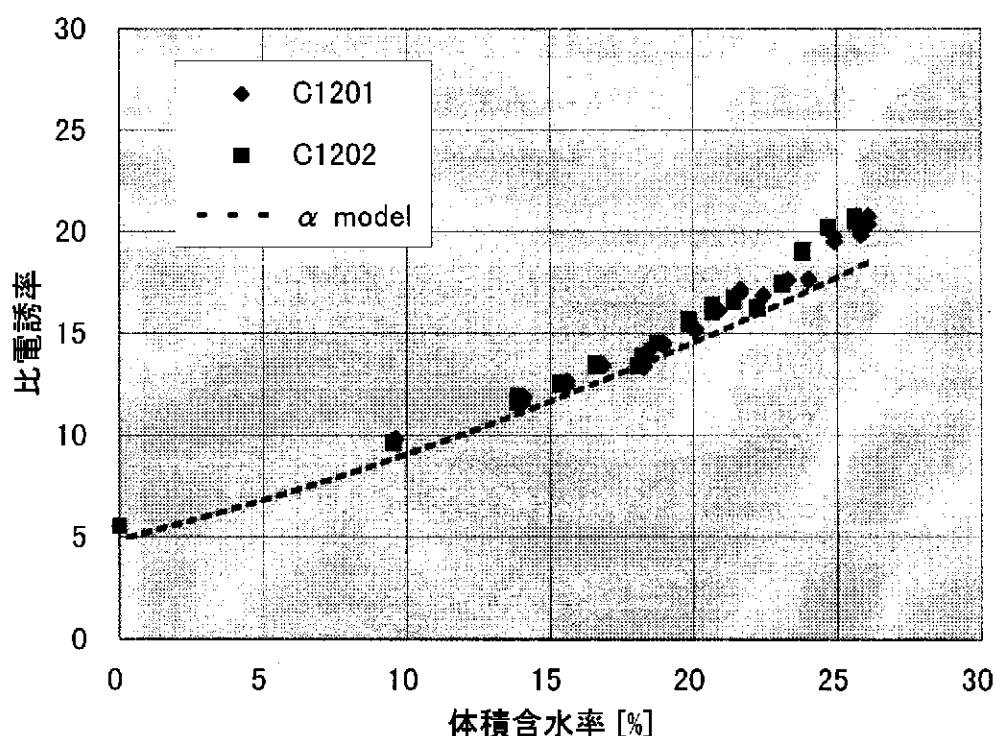


図5.7-4 実測キャリブレーション曲線と推定値との比較（コンクリート）

5.8 まとめ

原位置試験を行った 01SI-10, 01SI-11 孔の泥質凝灰岩コアと、室内試験用のコンクリートについて、各試料を段階的に乾燥させたときのロッド式プローブを用いた TDR 波形の計測により含水率と比誘電率の関係を求めた。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 泥質凝灰岩については、良好なキャリブレーション曲線が得られなかった。
- 2) 1)の要因として、① プローブ電極あるいは充填剤と孔壁の間にすきまが存在したこと、② 同軸ケーブル長が不適切であったために定位置反射波の影響を受けたこと、③ 乾燥後の水分再分布にかかる時間が十分でなかったために、試料内の水分分布が不均一であったこと、④ 試料の収縮の影響があったことが挙げられる。
- 3) TDR 波形の読み取りの障害となった定位置反射波は、プローブ電極や充填剤のみを伝搬した電磁波が、同軸ケーブルを往復して検出されたものであり、同軸ケーブル長の変更によりその影響を除去することが可能であると考えられる。
- 4) 良好なキャリブレーション曲線を得るためには、プローブ電極の設置時に隙間を残さないよう注意を払うとともに、定位置反射波の影響が出ないような同軸ケーブル長を選択し、乾燥後の水分再分布に十分な時間をかける必要がある。
- 5) 泥質凝灰岩の含水率と比誘電率の関係を、半経験式である α mixing model により推定した。飽和時の比誘電率は 36 程度と予想される。
- 6) コンクリートの体積含水率と比誘電率はほぼ直線的な関係となり、 α mixing model での推定値ともほぼ一致していることから、良好なキャリブレーションが得られたと判断される。

6. 改良型パッカー式プローブの適用試験

6.1 目的

東濃鉱山第2立坑第2計測坑道における原位置試験と、コンクリート管を用いた室内試験を実施し、4章で述べた改良型パッカー式プローブの適用性を検討することを目的とした。

6.2 原位置試験

6.2.1 試験孔と試験実施時期

試験孔は、3.2節で解説した東濃鉱山第2立坑第2計測坑道内の01SI-10孔および01SI-11孔である。

試験孔は、3.2節で述べた原位置試験後は孔口解放のまま放置されていることから、試験可能深度に変化はないと判断した。

原位置試験は、2001年12月17～19日と、2002年1月28～30日の2時期に分けて実施した。このときの孔口からの観察によれば、3.2節で解説した原位置試験時よりも、01SI-10孔の孔内に溜まった水の量、01SI-11孔では孔口からの浸出水の量とともに減少していることから、両孔ともより乾燥した状態へ変化していると考えられた。

6.2.2 実施項目

改良型パッカー式プローブの本体、および前掲表4.2-1に示した各種のプローブの適用性を検討することを目的として、以下の項目について試験を実施した。

(1) パッカー圧力と測定値との関係

01SI-10孔の深度1.5mを対象とし、電極の幅または厚さが異なるプローブNo.1, No.4, No.8を用いて、パッカー圧を変化させ、TDR波形と比誘電率値の変化を調べた。

(2) 各種プローブを用いた測定と改良効果の検討

全プローブを同一試験孔の同一深度に設置し、得られたTDR波形および比誘電率から、改良の効果を検討した。

(3) 同軸ケーブル長を短くした場合の改良効果の検討

同軸ケーブル長を15mから5mまで短くした場合の波形の改善効果を検討した。

(4) 深度方向の比誘電率分布の測定

プローブ No.4, No.7, No.15, No.16 について、深度別に TDR 波形の計測を行い、①プローブの設置方向による測定値の違い、②繰り返し測定による再現性、③比誘電率の深度分布について検討した。

6.2.3 TDR 計測

TDR 計測に用いた機材は、ほぼ前掲表 3.2-2 に示した通りである。変更分のみ表 6.2-1 に示した。

表6.2-1 TDR 計測に用いた機材（変更分）

名称及びメーカー	型式名	数量	主な仕様	備 考
パソコン 日本アイ・ビー・エム	2609-21J	1	Celeron(333MHz), 64MBメモリ, 6.4GB HDD MS-Windows 98(プログラムはDOSモードで使用) 波形データ取得用	
富士通	FMVNC8E	1	Pentium(100MHz), 32MBメモリ, 800MB HDD FreeBSD 4.3R 波形データ解析用	
パッカー式プローブ	改良型	1	外径φ92mm, パッカー部の長さ:700mm 本体アルミ製, ゴムパッカー, 発泡ポリエチレン緩衝材 脱着式プローブ×2, 同軸ケーブル 15m×2 付属	

改良型パッカー式プローブの仕様は、4 章の解説を参照されたい。パソコンは、TDR ケーブルテスターからのデータ収集用と、波形データ処理用の 2 つを用意し、両者をイーサネットにより接続して使用した。

また、TDR 計測の手順は 3.2.3 項を参照されたい。なお、特に断りのない場合、プローブの設置方向は左右である。

6.2.4 試験結果

6.2.4.1 パッカー圧力と測定値との関係

01SI-10 孔の深度 1.5m を対象とし、前掲表 4.2-2 中のプローブ No.1, No.4, No.8 について、パッカー圧を 20kPa から 60kPa へ段階的に変化させたときの TDR 波形の変化を図 6.2-1, 図 6.2-2, 図 6.2-3 に示した。なお、プローブ No.1 と No.4 ではプローブ電極幅のみが、プローブ No.4 と No.8 では電極の厚さのみが異なっている。

プローブ No.1 (電極幅 6mm, 厚さ 0.3mm) ではパッカー圧が大きくなると、反射波の立ち上がりがなだらかになっていき、これに伴ってプローブ先端の反射の位置 (おおよそ、波形の緩やかな谷底の部分に相当する) が相対的に伸びている。これに対し、プローブ No.4 (電極幅 3mm, 厚さ 0.3mm) の場合は、パッカー圧が変化しても、反射波の立ち上がりの変化はわずかであり、プローブ先端の反射点の位置にも大きな変化は見られない。これは、プローブ No.1 の電極幅が No.4 よりも大きいため、

孔壁との良好な密着にはより大きなパッカー圧力が必要であること、さらに電極が孔壁と接触する面積が大きい分、電磁波の減衰がより大きくなることを示している。

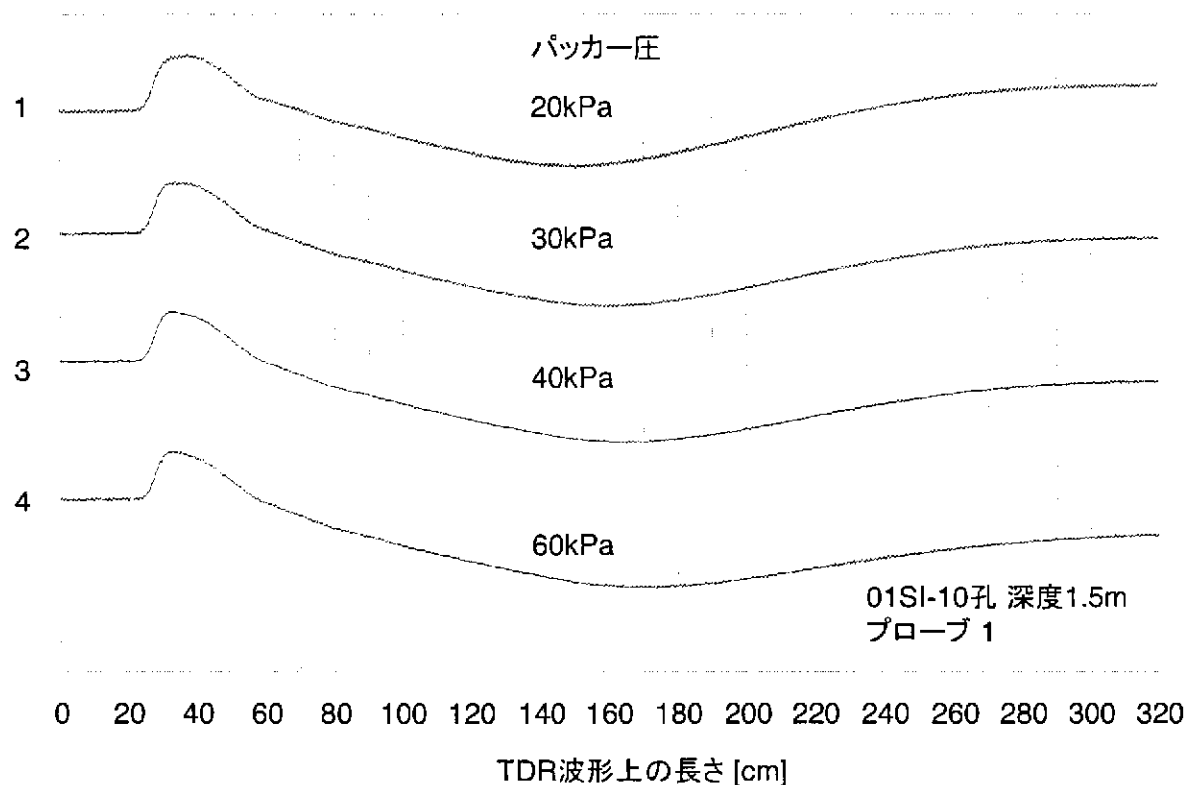


図6.2-1 パッカー圧を変化させたときの TDR 波形（プローブ No.1）

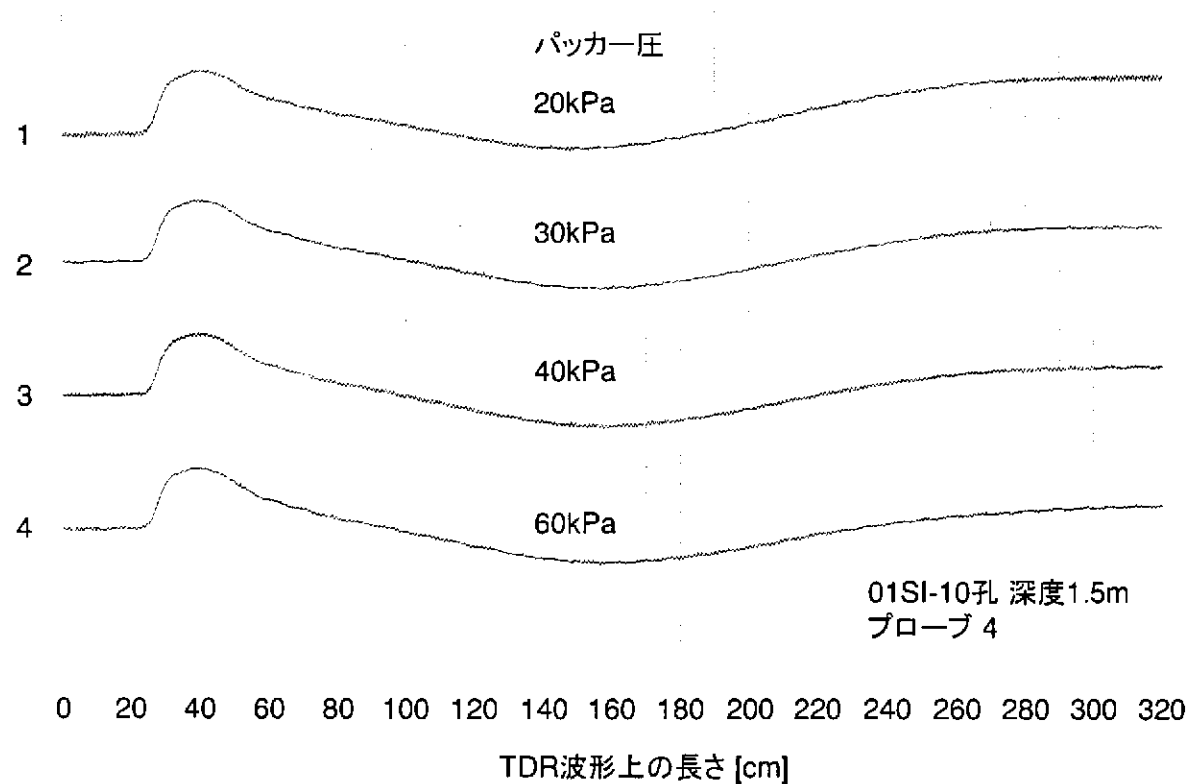


図6.2-2 パッカー圧を変化させたときの TDR 波形（プローブ No.4）

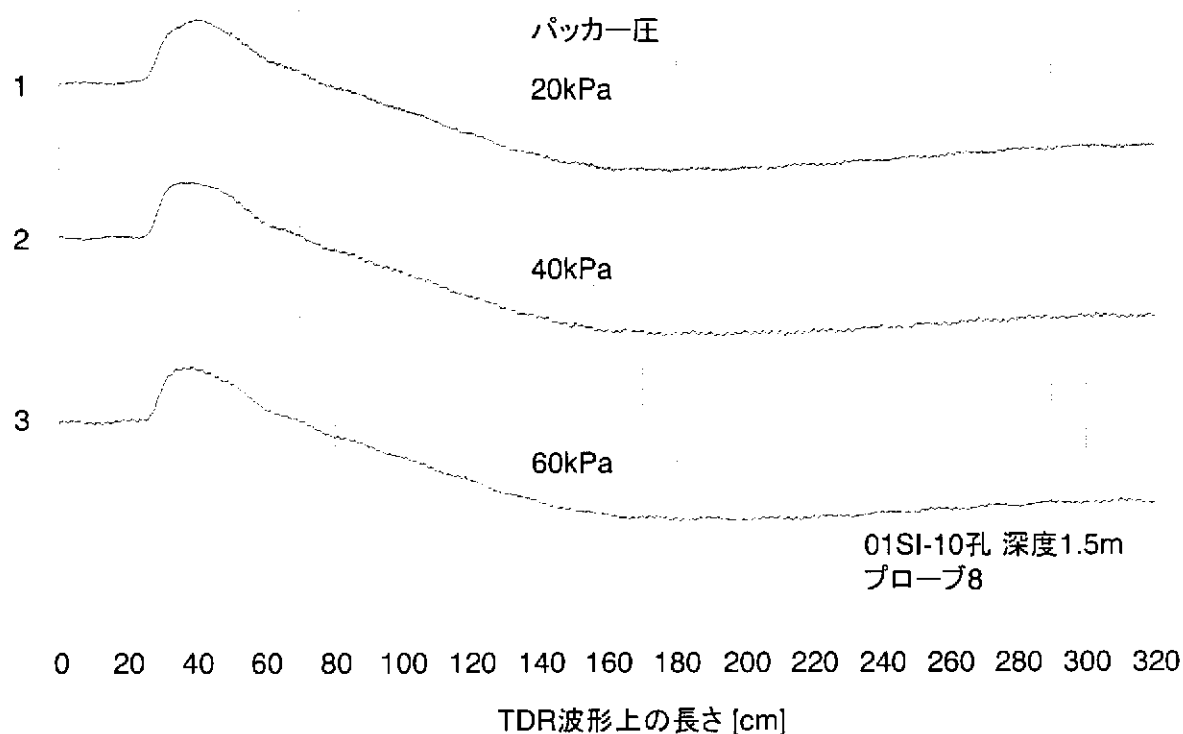


図6.2-3 パッカー圧を変化させたときの TDR 波形（プローブ No.8）

プローブ No.8（電極幅 3mm，厚さ 0.5mm）では，パッカー圧 20kPa の段階で既に反射波の立ち上がりがきわめて不明瞭であり，パッカー圧力が上昇するとともに徐々に立ち上がりが低くなる傾向が見られた。この測定においては，プローブの周りに付着した水や泥が孔壁とプローブの間の隙間に入り，密着性を高めた結果，低いパッカー圧力でも電磁波の減衰が大きかったものと予想される。

プローブ No.1 とプローブ No.4 について，パッカー圧力の変化に対する比誘電率の変化を図6.2-4に示す。比誘電率の変化は，先に述べた TDR 波形の変化の傾向を反映したものとなっており，プローブ No.1 ではパッカー圧 60kPa まで比誘電率は上昇しつつ，プローブ No.4 ではパッカー圧 30kPa 以上でほぼ一定値となった。また，パッカー圧 60kPa での比誘電率の値は，ボーリングコアについて求められた飽和時の比誘電率 36 よりも 16～20 以上高い値となった。

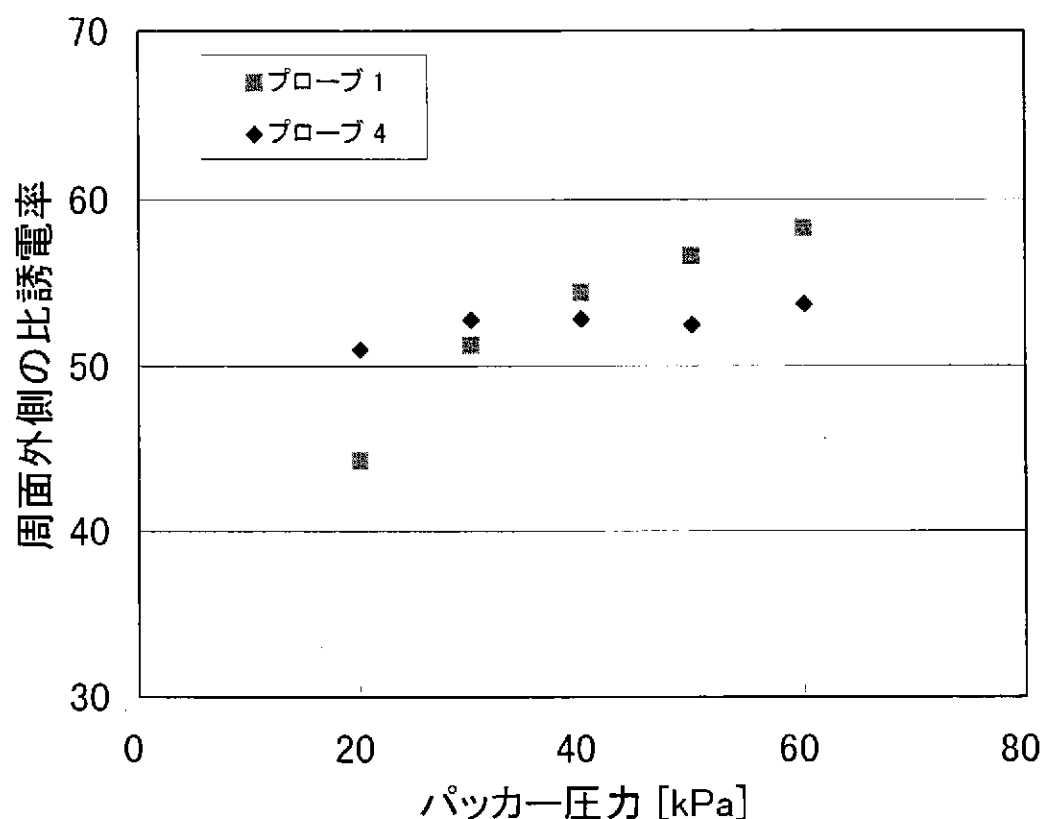


図6.2-4 パッカー圧の変化に対する比誘電率の変化（プローブ 1, 4）

6.2.4.2 各種プローブを用いた測定と改良効果の検討

01SI-10 孔の深度 3.0m を対象とし、前掲表 4.2-2 に示したプローブ No.1～16 を用いて測定した TDR 波形を図6.2-5、図6.2-6に示す。プローブ No.1～14 は 12 月の原位置試験時に測定したもので、プローブの設置方向は左右であり、プローブ No.15, No.16 は 1 月の原位置試験時に測定したもので、プローブの設置方向は上下である。また、プローブ No.3 のみ 01SI-10 孔の深度 1.5m での計測結果である。

プローブ No.1～16 の中で、反射波の立ち上がりが明瞭なものはプローブ No.6, No.9, No.13～16 であり、これらは全てプローブ電極表面にコーティングを施したものである。一方、反射波の立ち上がりが極めて不明瞭なものは、No.2, No.10, No.11, No.12 であり、これらは全て緩衝材の厚さが 25mm で、プローブ電極にコーティングを施していないのものである。その他のプローブについては、反射波の立ち上がりは確認できるが、明瞭なものとはなっていない。

反射波の立ち上がりが明瞭なもののうち、プローブ No.6, 9, 13, 14 はいずれも電

極にシリコンコーティングを施したものである。電極にテフロンコーティングを施したプローブ No.15 と No.16 は、シリコンコーティングを施したプローブほどではないものの、反射波の立ち上がりは明瞭であった。

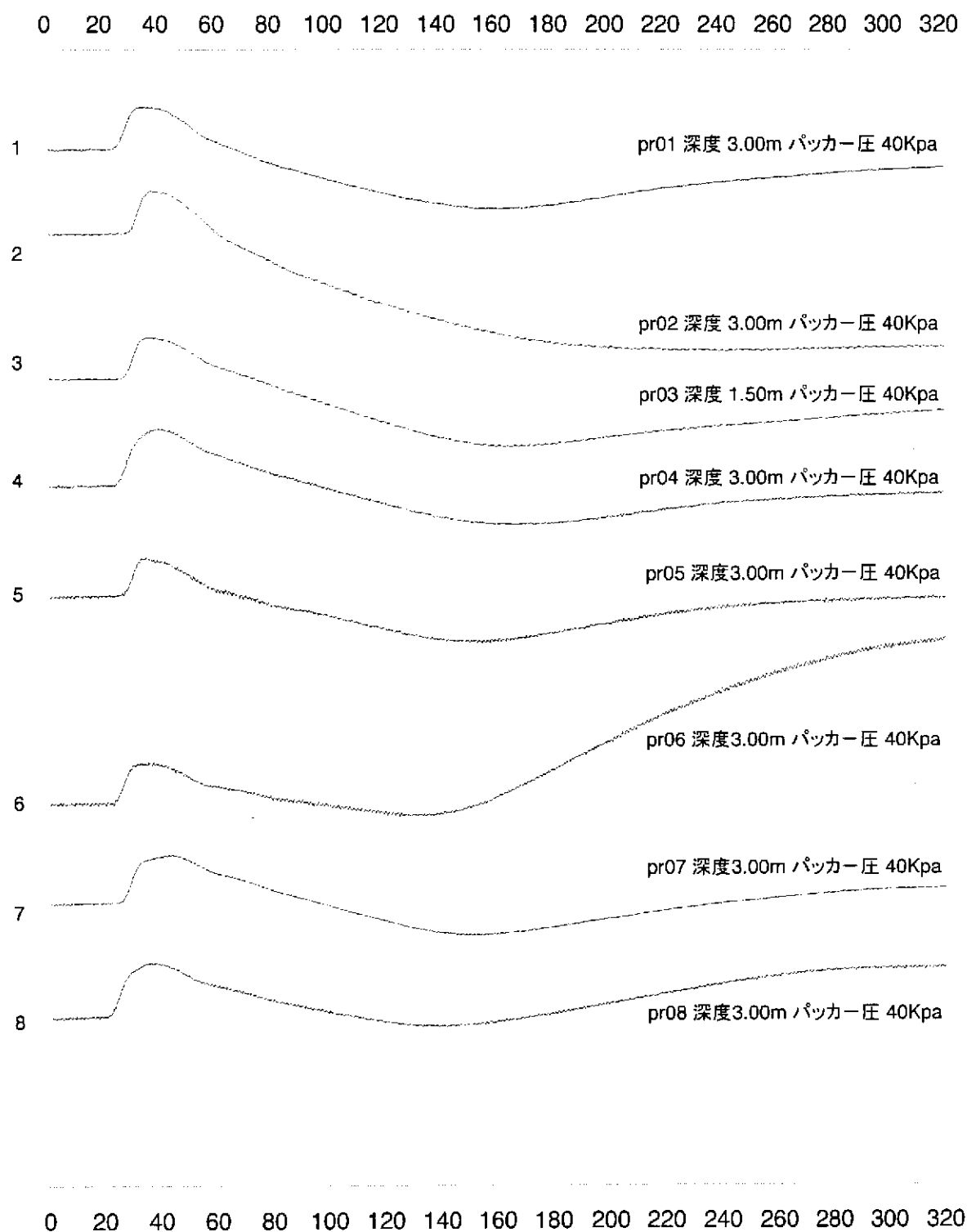


図6.2-5 各種プローブで得られた TDR 波形（その 1）

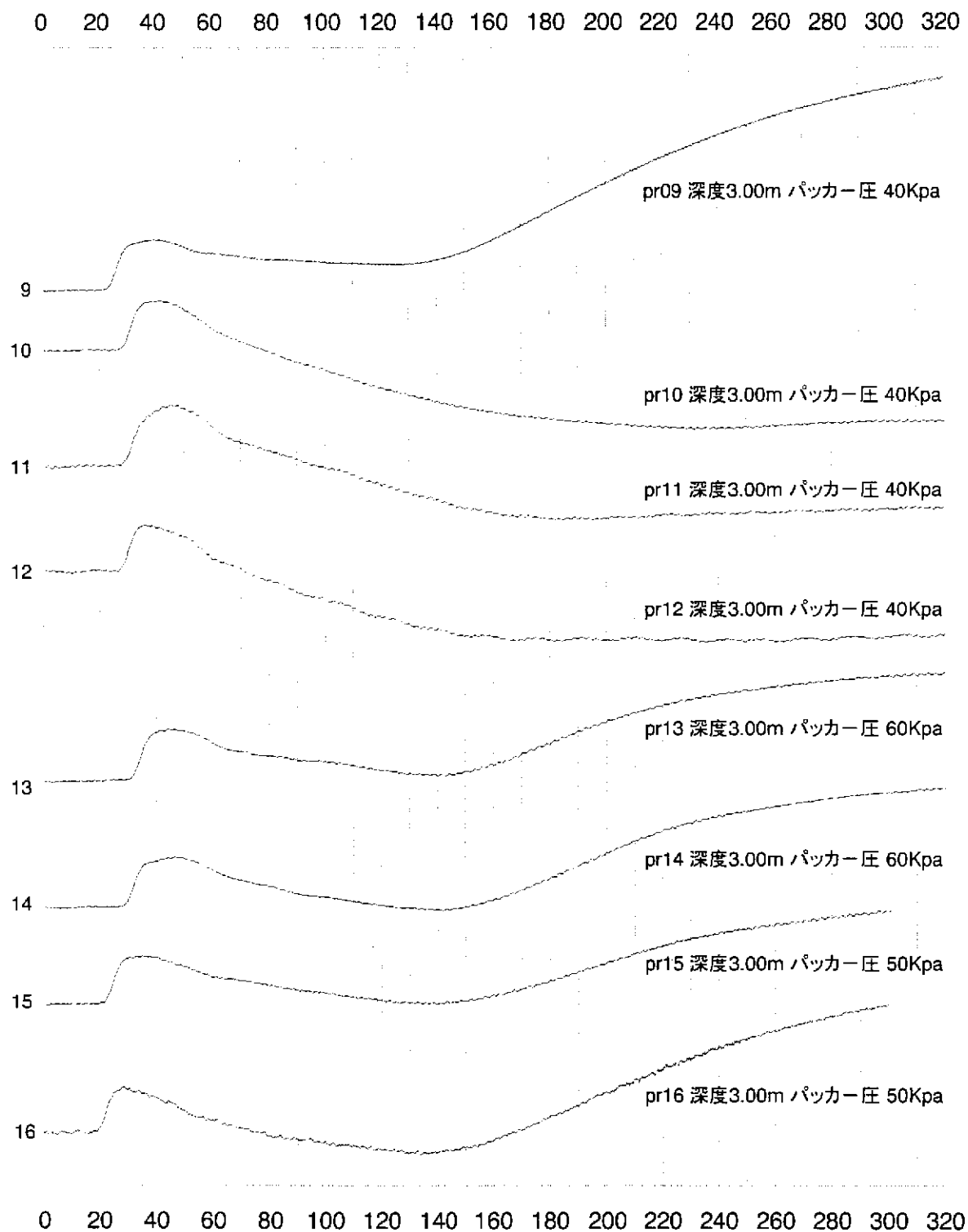


図6.2-6 各種プローブで得られた TDR 波形（その 2）

図6.2-5、図6.2-6の TDR 波形から求めた比誘電率を図6.2-7に示す。それぞれのプローブによる比誘電率は、先に述べた TDR 波形の特徴をほぼ反映しており、反射波の立ち上がりが不明瞭なものほど、比誘電率は大きくなっている。

図6.2-7で、プローブ No.2, 10, 12 は、水の比誘電率 81 を超える値となっており、明らかに異常値である。また、プローブ No.11 も比誘電率 63 と、通常の岩石で得られる値よりもはるかに大きく、異常値に相当すると考えられる。

プローブ No.1, 3, 4 は、比誘電率で 50~57 と通常の岩石で考えられる比誘電率よりも大きい値を示しており、反射波が明瞭でないことを考慮すると、これらも異常値に相当する値と判断される。また、プローブ No.5, 7, 8 は比誘電率で 43~45 となっており、これは 5.7 節で述べた岩石コアの飽和時の比誘電率である 36 よりも 7~9 高い値である。

プローブ電極にコーティングを施したものは、シリコンコーティングのもので比誘電率が 30~35、テフロンコーティングのもので 38 程度となっており、テフロンコーティングを施したものが、岩石コアの飽和時の比誘電率に最も近い値を示した。

