JNC TJ7400 2001-001

図書室
Lv012

不飽和領域の原位置計測手法の研究

（核燃料サイクル開発機構　委託研究成果報告書）

2001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)
2001

JNC TJ7400 2001-001
2001 年 2 月

不飽和領域の原位置計測手法の研究

（核燃料サイクル開発機構　委託研究成果報告書）

前村庸之*，得丸昌則*

要　旨

岩盤内に空洞を掘削すると、周辺岩盤に不飽和領域が発生する可能性がある。この不飽和領域では、岩盤の酸化還元状態が変化し、物質移行特性が変化する可能性があるため、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、岩盤中の不飽和領域を定量的に把握できる計測手法を開発し、実用化を図ることを最終目標としている。今年度は、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問題点の調査と仕様・構造の改良に関する試験、2)パッカー式プローブの試作、3) TDR 波形データ自動読み取りの試行と手法の確立、4) 岩盤中の含水量計測手法に関する研究情報の収集と整理，既存技術の調査を行った。得られた知見は以下の通りである。

1) 孔軸方向プローブにより測定された比誘電率は、周面の内側と外側の比誘電率の単純平均に近く、円周方向プローブよりも容易に対象物の比誘電率を求めることができる。
2) 従来の検討結果を踏まえて、パッカー式プローブの試作品を作成した。
3) 微分法に基づく TDR 波形の自動読み取りは、マニュアル法と同等以上の精度が期待できる。
4) 岩盤の不飽和領域の計測手法は、FDR などの他の測定法も研究されつつあるが、現時点においても確立したとは言い難く、TDR が先行している状況である。

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：120D0171

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 地質環境特性研究グループ
竹内真司

* 株式会社ダイヤコンサルタント

JNC TJ7400 2001-001
February, 2001

A study on in-situ method for measuring unsaturated zone

Tsuneyuki Maemura* and Masanori Tokumaru*

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. In this year, studies were conducted focusing on the following points: 1) Inspection of technical problems with the packer-type probe and improvements on its specifications and designs, 2) Manufacture of a pilot unit of the packer-type probe, 3) Trial and confirmation of the automatic TDR wave analysis methods, and 4) Research information of the methods for measuring water contents in rocks. Conclusions were obtained as below:

1) The dielectric constants measured with vertically mounted waveguides were close to the arithmetic mean of dielectric constants of inner and outer materials of the cylindrical plane. The arrangement has advantage to the circumferential one in calculating the dielectric constant of the outer material.
2) A pilot unit of the packer-type probe was manufactured depending on the post-achieved results.
3) The automatic wave analysis based on the derivative method could result same or superior accuracy in detecting reflection points.
4) Although some new approaches, like FDR, have been tested in measuring unsaturated zone of rock mass, no method has been fully developed at present. TDR method seems to be more advanced to the others.

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

JNC Liaison: Shinji Takeuchi

Geological Research Execution Group, TONO Geoscience Center

* DIA CONSULTANTS CO., LTD

目次

1. 研究の概要 1
1.1 研究委託の目的 1
1.2 研究委託の範囲 1
1.3 研究委託の内容 1
2. 研究経緯および実施内容 3
2.1 不飽和領域の計測手法に関する研究経緯 3
2.2 平成 12 年度の実施内容 4
3. パッカー式プローブの構造の検討に関する試験 5
3.1 パッカー式プローブの概要 5
3.2 電磁波の影響範囲の測定とプローブ設置方向の検討 6
3.2.1 概要 6
3.2.2 TDR による比誘電率の測定原理 6
3.2.3 実験方法 9
3.2.3.1 周面外側に対する電磁波の影響範囲 9
3.2.3.2 周面内側に対する電磁波の影響範囲 11
3.2.4 実験結果 12
3.2.4.1 周面外側に対する電磁波の影響範囲 12
3.2.4.2 周面内側に対する電磁波の影響範囲 13
3.2.5 考察 15
3.2.5.1 周面外側に対する電磁波の影響範囲 15
3.2.5.2 周面内側に対する電磁波の影響範囲 15
3.2.5.3 プローブ間隔の違いによる比誘電率の変化 15
3.2.5.4 プローブの設置方向 16
3.2.6 追加検討とその結果 17
3.2.6.1 実験方法 17
3.2.6.2 実験結果と考察 17
3.2.7 まとめ 19
3.3 電磁波影響範囲等を考慮した緩衝材の評価 19
3.3.1 概要 19
3.3.2 緩衝材物質の検討 20
3.3.3 緩衝材を用いた場合の円周内側に対する電磁波の影響範囲 23
3.3.3.1 実験方法 23
3.3.3.2 実験結果 24

3.3.3.3 考察 24
3.3.4 計測された読み取り値を媒質の比誘電率に換算する手法の検討 25
3.4 パッカー式プローブの構造の検討のまとめ 25
4. パッカー式プローブの試作 27
4.1 パッカー式プローブの仕様の決定 27
4.1.1 測定対象とする孔径 27
4.1.2 プローブの設置方向 27
4.1.3 プローブの電極幅およびプローブ間隔 27
4.1.4 プローブ電極の長さ 28
4.1.5 緩衝材の材質と厚さ 29
4.1.6 パッカーの径と加圧媒体 29
4.2 パッカー式プローブの試作 30
4.3 パッカー式プローブの試作についてのまとめ 33
5. TDR の波形データ自動読み取りの試行と手法の確立 34
5.1 目的 34
5.2 マニュアル法と微分法の概説 34
5.2.1 TDR 波形およびキャリブレーション 34
5.2.2 マニュアル法 35
5.2.3 微分法 36
5.3 TDR 波形解析プログラム 37
5.3.1 はじめに 37
5.3.2 プログラムの概要 37
5.3.2.1 プログラムの構造 37
5.3.2.2 入力データ 37
5.3.2.3 プログラムの波形解析方法 38
5.3.3 解析時の注意 40
5.4 波形解析プログラムの適用 40
5.5 波形解析プログラムによる読み取りとマニュアル法との比較 44
5.6 TDR 波形データの自動読み取りについてのまとめ 47
6. 岩盤中の含水量計測手法に関する研究情報の収集と整理 48
6.1 目的 48
6.2 海外の研究動向概要 48
6.3 本研究の経緯概要 48
6.4 比誘電率と含水量の関係 50

6.5 TDR の岩盤への適用事例 52
6.6 TDR 以外の近年の研究事例 53
6.6.1 X 線を用いた方法 53
6.6.2 FDR 53
6.6.3 ADR 54
6.7 岩盤の含水率計測手法に関する研究動向のまとめ 54

7. まとめ 56

7.1 本年度の研究成果 56
7.1.1 パッカー式プローブの実用化を目指した計測手法の問題点の調査と仕様・構造の改良 56
7.1.2 パッカー式プローブの試作 56
7.1.3 TDR 波形データの自動読み取りの試行と手法の確立 57
7.1.4 岩盤中の含水量計測手法に関す研究情報の収集と整理 57
7.2 今後の課題 57

参考文献 59

付録

1. TDR 波形データ
2. 写真
3. TDR 波形読み取りプログラムリスト（Fortran 77）
4. プローブに関する用語の定義

表目次

表 3.2–1　比誘電率測定および解析システムの構成 9
表 3.2–2　周面に沿ったプローブ間隔 D と d, θ, h との関係 11
表 3.3–1　主要なプラスチックの比誘電率 ε_r と誘電損失 tan δ（25℃） 21
表 3.3–2　3 種のプラスチックの特性検討 22
表 3.3–3　緩衝材として用いた発泡ポリエチレンの物性値 22
表 4.2–1　パッカー式プローブの試作機の仕様 31
表 4.2–2　パッカー式プローブを塩ビ管内に挿入して測定した比誘電率 32

図目次

図 3.1–1　パッカー式プローブによる測定概念図およびプローブの構造図 5
図 3.2–1　ケーブルテスターにおける波形の表示例 7
図 3.2–2　比誘電率が異なる媒体中の TDR 波形 7
図 3.2–3　周面外側の影響範囲を調べる実験の概念図 10
図 3.2–4　プローブの貼付け間隔と最下端からの距離との関係 11
図 3.2–5　周面内側の影響範囲を調べる実験の概念図 12
図 3.2–6　水面からのプローブまでの距離と比誘電率との関係 13
図 3.2–7　円筒の肉厚と比誘電率との関係 14
図 3.2–8　円筒の肉厚と比誘電率との関係（プローブ間隔で正規化） 14
図 3.2–9　プローブ間隔と比誘電率との関係 17
図 3.2–10　プローブ間隔と比誘電率との関係 18
図 3.3–1　緩衝材をの厚さを変えたときの電磁波の影響範囲を調べる実験 23
図 3.3–2　緩衝材の厚さと測定された比誘電率との関係 24
図 4.2–1　試作したパッカー式プローブの構造 31
図 4.2–2　パッカー式プローブの反射波形の例 33
図 5.2–1　典型的な TDR 波形の例 35
図 5.2-2　マニュアル法の概要 35
図 5.2–3　TDR 波形とその 1 階微分 36
図 5.2–4　微分法の概要 37
図 5.4-1　波形データの解析例（プローブ定数を求めた場合） 41
図 5.4–2　波形データの解析例（比誘電率を求めた場合） 41
図 5.4–3　波形データ解析プログラムの実行例（プローブ定数を求める場合） 42
図 5.4–4　波形データ解析プログラムの実行例（比誘電率を求める場合） 43
図 5.5–1　水面からの距離と比誘電率との関係（自動読み取りによる測定値） 45
図 5.5–2　水面からの距離と比誘電率との関係（マニュアル法による測定値） 45

図 5.5–3　自動読み取りとマニュアル法による測定値の対応 46
図 5.5–4　自動読み取りとマニュアル法による測定値のばらつき 46
図 6.3–1　飽和度と弾性波速度の関係（多胡砂岩，平成 6 年度） 49
図 6.3–2　飽和度と比抵抗の関係（多胡砂岩，平成 6 年度） 49
図 6.3–3　体積含水率と比誘電率の関係（多胡砂岩，平成 6 年度） 49
図 6.4–1　ネットワークアナライザによる岩石の K_a～θ_v 関係（平成 9 年度） 51

1. 研究の概要

1.1 研究委託の目的

岩盤内に空洞を掘削すると、岩盤から空洞へ地下水が流入し、空洞周辺の岩盤に不飽和領域が生じる可能性がある。不飽和領域では、岩盤中の間隙水圧低下や岩盤への空気の侵入が起こるため、このような領域では地下水の水質が変化すると考えられる。さらに、空洞が再び水で飽和した後も、周辺岩盤に侵入した空気中の酸素の影響がある期間残留する可能性が考えられる。したがって、空洞の利用においては、形成されうる不飽和領域の広がりやその特性の定量的な評価が重要となる場合がある。

このような観点から、東濃地科学センターでは、岩盤を対象とした不飽和領域の計測・解析手法の開発を目的として、多様な岩種を対象とした室内試験、東濃鉱山を構成する堆積岩を対象とした原位置試験、および不飽和領域の解析手法に関する研究を、平成5年度から実験と解析という2本立てで実施してきた。

計測手法に関する研究については、平成10年度までに、電磁波を利用した計測手法により岩盤の飽和・不飽和状態をある程度推定できる見通しを得た。また、平成11年度からは、これまでに開発した原位置計測手法として有効性が高いと考えられる方法について、その実用化を図るための検討を行っている。

今年度は昨年度に引き続いて、これまでに開発した計測手法について、信頼性の向上を図るとともに、昨年度までに生じた問題点の再検討を行い、実用的な計測手法としての確立を目指すものとする。

1.2 研究委託の範囲

平成12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 研究委託の内容

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 室内試験の結果より、岩盤中の電磁波伝播速度を測定して比誘電率を求めることで、多種の岩種について体積含水率の推定が可能であり、さらに、その岩盤の有効間隙率が既知であれば、飽和度の算出が可能である。

② 原位置計測手法としてTDR（Time Domain Reflectometry: 時間領域反射法)、および孔間レーダー法を試行し、東濃鉱山における試験、あるいは人工砂地盤を用いた土槽実験により、これらの計測手法の適用性を確認した。TDRに関しては、プローブ設置方法の改良を重ねた結果、岩石の正確な比誘電率を測定できること

を室内試験により確認した。

一方、これまでの室内および原位置試験結果から、以下のような課題が明らかとなっている。

- 孔間レーダー法は、坑道壁面近傍（壁面から１m以内）での測定に難点がある。
- TDR に関しては、原位置岩盤での設置が容易なパッカー式プローブを考案し、室内および原位置における適用性試験を実施した。その結果、有効性が確認されたが、装置の実用性という観点からは、その構造が十分に確立されていない。
- NAGRA 等の海外の研究機関や、石油掘削業界等の異業種においても、岩盤中の含水量の計測手法として同様の研究が実施されており、本研究を立ち上げた平成5年度時点で詳細な文献調査を実施したものの、近年ではその情報を体系的に取得しておらず、国際的な技術動向が十分反映された研究になっていない懸念がある。

これらの結果を踏まえ、平成12年度は以下の内容の研究を行った。

① パッカー式プローブの実用化を目指した計測手法の問題点や構造等に関する検討

② パッカー式プローブの試作

③ 昨年度提案された TDR 波形データの自動読み取りの試行と手法の確立

④ 海外の研究機関や異業種での研究を含めた、岩盤中の含水量計測手法に関する研究情報の収集と整理

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

岩盤中の不飽和領域の広がりを的確に、かつ効率的に把握するための物理探査的な手法について、広範な文献調査と、岩石試料を用いた室内試験等により検討を行った。その結果、岩石のマクロな比誘電率が、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手法として最も有望であることが示された。

次に、岩石の比誘電率の測定方法として TDR と孔間レーダー法を取り上げ、室内試験および原位置試験によりそれらの適用性を検討した。このうち TDR については、岩盤に設置する TDR プローブの構造と設置方法、ならびに適用可能な岩種について検討し、以下のような知見が得られた。

- ロッド式プローブ（棒状の電極を被測定物に挿入する形態）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。
- ロッド式プローブにより計測された比誘電率は、期待される比誘電率よりも全体的に低めであった。これは、ロッドと計測孔径との間に生じる隙間に起因することがわかった。
- 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を充填する方法を新たに考案し、その有効性を確認した。
- ロッド式プローブを原位置で設置することは困難である。これに対し、岩石の表面に貼付する表面プローブ（平成 11 年度報告まではテーププローブと呼んでいた）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。
- 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。

なお、孔間レーダー法は、不飽和領域の発生しやすい坑道壁面近傍（壁面から 1 m 以内）で測定する場合、レーダープローブが壁面からはみ出してしまうため、計測できないという難点がある。

上記を踏まえて、昨年度は、① 2 重管ロッドを用いた設置方法の有効性を、これまでに適用していなかった岩種を対象として確認するとともに、②原位置計測手法として有力な TDR のパッカー式プローブの実用化を目指して、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い、さらに、③低比抵抗性岩盤を対象とした TDR ロッド式プローブの改良を検討した。その結果、①については有効性を確認でき、③については、課題は残るものの改良の一手法を提案できた。なお、②についてはいく