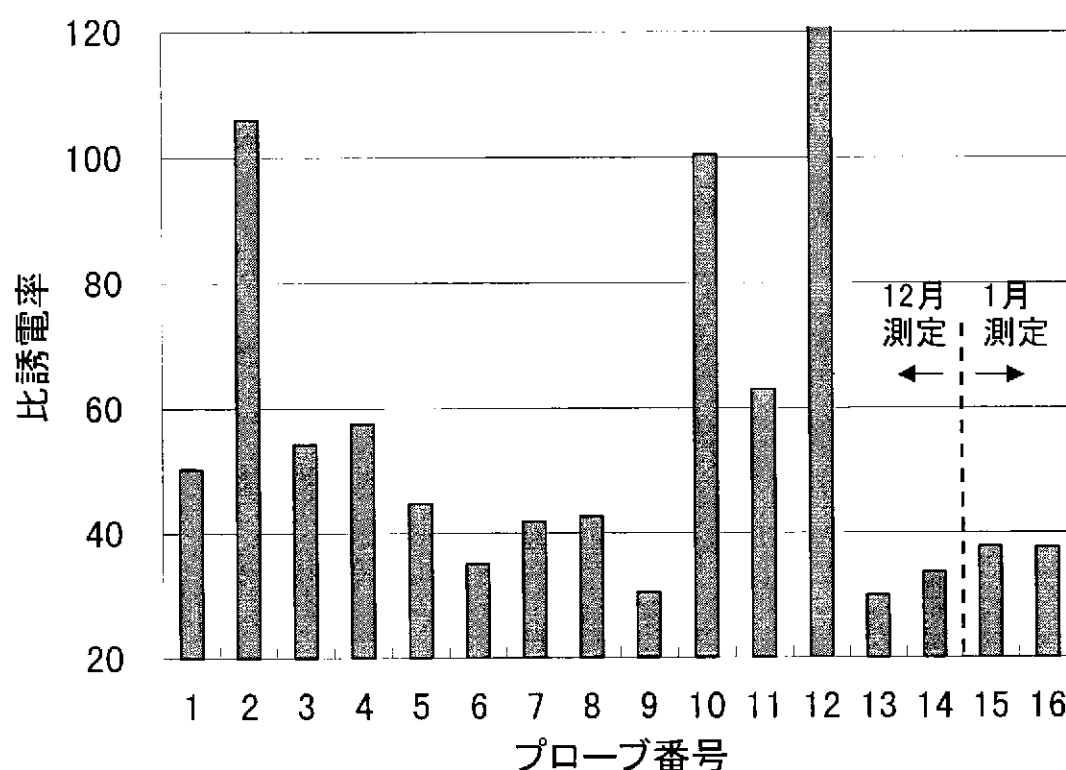


図6.2-7 各種プローブで得られた岩盤の比誘電率

6.2.4.3 同軸ケーブル長を短くした場合の改良効果

01SI-10 孔の深度 3.0m を対象とし、プローブ No.7 と No.15 について、同軸ケーブル長を 15m から 5m に短くしたときの TDR 波形の変化を調べた。得られた TDR 波形を図6.2-8に示す。

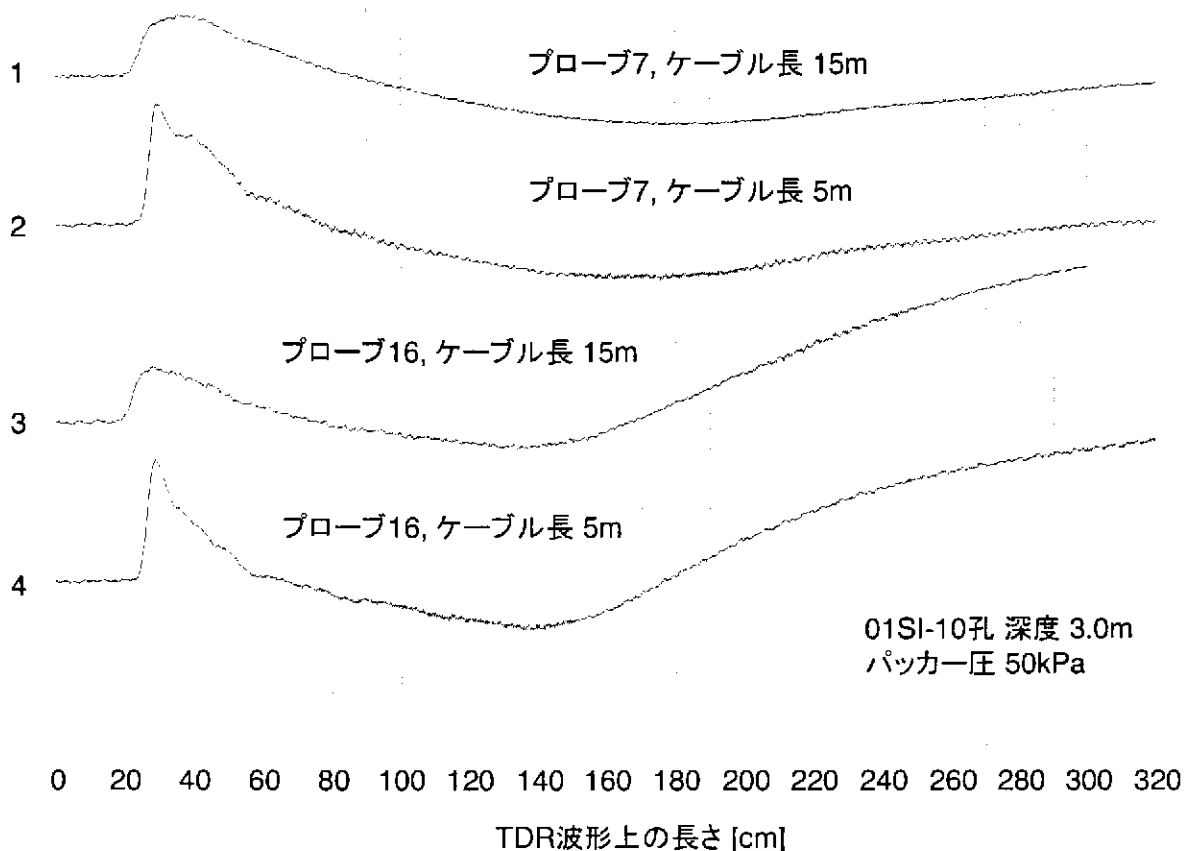


図6.2-8 プローブ長を変化させたときの TDR 波形の変化

3.2 節での検討結果と同様に、ケーブル長を短くすることにより、最初の反射点の立ち上がりがより鮮明になっている。これにより、反射波の立ち上がりもわずかに改善されているが、その効果はほとんどないことが読み取れる。

6.2.4.4 深度方向の比誘電率分布の測定

(1) 12 月の原位置試験時

01SI-10 孔の深度 1.50m～8.00m を対象とし、プローブ 4 とプローブ 7 を用いて TDR による深度方向の比誘電率分布の測定を行った。その際プローブの設置方向、すなわち孔の上面に設置するか、側面に設置するかの違いによる測定値の違いについても検討した。得られた比誘電率の分布を図6.2-9に示す。

図6.2-9の凡例で、プローブ孔側面とあるのは、プローブを孔の側面に圧着させて測定した場合であり、プローブ孔上端とあるのは、孔の上面に圧着させて測定した場合である。なお、孔側面に設置したものは、パッカー式プローブを深い深度へ移動させて測定し、孔上面に設置したものは、逆に浅い深度へ移動させて測定した結果である。

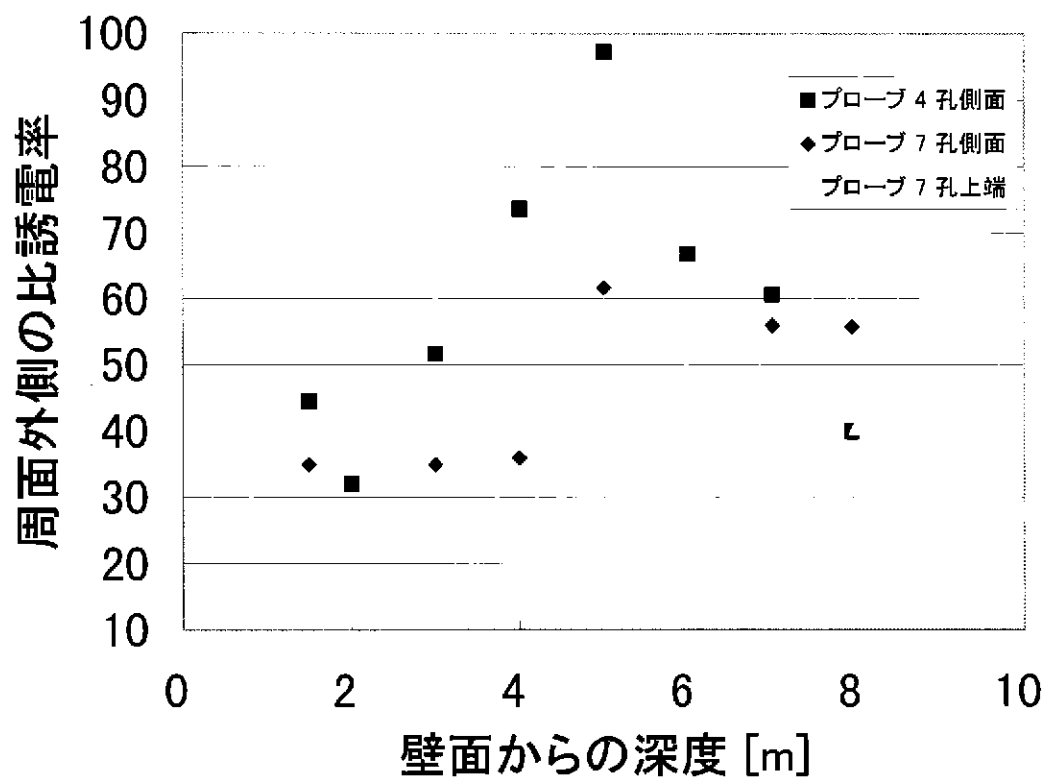


図6.2-9 岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔）

プローブ No.4, No.7 とも、得られた比誘電率は大きくばらつき、特に No.4 の場合は 32～97 と変動幅が最も大きかった。3 通りの測定方法の中では、プローブ No.7 を孔の上面に設置して測定した場合の変動幅が最も小さくなった。

得られた TDR 波形は、反射波の立ち上がりが不明瞭なものが多く、特に比誘電率が 50 以上となるものは極めて不明瞭であった。一方で、反射波の立ち上がりの明瞭なものもいくつかあり、それら波形から求めた比誘電率は、32～44 の値となった。

(2) 1月の原位置試験時

01SI-10 孔の深度 1.50m～8.00m を対象とし、プローブ No.7, No.15, No.16 を用いて TDR による深度方向の比誘電率分布の測定を行った。また、繰り返し測定の実現性を確かめるために、プローブを孔内へ押し込んでいく過程と、孔内から引き戻していく過程の両方の測定を行い、得られる比誘電率に差が見られるかどうかを確認した。プローブの設置位置は孔の上面とした。

得られた比誘電率の分布を図6.2-10、図6.2-11、図6.2-12に示す。

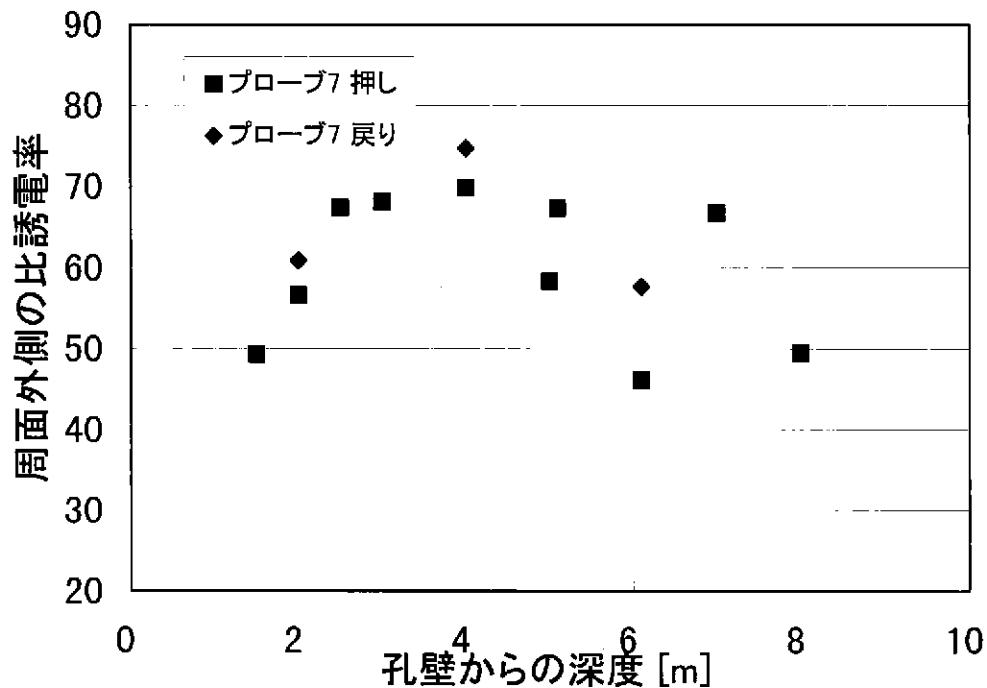


図6.2-10 岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔，プローブ No.7）

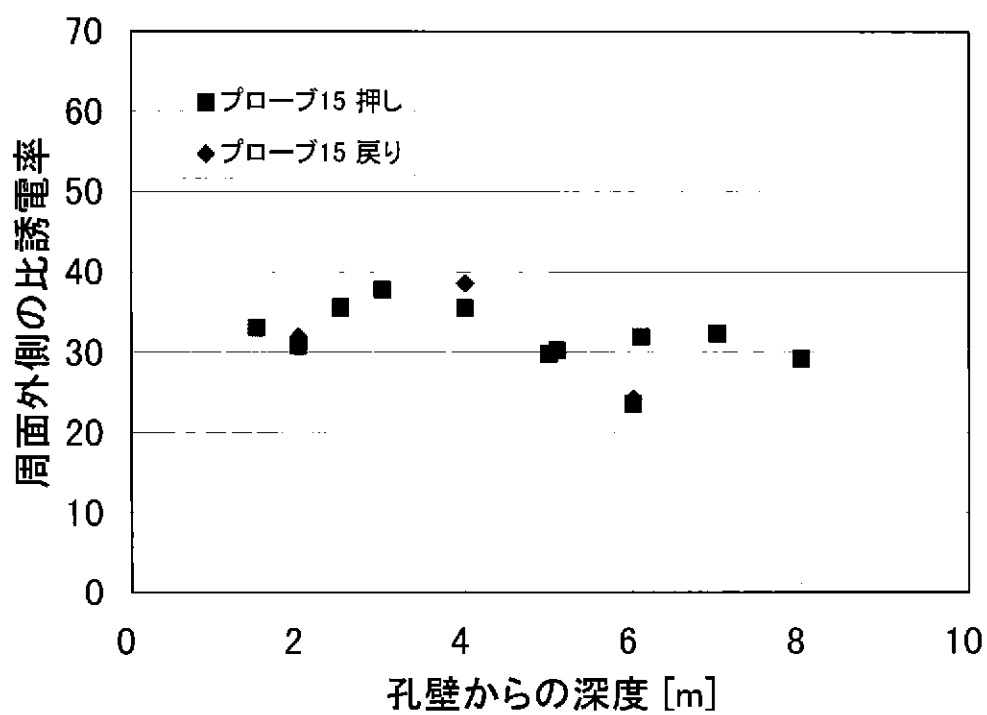


図6.2-11 岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔，プローブ No.15）

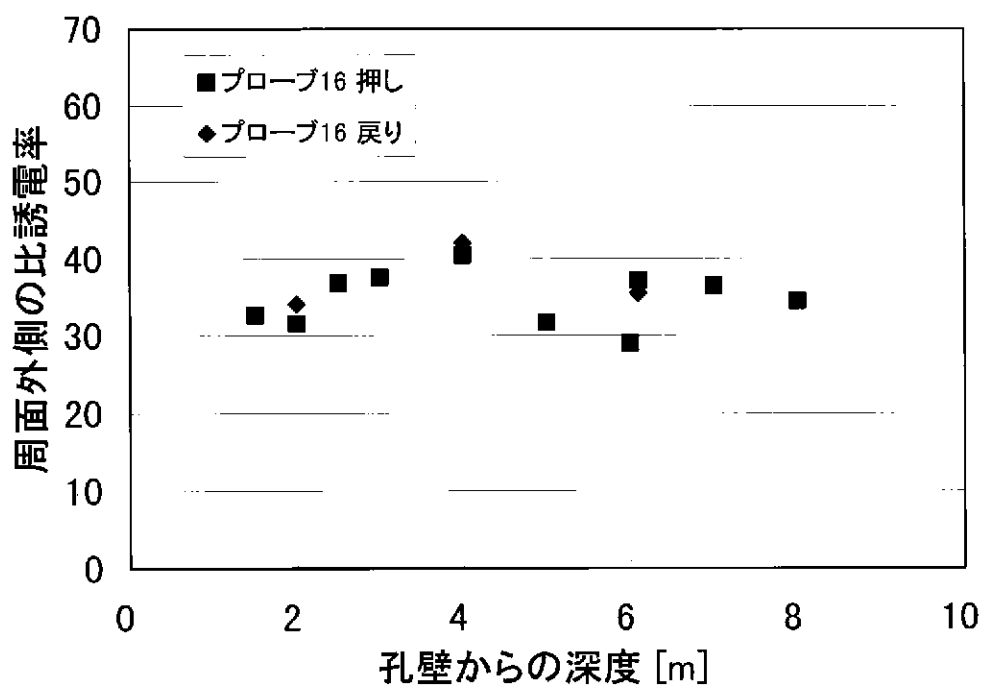


図6.2-12 岩盤の深度方向の比誘電率分布（01SI-10 孔，プローブ No.16）

プローブ No.7 は、12 月の調査では比誘電率で 40 程度の値を示すものが多かったが、今回得られた TDR 波形は反射波の不明瞭なものが多くを占めた。比誘電率は 46～75 と大きなばらつきを示した。

これに対し、電極にテフロンコーティングを施したプローブ No.15 と No.16 は、TDR 波形の反射波が明瞭であった。得られた比誘電率は、プローブ 15 で 24～39、プローブ 16 で 29～42 となり、岩石コアについて測定された比誘電率の変化の範囲内にほぼ収まっていた。

6.2.5 考察

6.2.5.1 パッカー圧力と測定値との関係

測定結果から、プローブ電極の幅、厚さの違いによって、プローブ電極と孔壁との接触状況に違いが生じ、圧着に必要なパッカー圧が変化したものと考えられる。前掲図 6.2-4 の結果から、電極をより低いパッカー圧で確実に孔壁に圧着させるには、電極幅が小さい方が望ましいと判断される。

6.2.5.2 各種プローブを用いた測定による改良効果の検討

緩衝材の厚さが 25mm のプローブで反射波の立ち上がりが極めて不明瞭になった理由は、厚さ 15mm の場合よりも孔壁とより干渉したために、プローブ電極の周りに水や泥が付着し、これが測定時に孔壁とプローブの間の隙間に入って、電磁波の減衰が大きくなったためと考えられる。したがって、緩衝材の厚さが 25mm のものは、この調査孔には不適であったと判断される。

測定結果からは、プローブ電極がテフロンでコーティングされており、緩衝材の厚さが薄く、かつコーティングが施されているものが測定に適していると判断される。

6.2.5.3 同軸ケーブル長を短くした場合の改良効果

同軸ケーブル長を 15m から 5m に短くすることにより、プローブ電極への入射波の鈍りが低減したと考えられるが、反射波の立ち上がりはほとんど改善されていない。これは、入射波に含まれる高周波成分が増えても、その成分が岩盤中でより強い減衰を受けるために、プローブの先端部では効果がなくなってしまうことによると考えられる。よって、測定対象とした泥質凝灰岩では、ケーブル長を 15m 未満にしても反射波形の改善効果は得られず、より深い深度を測定対象とする目的から、ケーブル長を 15m として使用するのが妥当である。

6.2.5.4 深度方向の比誘電率分布の測定

(1) 12月の原位置試験結果について

プローブ No.4 と No.7 では、プローブ No.7 の方が値のばらつきや異常値が少なかった。この原因は明確でないが、プローブ No.7 では緩衝材表面にシリコンコーティングを施すことによってパッカー式プローブの粗度が小さくなり、プローブ電極付近に泥や水が付着しにくくなって、電極と孔壁の間に水が入り込む現象が起こりにくかった可能性が考えられる。

また、プローブを孔上面に設置したものは、孔側面に設置したものより異常値を与える測定個数が少なくなっており、孔内に溜まった水や泥の影響を小さくする効果があったものと推察される。

(2) 1月の原位置試験結果について

前掲図6.2-11、図6.2-12で、プローブ No.15 と No.16 による測定結果を見ると、パッカーを押し入れる過程と、引き戻す過程の同一深度における比誘電率は非常に良く一致していた。このことから、得られたデータの再現性は高いと考えられる。

また、プローブ No.15 と No.16 での測定結果を比較すると、絶対値にやや差があるものの、相対的な変化の傾向は両プローブとも非常に良く一致していた。特に、深度 2m から 4m にかけて比誘電率が増えていく傾向や、深度 6m 地点で比誘電率が小さくなる様子は、いずれのプローブでも確認できた。

以上の2点から、プローブ No.15 と No.16 による測定結果は、深度方向の相対的な比誘電率変化を反映しているものと判断される。ただし、測定値の絶対値が岩盤の比誘電率に等しいかどうかは、プローブのキャリブレーションにより検討を行う必要がある。

なお、前掲図6.2-10から、プローブ No.7 による測定値は、全体的にプローブ No.15 と No.16 による測定値と類似した分布を示すものの、同一深度における繰り返し測定の再現性が低く、値のばらつきも大きいことから、信頼性が低いと判断される。

6.3 室内試験

6.3.1 試験方法

パッカー式プローブの適用性を検討するため、4.3 節で解説したような試験方法により、いくつかの飽和度におけるコンクリート円管の TDR 計測を行い、得られた飽和度と比誘電率との関係を、コンクリートコアについて得られた同様の関係と比較した。図6.3-1に室内試験の概念図を示す。

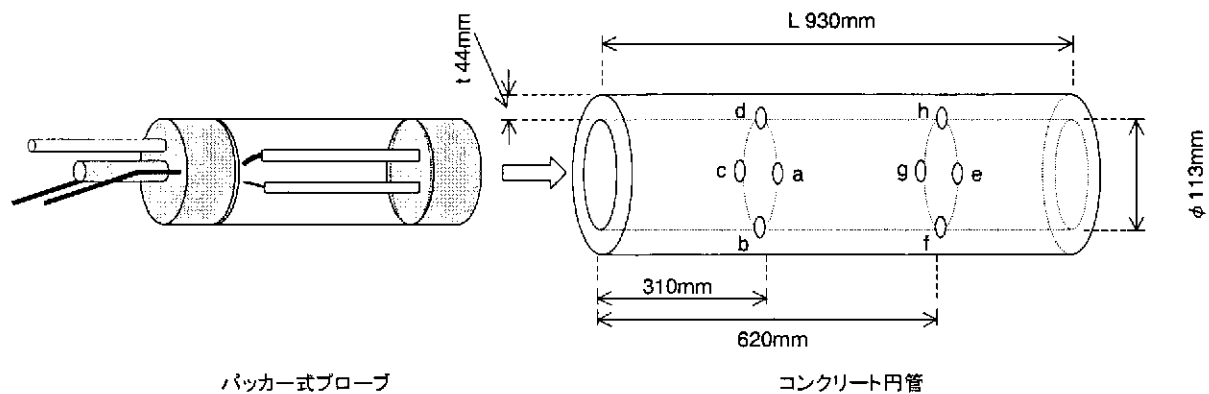


図6.3-1 パッカー式プローブの性能確認試験の概念図

コンクリート円管を室内で乾燥させていき、乾燥過程のいくつかの段階で、前掲表4.2-2中のプローブ No.4, 7, 10, 16 を装着したパッカー式プローブにより比誘電率を測定した。測定時のパッカー圧力は、パッカー圧を上げても TDR 波形の形状が変わらなくなる圧力とした。

コンクリート円管内で飽和度に違いが生じていることを考慮して、まずプローブ No.10 を用いて、図6.3-1に示した円管内の a~h の各位置にプローブの中心がくるように設置し、円管内の比誘電率の分布を確認した。その結果から、図6.3-1内の a, c, e, g の 4 点を代表として選び、以後の測定においてはこの 4 点にプローブの中心がくるように設置し、それらの平均値を円管の代表的な比誘電率とした。

6.3.2 試験結果

プローブ No.4, 7, 10, 16 を用いて測定したコンクリートの比誘電率と飽和度との関係を図6.3-2に示す。同図には、コンクリートコアについて得られた比誘電率と飽和度との関係 (C1201, C1202) を合わせて示した。

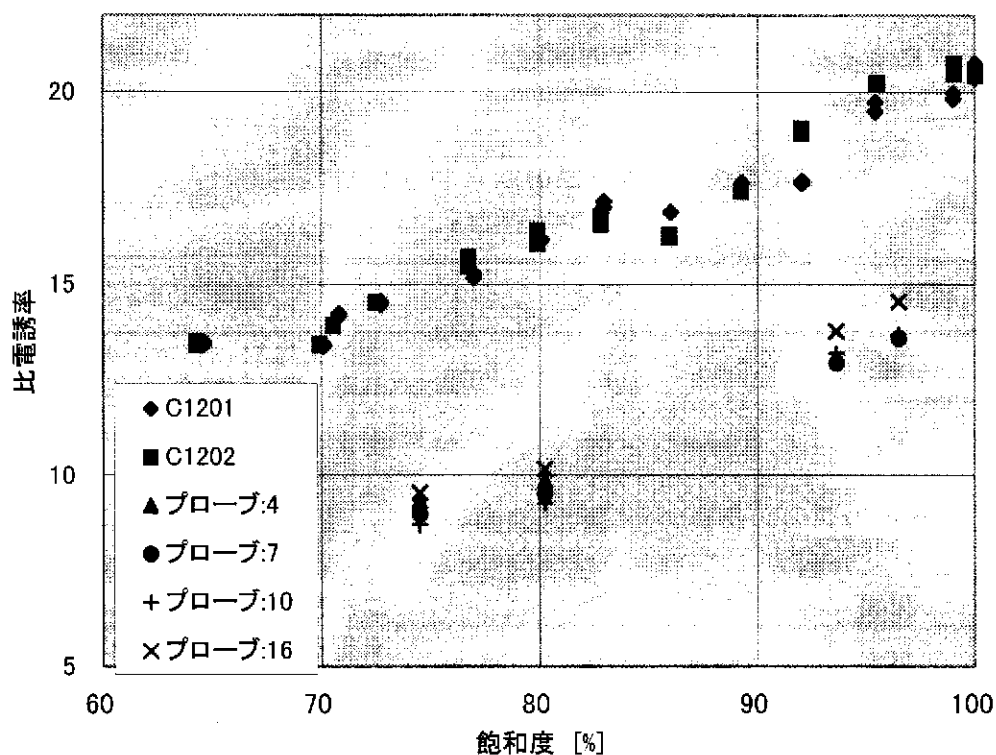


図6.3-2 パッカー式プローブで測定したコンクリート円管の比誘電率

これによれば、パッカー式プローブで測定した比誘電率は、ロッド式プローブを用いてコアについて得られたものの 60%~70%の値となっており、その比率は飽和側で大きく、コンクリートの飽和度が 80%のときに最も小さくなっている。

各プローブで得られた比誘電率を比較すると、4つのプローブの中では No.16 が全体的に大きめの比誘電率を与えており、プローブ No.7 と 10 がほぼ同じ値を示し、No.4 は中間的な値となっている。また、プローブの違いによる比誘電率の変動幅は、飽和度 80%のときに最大 9%となった。

6.3.3 考察

パッカー式プローブで測定した比誘電率と、ロッド式プローブで測定したコアの比誘電率とが異なる値を示す理由としては、コンクリート円管の表面と内部との間に含水率の差が生じており、パッカー式プローブで測定される比誘電率が、プローブ近傍のより乾いたコンクリートの比誘電率に大きく影響されることが考えられる。

このほかに、パッカー式プローブを用いて測定した比誘電率が、円周内側の物質と外側の物質の平均比誘電率となるという前提が成り立たないことも考えられる。この点についてはさらに検討を行う必要がある。

6.4 プローブの総合的な評価

各種のプローブによる原位置試験，室内試験の結果を総合して，プローブの評価を表6.4-2のようにまとめた。

表6.4-2 プローブの総合的な評価

項目			優劣		備考
電極	幅	3mm	$\geq$	6mm	理論上は3mmの方が優れると考えられる
	厚さ	0.3mm	$\approx$	0.5mm	あまり差は大きくない
	コーティング	あり	$>$	なし	適用できる岩盤が多くなると考えられる
	コーティングの種類	シリコン	$<$	テフロン	なるべく薄く均一に塗布できるもの
緩衝材	厚さ	15mm	$>$	25mm	孔壁との干渉がなければいずれも可となる
	コーティング	あり	$>$	なし	吸水の影響を防ぐ

6.5 まとめ

改良型パッカー式プローブを原位置測定とコンクリート円管を用いた室内試験に適用し、以下の結論を得た。

- 1) 原位置の同一孔，同一深度における TDR 波形は，プローブ電極にコーティングを施したもので反射波の立ち上がりが明瞭となり，緩衝材の厚さが 25mm で，プローブにコーティングを施していないのもので，反射波の立ち上がりが極めて不明瞭となった。
- 2) プローブ電極の幅、厚さの違いが測定値に与える影響は小さかった。
- 3) テフロンコーティングを施したものが，岩石コアの飽和時の比誘電率に最も近い値を示した。
- 4) プローブ電極を孔上面に設置したものは，孔側面に設置したものより異常値を与える測定個数が少なくなっており，孔内に溜まった水や泥の影響を小さくする効果があったものと推察される。
- 5) 電極にテフロンコーティングを施したプローブでの測定結果は，再現性が高いと同時に，深度方向の相対的な比誘電率変化を反映している可能性が高い。ただし，測定された絶対値は検証の必要があると考えられる。
- 6) 室内にて乾燥させたコンクリート円管の比誘電率をパッカー式プローブで測定したところ，コアの比誘電率の 60%～70%の値が得られた。この理由として，パ

ッカー式プローブで測定される比誘電率は、プローブ近傍のより乾いたコンクリートの比誘電率に大きく影響されることが考えられた。

- 7) プローブの総合的な評価により、原位置測定に適したプローブの要件として、プローブ電極についてはなるべく薄く均一な絶縁性材料でコーティングされていること、緩衝材については孔壁と干渉しない程度の厚さで、はっ水性材料でコーティングされていることが挙げられた。

7. TDR 波形の自動解析手法の適用と改良

7.1 目的

本研究では、TDR 波形からの反射点の読み取りの自動化、効率化および客観性の向上を目的として、平成 11 年度に岩石の測定に最適と思われる波形解析手法の調査を行い、平成 12 年度に微分法に基づく波形解析プログラムを作成した。この波形解析プログラムの有効性は、平成 12 年度に実施したポリエチレンなどの比誘電率の小さい材料を測定した波形で検証されたが、岩石を測定した波形への適用性の検討はなされていない。また、同プログラムを原位置測定で使用するには、操作性の向上、及び波形データの特性に応じて適切に反射点の読み取りができるように改良することが必要と考えられる。

そこで、今年度は波形解析プログラムを、岩石を対象とした室内測定や原位置測定の TDR 波形に適用することにより、反射点読み取り上の問題点を明らかにし、原位置測定における作業の効率化と信頼性の向上に向けた同プログラムの改良について検討した。

なお、本報告書で示した比誘電率の測定結果は、多くが波形解析プログラムを用いた読み取りによるものである。したがって、その有効性はこれまでの章で既に示されているともいえるが、ここでは適用時に生じた問題を中心に解説する。

7.2 岩石の TDR 波形への適用

7.2.1 波形の分類

3～6 章で解説した方法により取得した岩石の TDR 波形を、① 反射点の検出の容易さ、② 検出された反射点の信頼性、の 2 つの観点から分類することにする。ここで、反射点の検出が容易であるとは、波形を人の目で判断してプログラムに反射点の検索範囲を指定したり、波形データに特別な修正を施したりする必要性が低いことを意味する。

得られた TDR 波形に対するプログラムの適用性と、反射点の信頼性には正の相関があり、TDR 波形は概念的に図 7.2-1 に示す 4 つの区分に分類される。反射点がより容易に検出でき、かつその信頼性が高いほど、波形解析プログラムの「適用性が高い」波形とすることができる。