つかの重要な知見は得られたものの、パッカー式プローブの実用化を図るためにはさらなる検討が必要であることがわかった。

2.2 平成12年度の実施内容

平成12年度は、以下の研究を実施した。

(1) パッカー式プローブの実用化を目指した計測手法の問題点や構造等に関する検討

昨年度の検討結果を踏まえて、以下の項目について室内実験により検討し、パッカー式プローブの仕様・構造の改良に関する検討を行った。

① 電磁波の影響範囲の測定とプローブ貼付方向の検討

② 電磁波影響範囲等を考慮した緩衝材の評価

③ 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

(2) パッカー式プローブの試作

パッカー式プローブの構造、材質等に詳細な検討を加え、計測に適した構造を決定し、作製した。

(3) TDR波形データの自動読み取りの試行と手法の確立

より客観的にデータを読み取る手法として、昨年度提案された微分法を実際の測定に適用し、マニュアル法との比較も行ってその有効性を検証するとともに、問題点の整理を行った。また、現有する波形記録プログラムと読み取りのための波形処理プログラムとを統合することを目指し、その仕様の検討を行った。

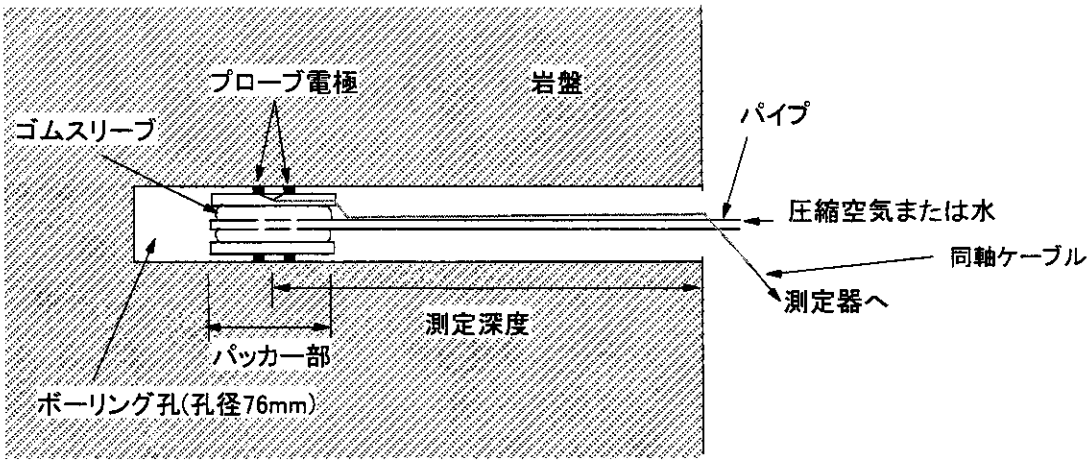
(4) 海外の研究機関や異なる業種での研究を含めた、岩盤中の含水量計測手法に関する研究情報の収集と整理

主として、本研究を立ち上げた平成5年（1993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。

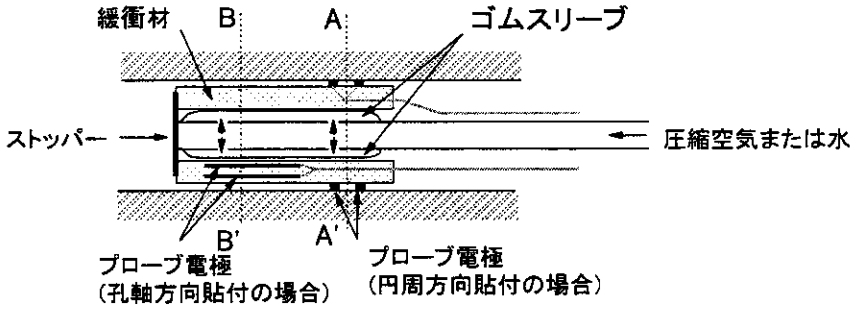
3. パッカー式プローブの構造の検討に関する試験

3.1 パッカー式プローブの概要

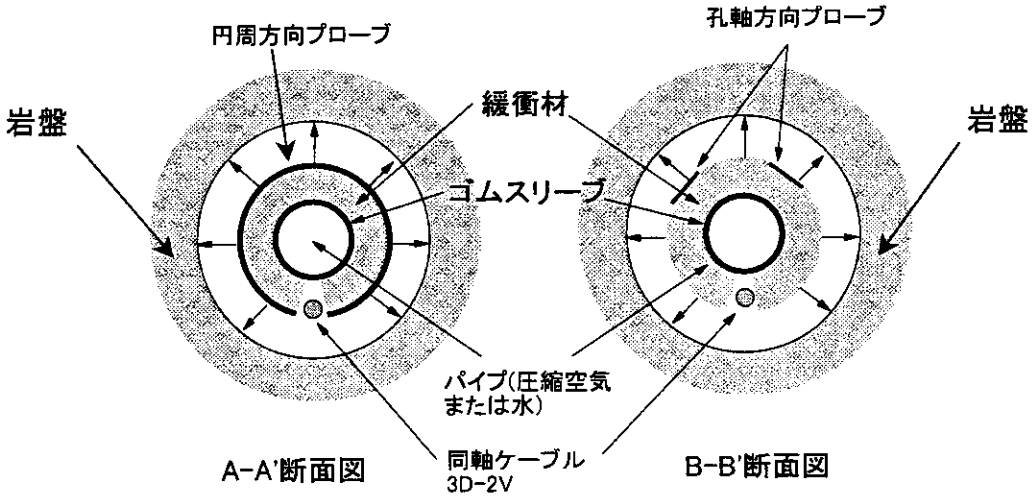
図3.1-1にパッカー式プローブによる測定概念図とパッカー式プローブの構造図を示す。



(a) 測定概念図(側面図)



(b) パッカー部詳細図



(c) パッカープローブ断面図

図 3.1-1 パッカー式プローブによる測定概念図およびプローブの構造図

パッカー式プローブは、表面プローブをパッカーでボーリング孔の孔壁に圧着させて測定するものである。その構造は、図3.1-1(b), (c)に示すように、ゴムパッカーに被せた緩衝材の表面に、円柱の周方向または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、プローブ近傍の地盤の比誘電率測定を行う。

平成10年度に、パッカー式プローブの適用性に関する検討を室内試験および原位置測定により実施した。さらに、平成11年度には実用化を目指した装置の構造や計測方法の検討を実施した。その結果、現時点では以下のような項目が検討課題として残されている。

① 電磁波の影響範囲の特定とプローブの設置方向（孔軸方向あるいは円周方向）
② 電磁波の影響範囲等を考慮した緩衝材の評価
③ 計測された読み取り値を媒質のみの比誘電率に換算する手法の検討

この章では、上記の検討課題について実施した実験の結果を示す。

3.2 電磁波の影響範囲の測定とプローブ設置方向の検討

3.2.1 概要

昨年度の研究により、TDRの2本プローブが形成する面に垂直な方向の影響範囲は、プローブの配置方向が孔軸方向、円周方向いずれの場合も、最大でプローブ間隔の1.0倍程度の広がりであることが示された。また、円周方向の場合については、測定された比誘電率について定量的な検討も行ってこれを確かめた。しかし、孔軸方向については、試験装置の形状がやや複雑であったため、定量的な検討には至らなかった。

プローブを孔軸方向に沿って設置した場合は、電磁波の影響範囲に孔の曲率が影響することも想定されるが、この影響はまだ検討されていない。このため、プローブを設置する方向として孔軸方向と円周方向のいずれがより適当なのかを判断するには、孔軸方向に設置した場合の検討が必要である。そこで、比誘電率が既知の均質材料（ポリエチレン）からなる丸棒、円筒容器を用い、孔軸方向に設置したプローブについて、プローブ間隔と測定される比誘電率との関係を調べ、電磁波の影響範囲を定量的に検討した。

3.2.2 TDRによる比誘電率の測定原理

TDRは、信号発生部からケーブルに入射したパルス波が、プローブ端部で反射して再び戻ってくるまでの時間を測定することにより、プローブを挿入した媒体中の電磁

波の伝播速度を求め、これにより媒体の比誘電率を求める方法である。TDR で反射波の時間変化を取得するには、ケーブルテスターを用いるが、これはもともとケーブルの故障個所や、ケーブルのある区間の信号の減衰率などを調べるための装置である。

ケーブルテスターでは、反射波の時間変化は、図3.2–1のようにケーブル上の位置における波形の変化として表示される。これは、ケーブル内を伝播する電磁波速度を指定することにより、時間軸に対する応答を、伝播距離に対する応答に換算して求められたものである。

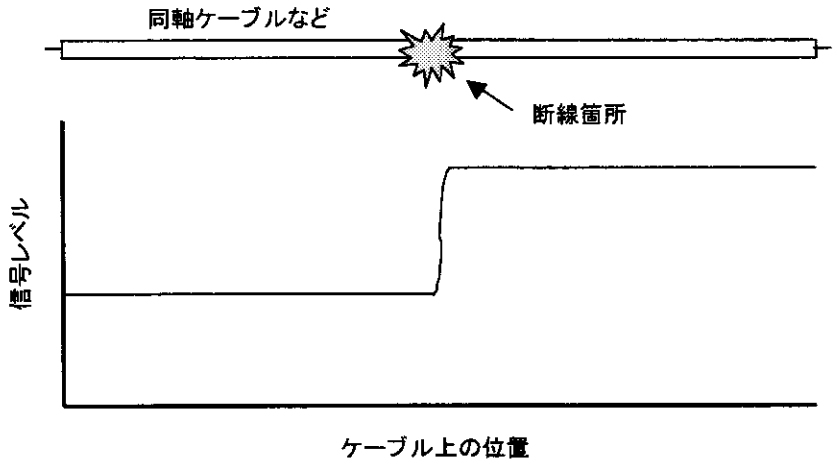


図 3.2–1　ケーブルテスターにおける波形の表示例

ところで、図3.2-2に示すように、比誘電率が既知である空気中と、比誘電率がこれと異なる媒体中で測定された TDR 波形とを比較すると、後者はプローブ終点の反射点の位置が変化し、実際のプローブ長さ L_{probe} が見かけの長さ L_{app} に変化したような波形となる。これら L_{probe}, L_{app} を用いることにより、ある媒体の比誘電率を求めることが可能となる。

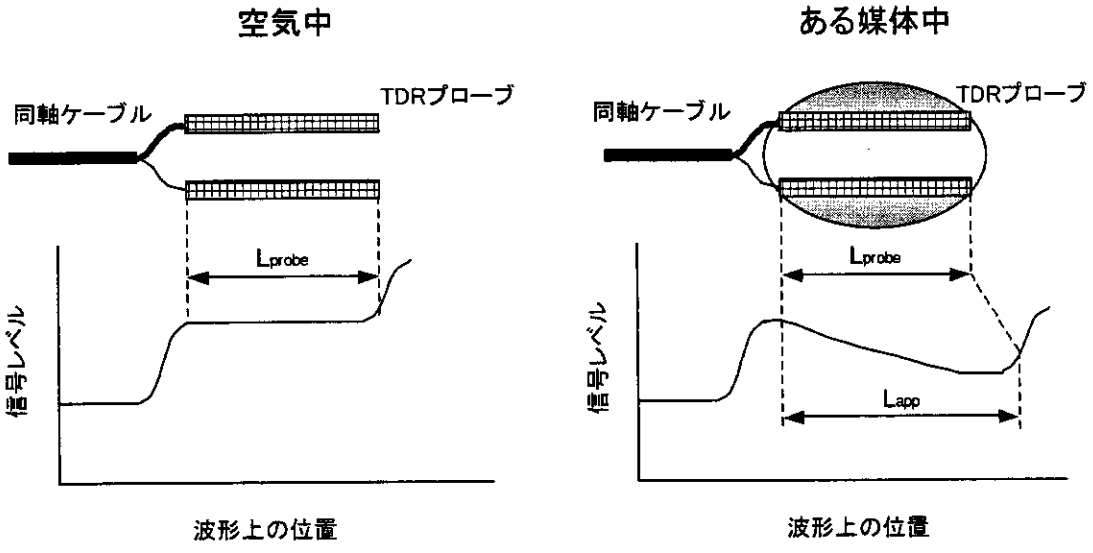


図 3.2–2　比誘電率が異なる媒体中の TDR 波形

電磁波の伝播速度と比誘電率の間には次の関係がある。

$$v_{air} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{air}}}, \qquad v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$$

ここで、

c ：光速 (= 3×10^8 m/s)

v_{air} ：空気中での電磁波伝播速度

v ：ある媒体中での電磁波伝播速度

ε_{air} ：空気の比誘電率（＝１）

ε ：ある媒体の比誘電率

プローブの見かけ長さはプローブの実際の長さと次のような関係がある。

$$L_{app} = \frac{L_{probe}}{v} v_{air}$$

ここで、

L_{probe} ：プローブの実際の長さ（実際のプローブ長）

L_{app} ：プローブの見かけ長さ（波形上のプローブ長）

したがって、ある媒体の比誘電率は次式で求められる。

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

本研究で用いた比誘電率測定および解析システムの構成を**表3.2-1**に示す。なお、比誘電率を求める際に必要なTDRの波形の読み取りには、5章で解説する微分法に基づく波形解析プログラムを用いた。

表3.2-1　比誘電率測定および解析システムの構成

名称及びメーカー	型式名	主な仕様	備　考
TDRケーブルテスター SONY-TEKTRONIX	1502B	出力インピーダンス　50Ω±1% 垂直軸 感度　0.5～500mρ/Div. 精度　フルスケールの±3% 水平軸 距離カーソル分解能　0.004 ft. 感度　0.025～50m/Div レンジ　2.5～500m 公称周波数　1.75GHz Vp　0.30～0.99可変 空気を1.0とした伝播速度 RS232Cインターフェース内臓 電源　AC100Vおよび内臓電池	
パソコン	NB-466VLD	DX2(66MHz), 8MBメモリ, 200MB HDD MS-DOS6.2	
データ収録変換ソフト MyTDR (株)ダイヤコンサルタント		RS-232Cを介してTDRデータを収録、変換する。 分解能13 bit、分割データを自動にリンクし変換する。 QBASICで開発	
波形変換ソフト TSpro 雷 興林氏作製 (非商用のフリーソフト)		SEG仕様対応の波形解析ソフト 波形記録の整理、データ読み取り、 波形対比、印刷出力	