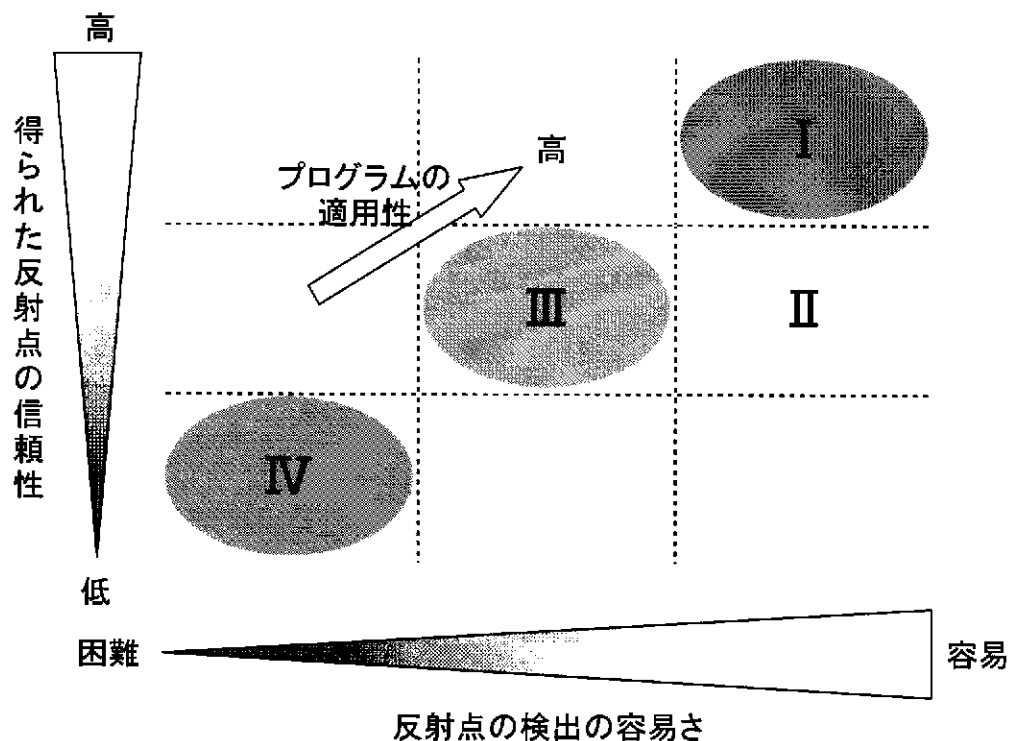


図7.2-1 岩石の TDR 波形の分類

7.2.2 各分類の波形の例

前掲図7.2-1に示した4つの区分には、それぞれにロッド式プローブによる TDR 波形と、パッカー式プローブによる TDR 波形が含まれる。以下に、4つの区分それぞれについて、ロッド式プローブ、パッカー式プローブによる代表的な TDR 波形を例示し、反射点検出上の問題を解説する。

7.2.2.1 分類 I

これは、反射点の検出が問題なく行われ、かつその信頼性が高いものであり、以下のようなものが含まれる。多くは室内測定で得られたものである。

(1) ロッド式プローブによる波形

- ① コンクリートコアを測定したものの大部分
- ② 泥質凝灰岩を測定したもののうち、乾燥側の一部

(2) パッカー式プローブによる波形

- ① コンクリート円管を測定したものの全て（プローブの種類によらず）
- ② 原位置岩盤を、電極にコーティングを施したプローブで測定したもの

波形例として、ロッド式プローブによるコンクリートコアの TDR 波形を図 7.2-2 に、パッカー式プローブによるコンクリート円管の TDR 波形を図 7.2-3 に示す。

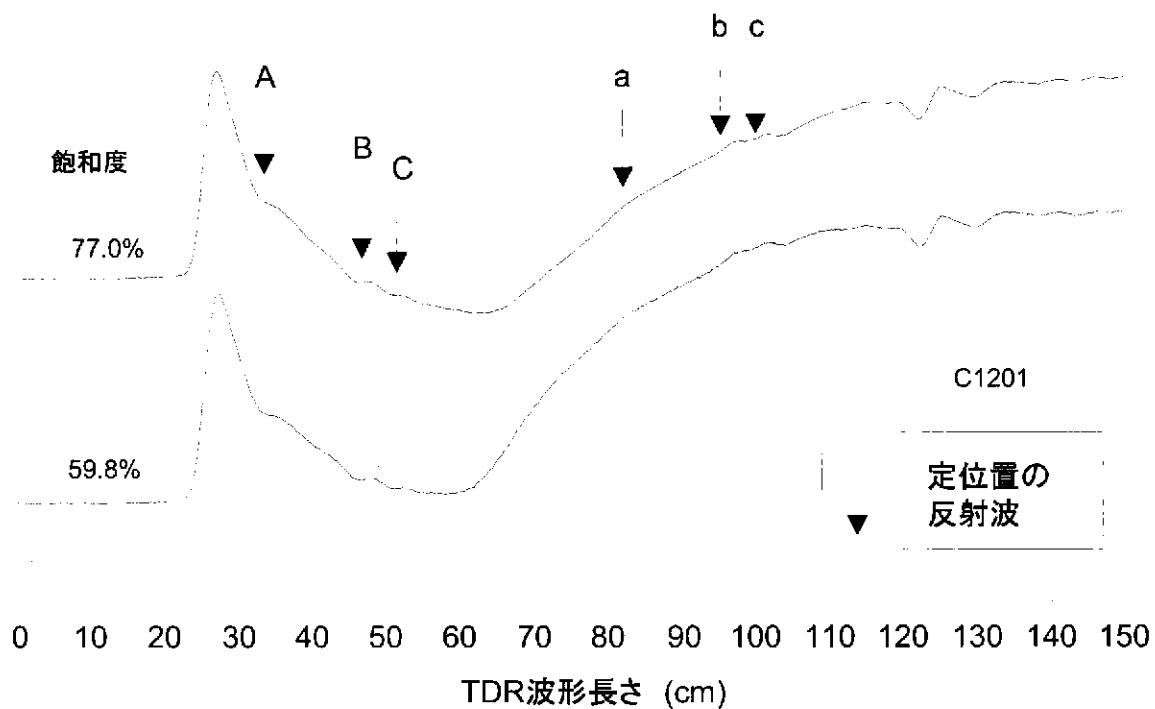


図7.2-2 コンクリートコアの TDR 波形例 (C1201)

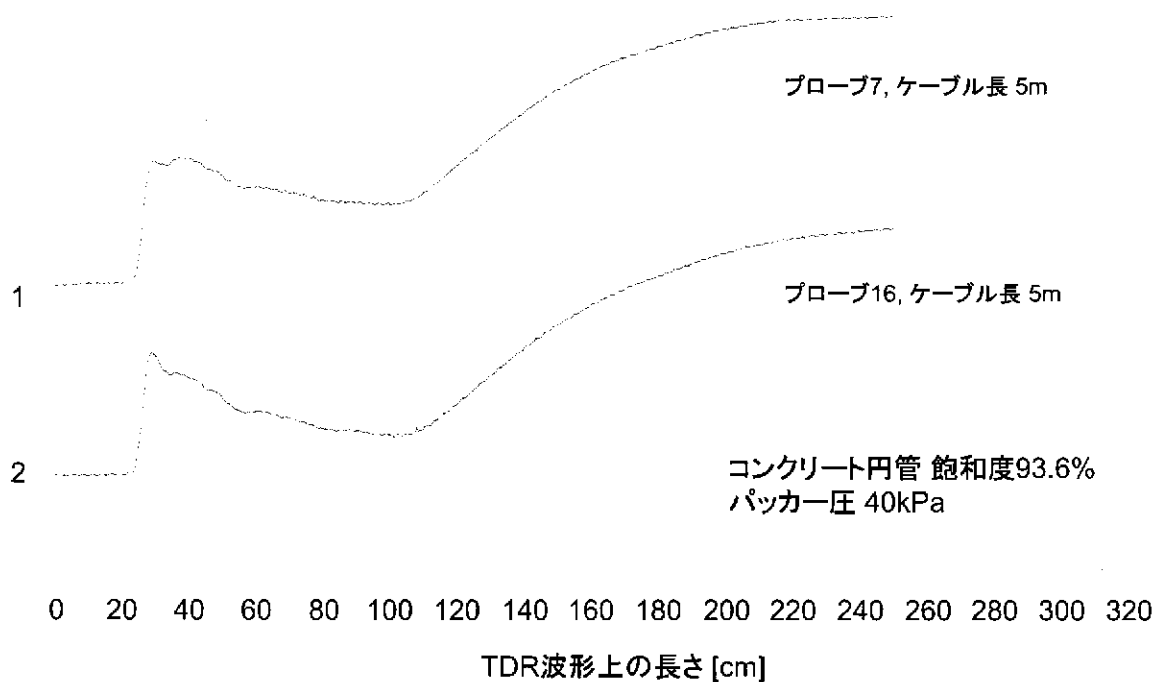


図7.2-3 コンクリート円管の TDR 波形例 (プローブ No.7, No.16)

前掲図7.2-2の C1201 の TDR 波形上には、定位置反射がいくつかあるが、反射点の付近に重ならないことや、反射波の立ち上がりが明瞭なことから、解析プログラムによる反射点の検索に影響はなかった。

前掲図7.2-3のコンクリート円管について得られた TDR 波形は、いずれも反射波の立ち上がりが明瞭であり、反射点の探索の妨げになるような定位置の反射も見られないため、反射点の探索は容易であった。また、得られた値も目視から判断される反射点とほぼ一致していた。なお、波形には短い周期のノイズが含まれていたが、波形解析プログラムの持つスムージング機能により、この影響は押さえられたと判断される。

7.2.2.2 分類Ⅱ

これは、反射点の検出は比較的容易にできるものの、得られた反射点の信頼性は中程度と考えられるものであり、以下のようなものが挙げられる。室内測定、原位置測定の両方に認められた。

(1) ロッド式プローブ

泥質凝灰岩を測定したもののうち、湿潤側の一部

(2) パッカー式プローブ

原位置岩盤をプローブ電極がコーティングされていないものにより測定したもの（一部）

波形例として、ロッド式プローブによる泥質凝灰岩の TDR 波形を図7.2-4に、パッカー式プローブによる原位置岩盤の TDR 波形を図7.2-5に示す。

図7.2-4の M1001 の TDR 波形については 5.7 節で解説しており、詳細はそちらを参照されたい。図7.2-4中の波形は、反射波の立ち上がり自体は明瞭であり、そのため、解析プログラムによる反射点の検出は容易であった。ただし、5.7 節で述べたように、この反射点は岩石自体の比誘電率を反映していない可能性が高い。これは解析プログラムの問題ではなく、測定装置に起因する問題であるといえる。

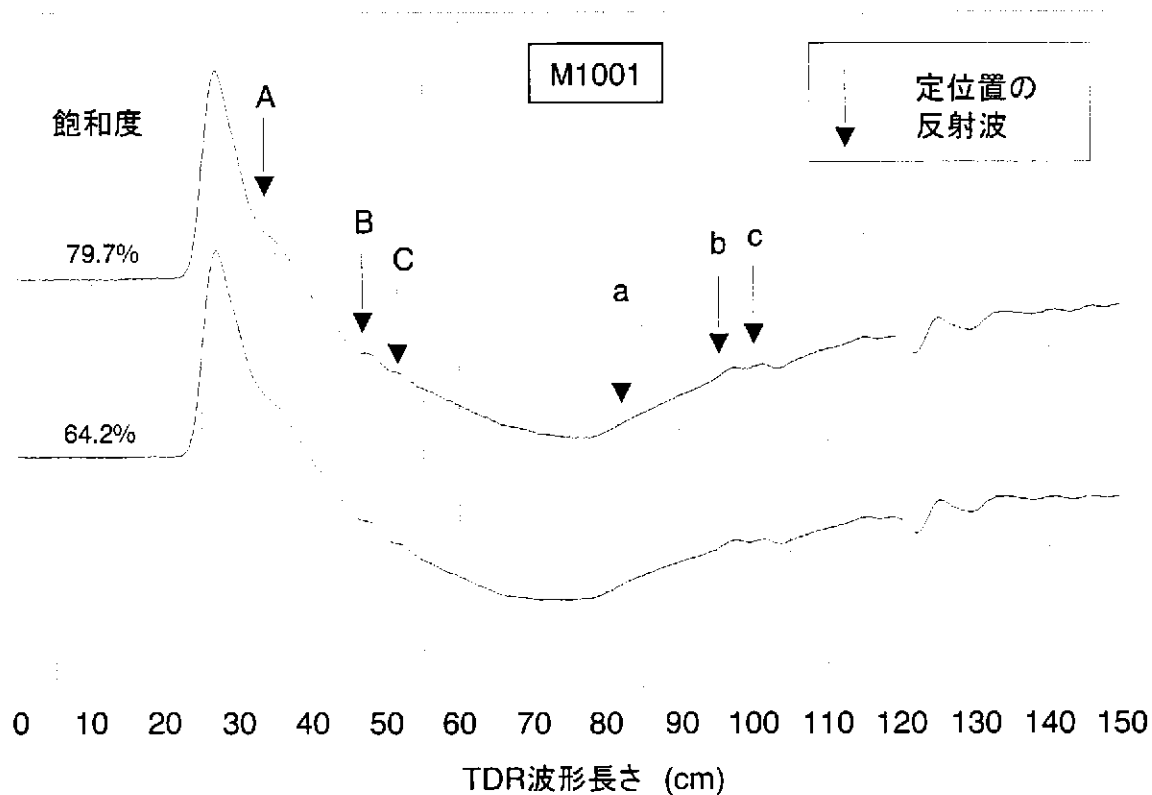


図7.2-4 泥質凝灰岩コアの TDR 波形例 (M1001)

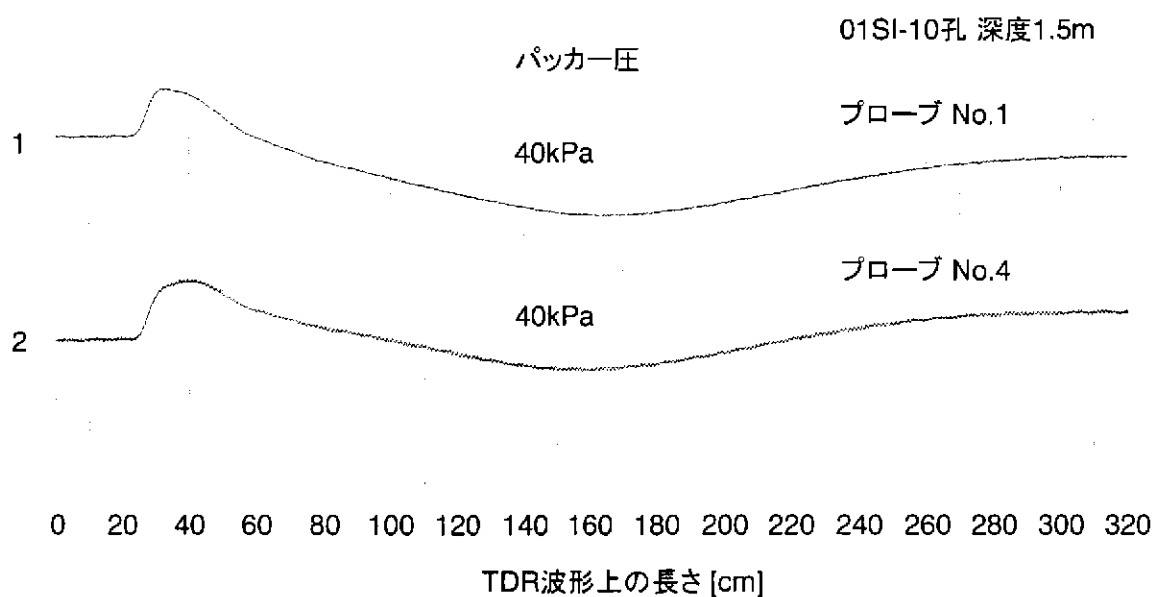


図7.2-5 原位置岩盤の TDR 波形例 (プローブ No.1, No.4)

図7.2-5で、プローブ No.1, No.4 の反射波の立ち上がりは不鮮明であるが、ノイズが短周期成分でスムージングにより低減可能であるため、微分法で反射点を求める際の基準となる1階微分の最大値を与える点の検出は容易であった。す

なわち、波形解析プログラム上では反射点を求めることが可能であった。ただし、得られた比誘電率は異常値となっており、このように立ち上がりの不鮮明な波形に対しても微分法を適用すべきかどうかは、検討が必要である。これは根本的にはプログラム側で解決すべき問題ではなく、装置を改良して波形の立ち上がりを改良することによって解決すべき問題である。

7.2.2.3 分類Ⅲ

これは、プログラムによる反射点の検出において、探索すべき範囲を人の目で判断して指定する必要がある、また得られた反射点の信頼性は中程度と考えられるものである。これは、室内測定で得られた TDR 波形に認められた。

(1) ロッド式プローブ

- ① コンクリートコアを測定したもののうち、湿潤側の一部
- ② 泥質凝灰岩を測定したもののうち、乾燥側の一部

波形例として、ロッド式プローブによる泥質凝灰岩、およびコンクリートの TDR 波形を図7.2-6に示す。

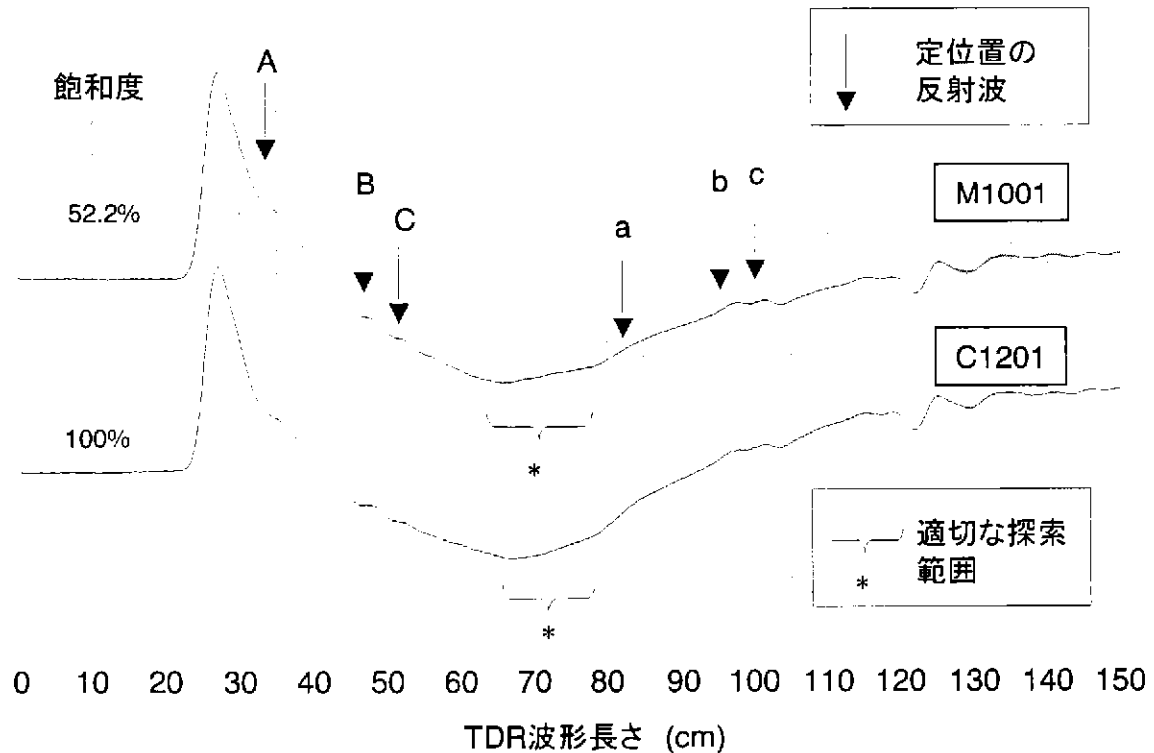


図7.2-6 泥質凝灰岩およびコンクリートの TDR 波形例 (M1001, C1201)

前掲図7.2-6で、M1001の飽和度 52.2%の波形では、66cm 付近で反射が起こっており、79cm 付近で反射波の立ち上がりが大きくなる。79cm 付近には定位置反射 a が含まれると判断されるため、この位置を反射点とするのは適切でない。しかし、この波形に波形読み取りプログラムを適用すると、反射点の検索範囲を指定しなければ、79cm 付近の立ち上がりが大きいいところを微分値の最大を与える点と判断し、ここに接線を引いて反射点を求めようとする。この場合は、波形の全体的な傾向を人の目で判断し、プログラムに反射点の検索範囲を指定することが必要であった。この場合、反射点は 68cm 付近となった。

C1201 の飽和度 100%の波形では、67cm 付近で反射が起こっているが、80cm 付近で反射波の立ち上がりが大きくなっており、この点を反射点と誤って判断する可能性がある。しかし、これは先に述べたように反射点の検索範囲を指定することにより解決できる。

Ⅱに分類される波形は、定位置反射によって反射点の読み取りを誤る可能性があるものであり、これは本質的には試験装置を改善することにより、定位置反射を除去してより解決すべき問題である。一方、ここで述べたようにプログラムに反射点の検索範囲を指定することによっても解決でき、その場合は検索範囲の指定がより容易にできるように、プログラムの改良を行うことが望ましい。

7.2.2.4 分類Ⅳ

これは、反射点の検出が困難であり、かつ得られた反射点の信頼性が低いと考えられるものである。このような波形は、原位置測定 of TDR 波形に多く認められた。

(1) ロッド式プローブ

飽和度 100%の泥質凝灰岩を測定したもの

(2) パッカー式プローブ

原位置岩盤を、電極がコーティングされていないプローブにより測定したもの（反射波の立ち上がりが極めて不鮮明なものや、低周波のノイズが混入するもの）

波形例として、ロッド式プローブによる泥質凝灰岩の TDR 波形を図7.2-7に、パッカー式プローブによる原位置岩盤の TDR 波形を図7.2-8に示す。

図7.2-7の M1001、M1002 の TDR 波形は、反射波の立ち上がりがきわめて不

鮮明なものに加え，反射点付近に **a～c** の定位置反射が重なっているため，解析プログラムの適用は不可能であった。実際の読み取りでは，5.7 節で述べたように，波形の全体的な傾向を人の目で判断し，接線を図7.2-7のように引いてマニュアル法により反射点を求めている。これは解析プログラム側で解決できる問題ではなく，同軸ケーブル長を変えて定位置反射を除去し，プローブ電極のコーティングによって反射波の立ち上がりの改善を行うことで解決すべき問題である。

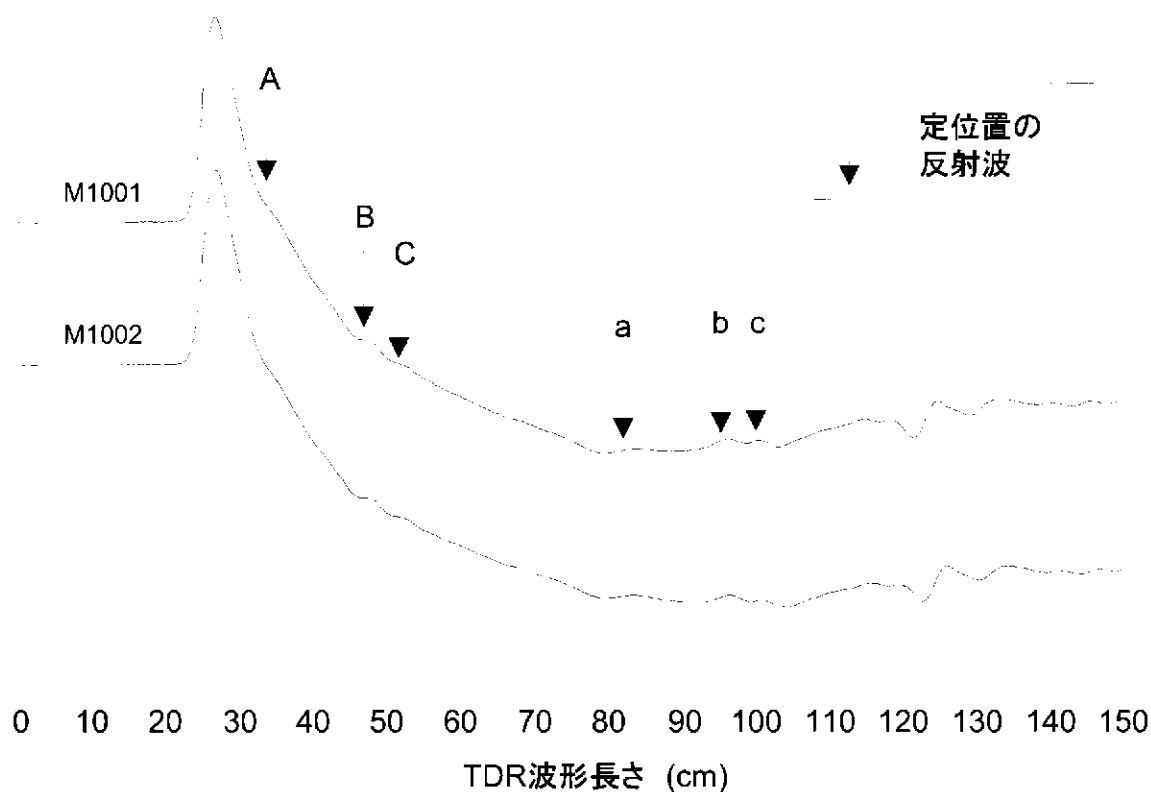


図7.2-7 飽和した泥質凝灰岩の TDR 波形（M1001, M1002）

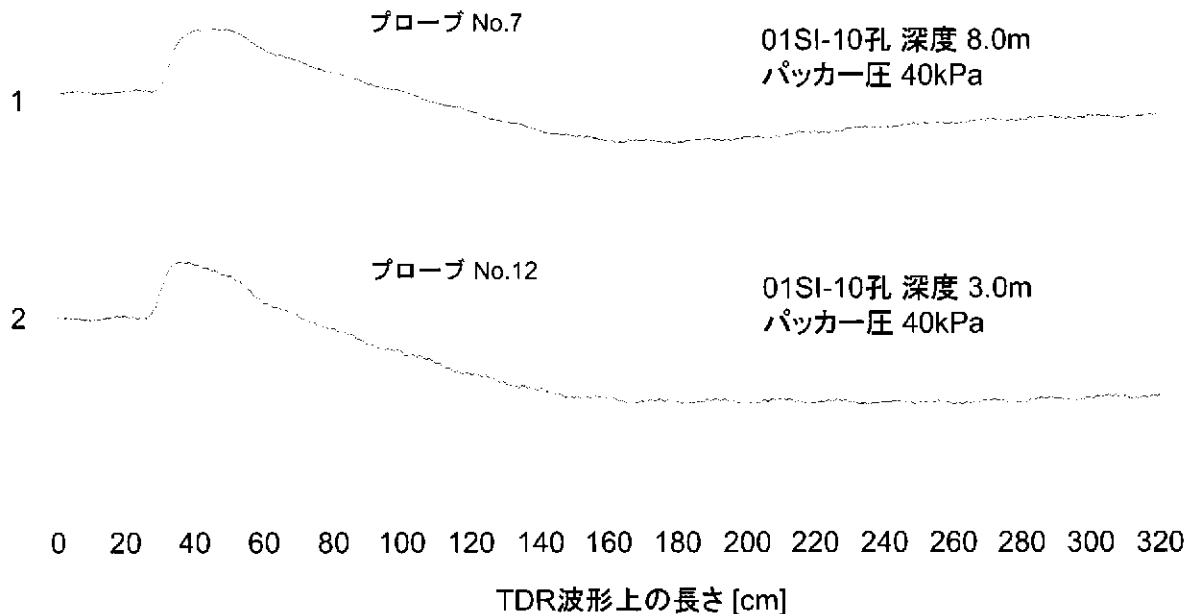


図7.2-8 原位置岩盤の TDR 波形例（プローブ No.7, No.12）

図7.2-8で、プローブ No.7 と No.12 の波形には、全体に比較的長周期のノイズが混入している。また、反射波の立ち上がりも不鮮明であり、特にプローブ No.12 ではほとんど認められない。現状の波形プログラムのスムージング機能では、このような長周期のノイズを除去することができず、反射点を検出させると、ノイズの中から最も凸な部分を選択する。このように、反射波の立ち上がりが不鮮明で、かつ全体に長周期のノイズが混入した波形の場合、波形解析プログラムを適用することは非常に困難である。対策としては、元の波形からノイズの周期とその平均的な振幅を読み取り、その信号の成分を出力値から除去する方法が考えられる。実際の読み取りではこのような対策は行わず、波形の全体的な傾向を人の目で判断し、接線を図7.2-8のように引いてマニュアル法で反射点を読み取った。

7.3 波形解析プログラムの改良点

7.2 節で述べたように、岩石の TDR 波形には波形解析プログラムの適用性が低いものが多く、特に原位置測定波形はほとんどが適用性の低いものである。しかし、その多くは測定装置の改善により解決できると考えられる。したがって、現状の波形解析手法および処理システムで改良を要すると考えられる点は、原位置での操作性向上とノイズ対策である。よって、改良点を次のようにまとめた。

(1) 高度な対話的処理機能

現状の波形データ処理システムは、データ取得プログラムと波形解析プログラムとが分離している。このうち波形解析プログラムに対話的に処理を進める機能がほとんどないことが、原位置での操作性が悪い原因である。原位置で得られた波形データには波形の読み取りが困難なものが多く、TDR 波形を見ながら対話的に処理を行う機能が必要である。

(2) ノイズ除去機能の追加

一般に、原位置の測定データにはさまざまな要因によるノイズが含まれており、この影響を取り除く必要がある。現状の波形解析プログラムは、短周期のノイズをスムージングにより除去することは可能であるが、波形に比較的長周期のノイズが混入している場合に反射点の判断を誤る可能性が高い。したがって、波形データからノイズを除去する前処理を行う必要がある。この際、単なる平均化法では波形がなだらかになってしまう恐れがあるため、対象とする周期のノイズを効果的に除去する方法を使用することが望ましい。一つの方法として、デジタルフィルターの使用が考えられる。

(3) データの補間機能の追加

先に挙げたノイズ対策にも関係するが、波形データの取得間隔を大きくすることにより、データ間隔よりも短周期のノイズの影響を低減することが可能である。一方で、TDR 波形が急変する最初の反射点、すなわち同軸ケーブルの分岐部分に相当する部分では、波形データの取得間隔をできるだけ短くする必要がある。両者の要求を満たすためには、現在のプログラムが備えているスムージング機能に加えて、データ間隔未満の位置について、スムージング曲線上の点を必要な間隔で補間する機能を追加することが望ましい。これにより、必要なデータ数が少なくなり、データ取得に要する時間を短縮できるという効果も生まれる。

7.4 まとめ

波形解析プログラムを、室内試験および原位置試験で取得した TDR 波形に適用し、その有効性を確認するとともに、解析上の問題点について検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 波形解析プログラムの適用性が高い TDR 波形は、主に室内試験のものであった。これに対し、原位置試験の波形は、反射点の検出はできてもその信頼性が低いか、または反射点の検出自体が困難であるものが多く、ほとんどが

適用性の低いものであった。

- 2) 波形解析プログラムの適用性を高めるためには、測定装置側で同軸ケーブル長の変更や、プローブ電極のコーティングなどの改善を行うことが有効と考えられる。一方、プログラム側に求められる改良点は、原位置での操作性向上とノイズ対策であり、これによりノイズや定位置反射が含まれるような波形からの反射点の読み取り精度が向上する。
- 3) 現在のシステムは、プログラムが対話的に処理を進める機能をほとんど持っていないため操作性が悪い。原位置波形データを効率的に解析するためには、TDR 波形を見ながら対話的に処理を行える機能を加えることが必要である。これにより、定位置反射が含まれる波形の解析がより容易になる。
- 4) 長周期のノイズを除去できるような機能を加えることが必要である。この際、単なる平均化法ではなく、対象とする周期のノイズを効果的に除去する方法を使用することが望ましい。

8. まとめ

8.1 本年度の研究成果

8.1.1 パッカー式プローブの原位置測定への適用

東濃鉱山第2立坑第2計測坑道の、土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩中に掘削された01SI-10, 01SI-11孔を対象として、平成12年度に作製したパッカー式プローブを用いて岩盤の比誘電率測定を行った。測定された比誘電率は、通常の岩石で得られる値よりもはるかに大きい異常値を示し、絶対値の信頼性は低いと考えられた。

この際に、パッカー式プローブの問題点として、① プローブ電極部と空気パッカー部の強度不足、② 装置前後端が孔壁と干渉することによる移動性の低下、③ 装置構成部品の保守性不足、④ 緩衝材の吸水が測定値に影響する可能性、⑤ 高導電率の岩盤に対する適用性の低さ、が明らかになった。

8.1.2 パッカー式プローブの改良

パッカー式プローブの問題点を解決するため、構造面での改良と、高導電率岩盤への適用性を高めるための改良を行った。後者については、緩衝材の厚さとコーティングの有無、プローブ電極の幅、厚さおよびコーティングの有無を取り上げ、比較検討用のプローブを作製した。