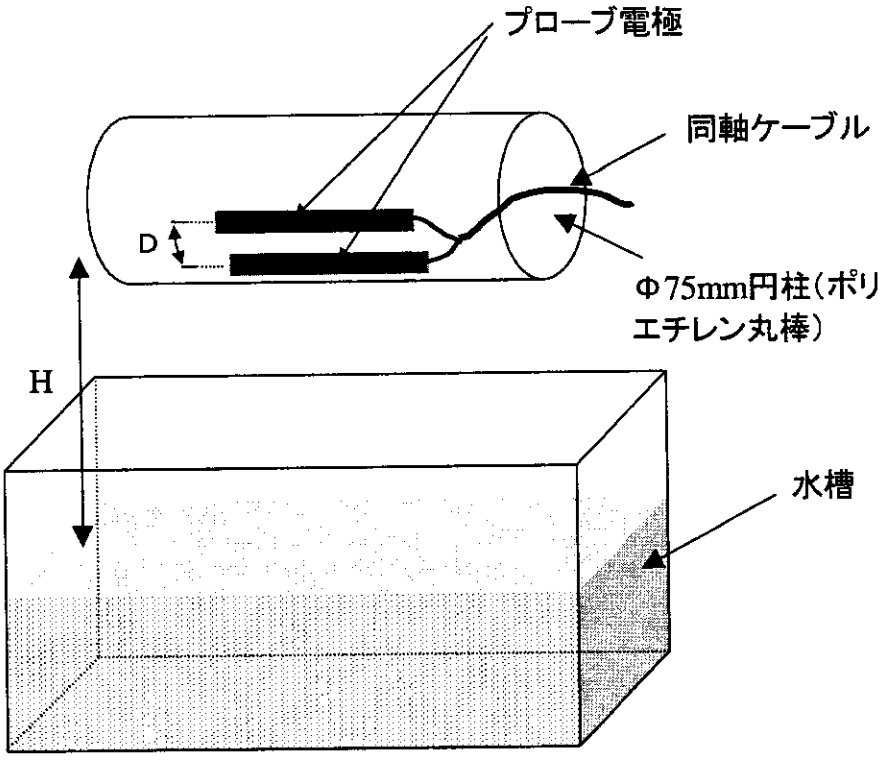
3.2.3 実験方法

3.2.3.1 周面外側に対する電磁波の影響範囲

図3.2-3に孔軸方向プローブの周面外側に対する電磁波の影響範囲を調べる実験方法を示す。プローブを中心軸間隔がDとなるようにポリエチレン丸棒の軸に平行に貼付する。ここで、間隔Dは丸棒の周面に沿った長さであり、それぞれのプローブの中心軸間の距離ではない。このプローブを水槽の水面からHの高さに設置したときの、プローブ周辺の比誘電率を測定する。プローブの周辺に存在する物質の比誘電率は、空気が1，ポリエチレンが2.3であるのに対し、水の比誘電率は81と大きいため、プローブの電磁波の影響範囲、すなわち実質的な測定範囲内に水槽の水が含まれると、それが含まれない場合に比べて測定される比誘電率が大きくなると考えられる。よって、Hを変化させたときの比誘電率の変化を調べることにより、周面外側の電磁波の影響範囲を知ることができる。

試験の組み合わせは、以下の通りとした。また、試験に用いたプローブ電極の長さと幅は、それぞれ30.0cm，6mmであった。

プローブ間隔D(2, 3, 4, 5, 7cm)×プローブの水面高さH(プローブ間隔の0.5, 1.0, 1.5, 2.0倍)＝20通り



Dが小さいときには $\varepsilon = \dfrac{\varepsilon_1 + \varepsilon_a}{2}$ と考えられるが、Dを変えた場合はどうなるか。

ε_1 : 円柱材料の比誘電率　ε_a : 空気の比誘電率(= 1)

図 3.2–3　周面外側の影響範囲を調べる実験の概念図

測定は、まず水面からの距離 H がプローブ間隔 D よりもはるかに大きい場合、具体的には H=20cm 程度の場合について実施し、次に H を 0.5D から 2.0D まで大きくしていく過程について行った。続いて H を 2.0D から 0.5D まで小さくしていく過程について行い、D = 4.0cm，5.0cm の場合については、H < 0.5D となる場合の測定も併せて行った。

なお、**図3.2–4**に示すように、プローブは丸棒の最下端よりも h だけ高い位置にあり、h の大きさは間隔 D によって変化する。この点を考慮して、プローブは 2 つのプローブの対称軸が水面から H の距離になるように、すなわち最下端から水面までの距離が H–h となるように設置した。また、**表3.2–2**には、それぞれのプローブ間隔のときのプローブの中心軸間の距離 d，プローブの対称軸と丸棒の中心軸のなす角 θ，プローブの対称軸が作る面と丸棒の最下端までの距離 h を示した。

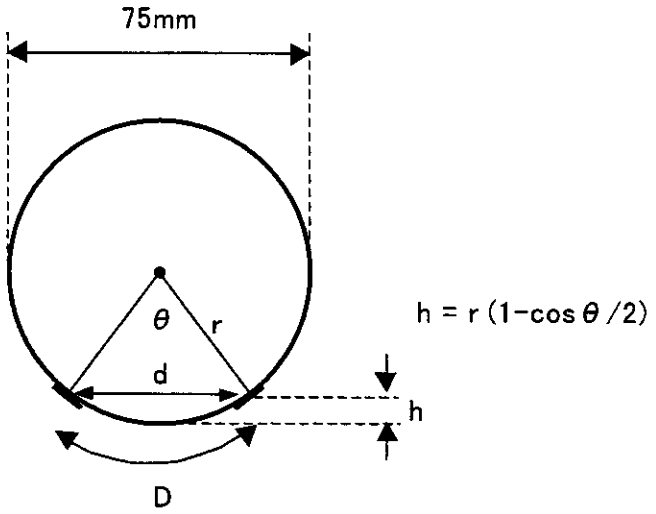


図 3.2–4　プローブの貼付け間隔と最下端からの距離との関係

表3.2–2　周面に沿ったプローブ間隔 D と d, θ, h との関係

丸棒の半径 (mm)	周面に沿ったプローブ間隔 D (mm)	プローブの中心軸間の距離 d (mm)	θ (deg)	h (mm)
37.5	20	19.8	30.6	1.3
37.5	30	29.2	45.8	3.0
37.5	40	38.1	61.1	5.2
37.5	50	46.4	76.4	8.0
37.5	70	60.3	107.0	15.2

3.2.3.2 周面内側に対する電磁波の影響範囲

図3.2–5に孔軸方向プローブの周面内側に対する電磁波の影響範囲を調べる実験方法を示す。肉厚 t のポリエチレン製円筒容器に、容器の軸に平行に間隔 D（丸棒の周面に沿った長さ）で表面プローブを貼付し、容器が中空のときと水を入れたときの比誘電率の変化を調べる。3.2.3.1 で述べたように、プローブの電磁波の影響範囲内に容器内の水が含まれる場合は、含まれない場合に比べて測定される比誘電率が高くなると考えられる。したがって、t を変化させたときの比誘電率の変化を調べることにより、周面内側の電磁波の影響範囲を知ることができる。

試験の組み合わせは以下の通りとした。また、試験に用いたプローブ電極の長さと幅は、それぞれ 30.0cm，6mm であった。

プローブ間隔 D（2, 3cm）×管の肉厚 t（0.5D, 1.0D, 1.5D）＝6 通り

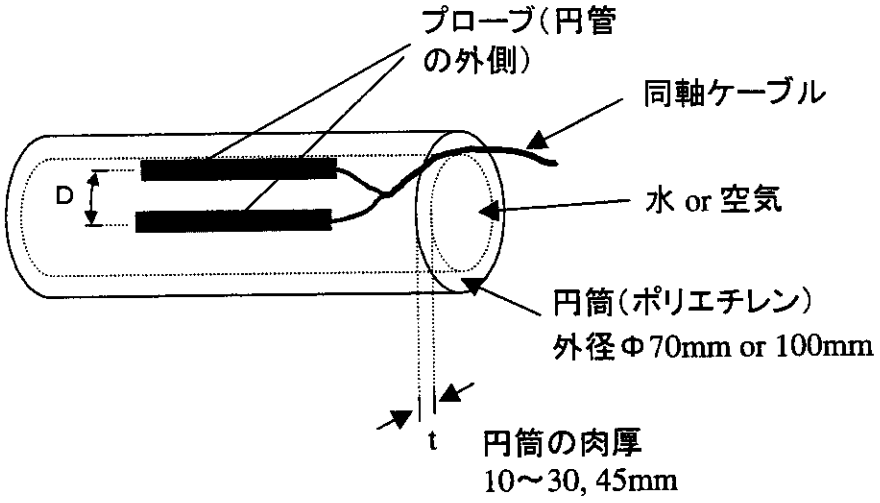


図 3.2-5　周面内側の影響範囲を調べる実験の概念図

なお、ポリエチレン容器の外径は 70mm としたが、プローブ間隔 D が 3cm で管の肉厚が 1.5D = 4.5cm の場合だけは、外径 100mm，内径 10mm のポリエチレン容器を用いた。

3.2.4 実験結果

図3.2-6に周面外側に対する影響範囲の測定結果を、また、図3.2-7と図3.2-8に周面内側の影響範囲の測定結果をグラフにして示す。それぞれの実験結果は、以下のようにまとめられる。

3.2.4.1 周面外側に対する電磁波の影響範囲

- いずれのプローブ間隔でも、H≧D の範囲では、比誘電率の値はほぼ一定の値である。この範囲での全測定値の平均値は 1.67 と、空気とポリエチレンの単純平均比誘電率 1.65 に対して 1.4%高い値を示している。
- 同一の H / D に対する比誘電率の変動幅は、中央値に対して最大で±1%程度であり、全体的には D の大きさにかかわらず、ほぼ同一の比誘電率が得られている
- プローブ間隔 D = 2cm, 3cm の測定値はほぼ同一である。これに比べて、D = 5cm, 7cm のときの測定値は、全体的に約 1%小さく、D = 4cm のときは約 1%大きい値を示している。
- H が 0.5 D 以下になると、全てのプローブ間隔で、比誘電率が H > D のときの値に比べて小さくなる傾向を示した。これは、昨年度円周方向プローブについて得られた結果と相反している。

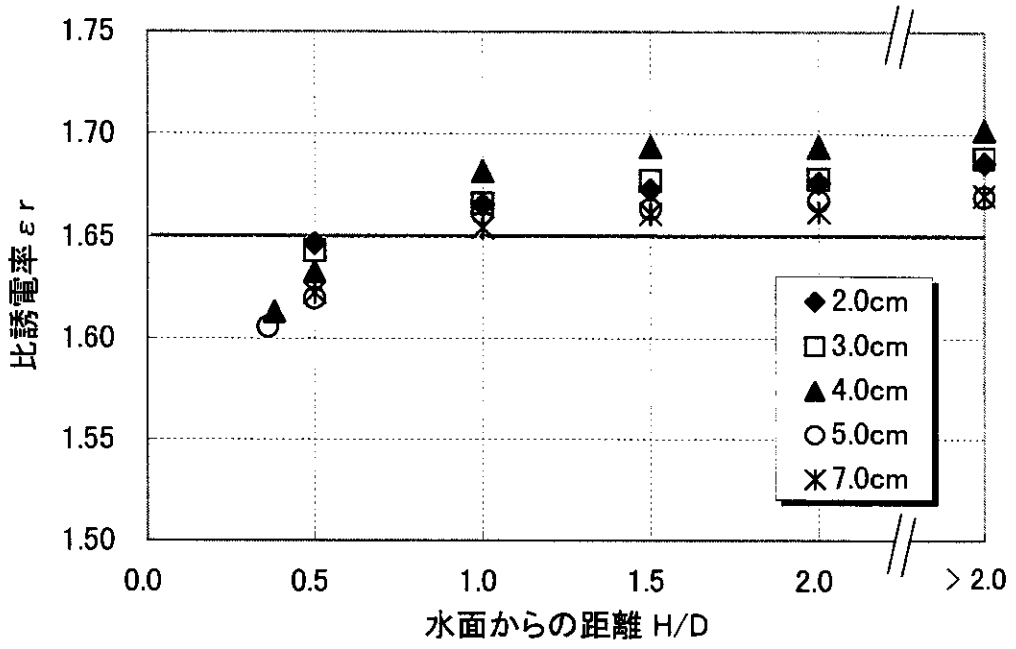


図 3.2-6　水面からのプローブまでの距離と比誘電率との関係

3.2.4.2 周面内側に対する電磁波の影響範囲

- D の大きさ、容器内の水の有無にかかわらず、t≧2.0cm では比誘電率の測定値はほぼ同一であり、この範囲で全測定値の平均値は 1.63 と、空気とポリエチレンの単純平均比誘電率 1.65 に対して 1.4%小さい値を示している。
- いずれのプローブ間隔でも、t < 2.0cm のときは、容器に水を入れた場合の方が中空の場合よりも高い比誘電率を示す。
- t / D≧1.0 の範囲では、D の大きさ、容器内の水の有無にかかわらず、比誘電率は 1.63 でほぼ一定である。またこの範囲での比誘電率の変動幅は、中央値に対して +0.3%～−0.6%である。
- t / D = 0.5 から t / D = 1.0 の変化に注目すると、中空の場合はいずれのプローブ間隔でも、肉厚が大きくなるとともに比誘電率が大きくなっている。また、容器に水を入れた場合には、D = 2cm では肉厚が大きくなると比誘電率は小さくなっているのに対し、D = 3cm ではほとんど変化がない。

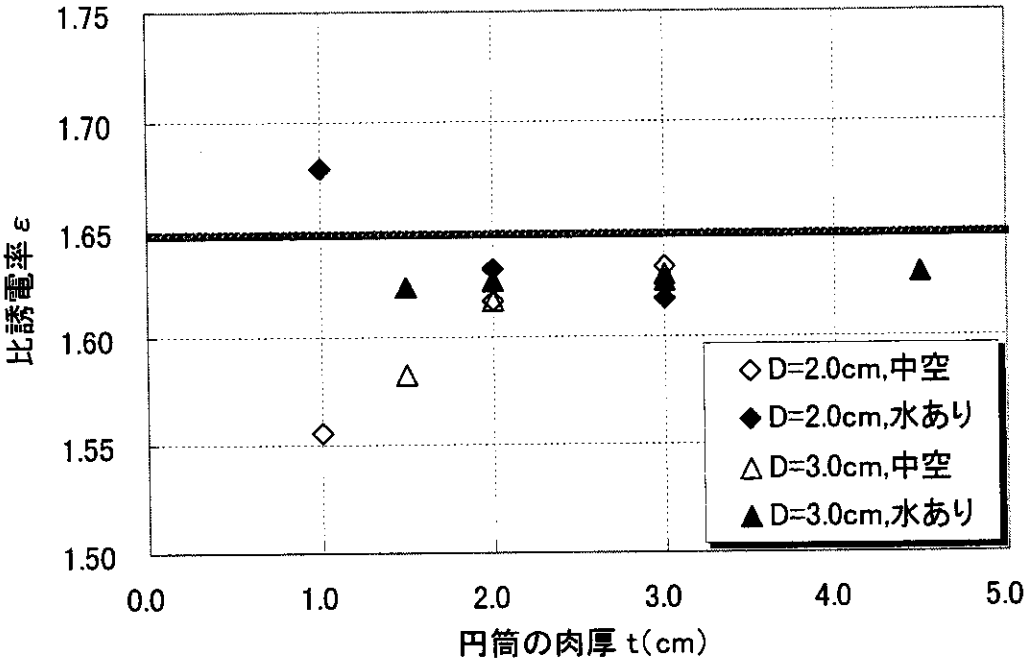


図 3.2-7　円筒の肉厚と比誘電率との関係

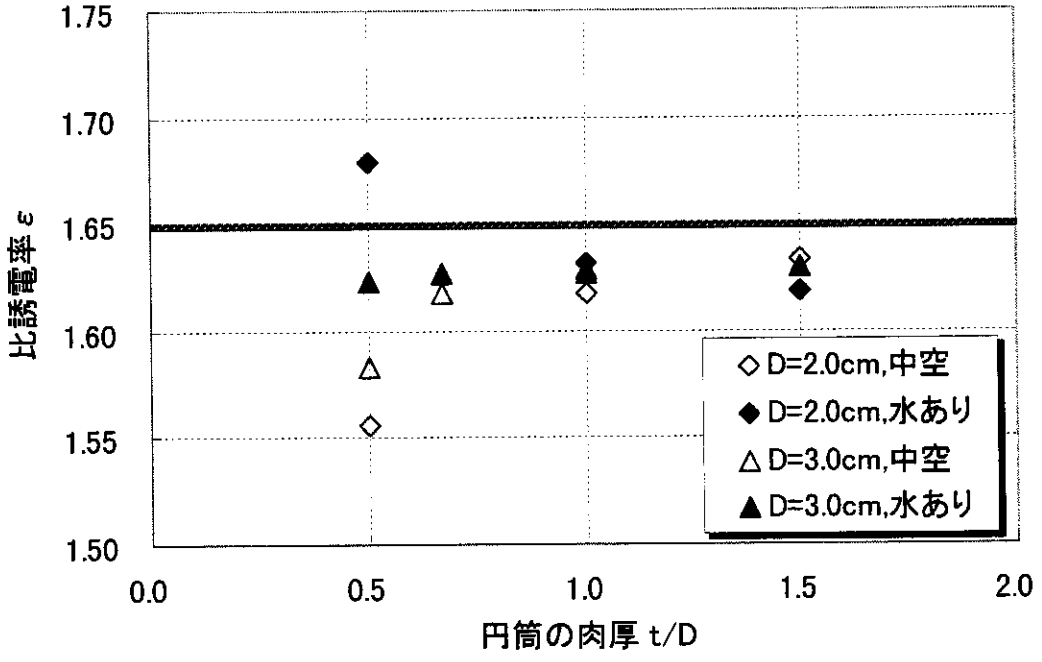


図 3.2-8　円筒の肉厚と比誘電率との関係（プローブ間隔で正規化）

3.2.5 考察

3.2.5.1 周面外側に対する電磁波の影響範囲

図3.2–6より、プローブから水面までの距離がプローブ間隔の 1.0 倍未満になると、比誘電率の変化が明瞭になっていることから、プローブの中心線が形成する面に垂直な方向の影響範囲は、最大でプローブ間隔の 1.0 倍程度の広がりであると考えられる。これは、前年度得られた結果と調和的である。

しかしながら、プローブをその間隔未満まで水面に近づけたときの比誘電率の変化は、より小さくなるという、当初想定していた変化の傾向とは正反対の結果であった。これは、昨年度に円周方向プローブを用いて行った実験結果とも調和しない。

この理由の一つとして、プローブの同軸ケーブル分岐点からプローブ電極の端点までがシールドされていなかったこと、すなわち TDR 波形はこの部分の周囲にある物質の比誘電率の影響を受けやすかったこと、さらに装置の構造上、この部分がプローブ部分よりも先に水面に近づくようになっていたことが考えられる。したがって、この部分が水面に近づくにつれて入力波の減衰が起こり、波形が全体的になだらかになって読み取り値（換算プローブ長）が小さくなった可能性が考えられる。

また、もう一つの理由として水面（気液界面）での電磁波の多重反射が考えられるが、この影響の程度を得られたデータから判断することは容易ではない。多重反射の詳細な検討を行うためには数値シミュレーションを用いる必要がある。

3.2.5.2 周面内側に対する電磁波の影響範囲

影響範囲の検討では、容器の肉厚が小さいときには水を入れた場合の方が中空の場合よりも比誘電率が高くなり、肉厚が大きくなるにつれて両者の差が小さくなって一定値に近付くという、予想された傾向が見られた。ただし、プローブ間隔が 3cm の場合には、容器に水を入れたときの比誘電率は、肉厚の変化によらずほぼ一定であった。

容器の肉厚がプローブ間隔の 1.0 倍未満になると、容器が中空のときと水を入れたときとの比誘電率の差が明瞭になっていることから、プローブが形成する面に垂直な方向の影響範囲は、最大でプローブ間隔の 1.0 倍程度の広がりであると考えられる。

t=2.0cm のとき、容器が中空のときと水を入れたときとの比誘電率の差は、D=3.0cm の場合の方がわずかに小さい。よって、プローブ間隔が大きくなると周面内側の影響範囲が小さくなることが考えられるが、変動幅が小さいことから、プローブ間隔をさらに大きくした場合について検討を行った上で判断する必要があると考えられる。

3.2.5.3 プローブ間隔の違いによる比誘電率の変化

周面外側に対する電磁波の影響範囲を調べる試験からは、わずかではあるが、プローブ間隔が大きくなるほど、得られる比誘電率が小さくなる傾向が認められる。

平成 11 年度の研究では、プローブ間隔が大きくなると、入力波の減衰が大きくなるため、反射波の立ち上がりがよりなだらかになり、読み取り値（見かけプローブ長）が減少して、結果的により小さい比誘電率が得られると考えられた。一方、今回の測定では、平成 11 年度の結果と比較して、プローブ間隔の違いによる読み取り値の変化はわずかであり、また反射波の立ち上がりにも大きな変化は見られないため、減衰による読み取り値の変化とは考えにくい。3.2.5.1 で述べたように、今回の実験では、同軸ケーブル分岐点からプローブ電極の端点までがシールドされていなかったため、測定値はこの部分と接触していたポリエチレンの影響を受けたものと考えられる。したがって、プローブ間隔の違いによる比誘電率の変化は、この部分の影響がプローブ間隔によって変化していたことによる可能性が高い。

一方、周面内側に対する電磁波の影響範囲を調べる試験によると、容器の肉厚が 2.0cm 以上であれば、得られた比誘電率はプローブ間隔によらずほぼ同一であった。しかし、今回設定したプローブ間隔の差が 1cm と小さかったため、このプローブ間隔の違いによる比誘電率の差が小さく、変化の傾向が測定のばらつきの範囲内に含まれてしまったものと想定される。

原位置測定で、間隙率が大きく含水量が高い岩種や、比抵抗が小さい岩種を対象とする場合には、入力波の減衰により波形の立ち上がりが不明瞭になることが想定される。以上のことから、さまざまな条件下での測定に適用させるため、プローブ間隔はなるべく狭くする方が望ましいと考えられる。

3.2.5.4 プローブの設置方向

プローブの設置方向としては、孔軸方向と円周方向の 2 通りが考えられる。**図3.2–9**に、今回実施した周面外側に対する電磁波の影響範囲を調べる試験と、昨年度実施した円周方向プローブについての試験結果を示す。同図に示したデータは、いずれもプローブと水面との距離がプローブ間隔よりも十分に大きいときのものである。

プローブ設置方向が円周方向の場合、得られる比誘電率は周面内部の物質と周面外部の物質との単純平均よりも小さく、またプローブ間隔が大きくなるとともに測定される比誘電率が小さくなる傾向を示している。この原因は円周方向プローブがやや複雑な電磁波の影響範囲を有していることによるものと想定されている。これに対し、孔軸方向の場合は、いずれのプローブ間隔においても周面内部の物質と周面外部の物質との単純平均にほぼ近い比誘電率が得られており、比較的単純な方法によって周面外部の物質の比誘電率を求められると考えられる。したがって、比誘電率の算出方法だけを考慮するのであれば、孔軸方向プローブの方がより望ましいと言える。

また、孔軸方向プローブは、TDR 測定に必要な精度に応じてプローブ長を長くすることが出来るが、円周方向プローブは、円周長の制約を受けることから、この点でも孔軸方向の方が有利である。

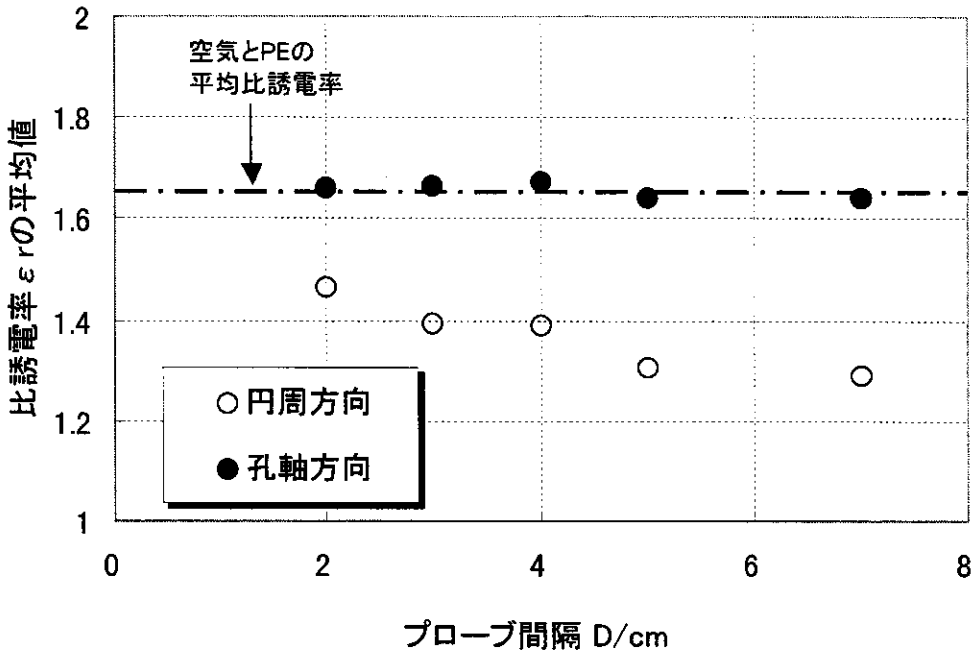


図 3.2-9　プローブ間隔と比誘電率との関係

ただし、円周方向プローブは、a) 短い深度区間の比誘電率を測定できる、b) 1 つのパッカーに多深度のプローブをつけることができる、c) 円周方向の平均的な比誘電率が得られると予想される、という利点を有していると考えられるため、今後さらなる検討によって、より簡便に適用できるのであれば採用するべき形態と言える。

3.2.6 追加検討とその結果

3.2.6.1 実験方法

先に周面内側の電磁波の影響範囲を調べる実験を行ったが、プローブ間隔の違いによる電磁波の影響範囲の変化は明らかでなく、プローブ間隔をさらに大きくした場合についても検討を行う必要があることが分かった。そこで、プローブ間隔に大きな差を付けた 2 つのケース、具体的には、プローブを軸対称に配置した場合と、プローブの中心軸と円筒の中心軸がなす角度が 30°になるように配置した場合（外径 70mm の円筒を用いた場合、外周に沿ったプローブ間隔は 1.8cm となる）について、3.2.3.3 で示したような円筒を用いた方法により、電磁波の影響範囲を調べた。

3.2.6.2 実験結果と考察

図3.2-10に、円筒容器の肉厚の変化に対する比誘電率の変化を示した。プローブ間隔 D が 1.83cm の場合、容器の肉厚が大きくなるにつれて、容器が中空の場合と、中に水を入れた場合の比誘電率の差が小さくなって一定値に近付くという、予想された

傾向が見られた。また、比誘電率は、t > D の範囲では容器内の水の有無によらず 1.63 の一定値を示した。これは空気とポリエチレンの平均比誘電率にほぼ等しく、先に行った実験結果と調和的であった。

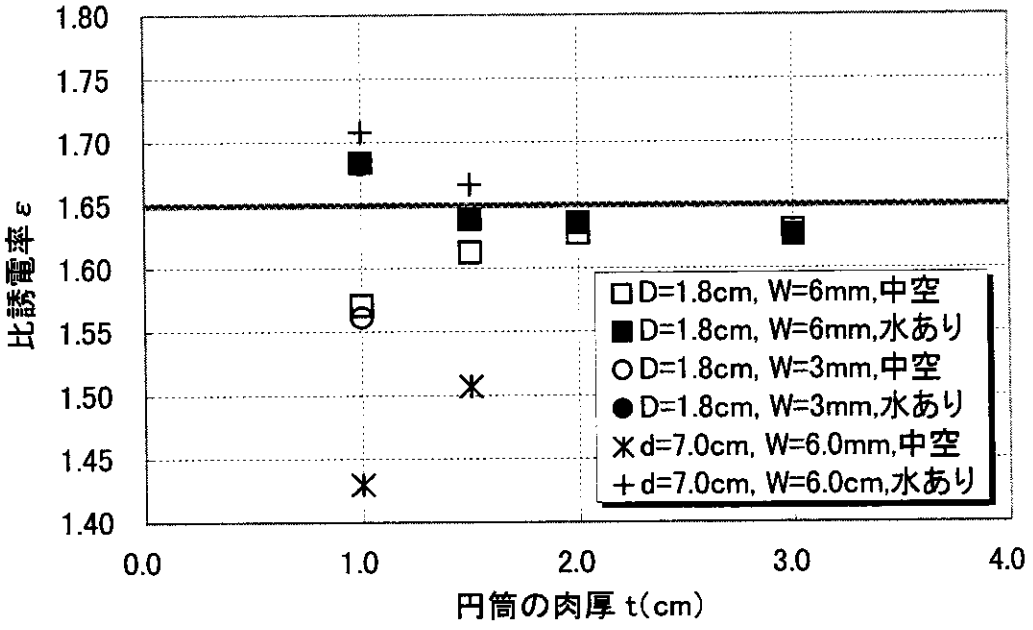


図 3.2–10　プローブ間隔と比誘電率との関係

D=1.8cm，t=1.5cm の場合、容器に水があるときの比誘電率は、中空のときよりも 1.6%高い値を示した。t > D の場合の測定値と比較すると、この差は有意であると考えられ、周面内側に対する電磁波の影響範囲は、少なくとも 1.5cm = 0.82D よりも大きいことがわかる。しかしながら、円筒内部に比誘電率の大きい水が存在したことを考慮すると、中空のときとの比誘電率の差はわずかであり、1.5cm を越える領域が測定値に与える影響は小さいと考えられる。

プローブ電極を軸対称にした場合、すなわちプローブ間の距離が d = 7.0cm のとき、容器が中空のときの比誘電率は、D = 1.8cm の場合よりも 0.1～0.15 小さく、容器に水を入れたときは、D = 1.8cm の場合よりもやや大きくなった。また、容器が中空のとき、肉厚の変化に対する比誘電率の変化は、D = 1.8cm を始めとして、プローブ間隔が小さい場合よりも大きかった。

以上のことから、プローブ電極を軸対称に配置した場合、測定される比誘電率はプローブ間に存在する空気や水の影響を受けており、その程度はプローブ間隔が小さい場合よりも大きいと考えられる。したがって、パッカー式プローブで測定される比誘電率が周面内側の材質の影響を受けないようにするには、プローブの間隔をなるべく狭くすることが望ましいと言える。ただし、間隔を小さくすると円周方向の測定領域も小さくなるため、測定対象の不均質性のスケールによっては、測定値のばらつきが

大きくなる可能性があることを考慮するべきである。

なお、プローブ電極幅の影響を調べるために、D=1.8cm，t=1.0cm の場合についてプローブ電極の幅 W=3.0mm の測定も併せて行ったところ、容器が中空の場合でも、水が入っている場合でも、W=6.0mm のときとほぼ同じ比誘電率が得られた。今回設定した条件では、プローブ間隔が最も小さいときでプローブ電極幅の 3 倍程度であり、少なくともこれよりもプローブ間隔が大きい場合には、測定値に与える影響はほとんど無いと考えられる。