飽和コンクリート円管を測定対象とした室内試験の結果から、電極をシリコンコーティングしていないプローブは、いずれもコンクリートの比誘電率測定に適用でき、岩石の測定にも適用できる可能性が高いこと、一方、電極をシリコンコーティングしたプローブによる比誘電率は、真の比誘電率を求めるために別途キャリブレーションを実施する必要があることが明らかになった。ただし、高導電率岩盤への適用性については、別途検討する必要があると判断された。

8.1.3 岩石コアの比誘電率と含水率のキャリブレーション

01SI-10, 01SI-11孔の泥質凝灰岩コアと、室内試験用のコンクリートについて含水率と比誘電率の関係を求めた。

泥質凝灰岩のキャリブレーション曲線は、良好なものが得られなかった。この原因として、プローブ電極あるいは充填剤と孔壁の間にすきまが存在したこと、同軸ケーブル長が不適切であったこと、試料内の水分分布が不均一になったこと、試料の収縮の影響が考えられた。

なお、コンクリートのキャリブレーション曲線は、良好なものが得られた。

8.1.4 改良型パッカー式プローブの適用試験

改良型パッカー式プローブを原位置測定とコンクリート円管を用いた室内試験に適用した結果、原位置測定に適したプローブの要件として、プローブ電極がなるべく薄

く均一な絶縁性材料でコーティングされていること、緩衝材は孔壁と干渉しない程度の厚さを持ち、はっ水性材料でコーティングされていることが挙げられた。また、プローブの設置位置は孔の上面が望ましいことが明らかとなった。

また、パッカー式プローブの測定値は、周面外側の材料のうち、プローブ電極近傍部分の比誘電率に大きく影響される可能性があり、比誘電率の算出方法に検討の余地が残された。

8.1.5 TDR 波形の自動解析手法の適用と改良

波形解析プログラムを室内試験および原位置試験で取得した TDR 波形に適用し、その有効性を確認するとともに、解析上の問題点について検討を行った。コンクリートの TDR 波形は、全般的に波形解析プログラムの適用性が高かったが、泥質凝灰岩の TDR 波形は、乾燥時を除いて同プログラムの適用性が低く、特に原位置試験のものは検出された反射点の信頼性が低かった。

波形解析プログラムの適用性を高めるには、測定装置とプログラムの両方に改良が必要と考えられる。プログラムの改良点としては、操作性を高めるための対話的处理機能、ノイズ除去やデータ補間機能の追加が挙げられる。

8.2 今後の課題

パッカー式プローブの構造が大幅に改良され、原位置測定に適したプローブの要件が明らかになったことで、プローブの仕様上の問題はほぼ解決できたといえる。しかし、パッカー式プローブで測定された比誘電率と、岩盤の真の比誘電率との対応が不十分な状態にある。現状では岩盤の比誘電率、引いては含水量の相対的な変化を捉える可能性があるに留まっており、定量的な評価は困難である。

今後は、測定対象の岩石について、信頼性の高い含水率と比誘電率の関係を求めると共に、パッカー式プローブによる測定値が測定対象の比誘電率とどのような関係にあるかを、理論および実験の両面から再度検討する必要がある。具体的な課題として、以下のような項目が挙げられる。

(1) 泥質凝灰岩の含水率と比誘電率の関係

現状では、泥質凝灰岩の含水率と比誘電率の関係について信頼性の高いデータが得られていないため、原位置測定データの評価が困難である。泥質凝灰岩の含水率と比誘電率の関係は、 α mixing model でほぼ推定できると考えられるが、飽和側の推定値は実際の値から乖離していると予想される。今回の室内試験で明らかとなった計測上の問題点を修正し、信頼性の高いキャリブレーション曲線を得ることが必要である。

(2) パッカー式プローブによる測定値と真の比誘電率との関係

現状では、パッカー式プローブを用いて測定した比誘電率を、周面内側の物質と外側の物質の平均比誘電率に等しいとしているが、これはコーティングを施していないプローブ電極を用いた場合に成立すると考えられる関係であり、コーティングを施したプローブ電極の場合は、キャリブレーションが必要である。また、この関係は、比誘電率の差が小さい空気とポリエチレンについて得られたものであり、周面外側の物質の比誘電率が高い場合には成立しない可能性もある。

そこで、原位置測定用のプローブを用いて、有機溶媒など比誘電率が既知の材料を複数測定することにより、測定値と真の比誘電率との関係を求めることが必要である。

(3) 多様な岩種へのパッカー式プローブの適用

今年度の研究で測定対象とした泥質凝灰岩は、電磁波の減衰が大きいため TDR 波形の計測が困難な岩種である。これを目標とすることは意義のあることだが、一方で導電率が低いことからより容易に測定できると考えられる砂岩や、有効間隙率が小さい結晶岩への本プローブの適用性も検討すべきである。今後は、パッカー式プローブを多様な岩種に適用することによって、その有効範囲を確かめ、計測技術として確立させていく必要がある。

(4) TDR 波形解析プログラムの改良

TDR 波形解析プログラムの適用性を高めるため、現状のプログラムに、① 操作性を高めるための高度な対話的処理機能、② 波形データに含まれるノイズの除去機能、③ ノイズを低減し計測時間を短縮するためのデータ補間機能を追加していくことが必要である。

以上に述べた今年度の研究成果と今後の課題について、表8.2-1にまとめて示した。

表8.2-1 今年度の研究成果と今後の課題

今年度の研究課題	得られた成果	今後の課題	優先度
1. パッカー式プローブ(平成12年度作製)を原位置試験に適用	1-1. 比誘電率は、通常の岩石で得られる値よりもはるかに大きい異常値であり、絶対値の信頼性は低い。	1-1'. 高導電率岩盤への適用性の向上を今年度の研究課題とし、計測に適したプローブの要件を明らかにした。	-
	1-2. パッカー式プローブの構造上、測定上の問題点を抽出。	1-2'. 今年度の研究で改良型のパッカー式プローブを作成し、解決された。	-
2. パッカー式プローブの改良	2-1. プローブ電極、パッカーの全体的な構造に改良を加え、構造上の問題を解決	2-1'. 特になし	-
	2-2. 飽和コンクリート円管を用いて、各種プローブの適用性を確認。いずれも適用可能であるが、電極コーティングの優位性はない。	2-2'. 泥質凝灰岩への適用性の向上を今年度の研究課題とし、計測に適したプローブの要件を明らかにした。	-
3. 岩石コアの比誘電率と含水率のキャリブレーション	3-1. 泥質凝灰岩のキャリブレーション曲線は、良好なものが得られず。	3-1'. 電極設置の際の間隙、同軸ケーブル長、乾燥方法に問題。再測定の必要あり。	1
	3-2. コンクリートのキャリブレーション曲線は良好。	3-2'. 特になし	-
4. 改良型パッカー式プローブの適用試験(原位置、室内)	4-1. 原位置測定に適したプローブの要件を明らかにした(電極:要コーティング、緩衝材:要コーティング、15mm以上で孔壁と干渉しない厚)	4-1'. 多様な岩種へのパッカー式プローブの適用性検討。	3
	4-2. プローブの設置位置は孔の上面が適当。	4-2'. 孔の上面へのプローブの設置に適した構造の検討	6
	4-3. 測定値は、プローブ電極近傍部分の比誘電率に大きく影響される可能性あり。	4-3'. パッカー式プローブの測定値と真の比誘電率との関係。周面外側の比誘電率の算出方法の検討。	2
5. TDR波形の自動解析手法の適用と改良	5-1. コンクリートのTDR波形は、全般的にプログラムの適用性が高い。	5-1'. 特になし	-
	5-2. 泥質凝灰岩のTDR波形は、プログラムの適用性が低いものが多い。	5-2'. 測定装置の改良。(パッカー式については解決済み)	(3-1'に含める)
	5-3. プログラムの改良すべき点を抽出。(高度な対話的処理機能、ノイズ除去、データ補間機能の追加)	5-3'. プログラムに、高度な対話的処理機能、ノイズ除去、データ補間機能を追加。	4

謝辞

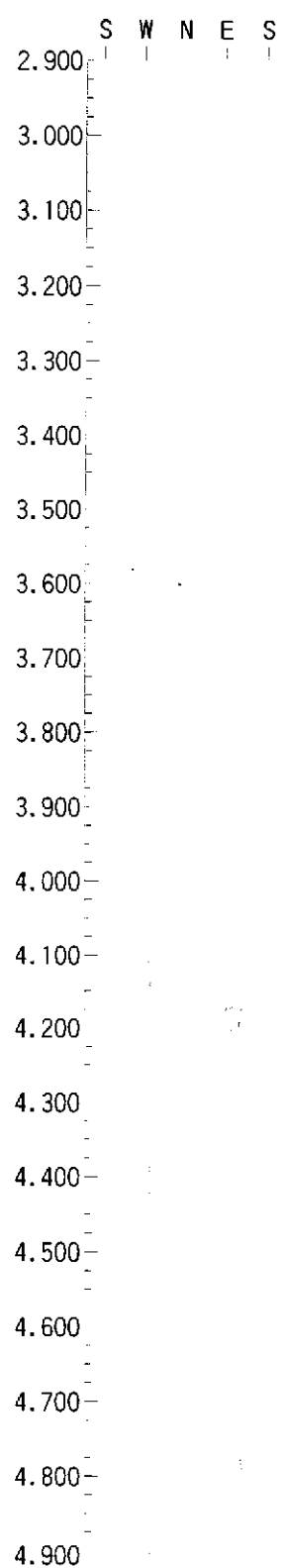
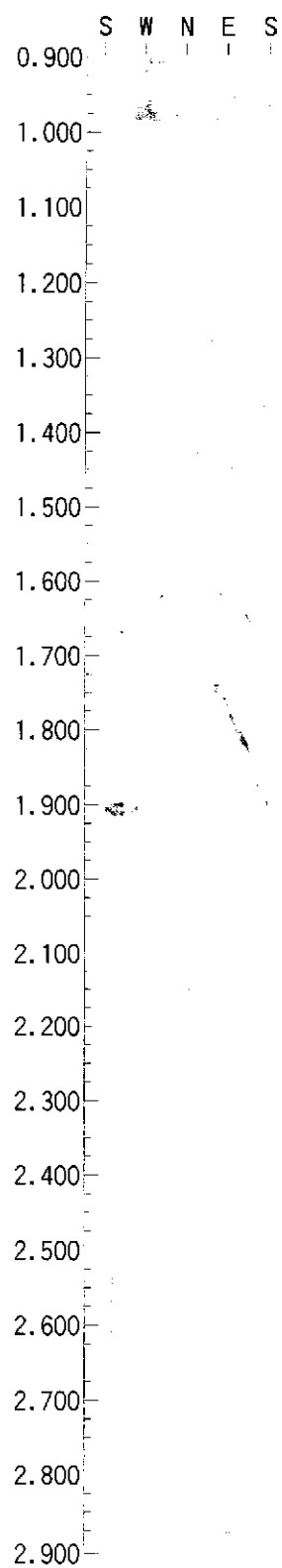
本年度の研究を遂行するにあたり，岡山大学環境理工学部の西垣誠教授には，研究の初期段階において貴重な御意見をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

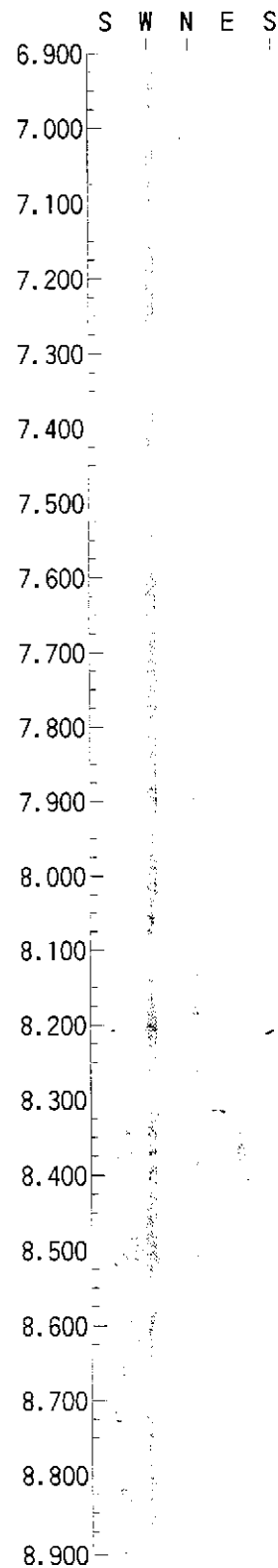
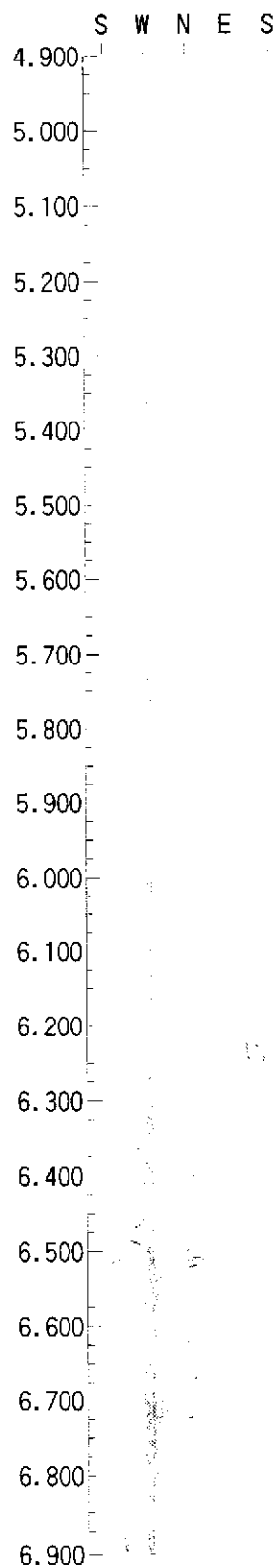
- 動力炉・核燃料開発事業団: 不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究, PNC TJ1449 98-004(2) (1998)
- 核燃料サイクル開発機構: 不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究, JNC TJ7400 99-009 (1999)
- 核燃料サイクル開発機構: 不飽和領域の原位置計測手法の研究, JNC TJ7400 2000-004 (2000)
- 核燃料サイクル開発機構: 不飽和領域の原位置計測手法の研究, JNC TJ7400 2001-001 (2001)
- 三輪 進: 高周波電磁気学, 東京電機大学出版局 (1992)
- Roth, K., R. Schulin, N. Fluhler, and W. Attinger: Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resour. Res.*, 26, pp.2267~2273 (1990)
- Sakaki, T., K. Sugihara, T. Adachi, K. Nishida, and W. R. Lin: Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock, *Water Resour. Res.*, 34, pp.2623~2631 (1998)
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan: Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16, pp.574~582 (1980)

付 録

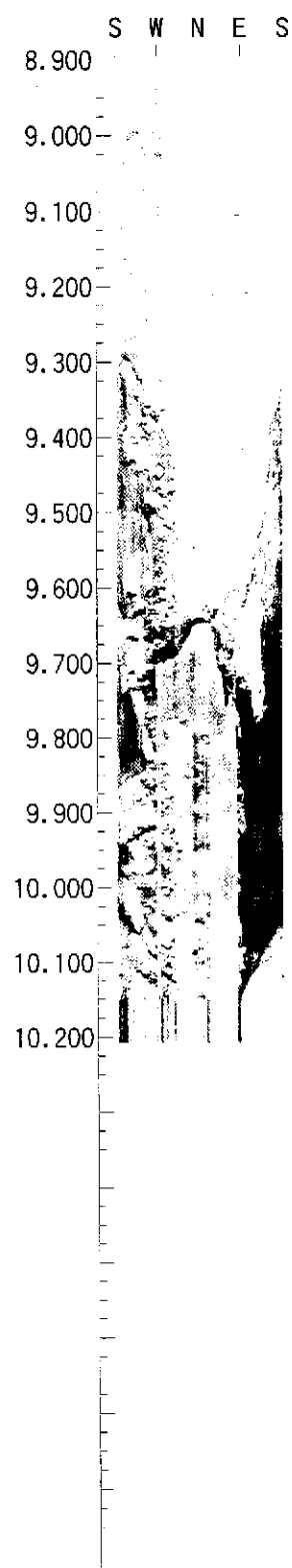
1. 孔 壁 画 像



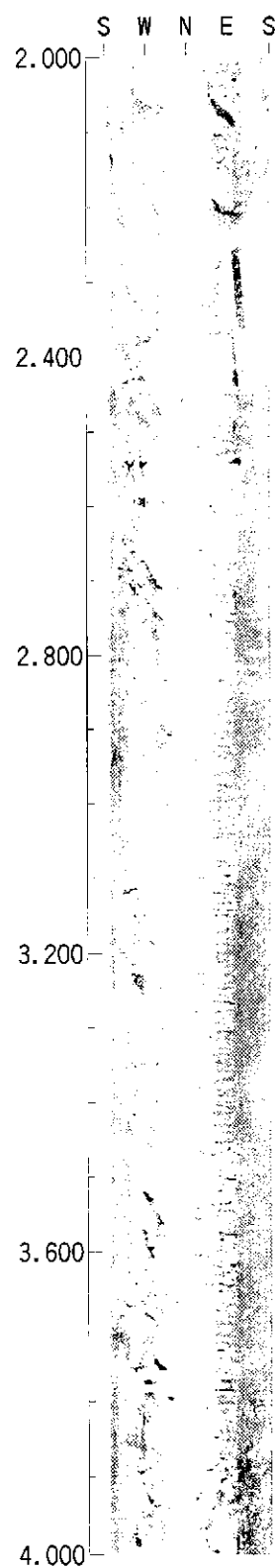
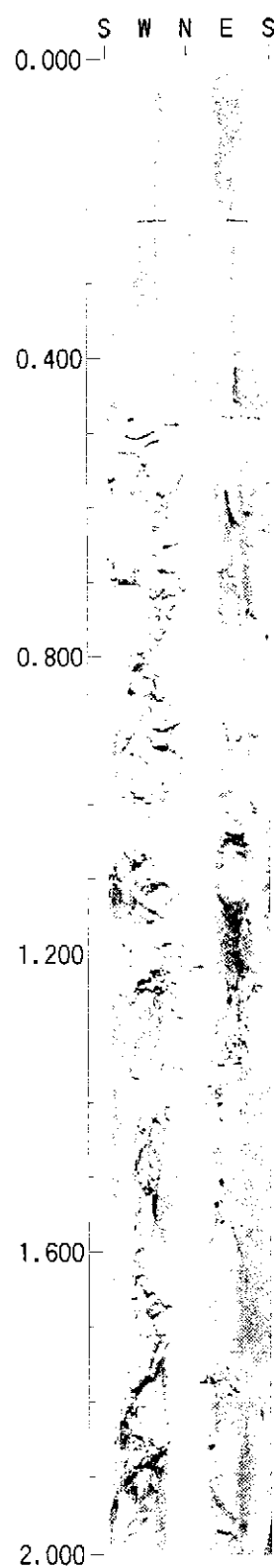
01SI-10 孔 孔壁画像 (0.900~4.900m)



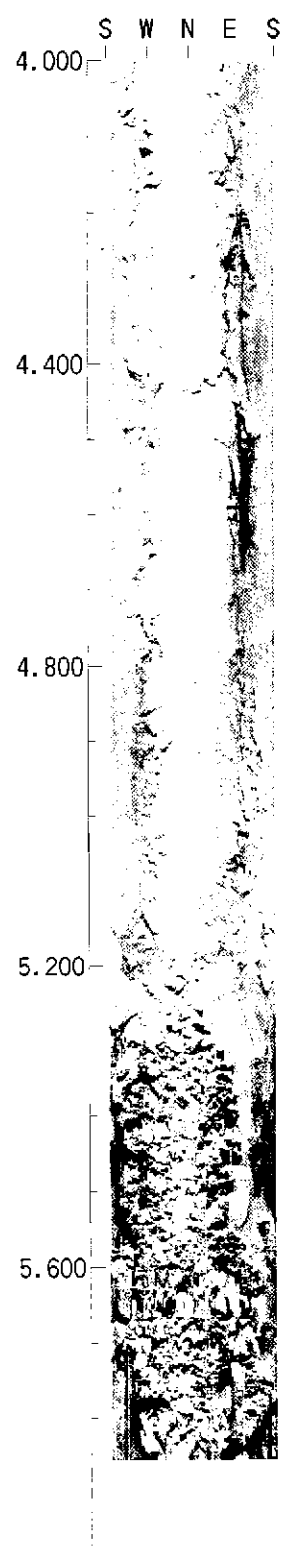
01SI-10 孔 孔壁画像 (4.900~8.900m)



01SI-10 孔 孔壁画像 (8.900~10.204m)



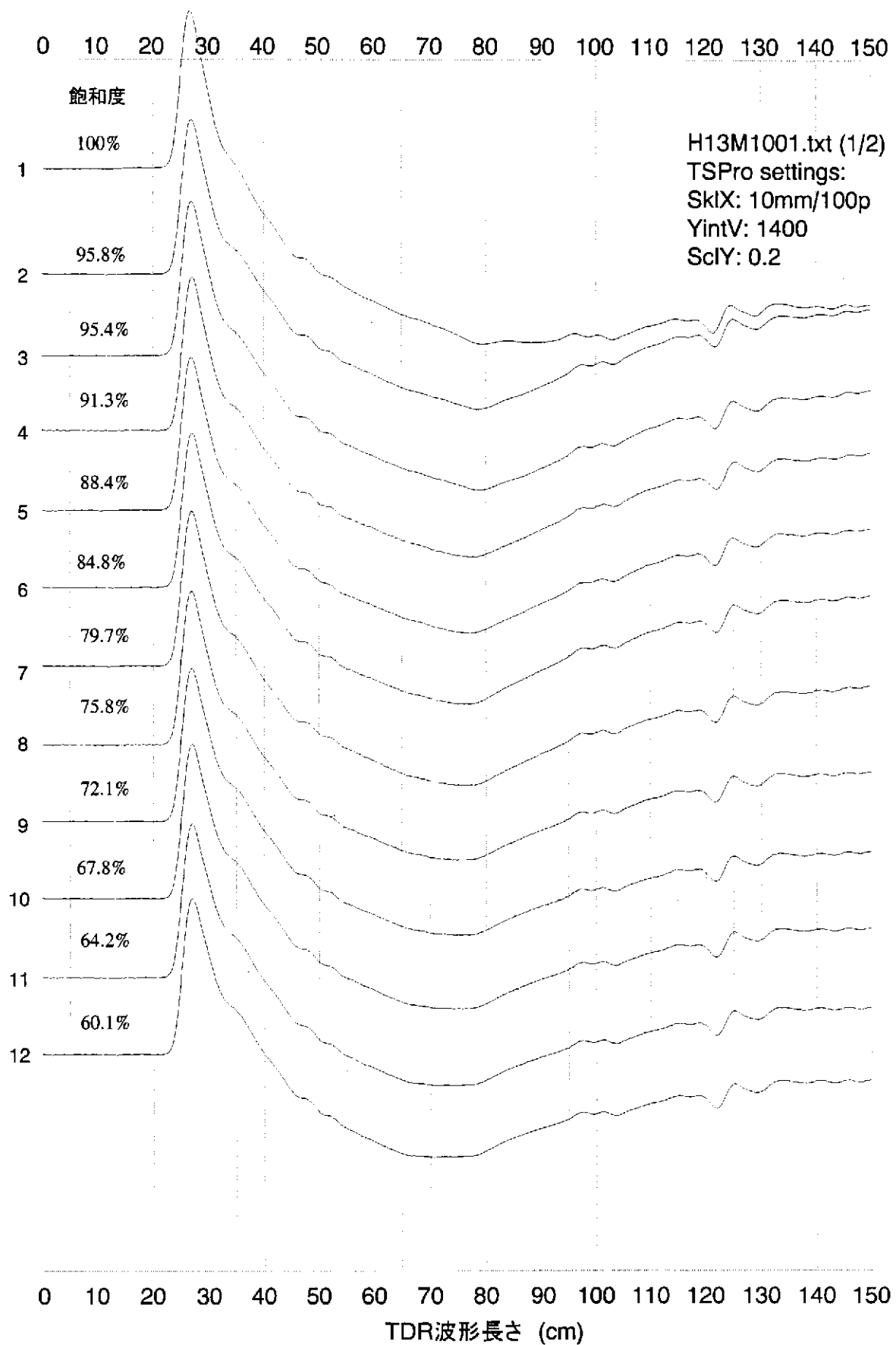
01SI-11 孔 孔壁画像 (0.000~4.000m)



01SI-11 孔 孔壁画像 (4.000~5.853m)

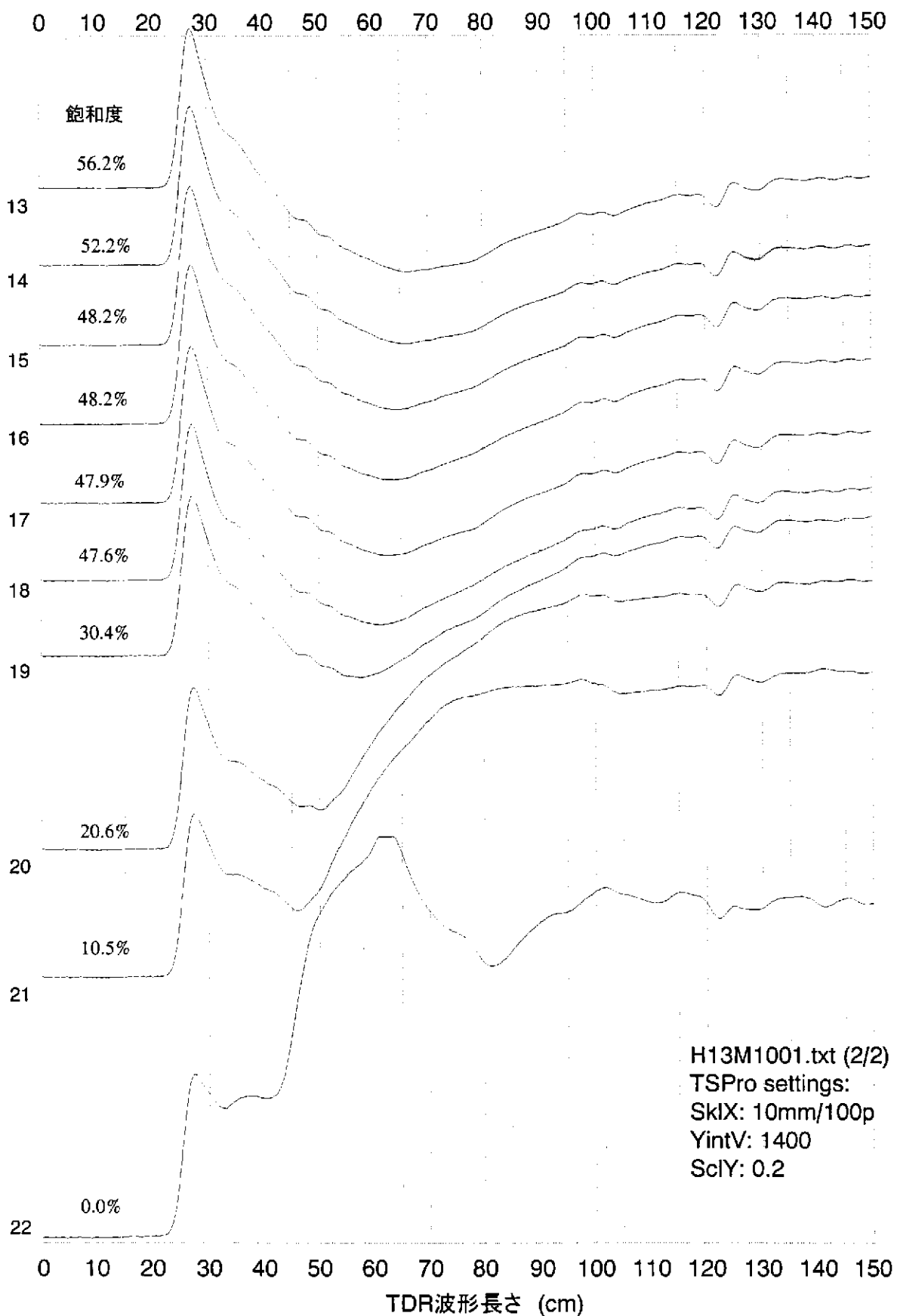
付 録

2. TDR波形データ



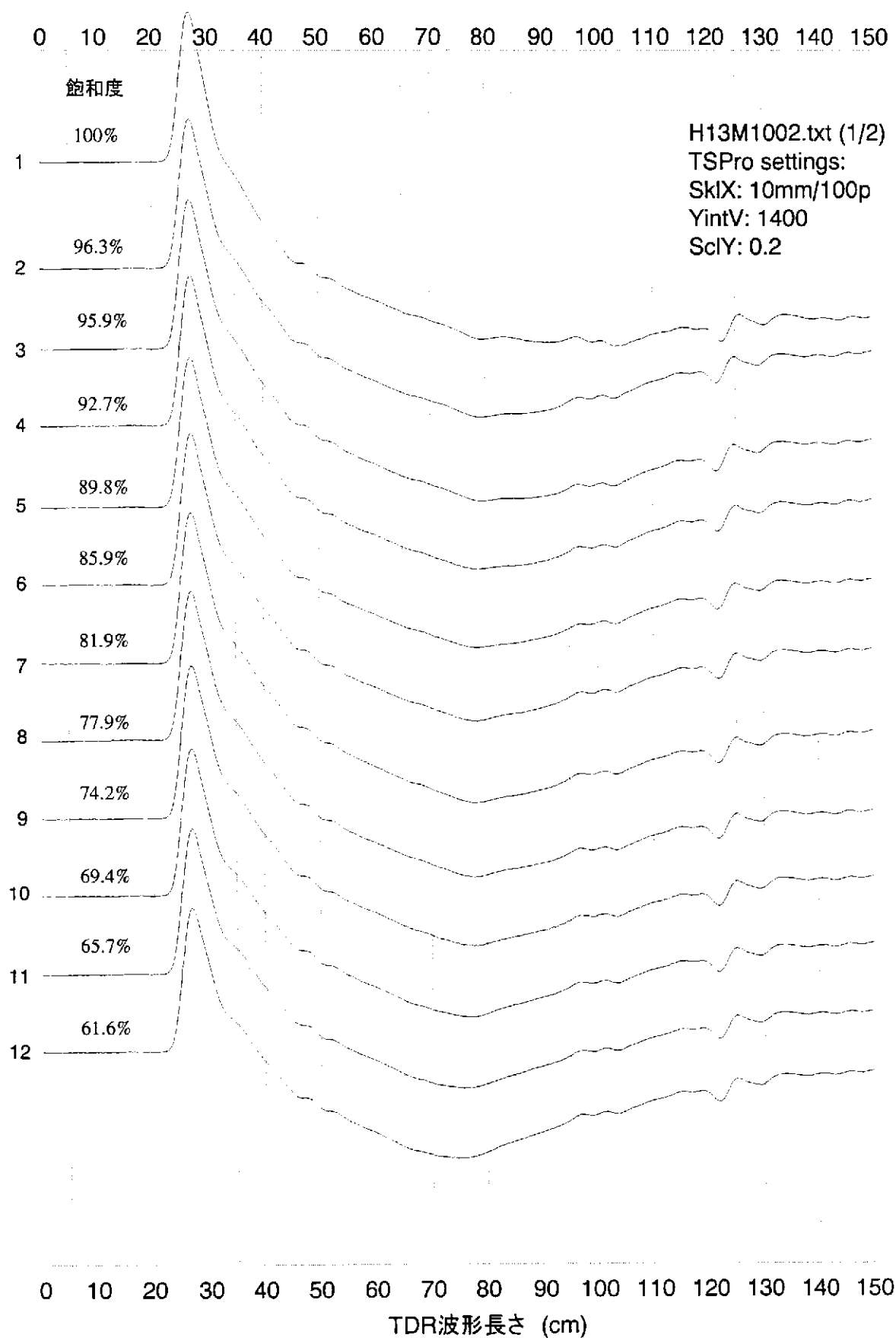
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1001)