3.2.7 まとめ

孔軸方向プローブについて、プローブ間隔の違いによる周面内側と外側に対する電磁波の影響範囲の変化を検討し、以下の結論を得た。

1) 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の 1.0 倍程度である。
2) 周面内側が均質である場合、プローブ間隔の違いによる比誘電率の変化は小さい。
3) 孔軸方向プローブを用いて測定される比誘電率は、周面内部の物質と周面外部の物質との単純平均にほぼ等しい。これは平面の場合と同じ計算方法であり、測定値に対する孔の曲率の影響は小さいと考えられる。
4) 周面内側に対する影響範囲を小さくするために、プローブ間隔は、なるべく小さい方が望ましい。ただし、測定対象の不均質性のスケールによっては、ばらつきが大きくなる可能性がある。
5) 少なくとも、プローブ間隔がプローブ電極幅の 3 倍程度であれば、プローブ電極幅が測定値に与える影響はほとんど無いと考えられる。

3.3 電磁波影響範囲等を考慮した緩衝材の評価

3.3.1 概要

平成 10 年度に作製したパッカー式プローブの原型は、前掲**図 3.1–1(c)**にあるように、ゴムスリーブの上に厚さ 20mm の発泡材料（発泡スチロール）を緩衝材として巻き付け、その表面にプローブを貼付した構造であった。この緩衝材は、1) パッカーを構成するゴムや中央の管路の素材（平成 10 年度のプローブではアクリル）がプローブの電磁波の影響範囲に入らないようにする、2) パッカーに圧力をかけたときに、緩衝材が孔壁面の細かい凹凸に追従して変形し、プローブと岩盤の密着性が高められる、ことを目的として導入されたものであった。

しかし、このパッカー式プローブを用いた実験では、パッカーに圧力をかけた際に、発泡スチロールが圧縮・破壊されていたにもかかわらず、測定された比誘電率は、空気と岩盤の比誘電率の平均値にほぼ等しかったことがわかっており、先に述べた 1) のような機能が発揮されていたかどうか疑問が残った。

このため、平成11年度は緩衝材の必要性を検討するために、緩衝材を省略してプローブを薄いプラスチック板に取り付け、エアパッカーと水パッカーを用いて空中での比較試験を行った。その結果、パッカーゴムおよびその内部の加圧媒体は、プローブの電磁波の影響範囲内に入っていることがわかったが、その影響の度合いを定量的に把握するには至らなかった。また、円周方向に貼付したプローブは、パッカーの加圧によって同軸ケーブルとの接合部分が破損しやすくなることも判明した。

したがって、プローブを防護する上での緩衝材の必要性が確認されたが、緩衝材がプローブの電磁波の影響範囲に及ぼす影響については十分に解明されていない。また、緩衝材を構成する物質に求められる特性についても、十分な検討は行われていない。そこで、ここではパッカー式プローブでの緩衝材の使用を前提とし、前節で実施した影響範囲の検討結果を踏まえて、その材質と厚さについて物理特性や実験により検討した。

3.3.2 緩衝材物質の検討

岩盤を対象とした TDR 原位置試験装置に用いられる緩衝材は、以下のような特性を備えることが求められる。

a) 適度の柔らかさと弾力性をもち、永久変形や破壊を容易に起こさない
b) 軽量で可搬性に優れている
c) 耐水性、耐摩耗性、耐薬品性に優れ、劣化しにくい
d) TDR プローブから放射される電磁波を吸収しにくい
e) 吸水性が小さく、TDR 読み取り値に与える影響が小さい

緩衝材の材質としては、大まかに分けて発泡性のプラスチック、ゴム、シリコン等が考えられ、その種類はきわめて多種多様である。このうち、シリコンは高価であり、弾力性にやや劣る。また、ゴムは弾力性には優れるが、発泡性が低いため重く、廉価なものは水溶液や紫外線により劣化しやすい。そこで、大まかな分類としてプラスチックを選択することとした。さらに、発泡性のプラスチックにもポリウレタン（ポリエーテル系，ポリエステル系)、ポリスチレン、ナイロン、ポリエチレン、あるいはそれらの混合物など多くの種類の物質が考えられるが、ここでは代表的なものを検討対象とした。

仮に、緩衝材として望ましい特性が決まったとしても、それを満たすような発泡性プラスチックを自ら製造することは、コスト面から非現実的である。そこで、緩衝材の材料は、現存する具体的なプラスチック製品から、望ましい特性を満たすようなものを選定することとする。プラスチックには、発泡率や物質の混合比、架橋（ポリマーの途中を化学結合によってつなぎ合わせること）の有無などの違いによって、様々な物理特性の製品が存在する。そのため、緩衝材の材料となるプラスチック製品を選

定するに当たっては、まず電気的、化学的な特性等の考察から、緩衝材により適した物質を絞り込み、次にその他の物理特性等を考慮して具体的な製品を選定するという手順を取った。

プラスチックの多くは誘電体であり、固有の電気的特性を持つ。**表3.3-1**に、主なプラスチックについて、パッカー式プローブの測定値に影響を与えると考えられる比誘電率と、電磁波の減衰に関連する誘電損失の測定例を示す。

表3.3-1　主要なプラスチックの比誘電率 ε_r と誘電損失 $\tan\delta$ (25℃)

種類	(略称)	25℃	
		ε'_r	$\tan\delta$
ポリエチレン	(HDPE)	2.3	3.3×10^{-3}
ポリプロピレン	(PP)	2.9	$<1\times10^{-4}$
ポリスチレン	(PS)	2.3	1.3×10^{-3}
ポリアセタール	(POM)	3.7	3.4×10^{-2}
ポリカーボネート	(PC)	3.6	7.6×10^{-3}
PPS樹脂	(PPS)	3.5	1.6×10^{-3}
ABS樹脂	(ABS)	2.7	3.8×10^{-3}
ポリメチルメタクリレート	(PMMA)	3.3	7.7×10^{-3}
6-ナイロン	(PA6)	3.2	1.9×10^{-2}
6, 6-ナイロン	(PA66)	3.3	1.8×10^{-2}
ポリ塩化ビニル	(PVC)	3.6	1.1×10^{-2}

測定条件:周波数:40MHz、印加電圧　500mV　<埼玉県工業技術研究所所有>

緩衝材は本来パッカー式プローブで測定対象としない物質なので、プローブの電磁波の影響範囲内にあっても、岩盤の比誘電率測定の妨げにならないことが要求される。したがって、比誘電率がなるべく空気中の比誘電率 1 に近く、かつ電磁波の減衰がなるべく小さいものが望ましい。

表3.3-1で、比誘電率の値が 1 に近いものは、ポリエチレン、ポリスチレン（発泡スチロールの主成分)、ABS 樹脂（代表的な難燃性樹脂）などである。また、電磁波の減衰に関連する誘電損失は、ポリプロピレンが最も小さく、ポリスチレンや PPS 樹脂、ポリエチレン等がそれに続いている。よって、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンの電気的特性が優れている。

これらの物質のうち、ポリエチレンは電気的特性に優れているため、軟質なものは同軸ケーブル中の誘電体として広く用いられており、さらに耐水性、耐磨耗性、耐薬品性が高いことから、各種の包装材、緩衝材として広範に利用されている。また、廉価である上に、発泡材料の種類も豊富である。一方、ポリプロピレンはプラスチックの中で最も軽量であるとともに、耐熱性に優れるが、太陽などの紫外線に弱く、発泡材料の種類がポリエチレンと比較するとやや少ない。また、ポリスチレンは廉価であ

り、種類も豊富であるが、耐摩耗性、耐薬品性に劣っている。以上の検討内容について整理し、表3.3–2に示した。

表3.3–2　3種のプラスチックの特性検討

	電気特性	耐摩耗性	耐薬品性	耐紫外線	種類	価格	総合
ポリエチレン	○	◎	○	○	○	○	◎
ポリプロピレン	○	○	◎	×	△	△	○
ポリスチレン	○	×	×	△	◎	◎	△

よって、緩衝材の物質としてポリエチレンを採用した。

さらに、緩衝材の厚みは周面内側に対するプローブの電磁波の影響範囲よりも大きいことが望ましいため、緩衝材はパッカーが膨張しても大きく変形しない程度の圧縮硬度を持つ必要がある。平成 10 年度の研究報告では、パッカーに与える空気圧を160kPa としていたが、これは後に 4.1.6 項で述べるように、パッカーの径が小さかったために必要とされたものであり、パッカーの径を大きくし、かつパッカーゴムの硬度を小さくすれば、プローブを圧着させるのに必要な圧力は小さくなると考えられる。そこで、パッカー使用時に緩衝材に加わる圧力を数十 kPa と想定し、緩衝材の圧縮硬度の選定基準を 100kPa 以上とした。

この他に、材料の吸水性がなるべく小さいこと、発泡率がなるべく大きいことを緩衝材の選定基準とした。

前述した物理特性を有する具体的な製品として、発泡ポリエチレンであるサンペルカ L–1400（三和化工株式会社製）を選定した。表3.3–3に同製品の代表的な物性値を示す。発泡ポリエチレンの製造業者はいくつかあり、販売されている製品も多様であるが、製造業者を選定するにあたっては、製品の入手が容易で廉価であること、多様な特性の製品を製造しており、選択の幅が広いことを判断基準とした。

表3.3–3　緩衝材として用いた発泡ポリエチレンの物性値

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

*) 公表値は従来単位系であるが、ここではSIに換算して表示した。 なお、kPa = kN/m^2 である。

3.3.3 緩衝材を用いた場合の円周内側に対する電磁波の影響範囲

3.3.3.1 実験方法

緩衝材を用いたときの円周内側に対する電磁波の影響範囲を検討するために、**図 3.3–1**に示すように、プローブを厚さ 5.0cm の発泡スチロールの台に貼り付け、これに厚さ 0.5～3.0cm の緩衝材の板を挟むようにして岩石ブロック（白河熔結凝灰岩）を載せたときの比誘電率を測定した。ここで、円筒形の緩衝材を用いた実験としていないのは、**3.2** 節での検討結果から、プローブを孔軸方向に貼り付けた場合、得られる比誘電率は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く、孔の曲率の影響はほとんどないことがわかっているためである。この実験において、緩衝材の外側、すなわち測定対象に対応するのは発泡スチロールであり、岩石ブロックは比誘電率が高い材料として、緩衝材の内側に対する電磁波の影響範囲を確認する目的で用いた。発泡スチロールや緩衝材の比誘電率は、空気に近いため、プローブの電磁波の影響範囲に岩石が含まれれば、比誘電率は高くなると考えられる。したがって、緩衝材の厚さの違いによる比誘電率の差を調べることにより、電磁波の影響範囲を検討することが可能となる。

なお、プローブ間隔は、**3.2.6** 項の追加検討の際に用いた 1.8cm、すなわち直径 70mm の材料に、プローブの中心軸と円筒の中心軸がなす角度が 30°になるように配置した場合と、直径 92mm の材料に同様に設置した場合の間隔 2.4cm を用いた。

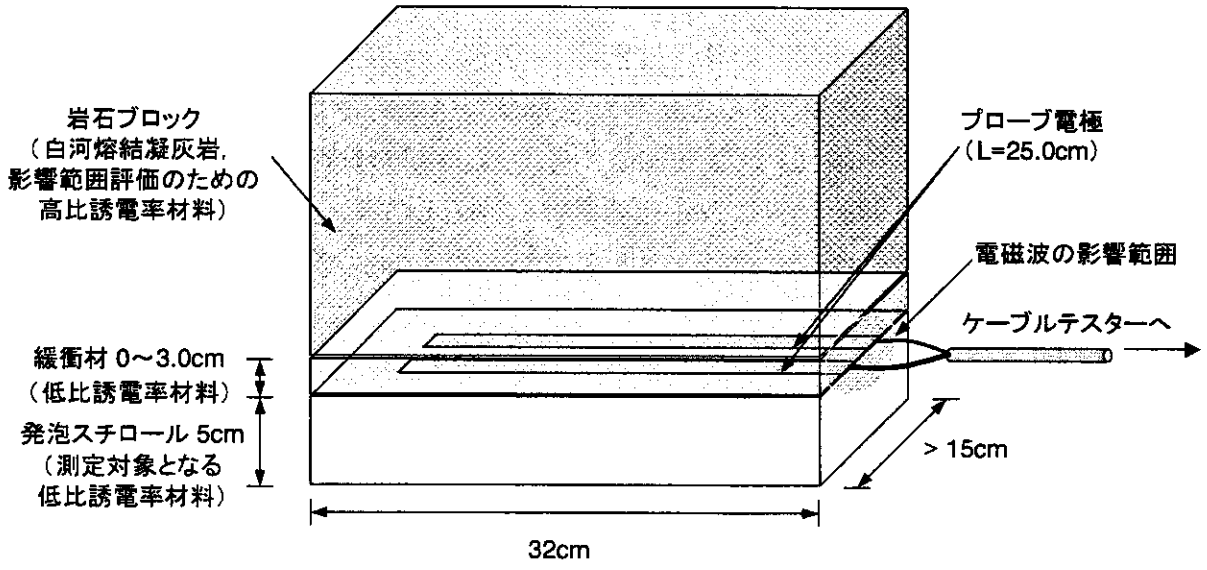


図 3.3–1　緩衝材をの厚さを変えたときの電磁波の影響範囲を調べる実験

3.3.3.2 実験結果

図3.3–2に、それぞれの試験条件における測定結果をグラフに示す。

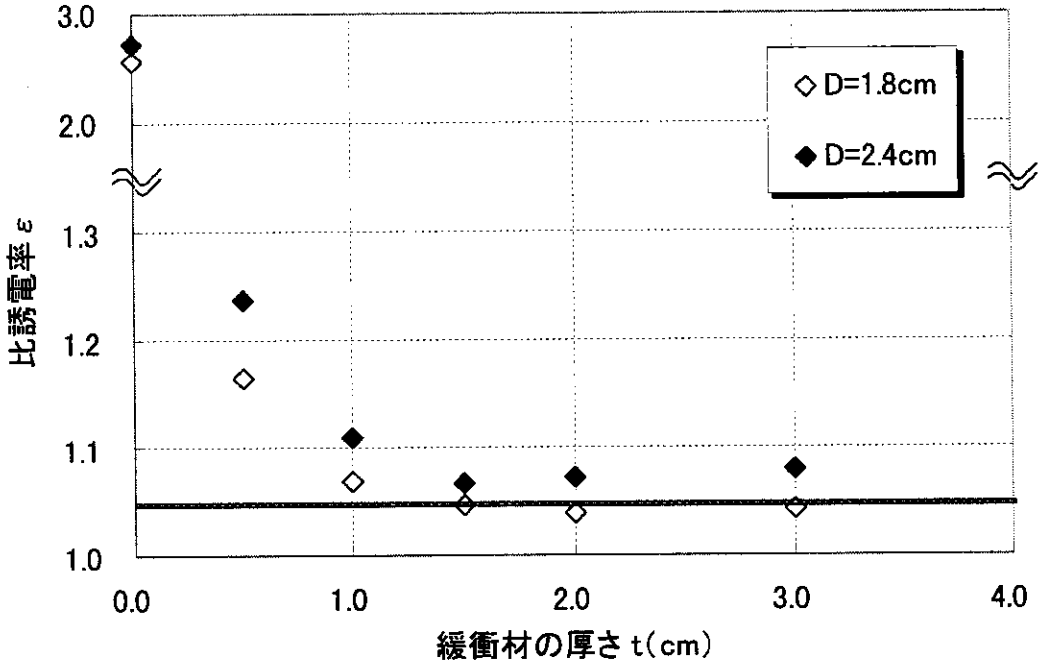


図 3.3–2　緩衝材の厚さと測定された比誘電率との関係

図3.3–2で、緩衝材の厚さ t = 0.0cm とは、プローブを貼り付けた発泡スチロールに、緩衝材を挟まずに直接岩石ブロックを載せた場合を意味する。また、図中の横線は、緩衝材とした発泡ポリエチレンの見かけ密度（0.072g/cm^3）と、固体ポリエチレンの比誘電率の代表的な値（2.3）から推定した発泡ポリエチレンの比誘電率（1.1）と、空気の比誘電率との平均値（1.05）である。これは、電磁波の影響範囲に岩石ブロックが含まれなくなったときに得られる比誘電率と考えられる。

D=1.8cm，2.4cm のいずれのプローブ間隔でも、t≦1.5cm の範囲では t が大きくなるにつれて比誘電率は急激に減少する傾向を示した。また、t>1.5cm の範囲では、比誘電率は想定される発泡ポリエチレンと空気との平均比誘電率に近い、ほぼ一定の値となった。なお、D=1.8cm と D=2.4cm の測定値を比較すると、D=2.4cm の方が全体的に高めの値を示した。

3.3.3.3 考察

3.2 節において、プローブの中心線が形成する面に垂直な方向の電磁波の影響範囲は、最大でプローブ間隔の 1.0 倍程度であるという結論が得られた。図3.3–2に示した結果でも、緩衝材の厚さがプローブ間隔以上であれば、想定される発泡ポリエチレンと空気との平均比誘電率に近い値が得られており、3.2 節の結論と調和的である。

また、緩衝材の厚みがプローブ間隔よりも小さい 1.5cm 程度であっても同様の測定値が得られていることから、パッカー内部の材料の存在がプローブの測定値に影響しないようにするためには、緩衝材の厚みは 1.5cm 程度でも実用上問題ない可能性がある。これは電磁波の影響範囲が 1.5cm 程度であることを意味するものではないが、3.2.5 節でも、D=1.8cm のときの電磁波の影響範囲は 1.5cm を上回るものの、1.5cm を超える部分が測定値に与える影響はわずかであるとの検討結果が得られている。実際のパッカー式プローブでは、緩衝材の内側はパッカーゴムであり、これは水よりもはるかに小さい比誘電率であることを考慮すれば、緩衝材の厚さを 1.5cm としても測定値に大きな影響はないと考えられる。

3.3.4 計測された読み取り値を媒質の比誘電率に換算する手法の検討

これまでの検討から、孔軸方向プローブを用いた測定した比誘電率は、周面内部の物質と周面外部の物質との単純平均に相当すると考えられる。ここでは、孔軸方向のパッカー式プローブを用いて測定した比誘電率から、測定対象の比誘電率を求める方法を示す。

緩衝材の比誘電率が ε_i と既知であり、実際の長さ L_{probe} のプローブを用いて測定された TDR の読み取り長が L_{app} であったとする。測定対象となる周面外側の物質の比誘電率を ε とすると、3.2.2 項で解説したように、L_{probe} と L_{app} から、見かけの比誘電率 ε_{app} は次式で求められる。

$$\varepsilon_{app} = \frac{\varepsilon + \varepsilon_i}{2} = \left(\frac{L_{app}}{L_{probe}} \right)^2$$

したがって、測定対象の比誘電率は、次式で求められる。

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

このように、緩衝材の比誘電率が既知であれば、容易に周面外部の物質の比誘電率を求められる。

3.4 パッカー式プローブの構造の検討のまとめ

パッカー式プローブの構造と緩衝材の材質についての検討結果は、以下のようにまとめられる。

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の 1.0 倍程度である。(3.2.5 項)
2) 孔軸方向プローブを用いて測定される比誘電率は、周面内部の物質と周面外部の物質との単純平均にほぼ等しい。これは平面の場合と同じ計算方法であり、孔の

曲率の影響は小さいと考えられる。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。(3.2.5 項)

3) 周面内側に対する影響範囲を小さくするために、プローブ間隔は、なるべく小さい方が望ましい。ただし、測定対象（岩盤）の不均質性のスケールによっては、測定値のばらつきが大きくなる可能性がある。(3.2.6 項)

4) 測定対象の不均質性のスケールの影響が無視できる場合、少なくともプローブ間隔がプローブ幅の 3 倍程度であれば、プローブ幅が測定値に与える影響はほとんど無いと考えられる。(3.2.6 項)

5) 緩衝材の材質としては、電気的特性や耐摩耗性に優れ、かつ安価な発泡ポリエチレンが適当である。(3.3.2 項)

6) パッカー式プローブの緩衝材に求められる特性を検討し、これに基づいて適当な緩衝材の材料を選定した。緩衝材の厚さはプローブ間隔が 1.8～2.4cm であるとき、それと同程度であれば良く、また厚さが 1.5cm 程度でも実用上は問題ないと考えられる。(3.3.3 項)

7) 孔軸方向のパッカー式プローブを用いた測定において、緩衝材の比誘電率が既知であれば、実際のプローブの長さと見かけ上のプローブ長を用いて、周面外側の物質の比誘電率を計算することが可能である。(3.3.4 項)

4. パッカー式プローブの試作

4.1 パッカー式プローブの仕様の決定

これまでのパッカー式プローブの構造に関する検討結果をとりまとめ、試作機の仕様を決定した。

4.1.1 測定対象とする孔径

測定対象としては、地質調査や地盤調査で一般的に用いられるなるべく広範囲の孔径に対応することを目標とした。しかし、4.1.6 項で述べるパッカーの構造上の要件から、測定可能な最小の孔径を HQ（直径約 98mm）とし、これ以上の孔径に対応できるようなものとした。

4.1.2 プローブの設置方向

プローブの設置方向については、これまでの研究で以下の結論が得られている。

1) パッカー式プローブの原型を用いた原位置試験の結果によれば、孔軸方向プローブは円周方向プローブよりも比較的よい精度で比誘電率を測定できた。（平成 10 年度研究報告 p.3-47）
2) 孔軸方向プローブの場合、測定される比誘電率は、周面内部と外部の物質の単純平均にほぼ等しく、円周方向プローブの場合よりも容易に周面外側の物質の比誘電率を計算できる。（平成 11 年度研究報告 pp.34～35，本報告）
3) 孔軸方向プローブは、TDR 測定に必要な精度に応じてプローブ長を長くすることが出来るが、円周方向プローブは、円周長の制約を受ける。（本報告）

以上のことから、プローブの設置方向は孔軸に沿った方向を採用した。

4.1.3 プローブの電極幅およびプローブ間隔

プローブの電極幅と間隔については、電磁波の影響範囲や波形の読み取りやすさとの関係に着目して、以下の結論が得られている。

1) 棒状プローブを用いた検討により、ロッド径が小さいほど反射波形のピークと最小値との差が大きくなるので、波形の読み取りが容易になる。（平成 8 年度研究報告）
2) プローブの中心軸が形成する面に垂直な方向の電磁波の影響範囲は、周面外側、内側のいずれに対しても、最大でプローブ間隔の 1.0 倍程度である。（平成 11 年度研究報告 pp.34～35，本報告）
3) 測定値が周面内側に存在するパッカーや中央の管路の素材の影響を受けないようにするためには、プローブ間隔をできるだけ小さくすることが望ましい。

ただし、測定対象が持つ円周方向の不均質性のスケールによっては、測定値のばらつきが大きくなる可能性がある。(本報告)

4) 表面プローブを用いた検討により、少なくともプローブ間隔がプローブ幅の 3 倍程度あれば、プローブ幅が測定値に与える影響はほとんど無いと考えられる。(本報告)

以上のことから、プローブ間隔はできる限り小さくするべきであるが、岩盤の亀裂部分などでは不均質性が大きくなるため、ある程度の間隔を設けておく必要があると考えられる。そこで、3.2.6 項と 3.3.3 項での検討で用いた、プローブの中心軸と孔軸との成す角 θ が 30°となる配置を採用した。

θ =30°の場合、パッカープローブの緩衝材の外径を I_d とすると、円周に沿ったプローブ間隔 D とプローブの中心軸間の距離 d は、次式で求められる。(前掲図 3.2-4を参照)

$$D = \frac{\theta}{360}\pi I_d = \frac{\pi I_d}{12}, \quad d = I_d \sin\frac{\theta}{2} = \frac{I_d\left(\sqrt{6}-\sqrt{2}\right)}{4}$$

最小の孔径として HQ を想定すると、緩衝材の外径はφ92mm 程度が適当である。このとき、D=2.41cm, d=2.38cm となり、両者がほぼ一致することから、プローブはほぼ平面上に設置されていると考えて良い。

また、プローブの電極幅は、小さい方が波形の読み取りが容易になる利点があるが、表面プローブの場合は細すぎると取扱いが困難になることから、これまでの検討で主に用いてきた 6mm を採用した。

4.1.4 プローブ電極の長さ

プローブの電極の長さについては、TDR 波形の読み取り精度との関係に着目して、以下の結論が得られている。

1) ロッド式プローブを用いた検討によれば、TDR 読み取り長さと実際のプローブの長さは比例関係にあり、プローブの長さが読み取り長に与える影響は認められない。ただし、プローブ長が 5.0cm 以下になると、ケーブルの分岐部分とと先端での反射点の差が小さくなるので、読み取りが困難になる恐れがある。(平成 8 年度研究報告)

2) 円周方向に貼り付けたプローブを用いた検討においても、実際のプローブの長さと TDR 読み取り長さは比例関係にあり、プローブの長さが読み取り長に与える影響は認められない。(平成 11 年度研究報告 pp.27～28)

以上のことから、プローブ長については孔の深度以外に大きな制限要因はなく、あ

る程度の長さがあれば測定には支障がないと考えられる。ただし、あまり長すぎると、低比抵抗性の岩盤を対象とする場合には、減衰によって反射波の立ち上がりが不明瞭になることが想定される。また、逆にポリエチレンのような比誘電率が 1 に近いものを測定するには、プローブ長は長い方が誤差を低減できる。そこで、試作にあたっては、これまでの検討で用いてきた L=30cm を採用した。

4.1.5 緩衝材の材質と厚さ

緩衝材の材質と厚さについては、本報告の **3.3** 節で詳細な検討を行っているため、詳細についてはそちらを参照されたい。簡単にまとめると、以下のようになる。

1) 緩衝材の材質としては、誘電損失が小さく、比誘電率が 1 に近いこと、また耐摩耗性に優れ、安価であることから、発泡ポリエチレンが適当である。
2) 用いる緩衝材は、適度の柔らかさと弾力性をもち、永久変形や破壊を容易に起こさないこと、また、吸水性が小さく、計測値に影響を及ぼさないことが求められる。
3) 緩衝材の厚さはプローブ間隔が 1.8～2.4cm であるとき、それと同程度であれば良く、また厚さが 1.5cm 程度でも実用上は問題ないと考えられる。

以上のことから、緩衝材の材質は発泡ポリエチレンとし、サンペルカ L–1400（三和化工株式会社製）を選定した。また、緩衝材の厚さはプローブ間隔以上を目標としたが、**4.1.6** 項で述べるように、パッカーの径を大きくする必要が生じたため、**4.1.1** 項で述べたように HQ の孔径に対応するため、今回の試作では実用上問題ないと考えられる 1.5cm まで小さくすることとした。

4.1.6 パッカーの径と加圧媒体

平成 10 年度に作成したパッカー式プローブの原型では、前掲**図 3.1–1(c)**に示したように、加圧媒体には空気が用いられており、パッカーゴムは心棒のパイプとほぼ同じ径となっていた。この構造では、緩衝材に貼り付けた表面プローブを孔壁に圧着させるために、パッカーを大きく膨らませなくてはならず、そのためパッカーに大きな圧力をかける必要があった。パッカーを大きく膨らませると、パッカーゴムに大きな張力がかかるため、緩衝材を用いても壁面の小さい凹凸に追従した変形が充分に得られない可能性が考えられる。また、逆に壁面の小さい凹凸に追従させるためには、緩衝材を強く壁面に押しつける必要が生じるため、平成 10 年度研究報告で述べられているように、緩衝材が破壊される結果につながったとも考えられる。

そこで、今回の試作では、パッカーに与える圧力が小さくても孔壁との密着性が容易に得られるよう、硬度の小さいパッカーゴムを用いるとともに、パッカーの径をなるべく大きく取ることとした。

次に、本報告の 3.2.5.1 で述べたように、プローブにつながる同軸ケーブルの分岐部分は、測定対象の比誘電率が変化しても影響を受けない位置、すなわち孔壁と接触しない離れたところに配置する必要がある。この方法として、① 同軸ケーブルをパッカー内部に通すか、② 緩衝材の中を通して、プローブ電極の位置でケーブルの分岐の先端のみを引き出す方法のいずれかが考えられる。今回の試作では、パッカーの径をなるべく大きく取るために、①を採用することとした。すると、測定に用いる同軸ケーブルをパッカーの中に通すためには、パッカーの径は最低でもφ60mm は必要であるため、この構造上の用件からパッカーの径をφ60mm とした。

また、パッカーの加圧媒体については、平成 11 年度研究で検討を行っており、以下の結論が得られている。

1) 不飽和領域を測定対象とする場合、ボーリング孔内は空気で満たされているため、空気を加圧媒体とすれば、孔内を移動させる際に比重差の影響を受けることが無く、取扱いが容易であるため望ましい。(平成 11 年度研究 p.39)

したがって、加圧媒体としては空気、もしくは窒素などのガスを用いることとする。また、パッカーに与える圧力は、平成 10 年度研究では 160kPa としていたが、構造の変更によって圧着に必要な圧力は数十 kPa になると想定し、低硬度のパッカーゴムを使用することを考慮して、許容圧力を 100kPa 程度とした。

4.2 パッカー式プローブの試作

前節での検討に基づき、パッカー式プローブの仕様を**表4.2-1**のように決定し、試作機を作成した。

試作機で設定したプローブ間隔は、緩衝材の円周の 1/12 と小さいため、設置するプローブを 1 個（電極 1 対）とすると、これが孔壁の不均質性の高い部分に設置された場合に、得られた含水率がその深度の代表値とならない可能性がある。そこで、プローブを軸対称となる位置に 2 個配置した。また、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4.2-1に、試作した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て、その上に軸対称となるようにプローブを 2 個配置した構造となっている。パッカーの端部には、プローブにつながる 2 本の同軸ケーブルと、加圧用のガスを注入するナイロンチューブが接続されている。

同軸ケーブルは、パッカー内を通ってプローブの端部付近で心線と網線に分岐し、それらの先端はパッカーゴム，緩衝材を通って、プローブ電極にはんだ付けされている。心線と網線がパッカーゴムを通る部分は、金属製のリングで補強されており、空気漏れを防ぐために、内側から接着剤で充てんされている。

表4.2-1　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　φ 60mm × L 1000mm（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	手動での取扱いを容易にするため軽量化	
パッカー膨張部	寸法　φ 60mm × L 600mm × 1mm 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 4.1.6 H12報告 4.1.6 H11報告 p.39 H12報告 4.1.6	
外部緩衝材	寸法　φ 92mm × L 1000mm × 15mm 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 3.3.3 H12報告 3.3.2 〃 〃	
表面プローブ(2個)	寸法　W 6mm × L 300mm × 0.1mm t 数量　2個(電極2対) プローブ間隔　2.4cm（プローブと孔軸の成す角 30°） 材質　銅製	H12報告 4.1.3 － H12報告 4.1.3 －	
適用範囲	ボーリング径　φ 96 ～ 110mm程度(HQ以上) 測定深度　0.5m～20m程度 比誘電率　1～	H12報告 4.1.1	測定精度は対象物に依存