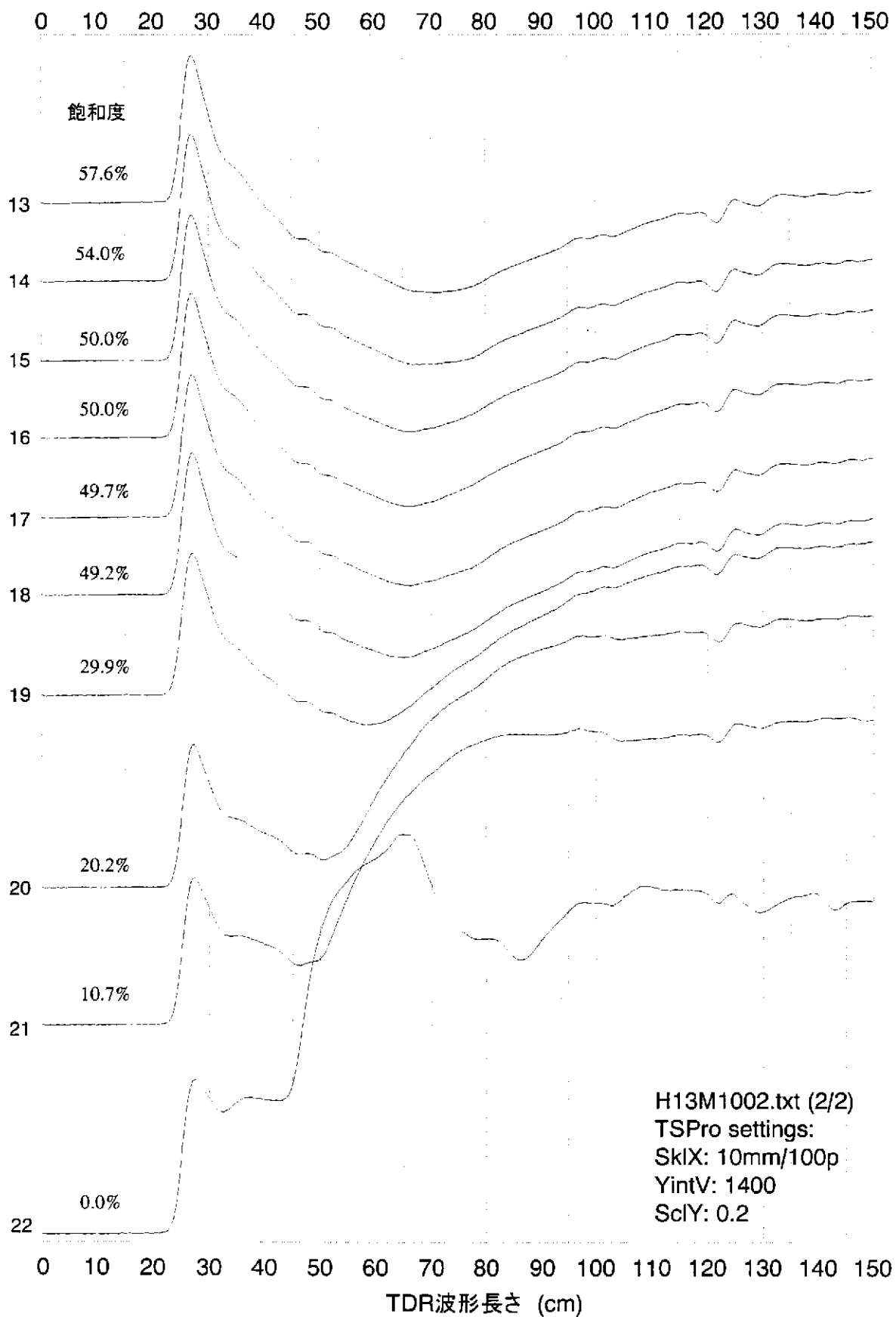
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1001)



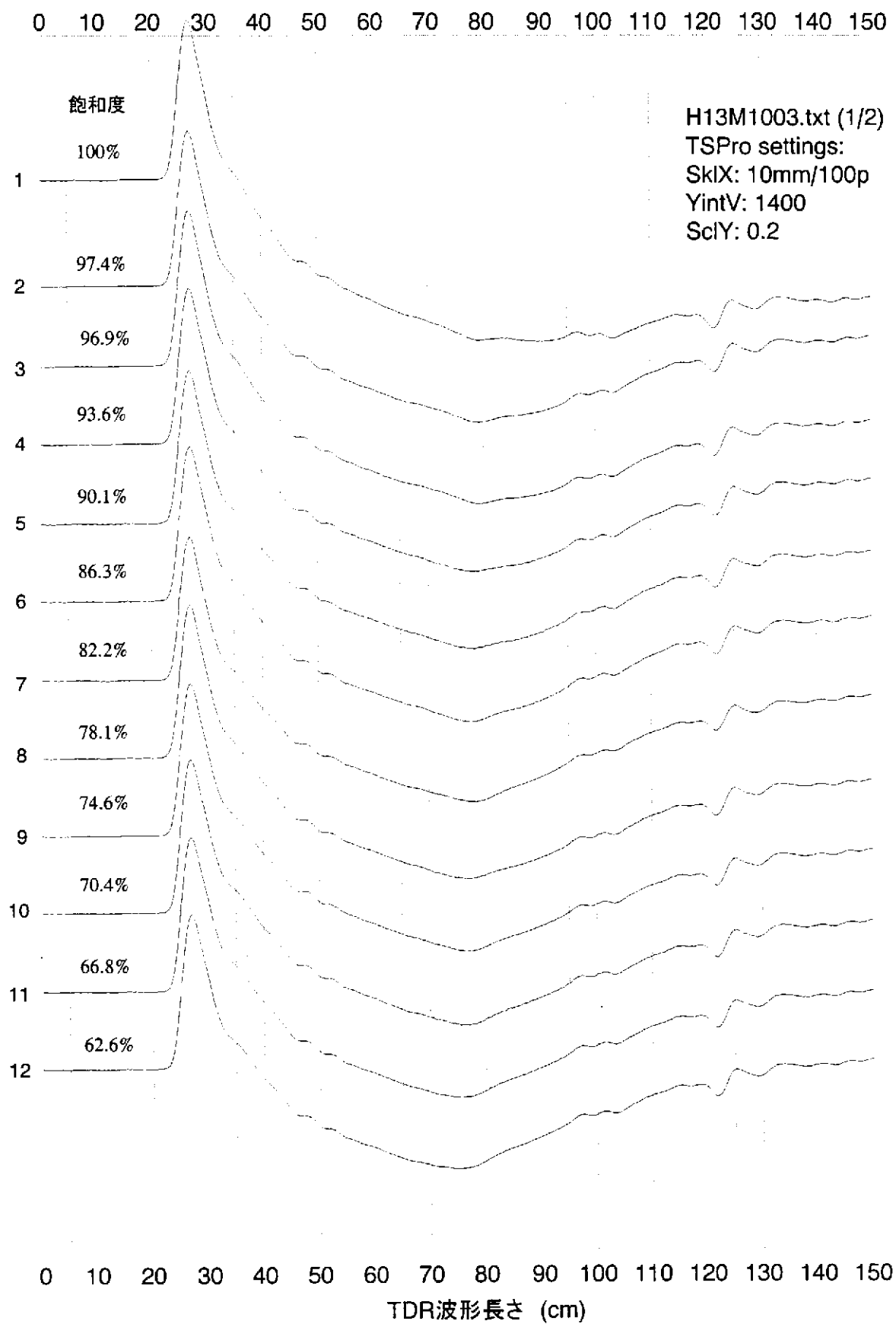
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1002)



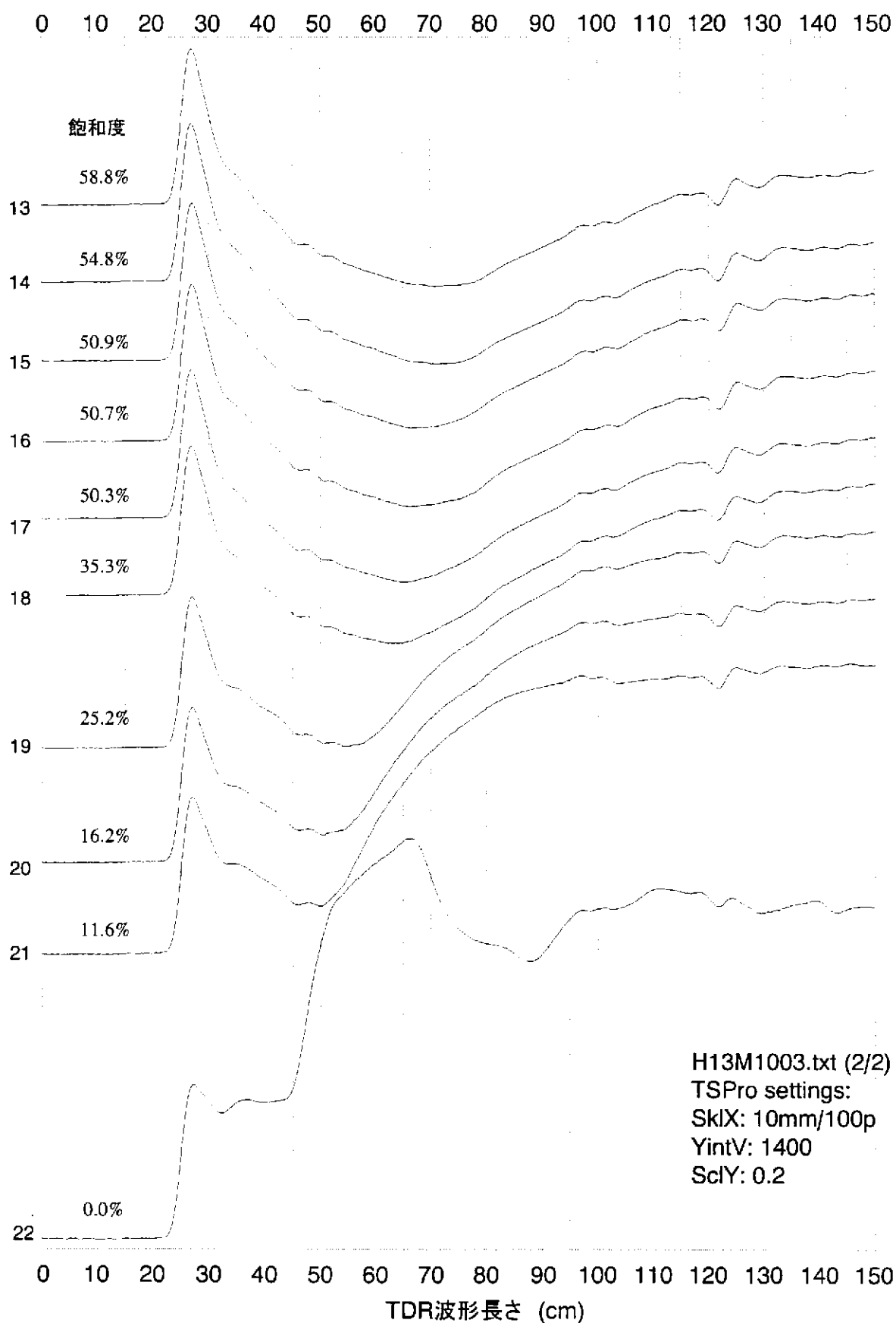
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1002)



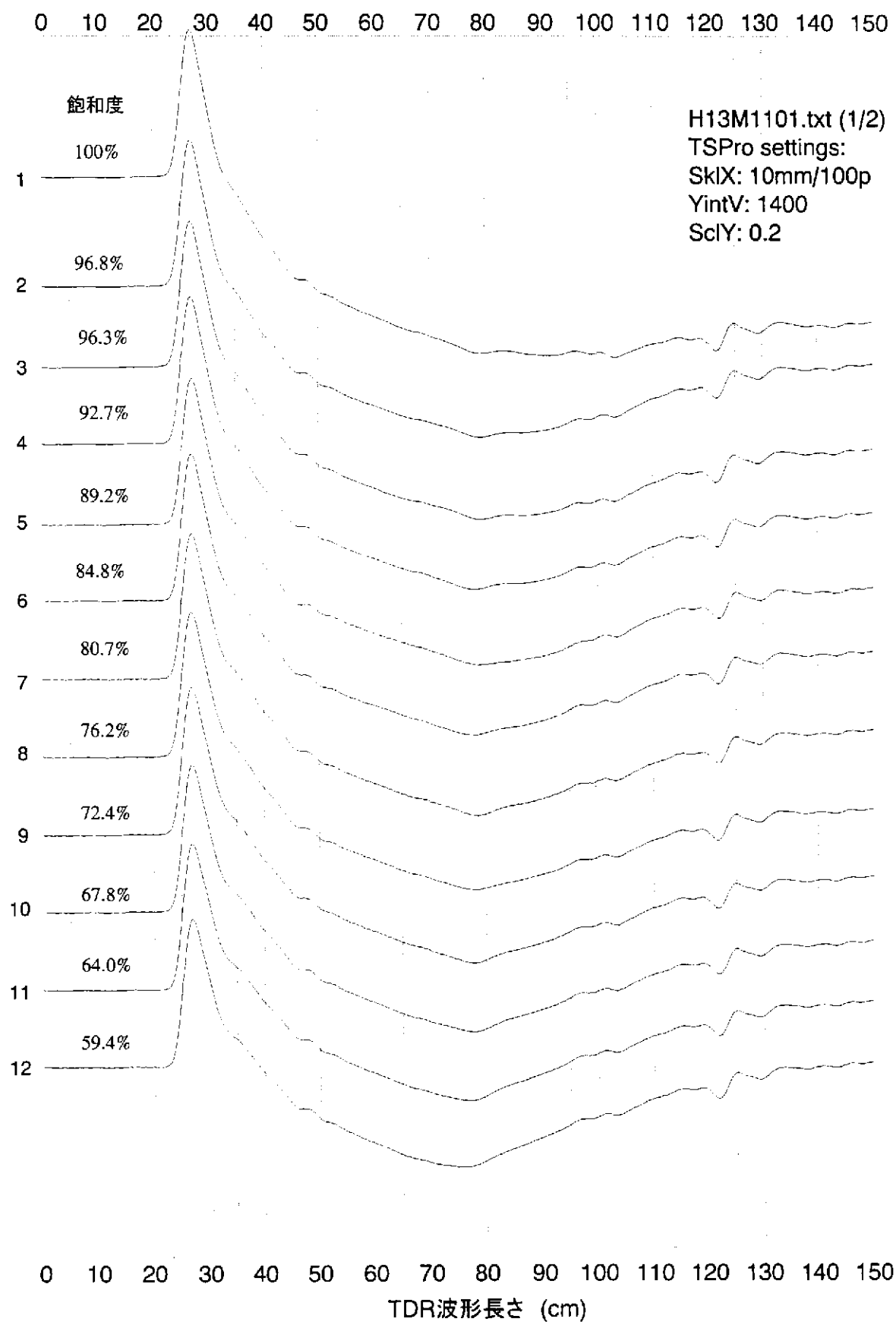
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1003)



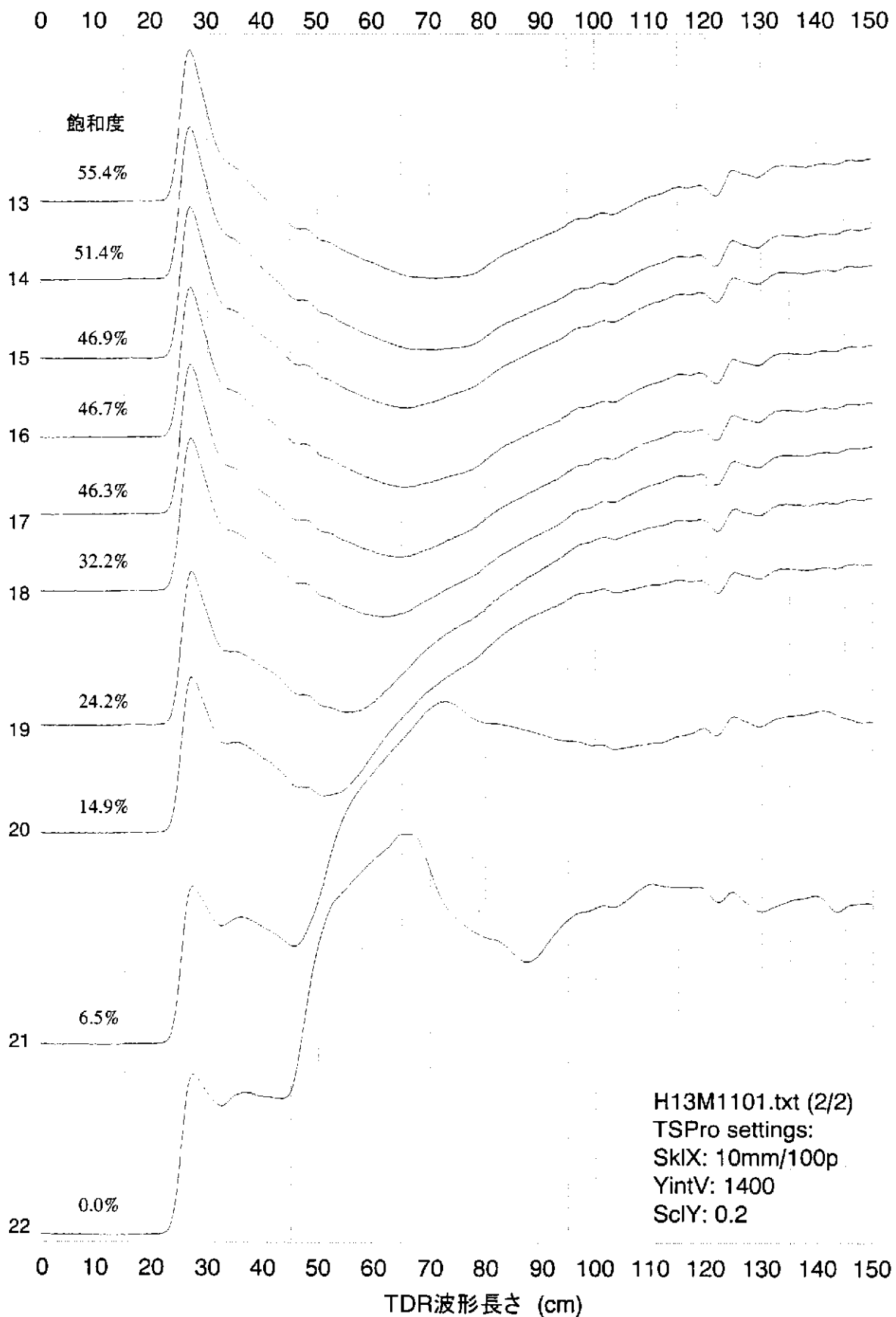
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1003)



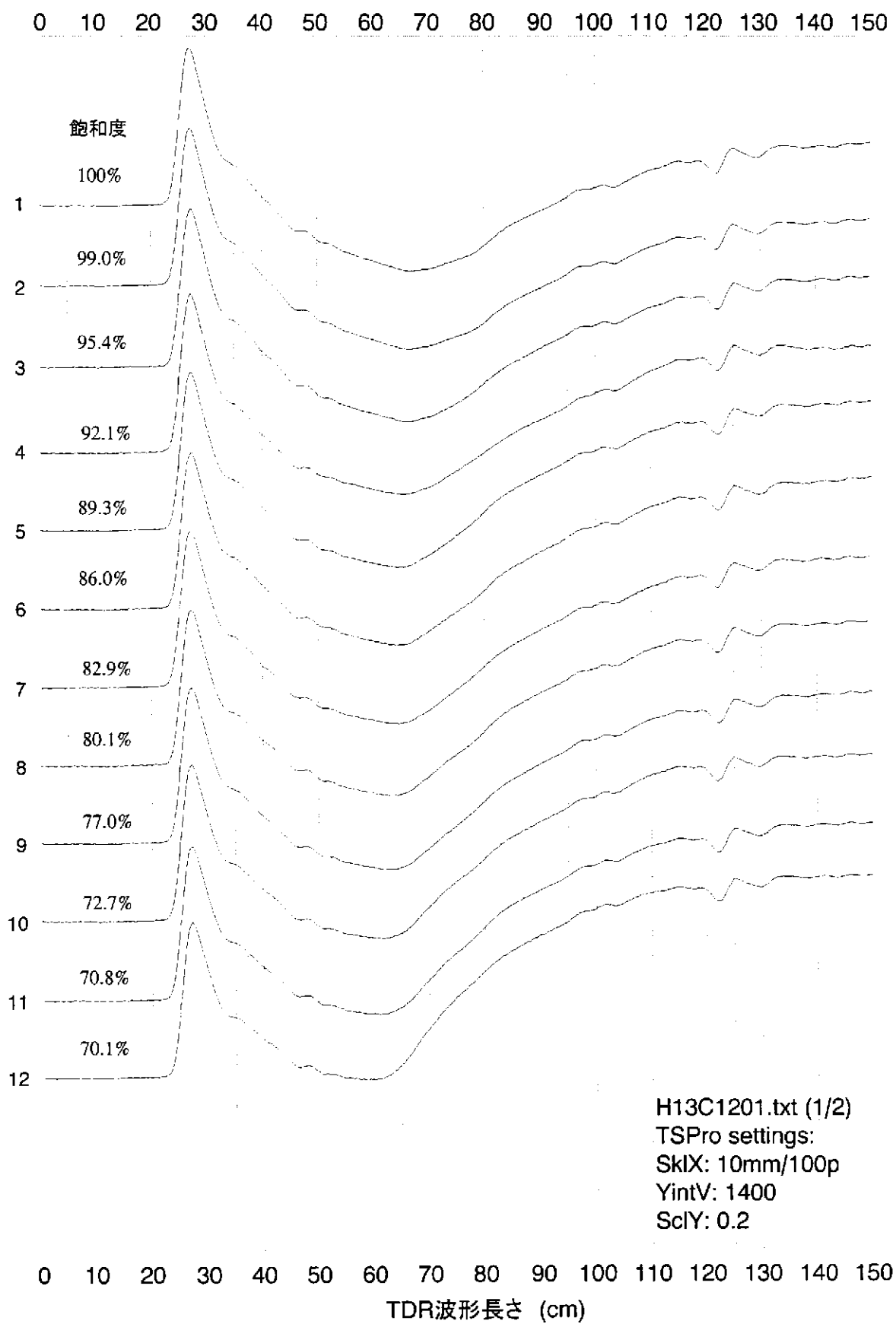
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1101)



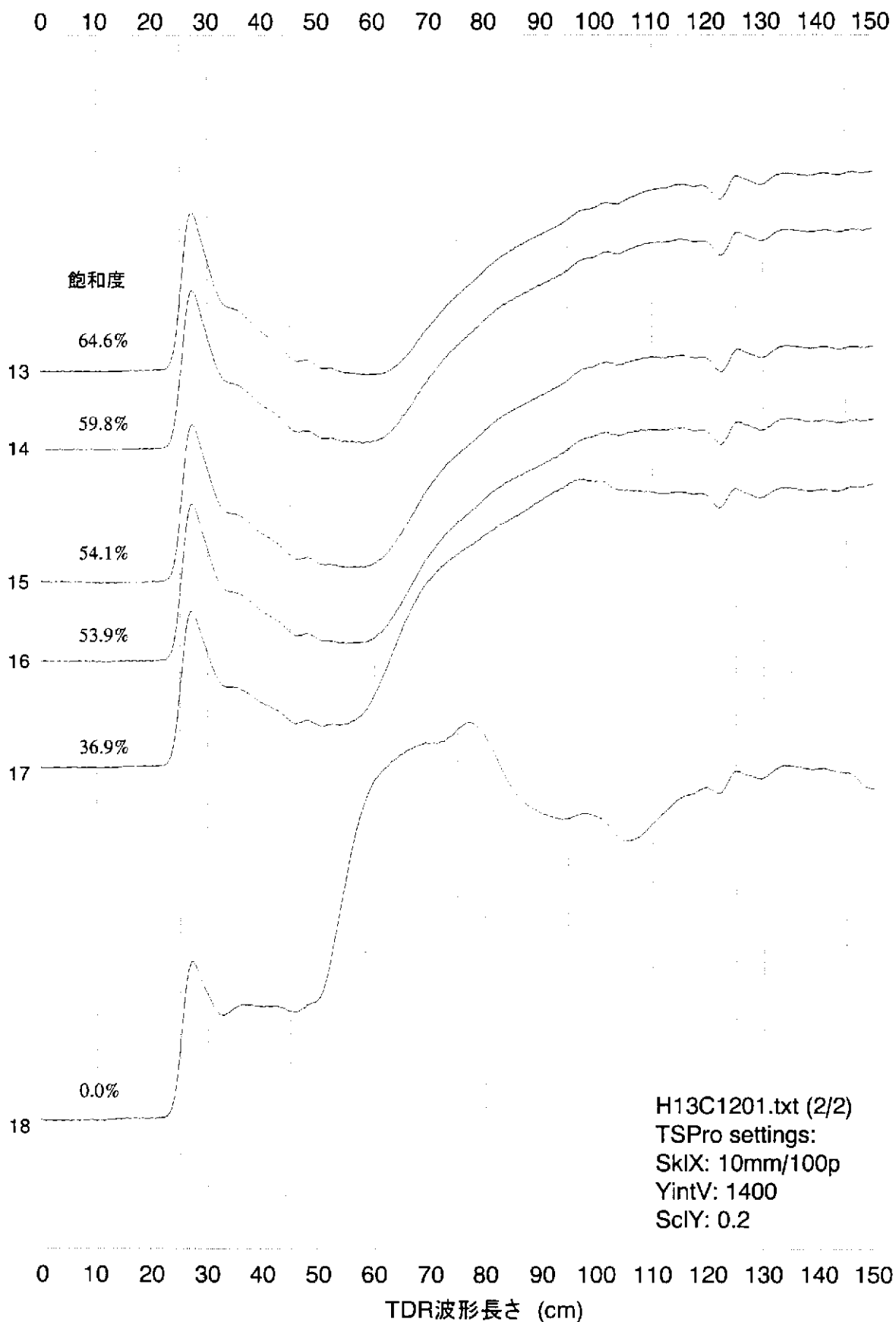
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(土岐夾炭層上部累層泥質凝灰岩 M1101)



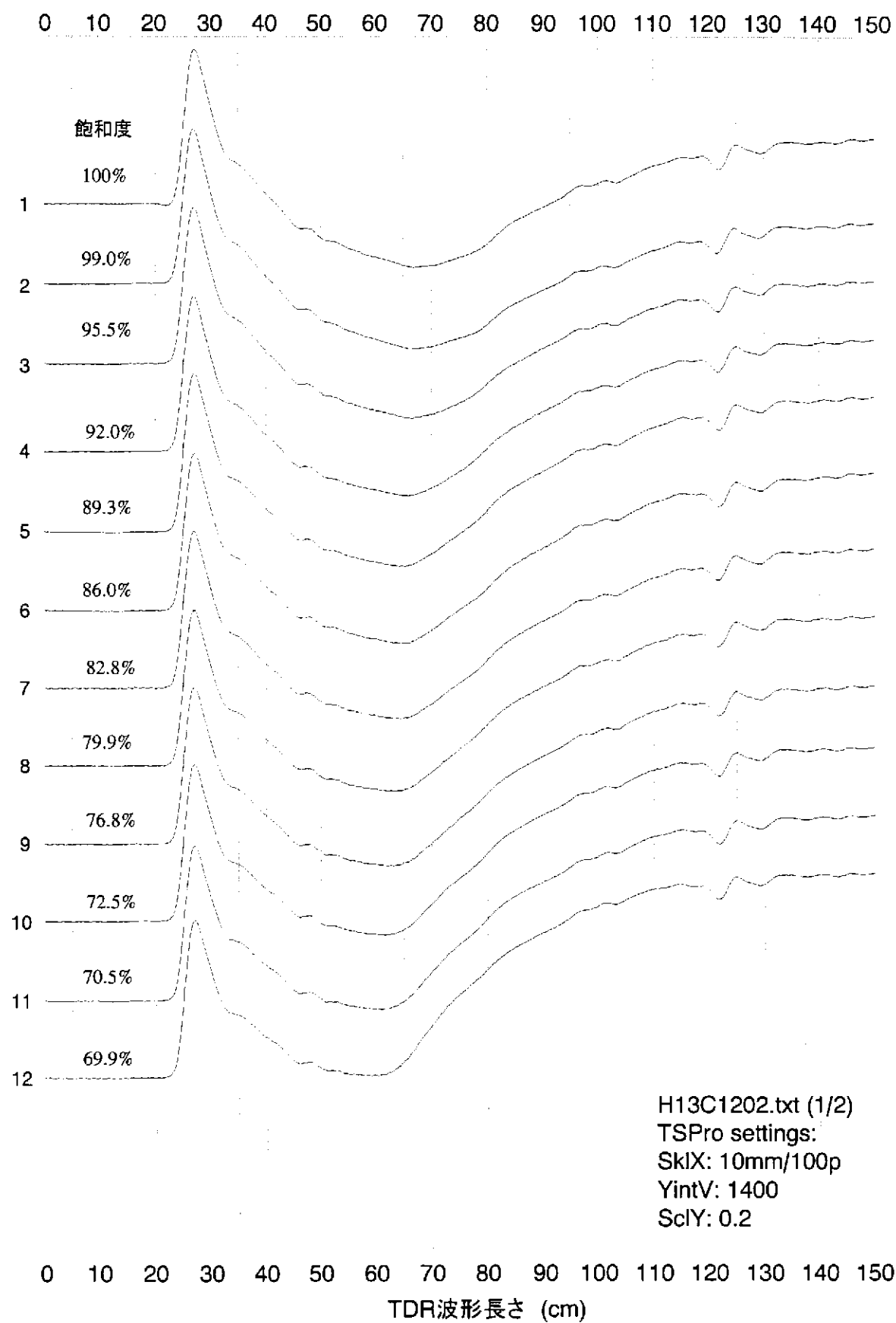
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(コンクリート C1201)



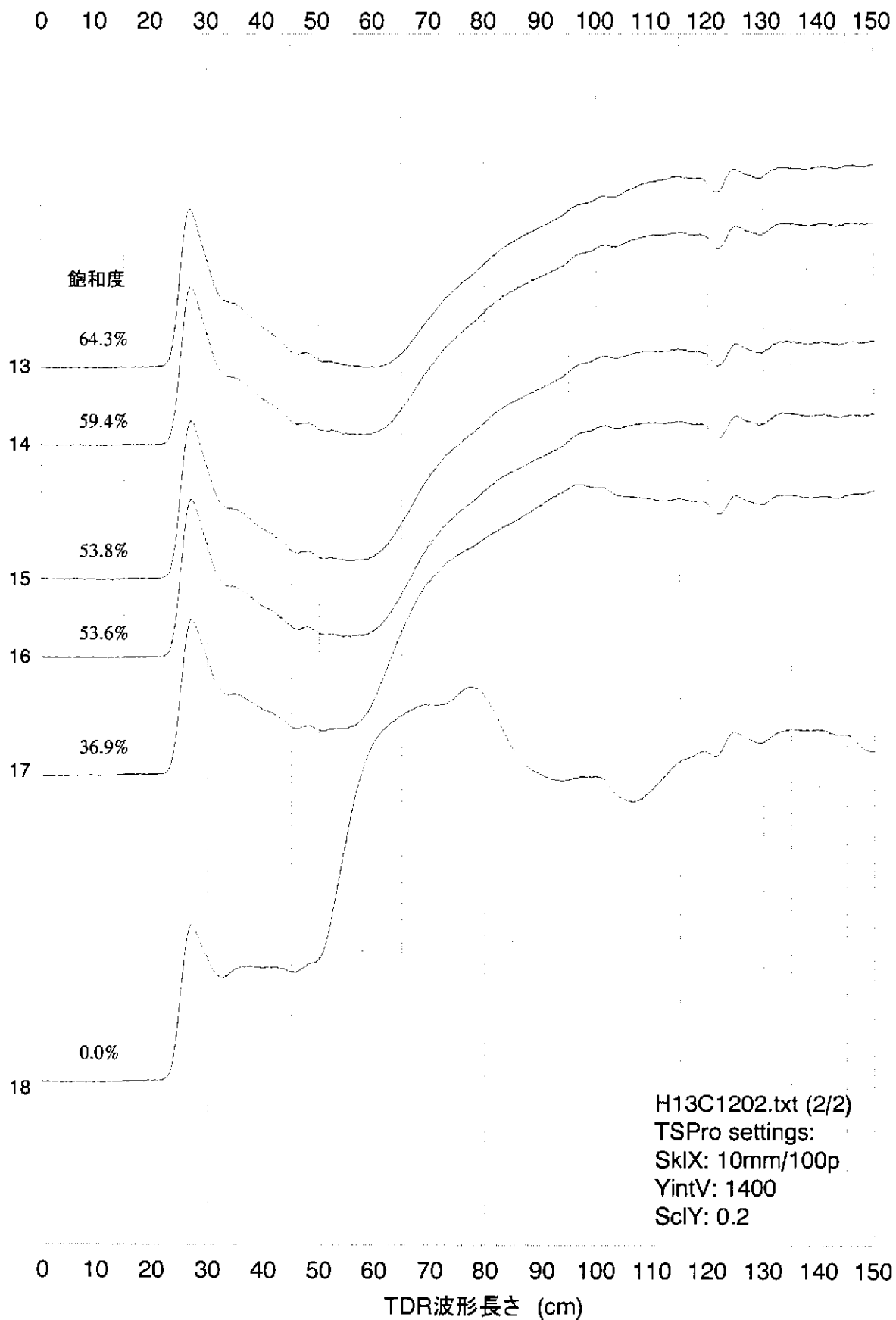
コアキャリブレーション試料の TDR 波形

(コンクリート C1201)