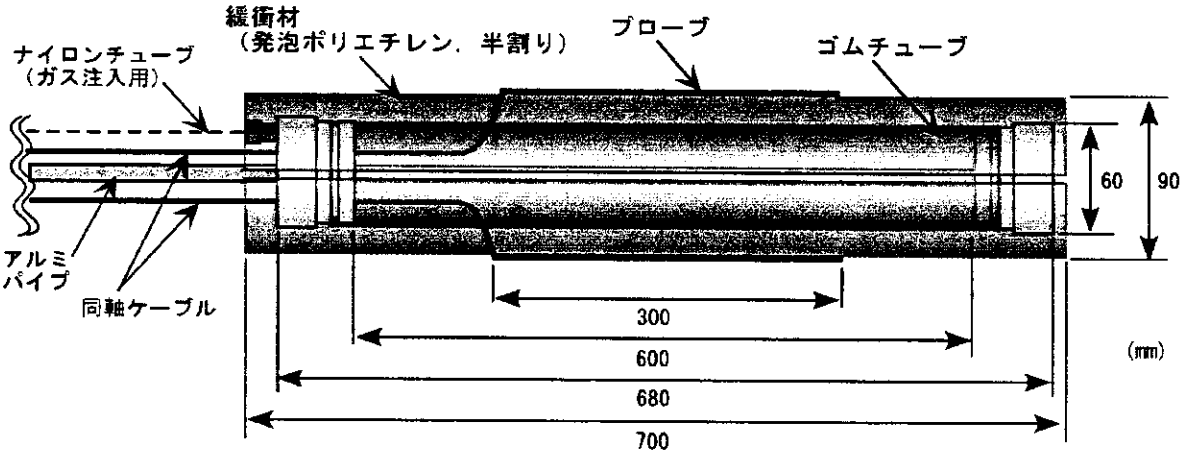


図4.2-1　試作したパッカー式プローブの構造

パッカー式プローブの動作を確認するため、これを内径 100mm，肉厚 7mm の塩ビ管に入れ、パッカーに空気圧を 40kPa 与えた。このとき、パッカーから空気が漏れる

音は確認されず、アルミパイプを力強く引っ張ってもパッカーは滑らなかった。よって、プローブは塩ビ管の内壁に充分に圧着されており、3.3.2 項の緩衝材の選定と 4.1.6 項のパッカーの設計において想定した圧力は妥当であると判断した。

このときの測定値を、2 つのプローブそれぞれについて表4.2-2に示した。ここで、外側材料の比誘電率を計算するために必要な緩衝材の比誘電率は、3.3.3.2 で緩衝材の見かけ密度と固体ポリエチレンの比誘電率から推定した 1.10 を仮定した。また、同表には真の比誘電率を求めるために、半割れの塩ビ管の内側に表面プローブを貼り付けて、これを空中で測定した値を示す。さらに、3.3.4 で示した方法により計算した周面外側の物質のみの比誘電率を併せて示した。

表4.2-2　パッカー式プローブを塩ビ管内に挿入して測定した比誘電率

プローブ No.	緩衝材厚み T(cm)	緩衝材厚みとプローブ間隔の比 T/D	反射点間 (A-C)の長さ	見かけプローブ長(B-C)	実際のプローブ長 (L)	プローブ定数(A-B)	測定された比誘電率	外側材料の比誘電率	備考
1	1.5	0.622	0.4572	0.3929	0.3000	0.0643	1.715	2.332	塩ビ管の中で膨らませた
2	1.5	0.622	0.4575	0.3958	0.3000	0.0617	1.740	2.382	塩ビ管の中で膨らませた
3	0.0	−	0.4376	0.3755	0.3000	0.0621	1.567	2.035	半割れの塩ビ管内側にプローブ貼付

注）1,2は、パッカー式プローブを用いて測定した値。3は、半割れの塩ビ管の内側にテーププローブを貼り付け、測定された値。3は基準となる。

これによれば、パッカー式プローブで測定された円周外側の材料の比誘電率は、2 つのプローブともほぼ同程度の値を示しており、2 つのプローブがほぼ同じ状態で塩ビ管の内側周面に圧着されていたものと考えられる。一方、これらの値は真の比誘電率よりも 17～19%程度高い値となっている。

この原因の一つとして、同軸ケーブルの長さが 30m と長いために、図4.2-2に示すように反射波形が大きく鈍っており、自動読み取りプログラムにより反射点は計算できるものの、2 つの反射が重なるようになっているため、得られた値の信頼性が低くなっていることが挙げられる。これは、今回の試験が（ポリ塩化ビニル＋空気）のような比誘電率の低いものを対象としたためであり、岩石を対象とした測定においては、プローブ先端の反射波はより明瞭な形で得られると考えられる。しかしながら、原位置の測定においても、同軸ケーブルの長さについて検討する必要がある。

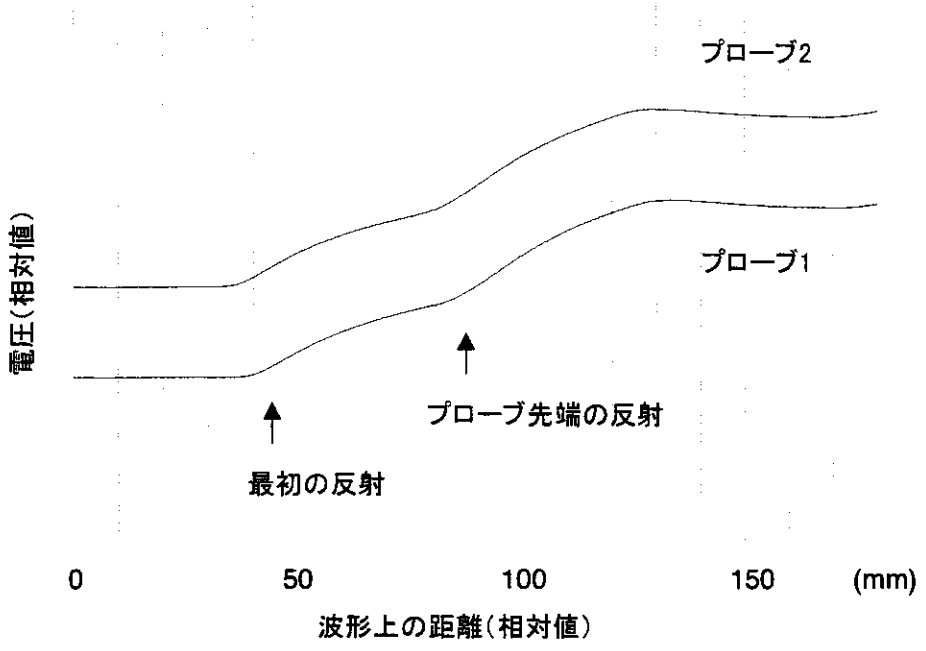


図 4.2-2 パッカー式プローブの反射波形の例

4.3 パッカー式プローブの試作についてのまとめ

これまでのパッカー式プローブの構造に関する検討結果に基づき、試作機の仕様を決定し、試作機を作成した。試作機の主な仕様は以下の通りである。

1) 対象とする孔径は、最小でHQ（直径約98mm）程度とした。
2) 本体は人力による取扱いが容易となるように、軽量なアルミニウム製とした。
3) パッカーの加圧媒体は空気あるいは窒素とし、小さい圧力でも孔壁との密着性が容易に得られるよう、パッカーの径を大きくするとともに、低張力のパッカーゴムを用いた。
4) 同軸ケーブルの分岐部分が測定対象の比誘電率の影響を受けないようにするため、ケーブルをパッカー内に通すような構造とした。この結果、構造上の要件からパッカーの径はφ60mmとなった。
5) 緩衝材の厚さは、実用上測定値に影響を及ぼさないと考えられる最小値として、1.5cmを選択した。
6) 表面プローブは孔軸方向に平行な配置とし、間隔はプローブの中心軸と孔軸の成す角が30°になるようにした。また、緩衝材表面には2対の表面プローブを軸対称に配置した。

パッカー式プローブの動作を確認するため、塩ビ管を用いた試験を行ったところ、得られた周面外側の比誘電率は、真の比誘電率値よりも17～19%高い値であった。これは同軸ケーブルが30mと長く、比誘電率の低いものを測定対象としたために、反射波形が不鮮明になっていることに起因すると考えられた。しかし、岩石を対象とした測定では、反射波形は比較的鮮明に得ることができると考えられる。

5. TDR の波形データ自動読み取りの試行と手法の確立

5.1 目的

TDR による比誘電率の測定は、測定対象となる媒体中の電磁波の伝播速度を測定することにより行う。具体的には、媒体に挿入したプローブに、同軸ケーブルを介してケーブルテスターからパルス信号（ステップ）を送り、この信号がプローブ端部で反射して帰ってくるまでの時間を測定する。過去に実施した不飽和領域の計測手法の研究では、この時間の測定をケーブルテスターで得られた波形からマニュアルで読み取ることにより実施してきたが、読み取りの一貫性に欠け、個人差の影響が避けられない上に、読み取りの労力がかかるという問題がある。

そこで、昨年度の研究において、より客観的にデータを読み取る手法について、既存技術の調査を実施し、本研究で対象としている岩石の測定に最適と思われる手法として微分法を提案した。

今年度は、提案された手法を実際の測定に適用し、マニュアル法との比較も行ってその有効性を検証するとともに、問題点の整理を行う。適用対象としては、3 章に挙げた各種の測定を当てることとした。

なお、3 章で示した測定結果は、全て微分法に基づく自動波形読み取りによるものであり、したがって、その有効性は前章ですでに示されているとも言えるが、ここでは具体的な適用方法と、マニュアル法との比較、そして適用上の問題にはどのようなものがあったかについて解説する。

5.2 マニュアル法と微分法の概説

5.2.1 TDR 波形およびキャリブレーション

図5.2–1にそれぞれ空気中、試料中における典型的な TDR 波形を示す。同図において、明瞭な反射点が 2 箇所に見られる。最初の反射点は同軸ケーブルの分岐開始位置である A 点である。ここで、反射点が同軸ケーブルの分岐開始位置であって、プローブ電極の始点ではないことに注意されたい。もう一つはプローブ終点である C 点での反射である。つまり、TDR 波形での 2 反射点間の距離は、ケーブル分岐位置からプローブ終点までの長さに相当する。空気の比誘電率は 1 と既知であり、プローブの電極の実長も既知である。したがって、左図の気中の波形において、AC からプローブの実長分 BC を差し引くことで得られる距離 AB は、ケーブルの分岐開始点からプローブ電極始点まで、つまりプローブヘッド部の波形上の長さを示す。この長さがいわゆるプローブ定数であり、キャリブレーションはプローブ定数を求める作業と言うことができる。

プローブが気中、試料中のいずれに設置されていても、プローブのヘッド部は通常の計測では空気中にあるため同条件である。したがって、右図の試料中の波形におい

て２つの反射点から求まる波形上の長さ AC から AB に相当する距離を差し引くと、試料中の「プローブの見かけ長さ」BC が算定できる。プローブの実長は既知であるため、この見かけ長さ BC より試料の比誘電率を求めることができる。

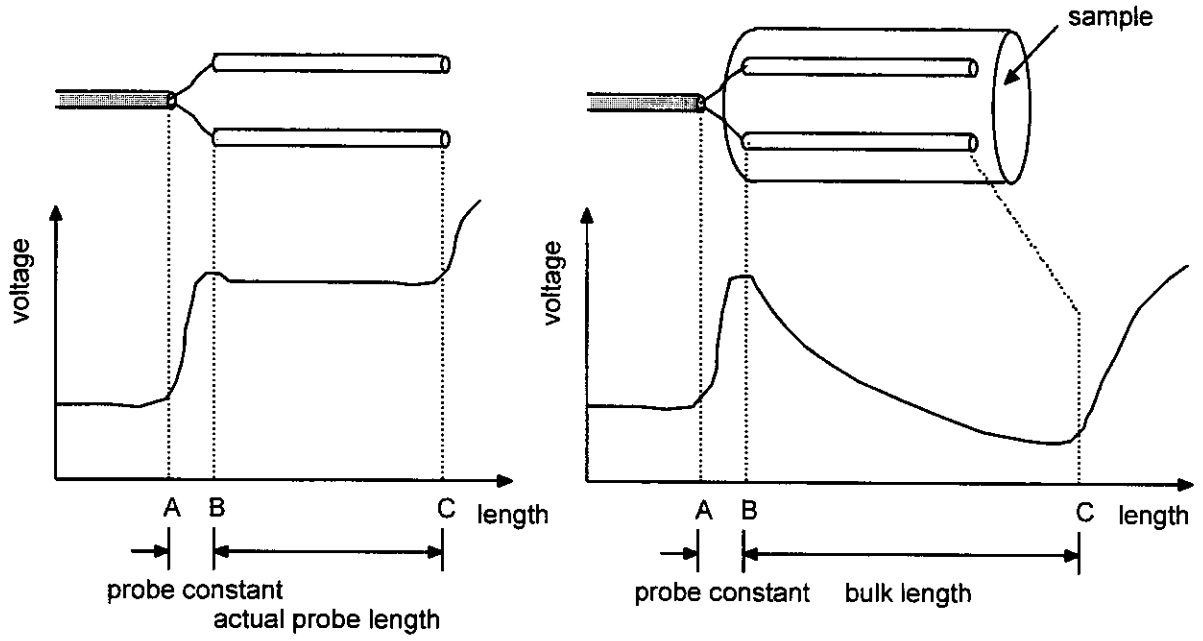


図 5.2–1　典型的な TDR 波形の例

5.2.2 マニュアル法

マニュアル法は、文字通り人間の手作業で反射点を読み取る方法である。通常は、**図5.2–2**のようにピーク位置をプローブ電極の始点と仮定し、終点には図のように２本の接線を引いてこれらの交点を反射点とする。最も簡単であるが、接線の取り方の一貫性が保証されないことや読み取りの個人差の問題が考えられる。なお、Timlin and Pachpsky (1996)によれば、同手法には精度的な問題はないとしている。

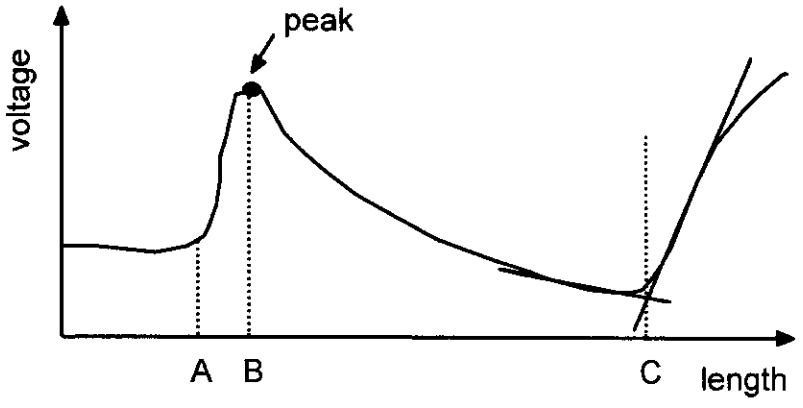


図 5.2-2　マニュアル法の概要

本研究では、従来マニュアル法により反射点を読み取っているが、その方法は上記と若干異なる。すなわち、C 点の読み取りは上記の方法に拠っているが、B 点は波形のピークではなく、5.2.1 項で述べたように、空中におけるキャリブレーション時に求めた C 点から、プローブの実長分だけ手前の点として求めている。