コアキャリブレーション試料の TDR 波形

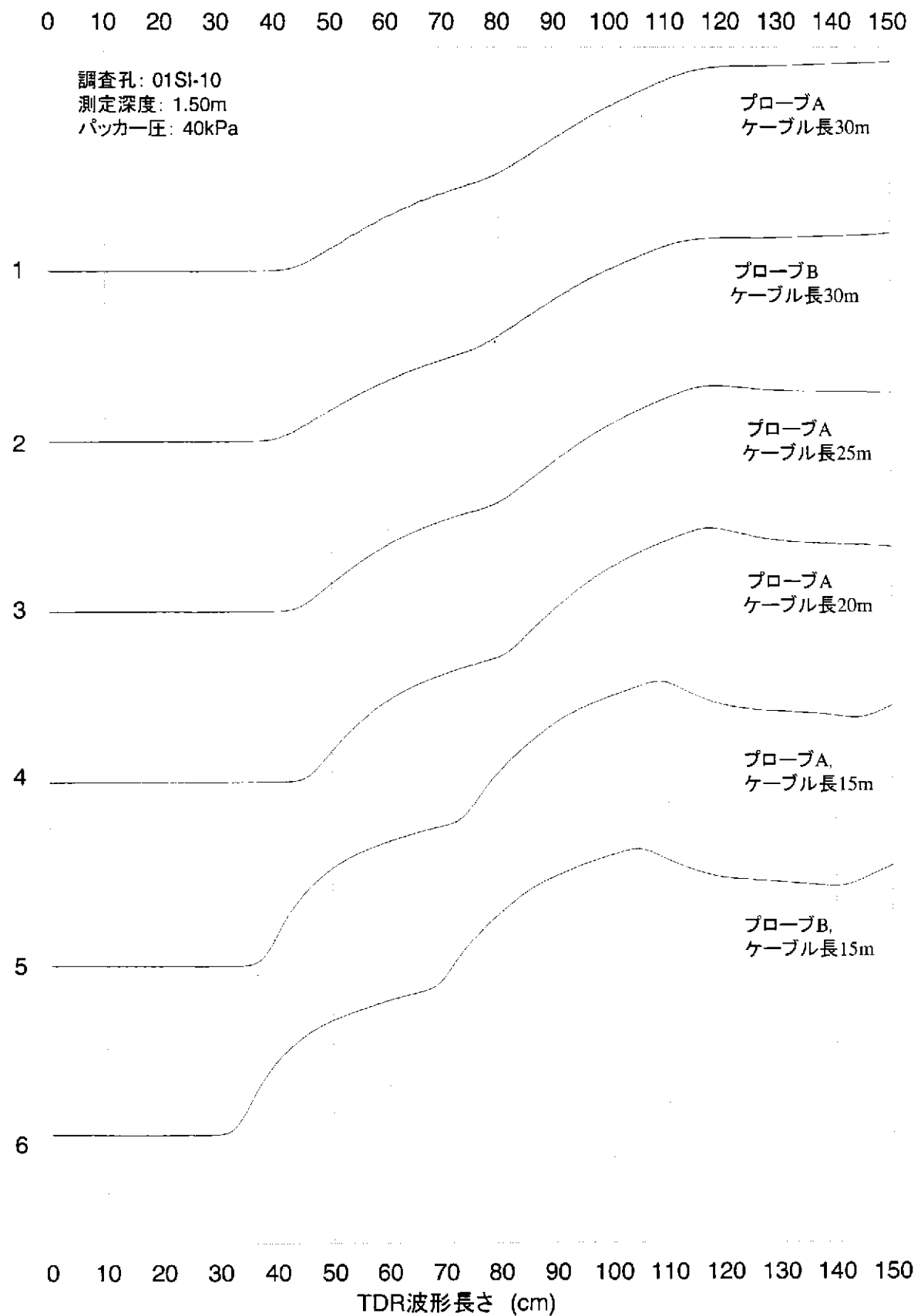
(コンクリート C1202)



コアキャリブレーション試料の TDR 波形

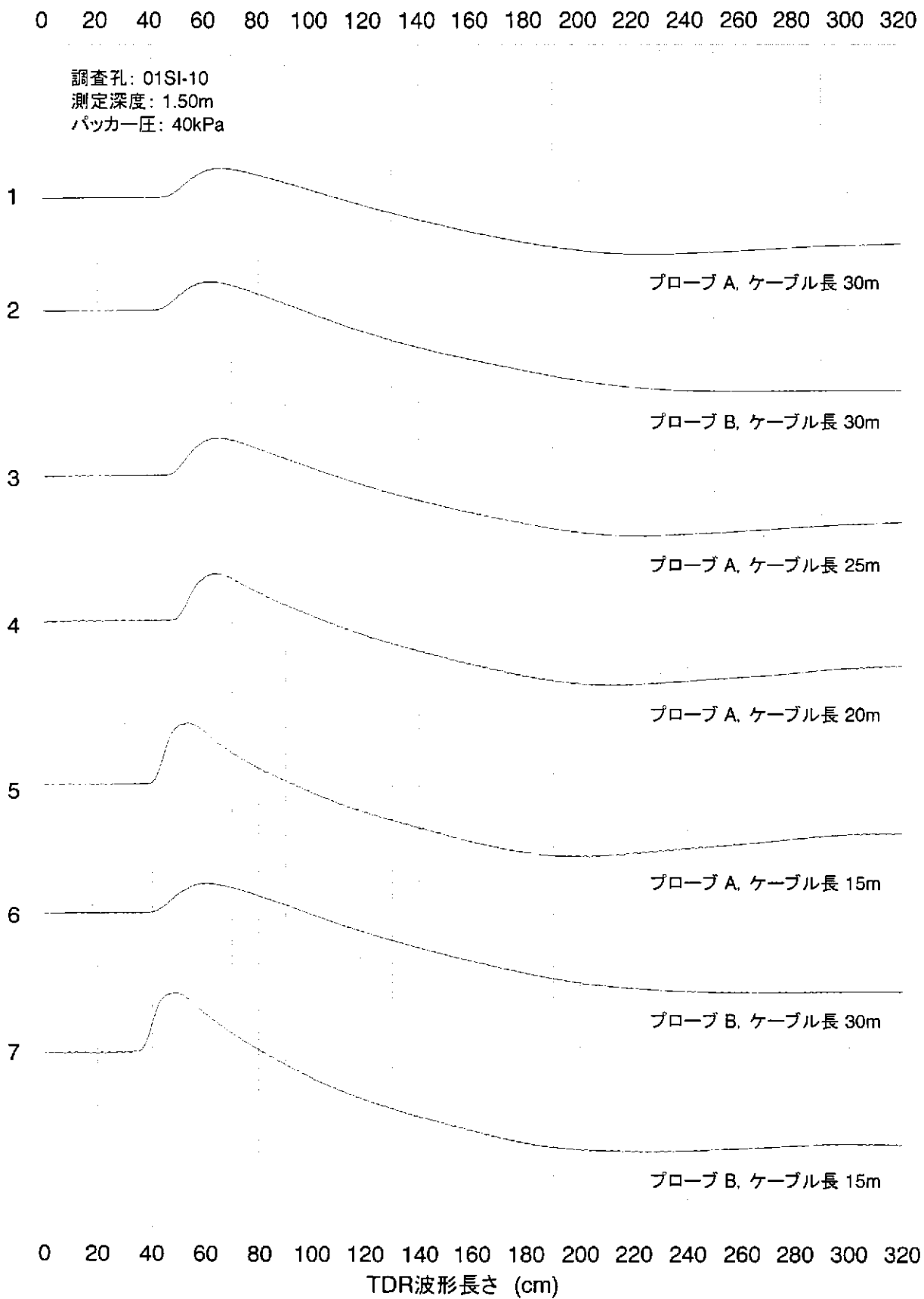
(コンクリート C1202)

- 付-2 (134) -

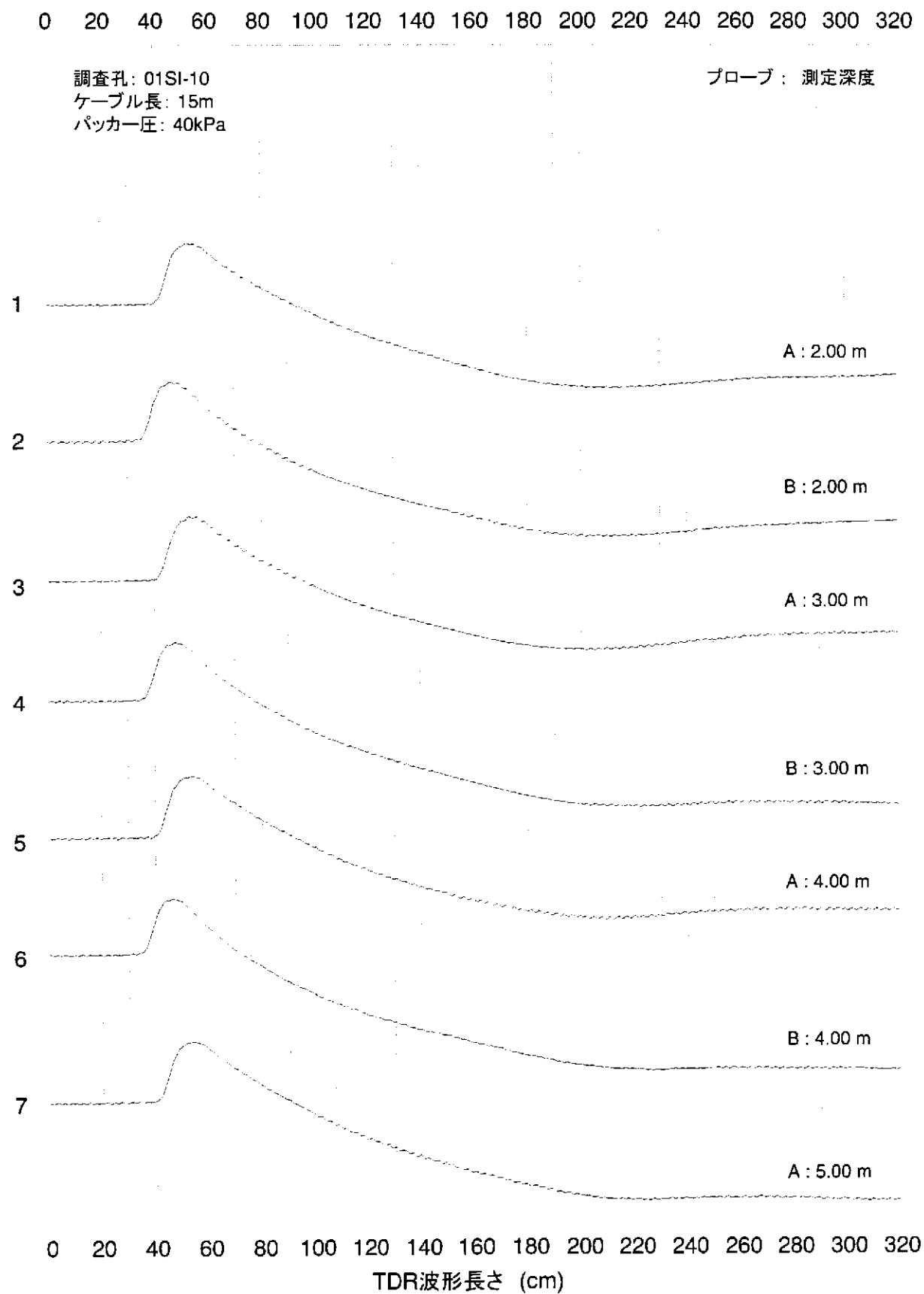


パッカー式プローブ（旧型）の TDR 波形

（空中キャリブレーション時）



ケーブル長を変化させたときのパッカー式プローブ（旧型）の TDR 波形

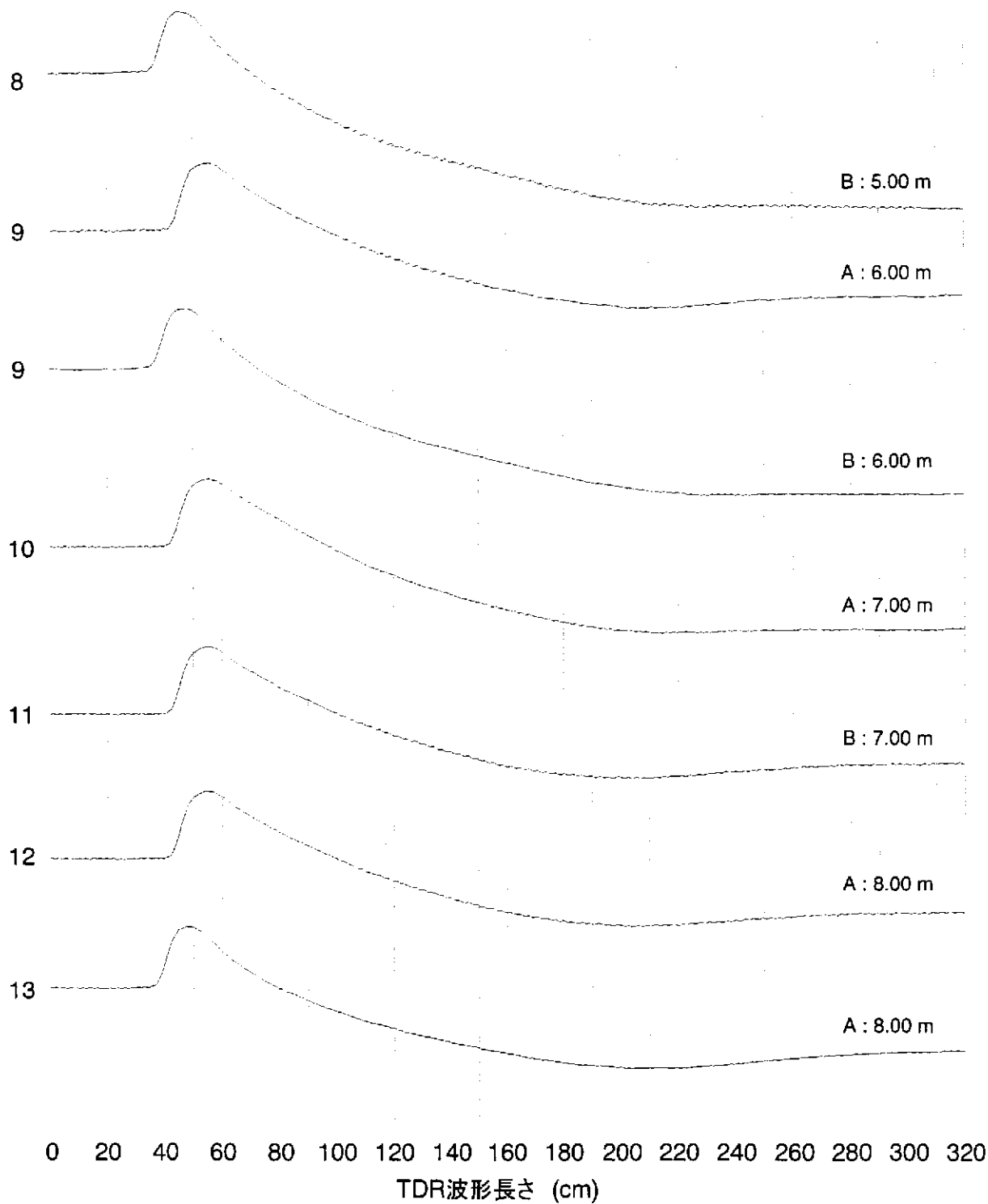


深度方向の比誘電率測定時のパッカー式プローブ（旧型）の TDR 波形

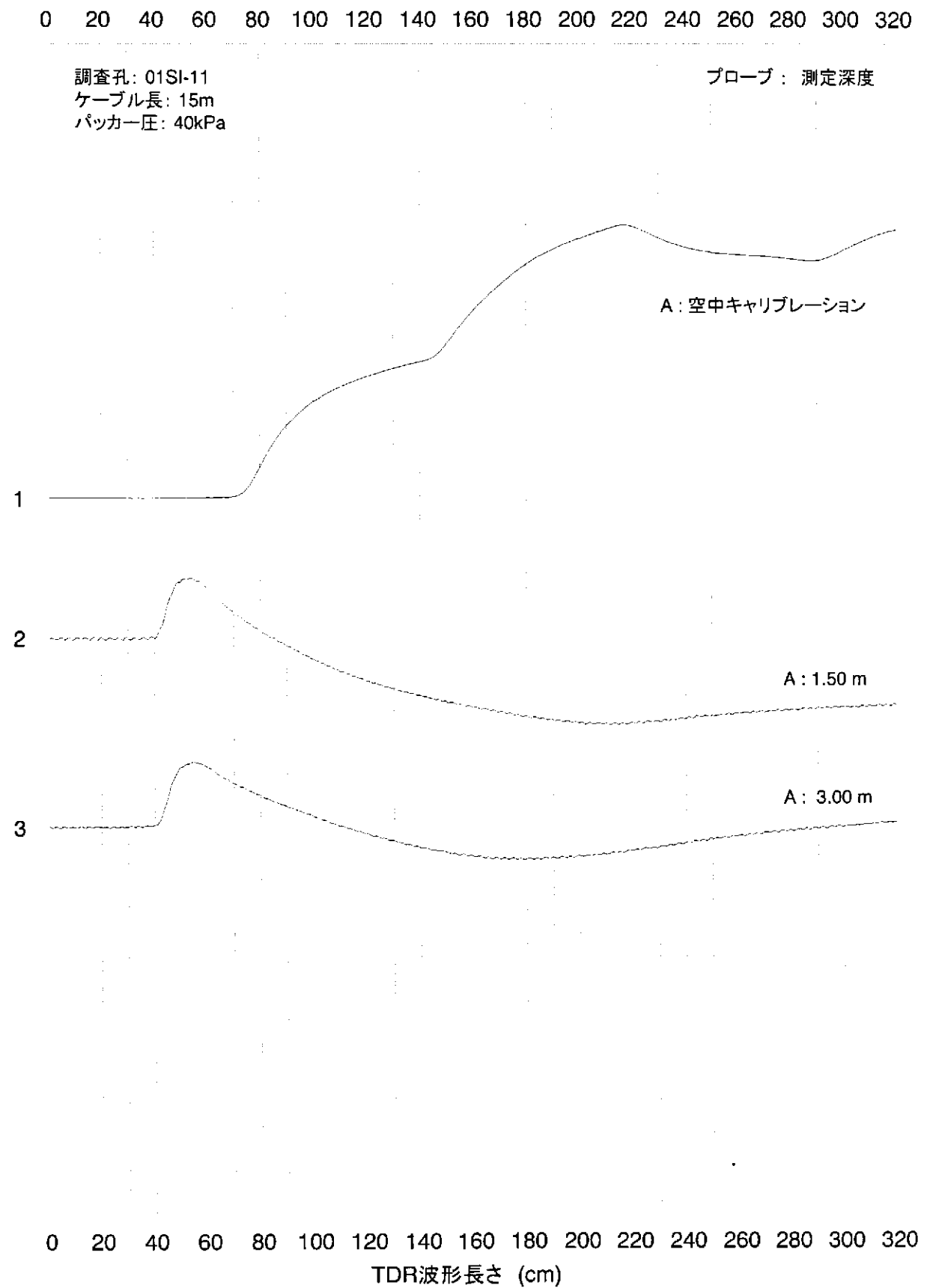
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

調査孔: 01SI-10
ケーブル長: 15m
パッカー圧: 40kPa

プローブ: 測定深度



深度方向の比誘電率測定時のパッカー式プローブ（旧型）の TDR 波形



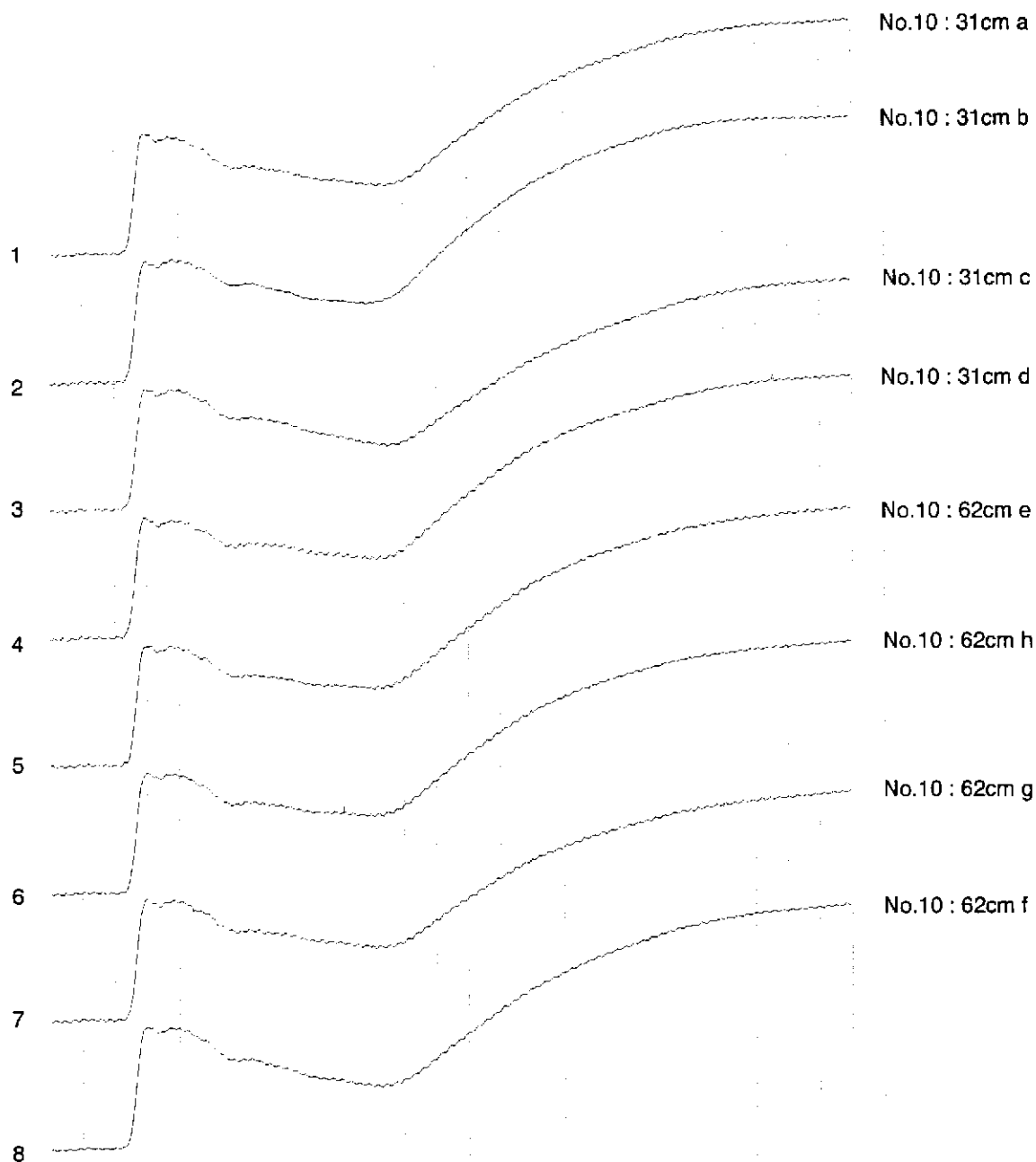
深度方向の比誘電率測定時のパッカー式プローブ（旧型）の TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定対象: コンクリート管
ケーブル長: 5m
パッカー圧: 40kPa

020405a

プローブ番号: 測定位置



0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

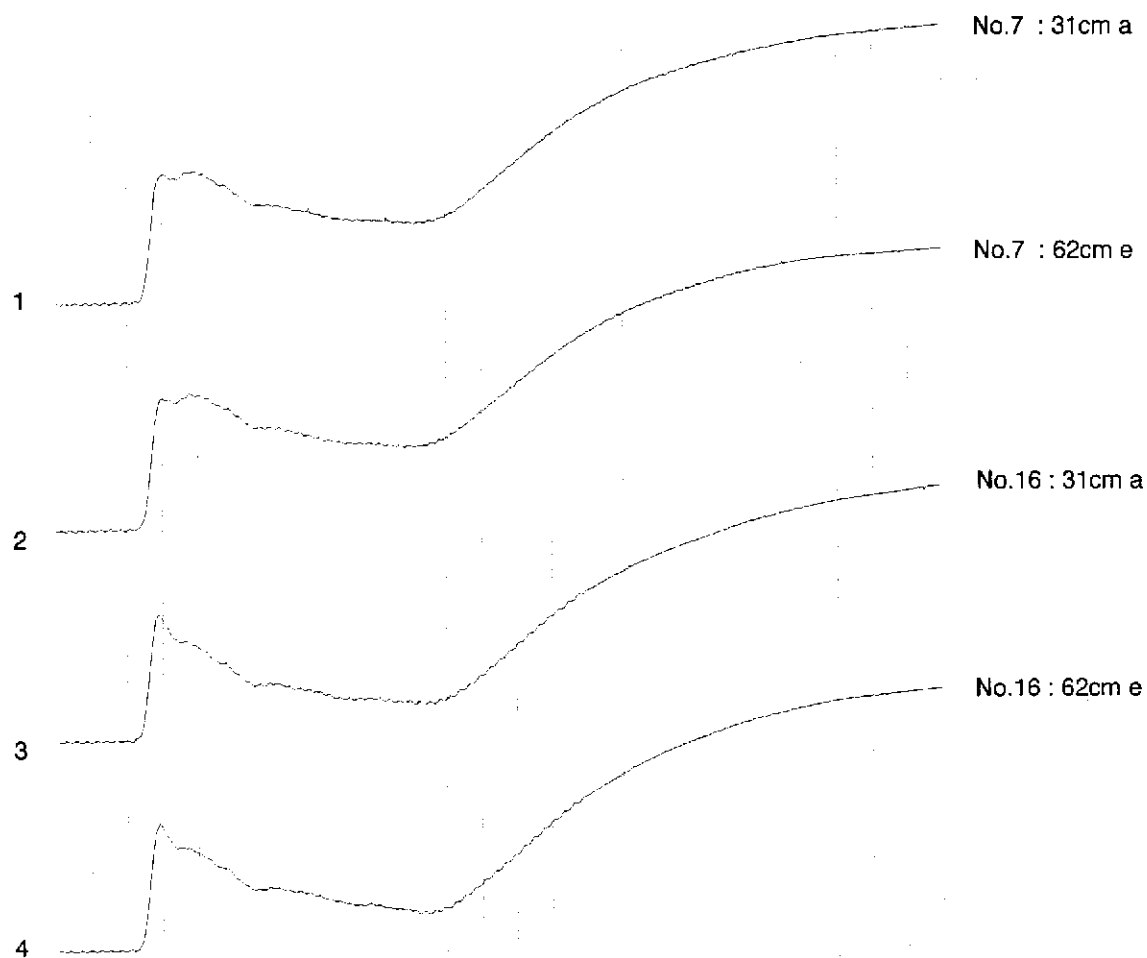
コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定対象: コンクリート管
ケーブル長: 5m
パッカー圧: 40kPa

020406a

プローブ番号: 測定位置



0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

TDR波形長さ (cm)

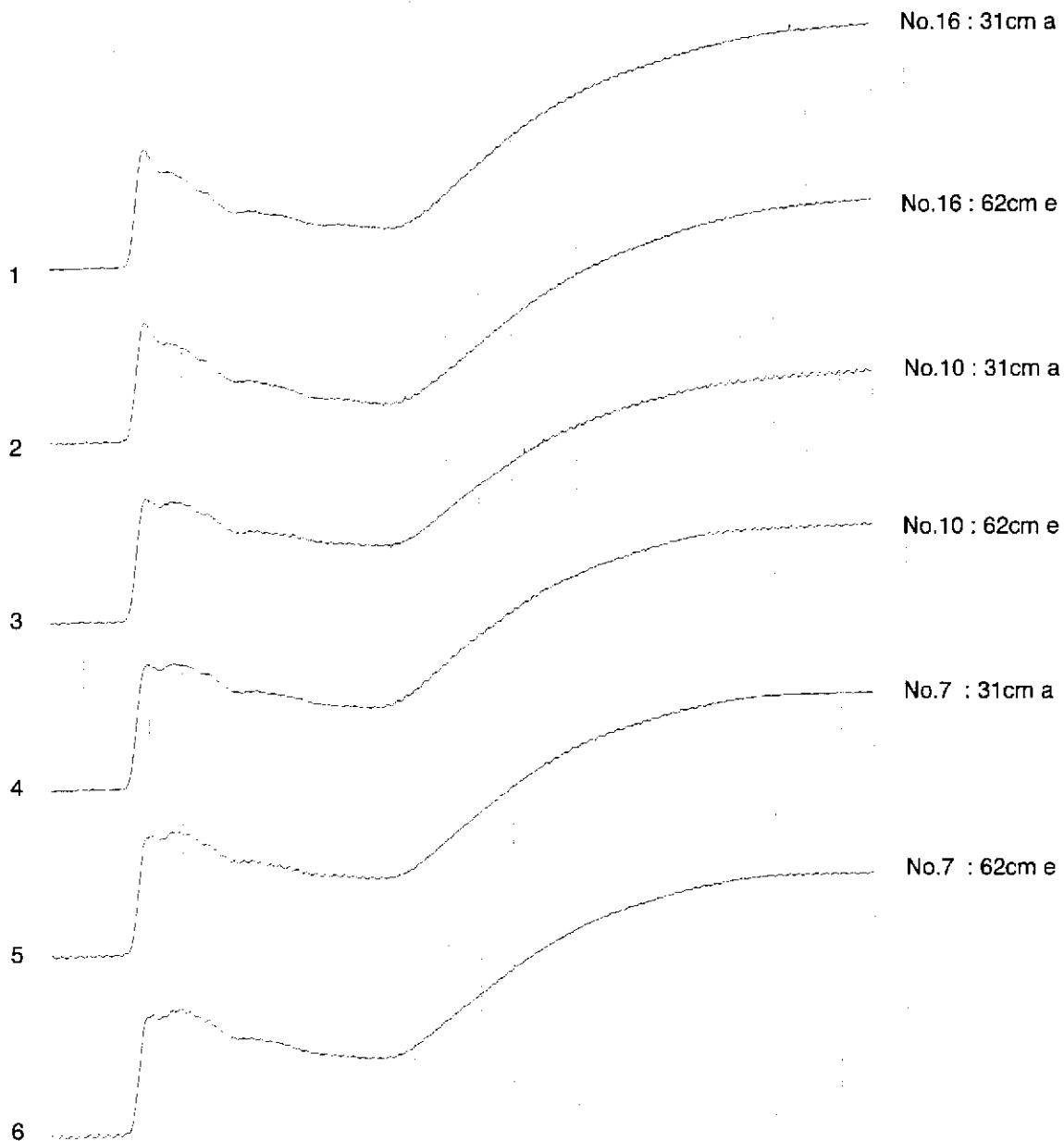
コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定対象: コンクリート管
ケーブル長: 5m
パッカー圧: 40kPa

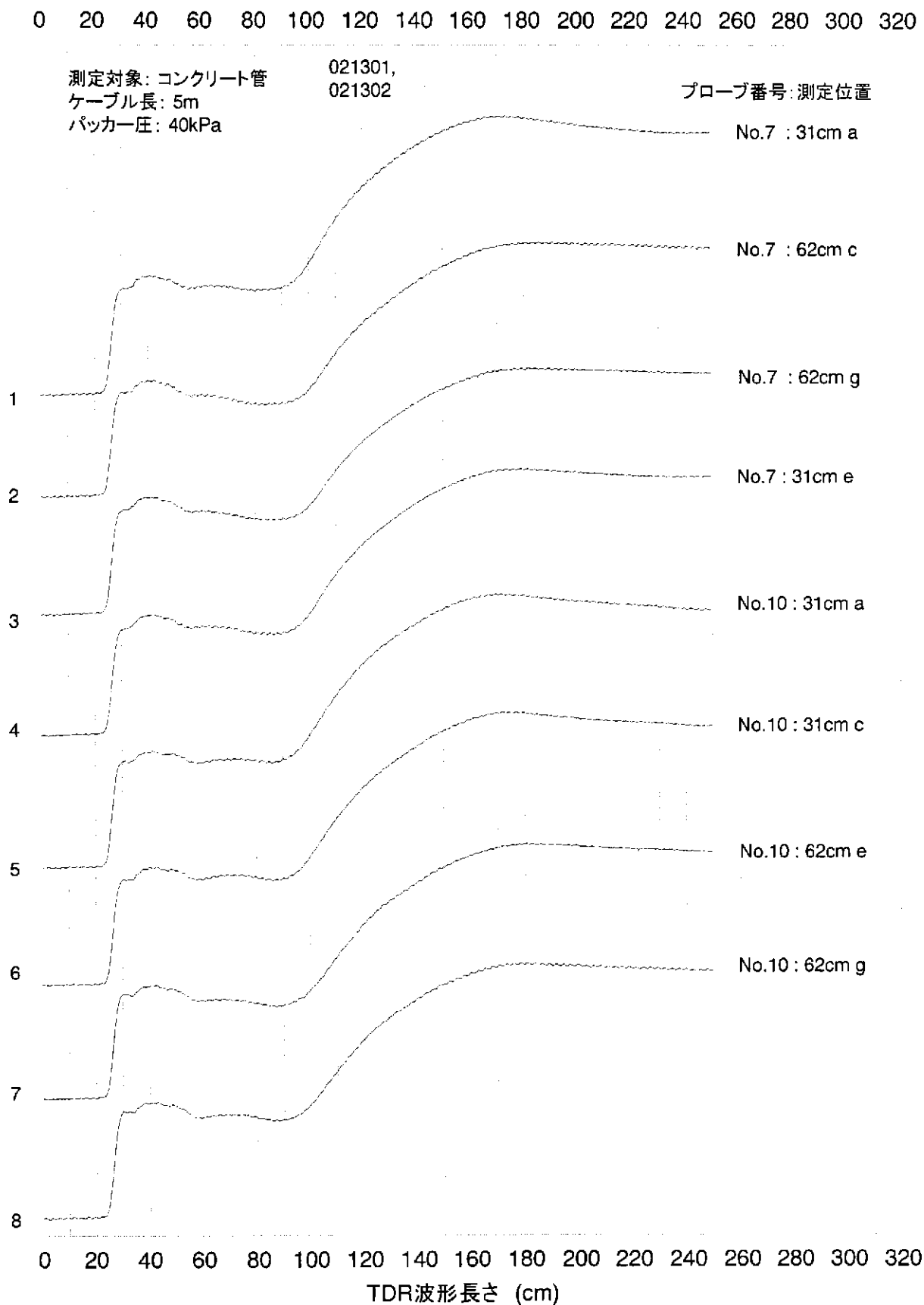
020501

プローブ番号: 測定位置



0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形



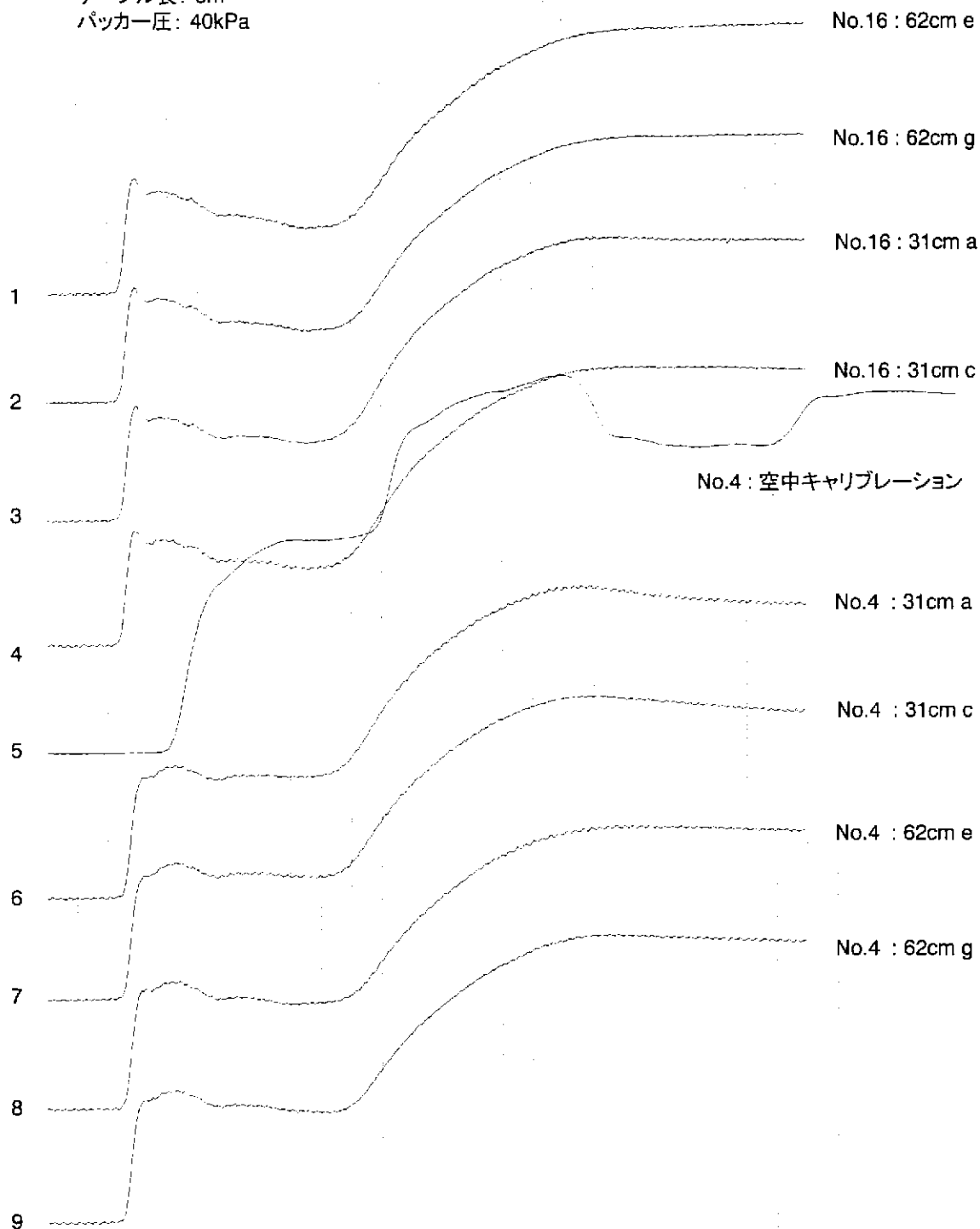
コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定対象: コンクリート管
ケーブル長: 5m
パッカー圧: 40kPa

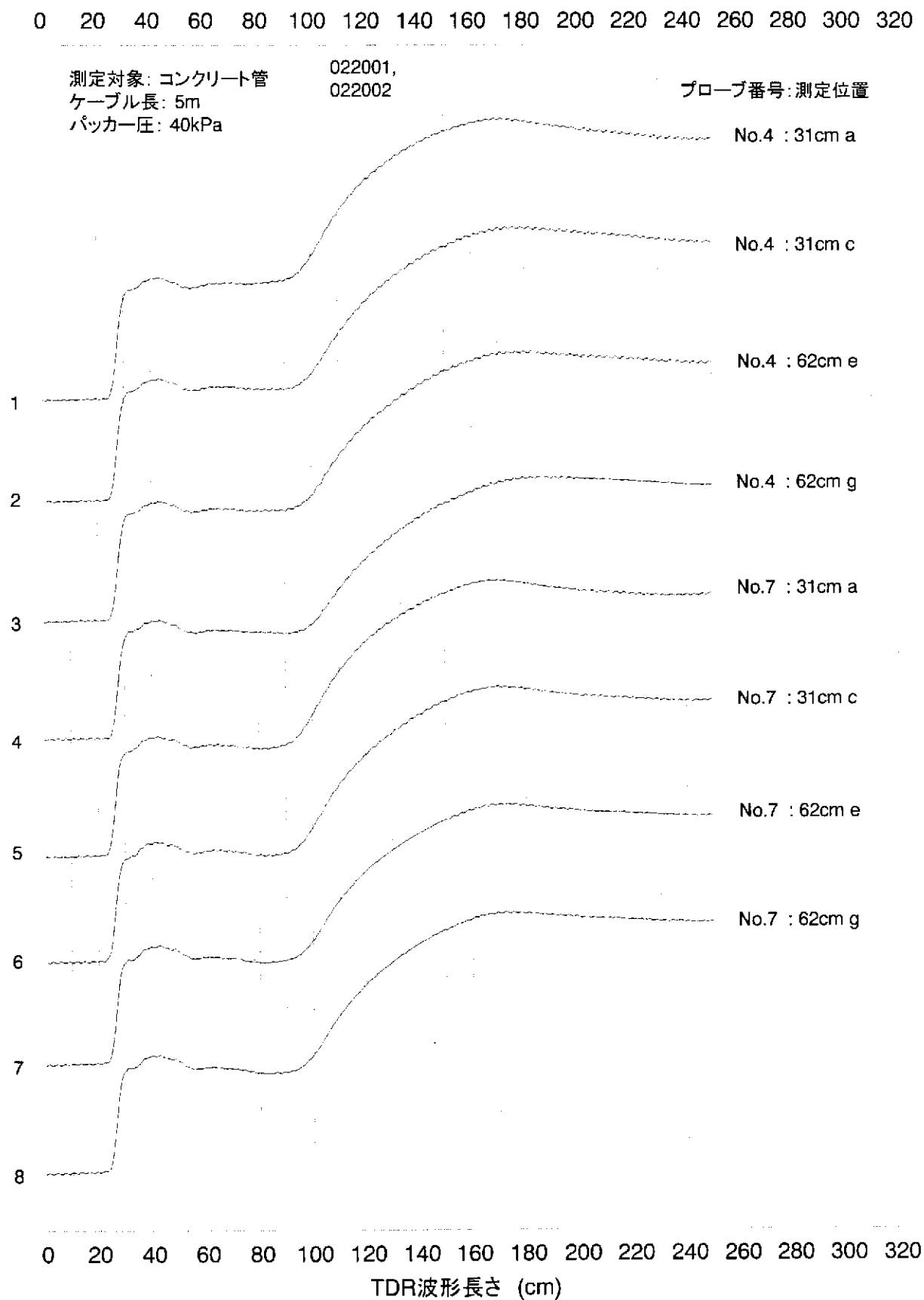
021303,
021304

プローブ番号: 測定位置



0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形



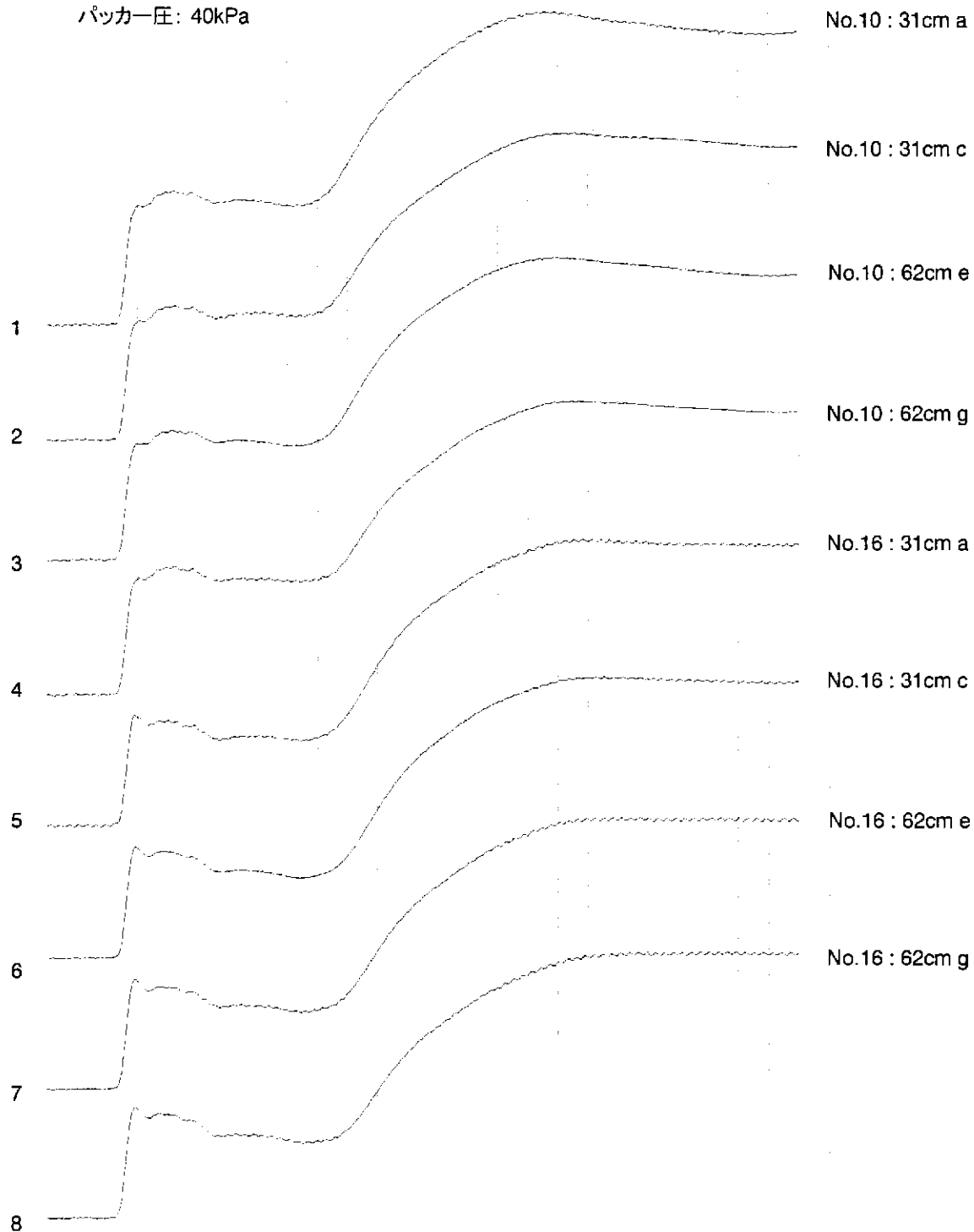
コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定対象: コンクリート管
ケーブル長: 5m
パッカー圧: 40kPa

022003

プローブ番号: 測定位置

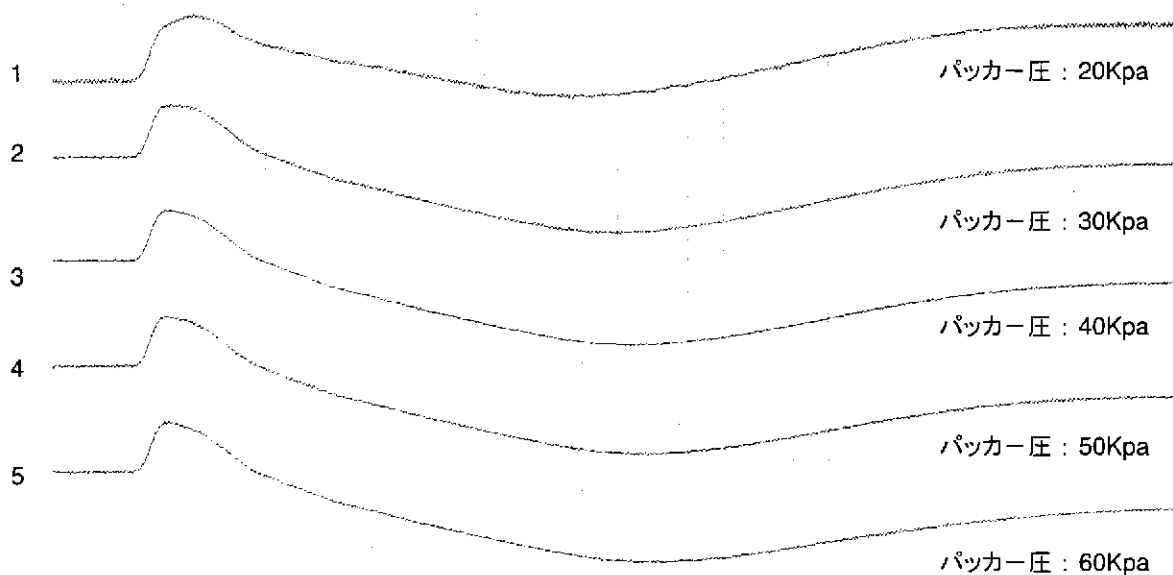


0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

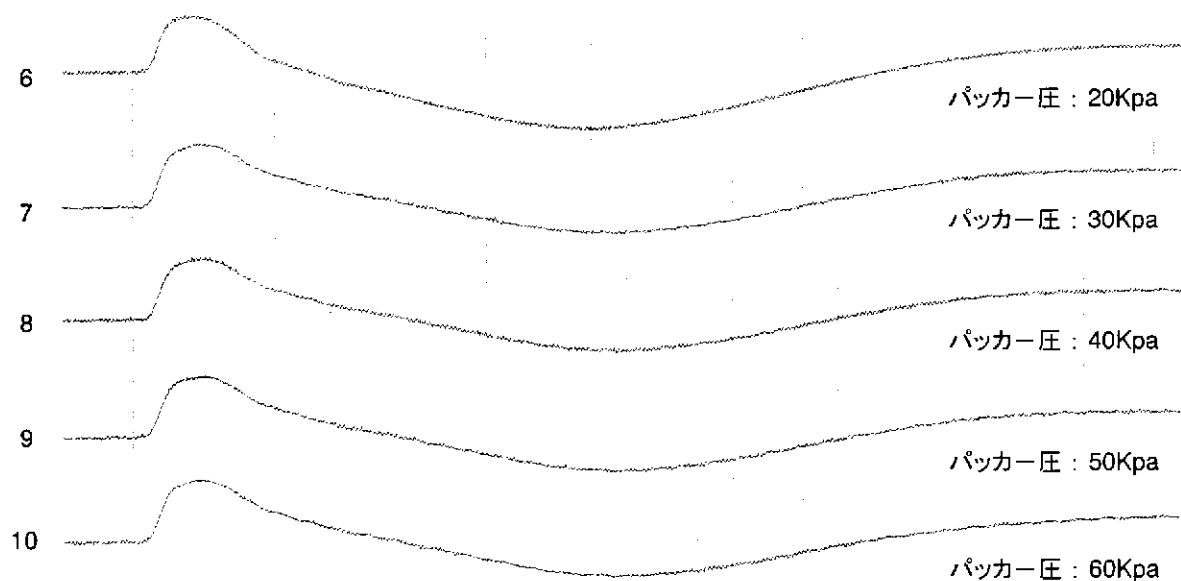
コンクリート管を用いた室内試験の TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

調査孔: 01SI-10
測定深度: 1.50m
プローブ No.1
ケーブル長: 15m



調査孔: 01SI-10
測定深度: 1.50m
プローブ No.4
ケーブル長: 15m



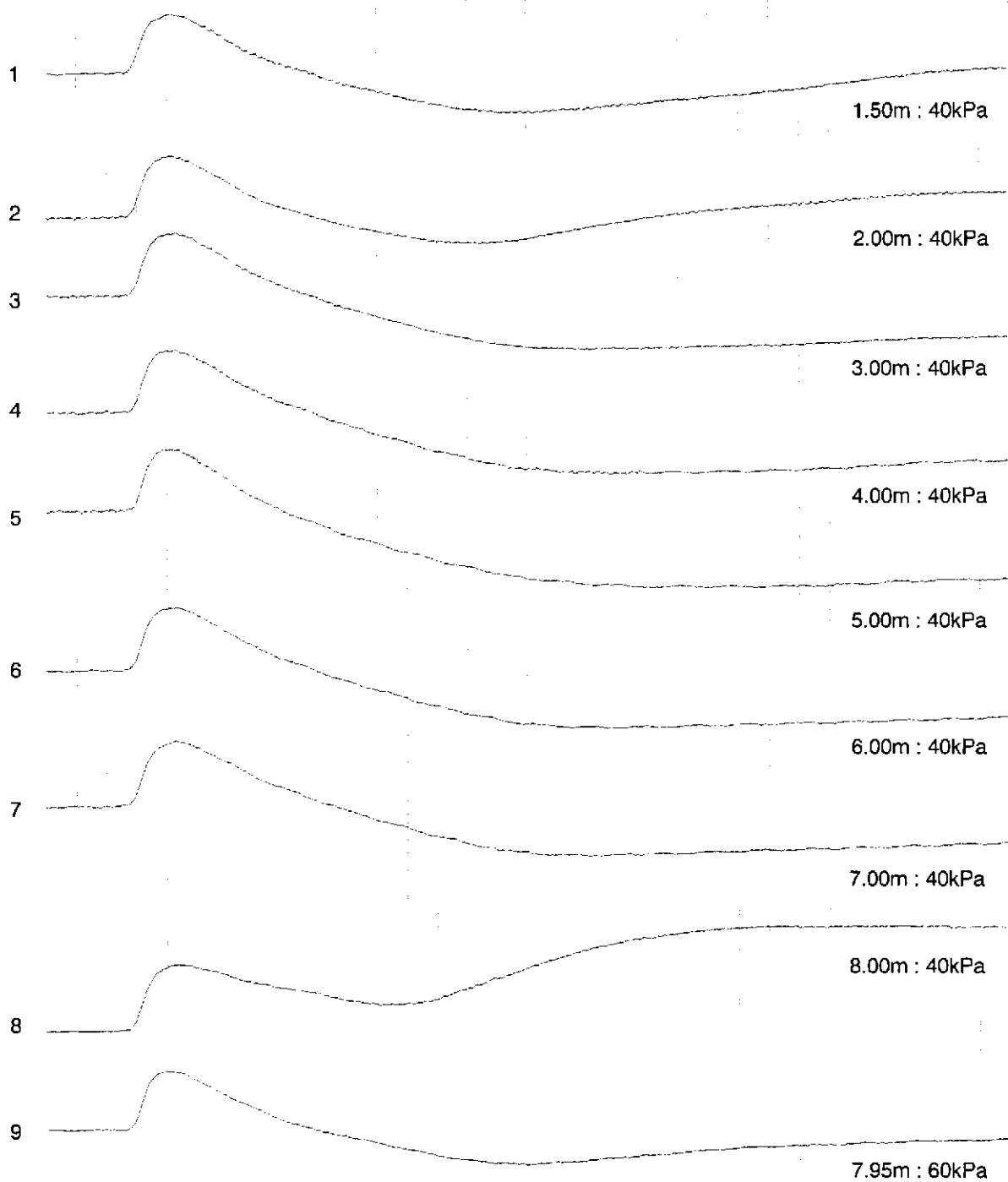
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

パッカー圧を変化させたときの改良型パッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

調査孔: 01SI-10
プローブ No.4
ケーブル長: 15m

測定深度: バッカー圧



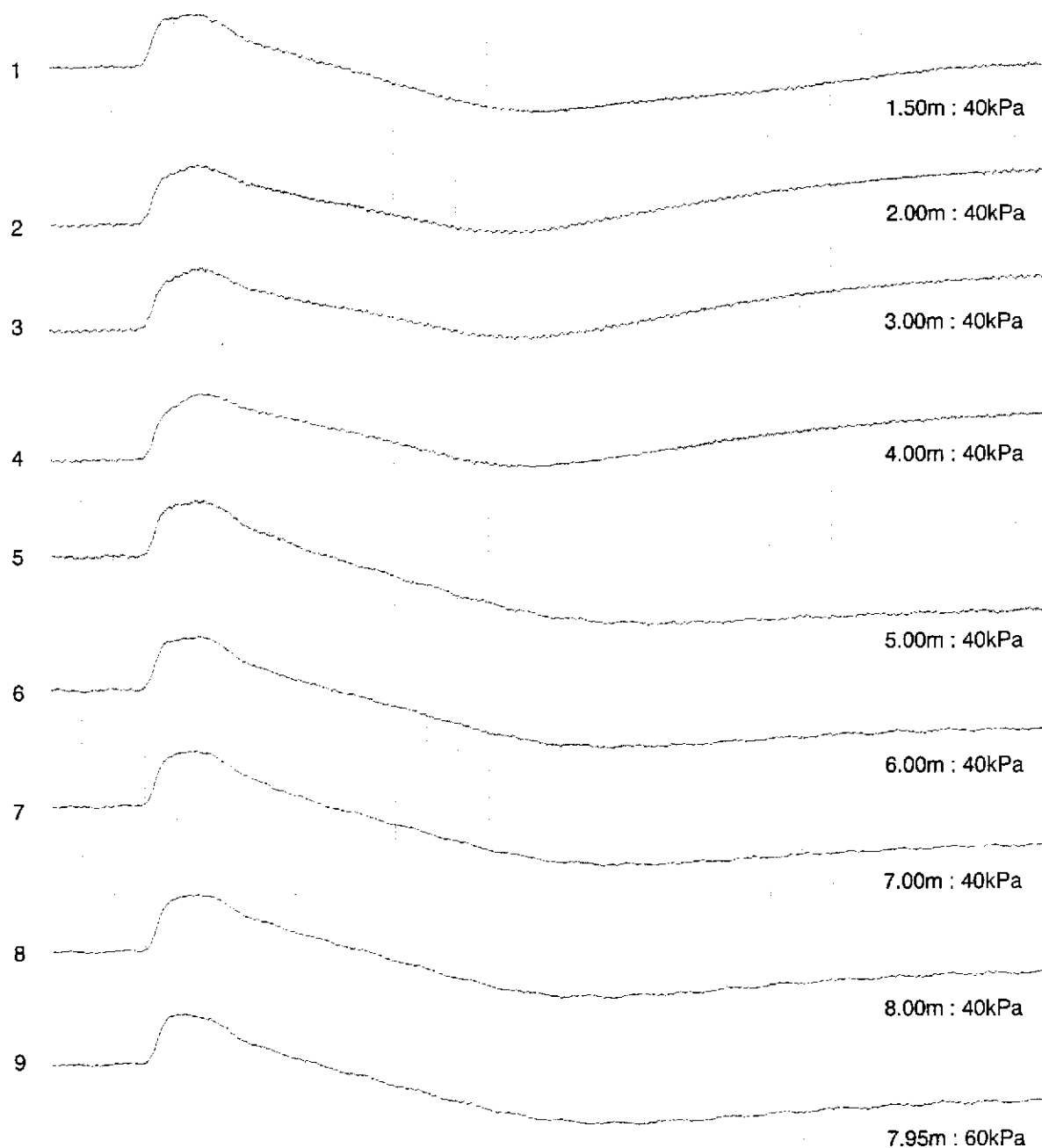
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型バッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

調査孔: 01SI-10
プローブ No.7
ケーブル長: 15m

測定深度: パッカー圧



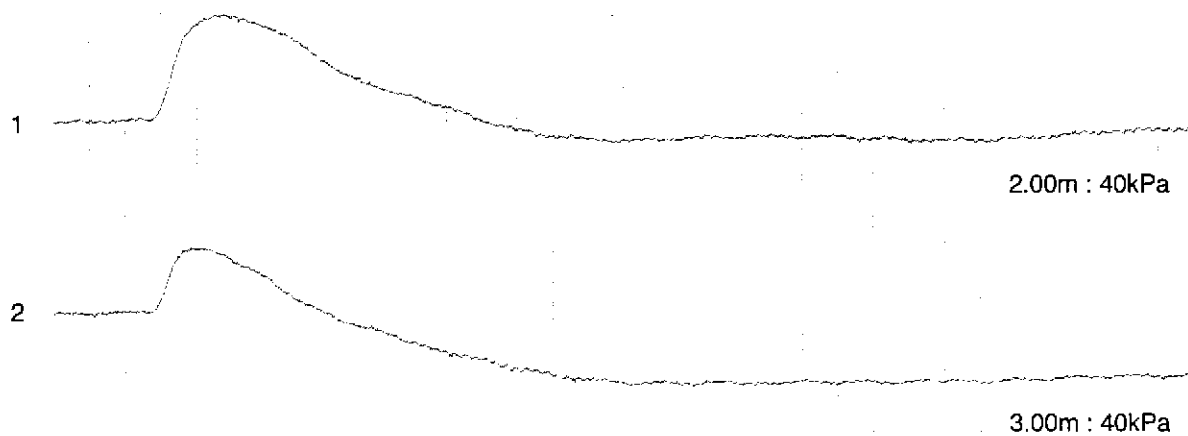
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

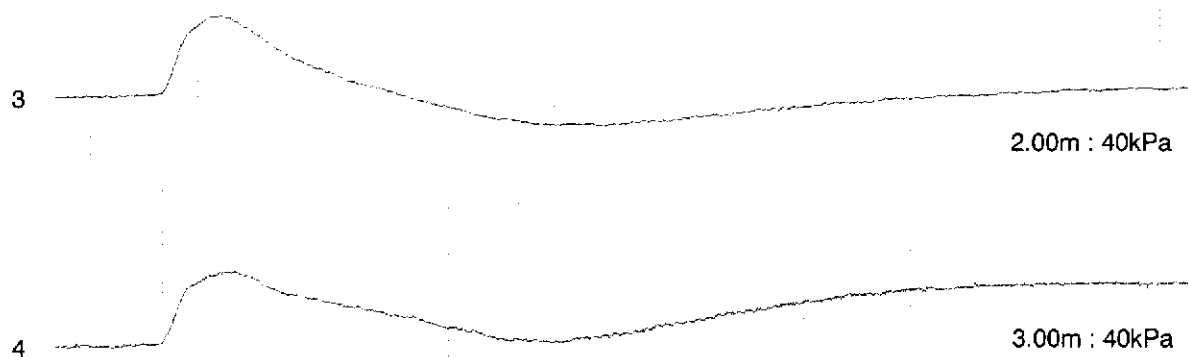
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

調査孔: 01SI-11
プローブ No.4
ケーブル長: 15m

測定深度: パッカー圧



調査孔: 01SI-11
プローブ No.7
ケーブル長: 15m



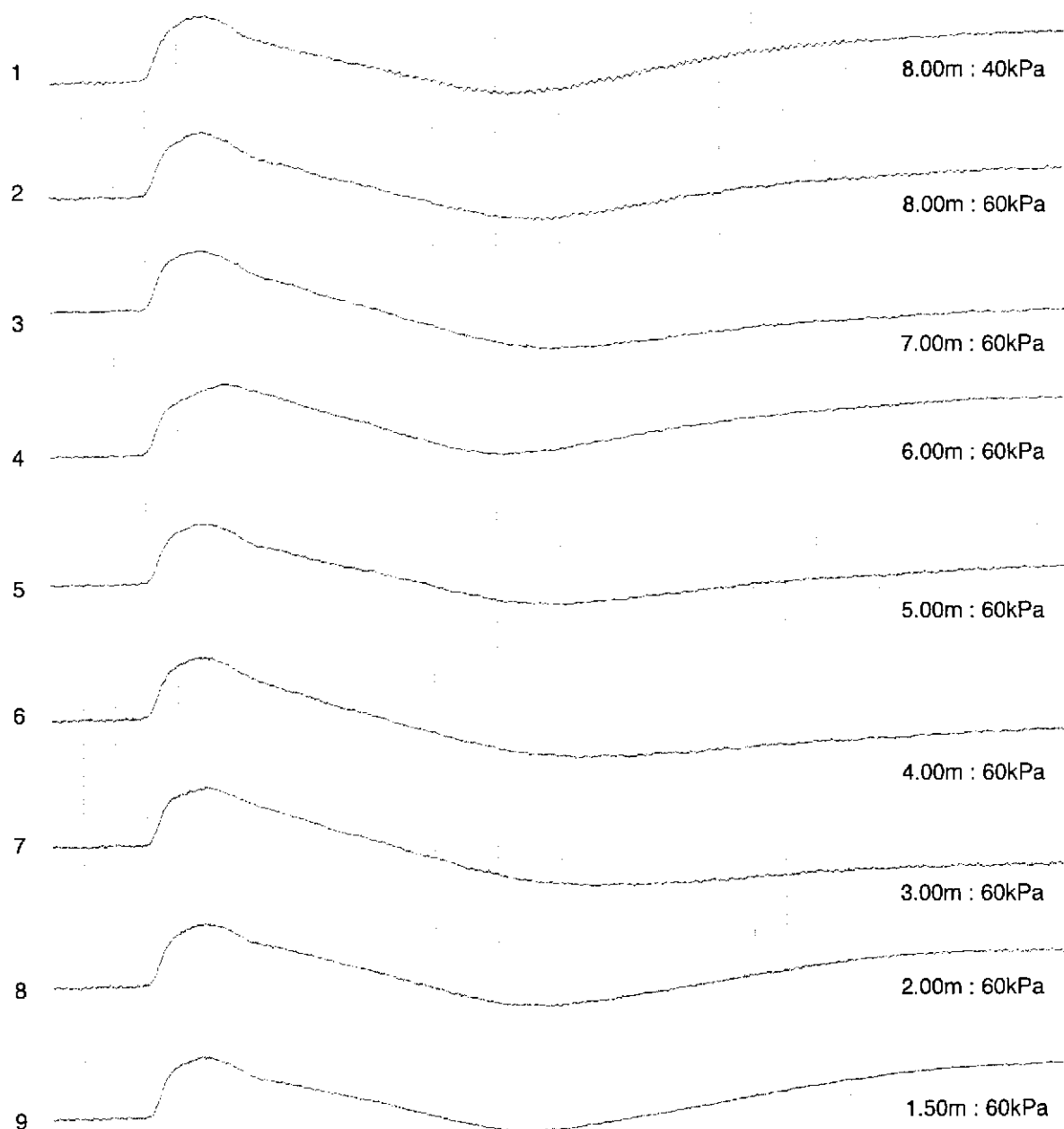
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

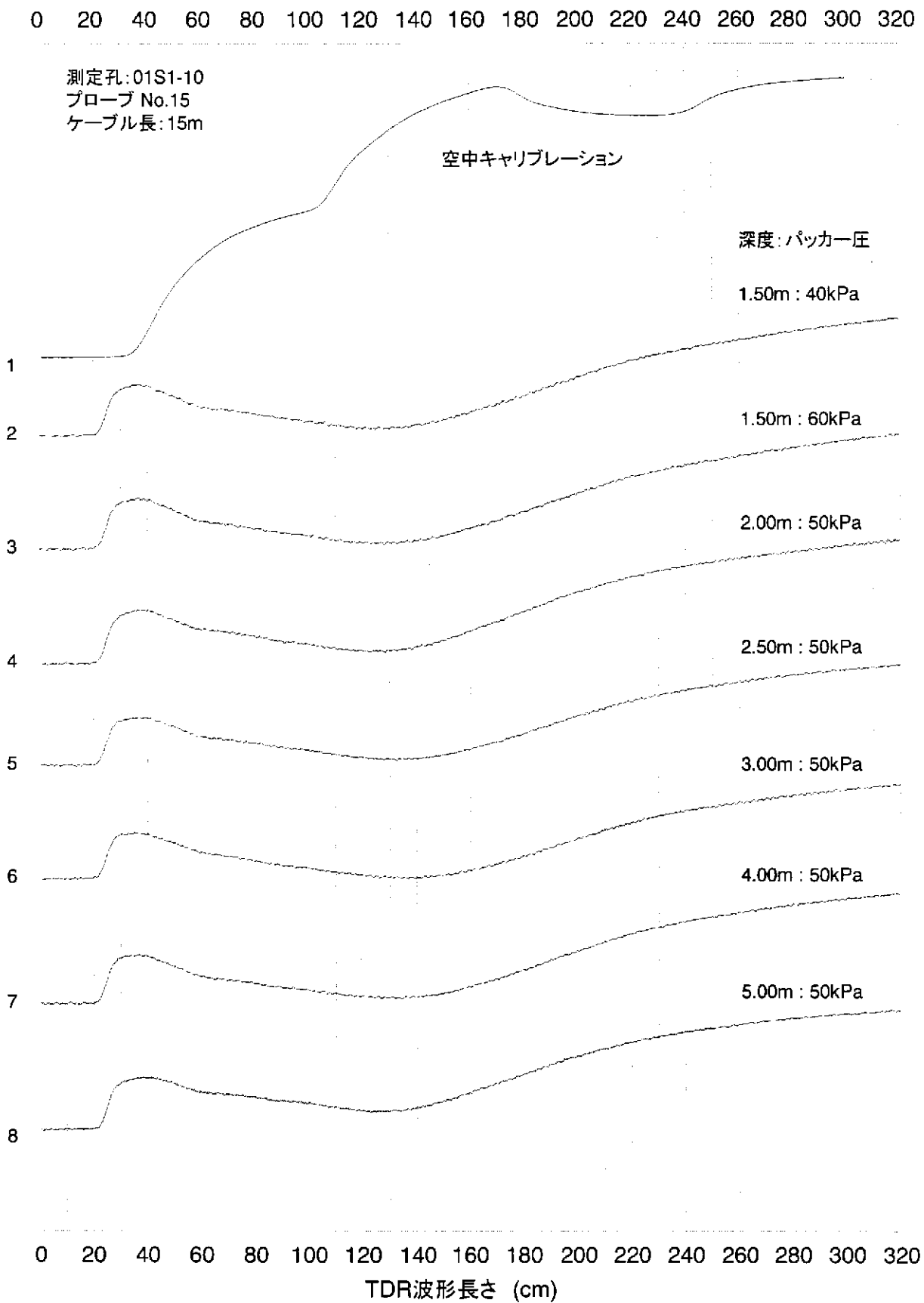
調査孔: 01SI-10
プローブ No.7
ケーブル長: 15m

測定深度: パッカー圧



0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形



深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

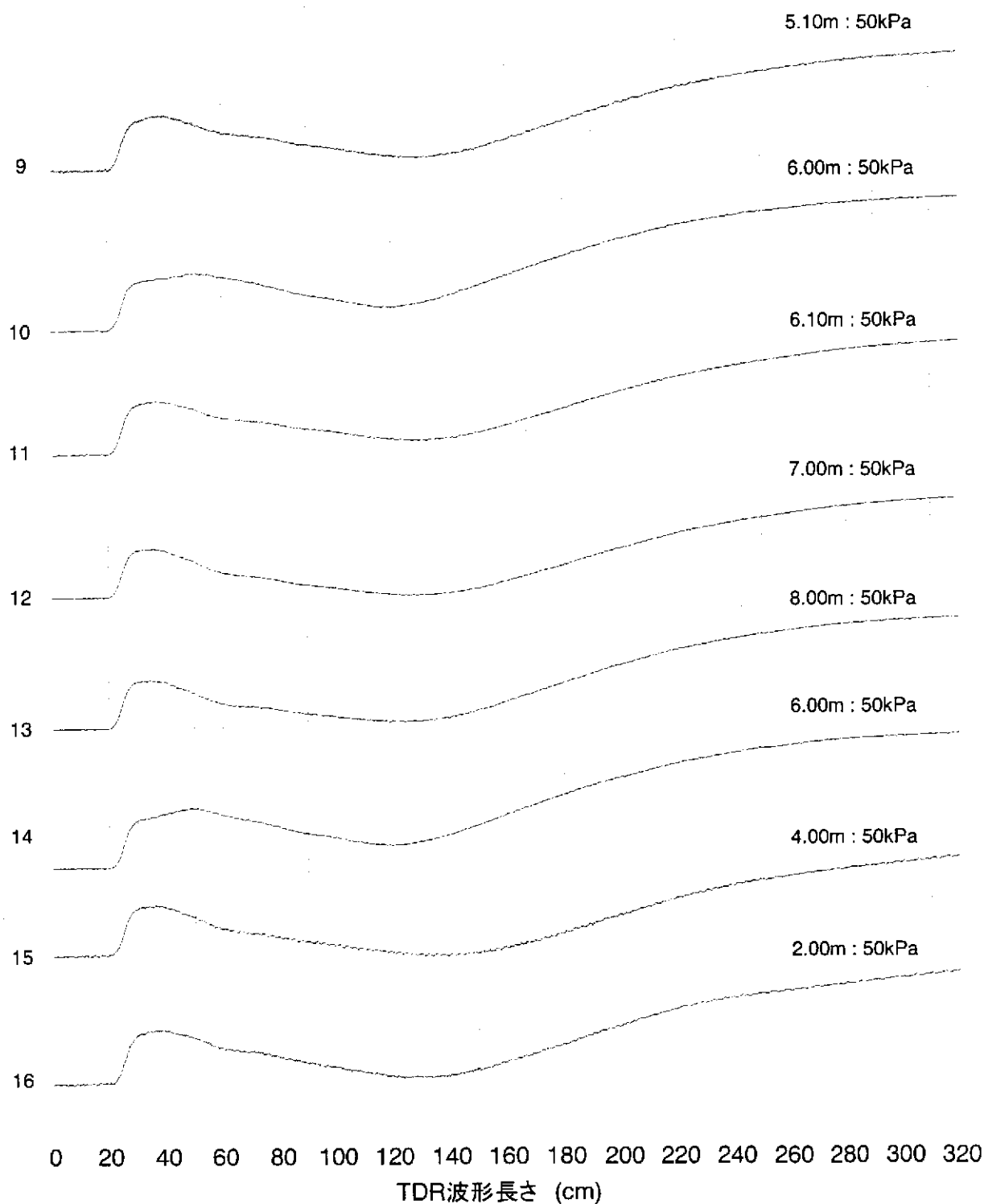
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定孔:01S1-10

プローブ No.15

ケーブル長:15m

深度:パッカー圧



深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定孔:01S1-11
プローブ No.15
ケーブル長:15m

深度:パッカー圧

2.00m : 50kPa

1

2.50m : 50kPa

2

3.00m : 50kPa

3

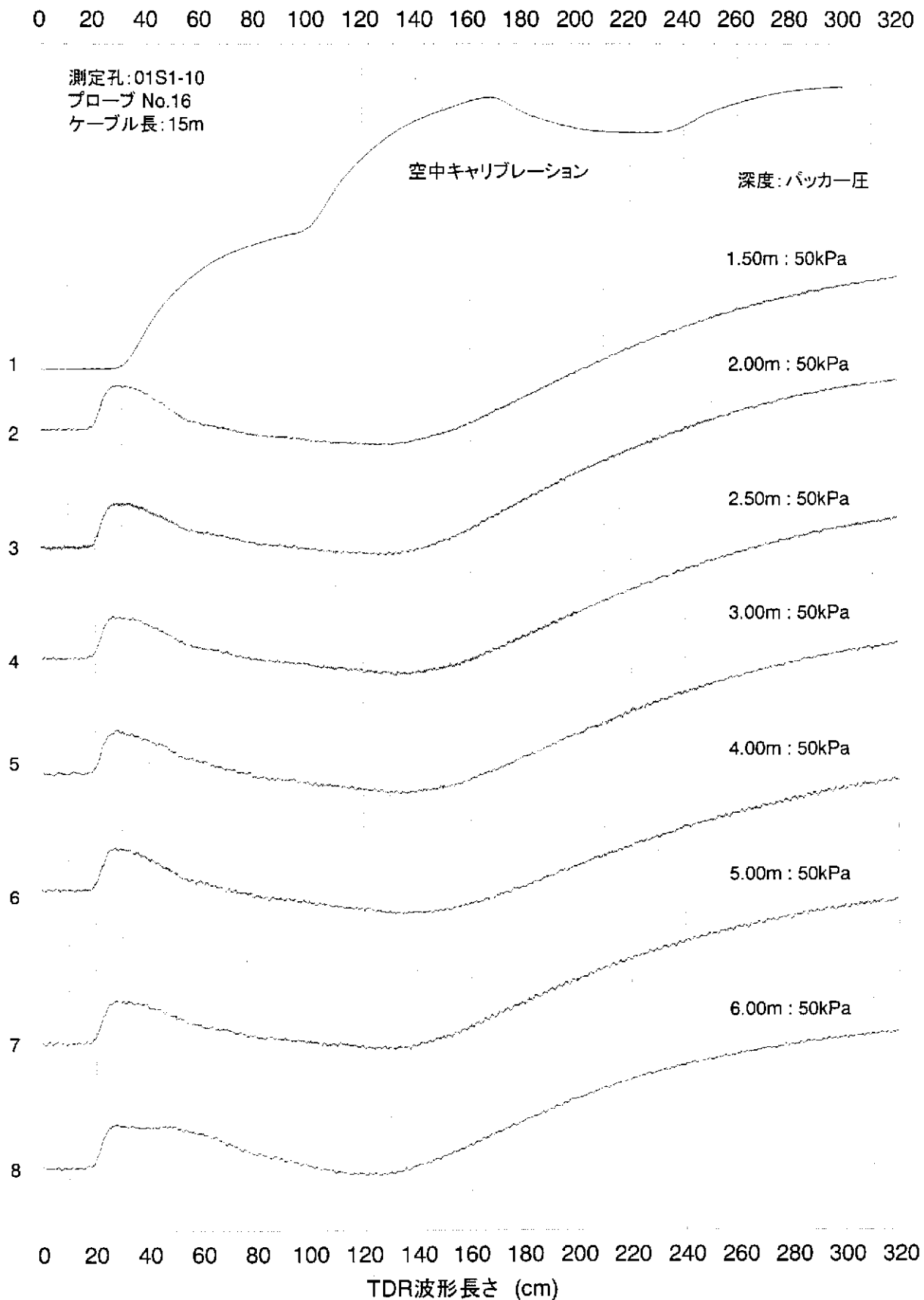
2.00m : 50kPa

4

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

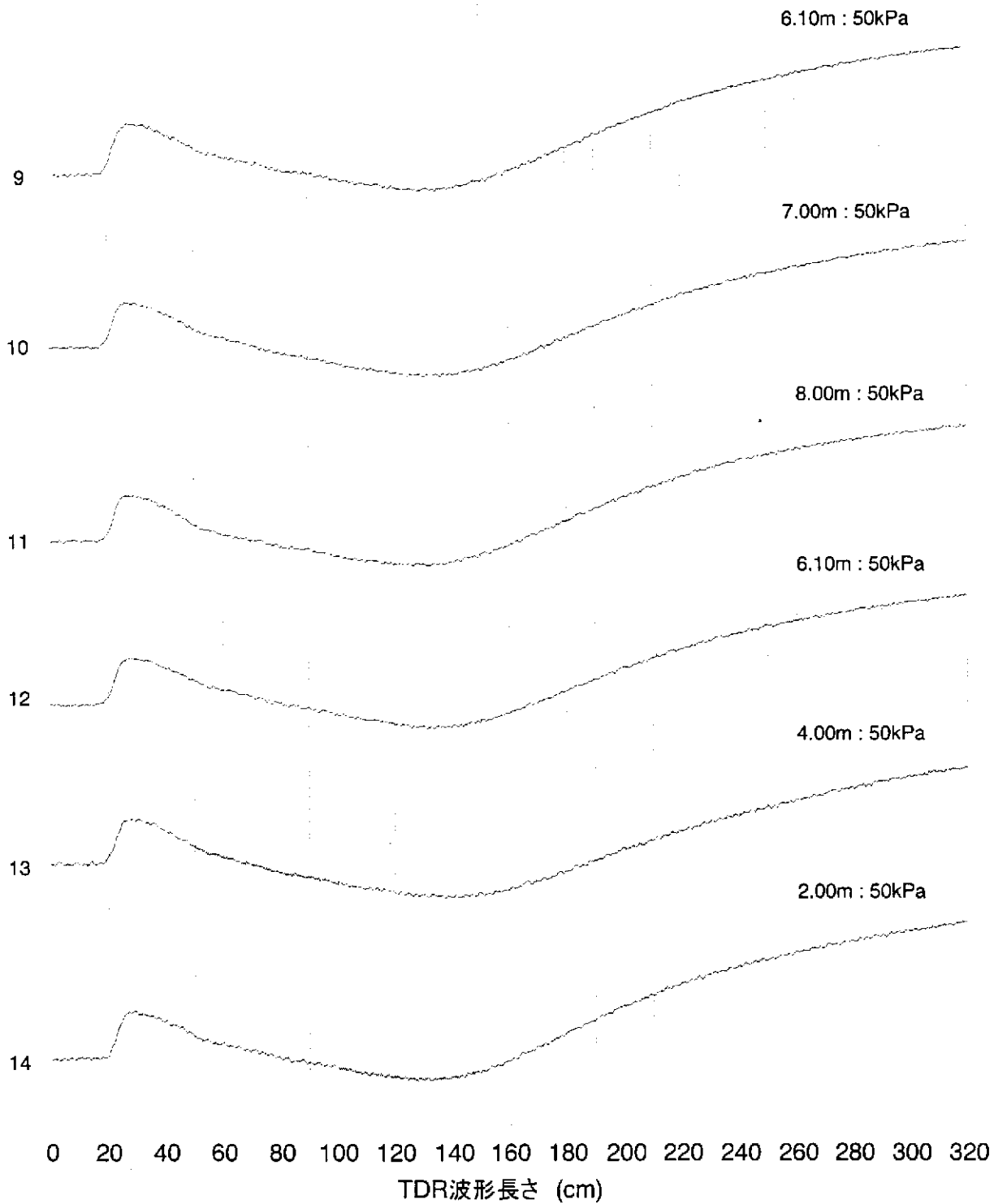


深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定孔:01S1-10
プローブ No.16
ケーブル長:15m

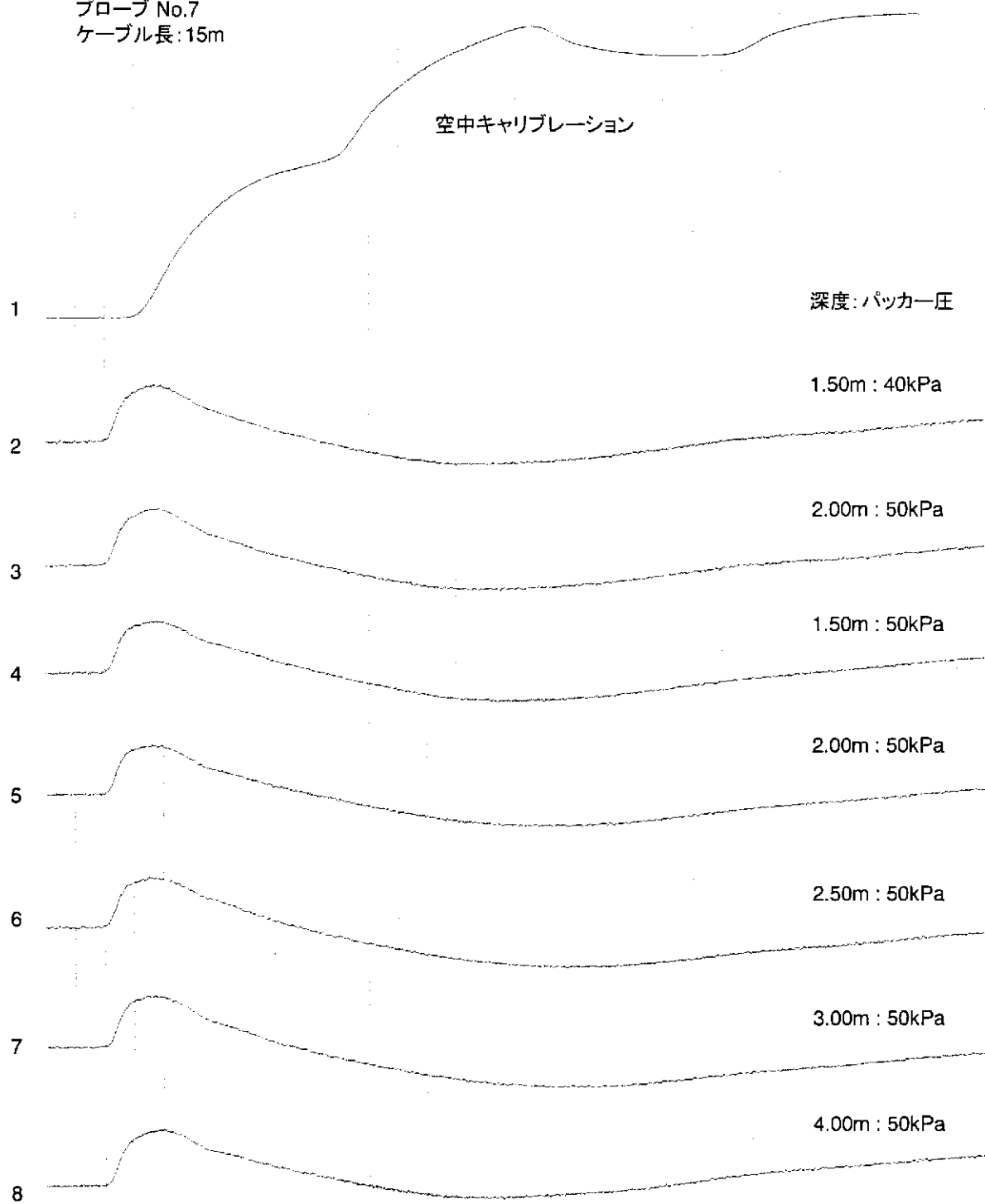
深度:パッカー圧



深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

測定孔: 01S1-10
プローブ No.7
ケーブル長: 15m



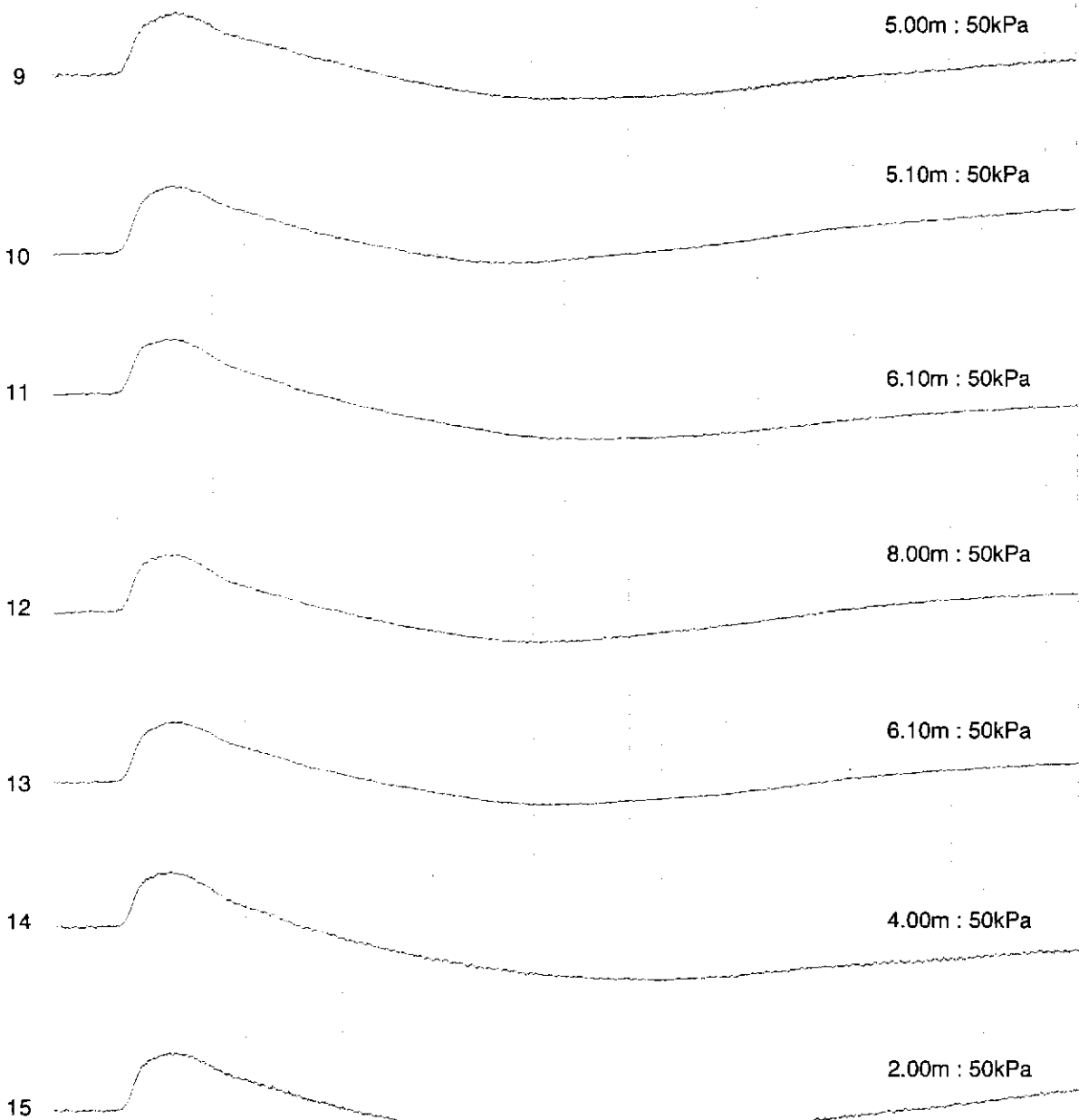
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320

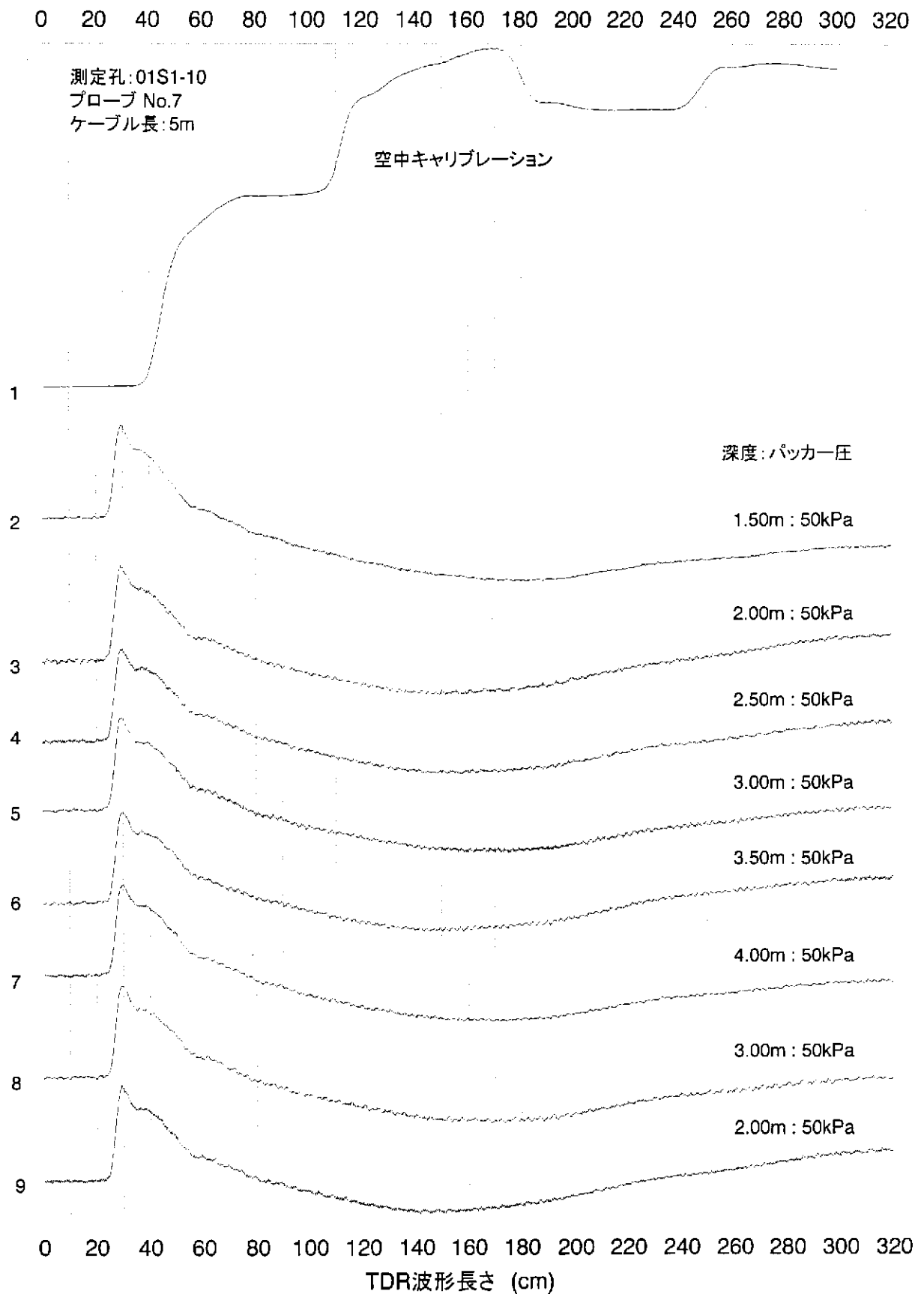
測定孔:01S1-10
プローブ No.7
ケーブル長:15m

深度:パッカー圧



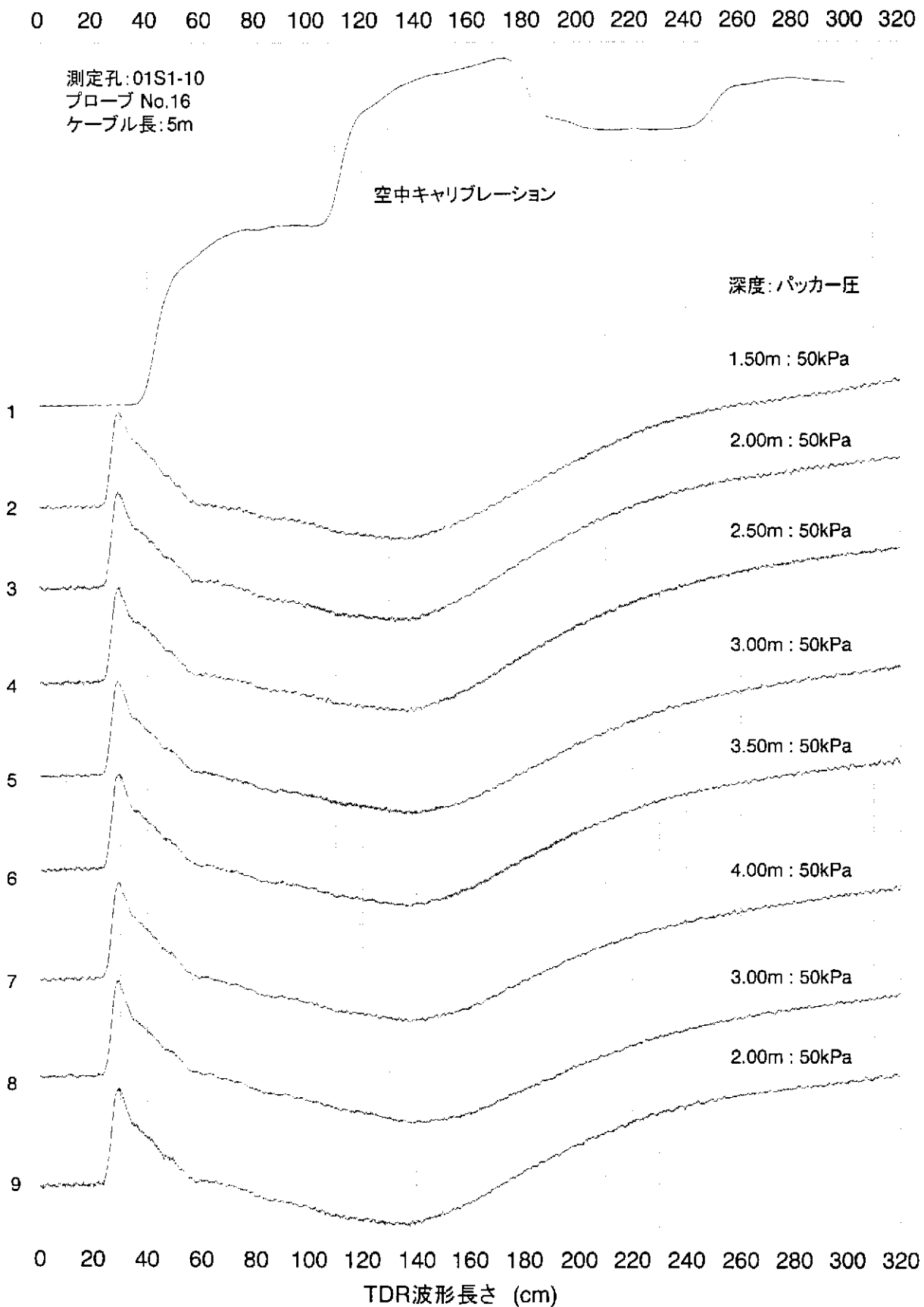
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320
TDR波形長さ (cm)

深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形



深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

(ケーブル長を短くした場合)



深度方向の比誘電率分布測定時の改良型パッカー式プローブの TDR 波形

(ケーブル長を短くした場合)