5.2.3 微分法

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

図5.2–3の上に示すような典型的な TDR 波形においては、プローブの始点および終点の 2 箇所において明瞭な反射が見られる。この波形データの出力電圧をプローブ上の位置について 1 階微分したものをプロットすると、2 箇所にピークが見られる。

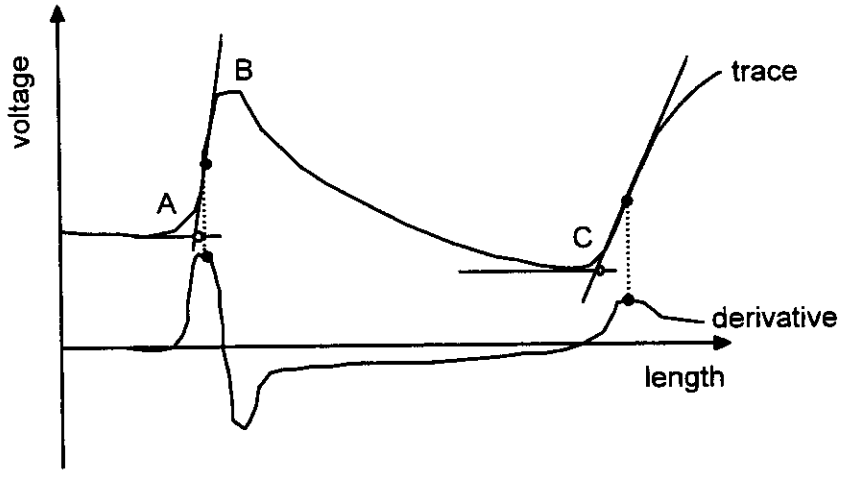


図5.2–3　TDR 波形とその 1 階微分

これらのピークは、TDR 波形の勾配が最も急な部分に当たる。微分法は、ここに相当する位置の波形データに接線を引き、これと水平に引いた基線の交点を反射位置とするものである。すなわち、初めのピークを用いて得られる点を分岐の開始位置 A 点とし、後ろのピークを用いて得られる点をプローブの終端 C 点としている。

プローブ定数は、5.2.1 項で述べたように、空中におけるキャリブレーション時に求めた波形上の長さ AC から、実際のプローブ長を差し引くことにより得られる。

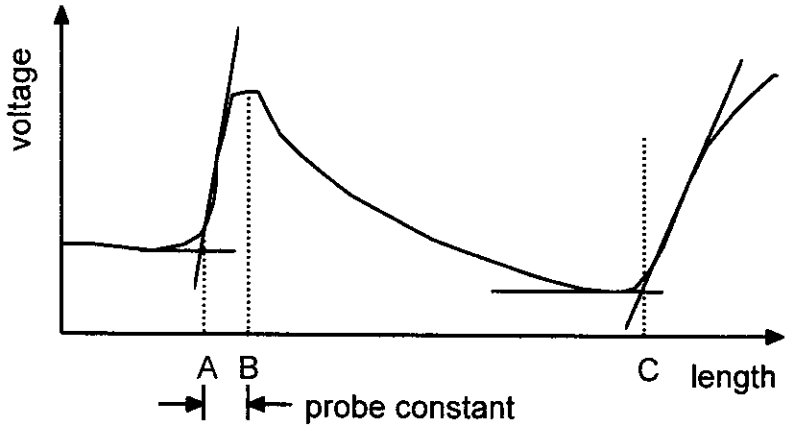


図 5.2–4　微分法の概要

5.3　TDR 波形解析プログラム

5.3.1　はじめに

ここでは、微分法に基づいた TDR 波形解析プログラムの概要および使用法について説明する。同プログラムで解析する TDR 波形データは、市販のケーブルテスター（TEKTRONIX 社 1502B または 1502C）により取得したものを対象としている。

なお、波形解析方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。

5.3.2　プログラムの概要

5.3.2.1 プログラムの構造

本プログラムは、以下のサブルーチンからなる。

READER :　入力データの読み込み

SAVITZKY : 波形データのスムージングと微分に必要な Savitzky-Golay convolution weight の算定（内部でサブルーチンをコールするがここでは省略する）

SMOOTH :　波形データのスムージングおよび 1 階微分

INFLECT1 : 同軸ケーブル分岐点における反射点の算定

INFLECT2 : プローブ端部における反射点の算定

WRITER :　プローブ定数または比誘電率の算定および結果の出力

5.3.2.2 入力データ

同プログラムで TDR 波形の解析を実施するにあたっては次の 2 つの入力ファイルを用意する。

a) コントロールおよびプローブデータファイル

b) 波形データファイル

a) コントロールおよびプローブデータファイル

データ解析のためのコントロールデータおよびプローブに関するデータは1つのファイル（デフォルトでのファイル名は “PROBE.DAT”）で定義する。その形式は以下の通りである。

- 1行目：波形データに含まれるデータ個数
- 2行目：データポイント間の見かけ長さ（m）
- 3行目：実際のプローブ長（m）
- 4行目：プローブ定数（m）　　（波形解析時のみ必要）

データ個数の推奨値は251であるが、今年度の実験では比誘電率の低いものを測定対象としたため、距離分解能を上げる必要があり、個数は 1201 とした。また、TEKTRONIX 1502B では、1DIV.がデータポイント数 25 点に相当するので、1DIV=0.025m の設定であれば、データポイント間の見かけ長さは、1mm となる。なお、これは本研究で従来から用いている設定である。

b) 入力波形データ

波形データの書式は以下のとおりである。波形データは1行に1つのデータの入ったファイル（デフォルトでのファイル名は、“TEST.DAT”）で定義する。

- 1行目：データポイント1の値
- 2行目：データポイント2の値
- 3行目以降：データポイント数回だけ繰返し

波形データ数がコントロールデータの1行目で指定した数よりも少ない場合はエラーとなる。逆に多い場合は、先頭からコントロールデータで指定した数だけが読み込まれ、それ以降は無視される。

5.3.2.3 プログラムの波形解析方法

波形解析方法として、Bake and Allmaras (1990) の方法を用いた。同方法では、同軸ケーブル分岐点（A点）、プローブ終点（C点）での2つの明確な反射を、1階微分のピークを探すことにより求め、これらの点を通る接線と水平線との交点を反射点とする。反射点を求めた後、反射点間の見かけ長さ（L_{AC}）を算定する。

(1) スムージングと数値微分

取得したデータには若干のノイズが含まれるため、直接微分すると大きなばらつきが見られることがある。したがって、微分に先立って波形データを平滑化（スムージング）する必要がある。本プログラムでは、平滑化に Savitzky-Golay 法を用いた。これは、一定の時間間隔 Δt で計測されたデータのスムージングおよび数値微分を行うための一つの方法である。詳しくは、平成 11 年度報告書を参照されたい。

(2) 反射点の算定

TDR 波形では、同軸ケーブル分岐点およびプローブ終点の 2 箇所にて明瞭な反射が見られる。これらの反射点位置を求めるために次の手順を用いた。

- ケーブル分岐点における反射ではその勾配は常に最大値を示す。したがって、1 階微分の最大値に対応する位置を探し、接線の関数式を求める。
- 反射直前のデータで局所的な最小値を探し、この位置に X 軸と平行な基線を引く。局所的な最小値が見られない場合は、反射直前の適当数のデータを取り、それらを通る平均的な勾配の直線の式を求める。そして、先に求めた接線との交点位置をケーブル分岐点における反射点（A 点）とする。
- 電極終点における反射は通常 2 番目に大きな勾配として現れる。そこで、1 階微分で 2 番めのピークを求め、接線の関数式を求める。
- 反射直前のデータで局所的な最小値を探し、この位置に X 軸と平行な基線を引く。局所的な最小値が見られない場合は、反射直前の適当数のデータを取り、それらを通る平均的な勾配を持つ直線の式を求める。そして、先に求めた接線との交点位置を電極終点における反射位置（C 点）とする。

(3) プローブ定数算定（L_{HEAD}）

スムージングしたキャリブレーション時のデータを用いて得られた見かけのプローブ長さ（L_{AC}）から実際のプローブ長（L_{PROBE}）を差し引くことにより、プローブ定数 L_{HEAD} を算定する。

$$L_{HEAD} = L_{AC} - L_{PROBE}$$

なお、実際の比誘電率算定に先だって、ここで求めた L_{PROBE} をコントロールデータファイルに加えておく必要がある。

(4) 比誘電率算定（Ka）

反射点間の見かけ長さ（L_{AC}）からプローブ定数（L_{HEAD}）を差し引いて、電磁波がプローブ往復に要した見かけ長さ（L_{APP}）を算定する。その見かけ長さの 2

乗と実際のプローブ長の2乗の比より比誘電率（Ka）を求める。

$$Ka = (L_{APP})^2 / (L_{PROBE})^2$$

5.3.3 解析時の注意

TDR波形には様々な要因によりノイズが含まれ、これが計算値に影響を与える場合がある。例えば、元のデータに周期の長いノイズが入っている場合には、スムージング後のデータにもノイズが残る場合がある。したがって、スムージングおよび1階微分データをプロットすることにより、得られている反射点の位置が妥当であるかどうかを1波形ずつ確認しながら作業を進めることが望ましい。

特に多く見られる問題点は、ノイズやその他の要因による多重反射などによって1階微分の最大値が発生する場所が適正でない場合である。本プログラムでは反射点を探すときに、波形上での捜索範囲を自動的に設定するようになっている。しかし、前記のような問題が発生した場合、メインプログラム中の IBEGIN1, IENDPT1, IBEGIN2, IENDPT2 にそれぞれ必要なデータポイント番号を指定することで、その探索範囲をユーザーが指定できるようになっている。

5.4 波形解析プログラムの適用

解析プログラムの適用例として、3.2節で行ったTDR測定の中から、パッカー式プローブ周面外側に対する電磁波の影響範囲を調べた実験を取り上げる。**図5.4–1**，**図5.4–2**は、それぞれプローブ間隔が 3.0cm の場合に、①空気中でキャリブレーションしたときと、②プローブと水面との距離がプローブ間隔の 0.5 倍のときの波形データを解析した例である。また、**図5.4–3**と**図5.4–4**には、プログラムを実行した際の画面出力の例を示した。なお、この解析ではデータどうしの間隔は 1mm となっており、データ番号の間隔 100 は、波形上で 10cm に相当する。

図5.4–1，**図5.4–2**では、データの間隔が短いためにややわかりにくいが、スムージングによって、元のデータに含まれていた周期の短いスパイク的なノイズが取り除かれている。また、1階微分値に基づいた反射点 A，C の探索も適切に行われている。

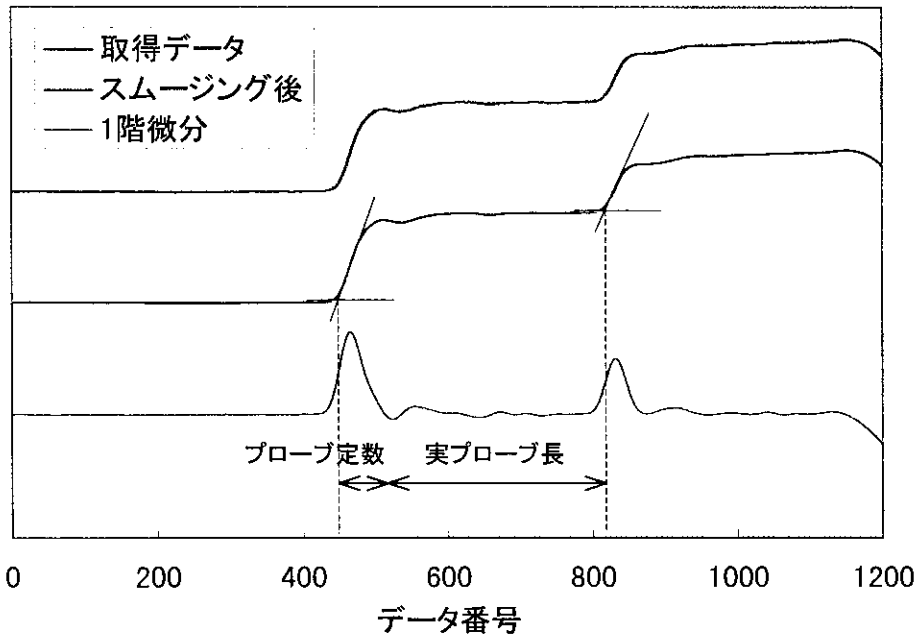


図 5.4-1　波形データの解析例（プローブ定数を求めた場合）

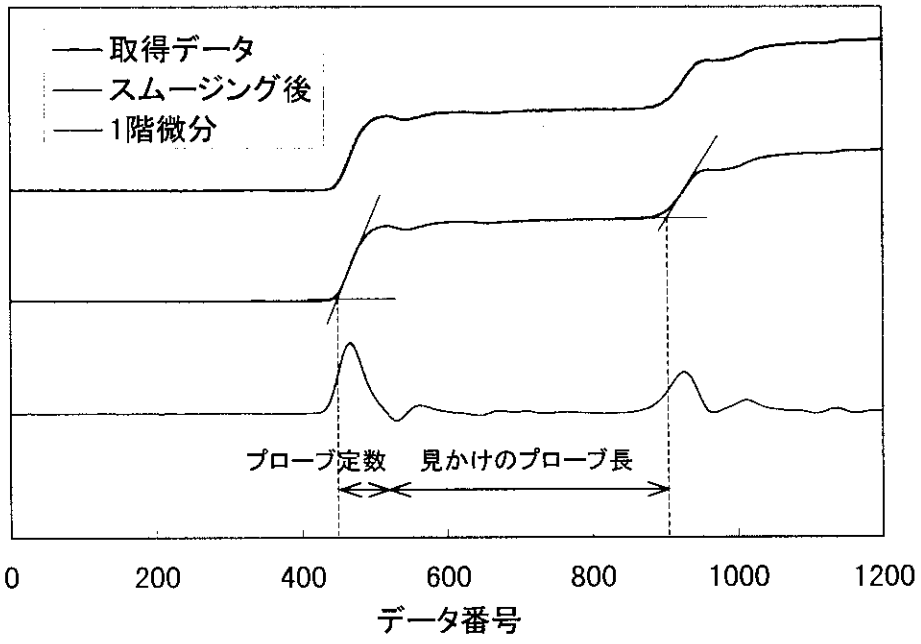


図 5.4–2　波形データの解析例（比誘電率を求めた場合）

```
  TDR-TRACE PROCESSOR (VER27JAN01)

Enter trace data file name to be processed...
test-1.dat                          ← 波形データファイル名を入力
Enter probe data file name to be read...
probe.dat                           ← コントロールデータファイル名を入力

Enter analysis type...
  compute probe constant       : 0    ← プローブ定数を計算するには 0
  compute dielectric constant : 1    ← 比誘電率を計算するには 1

0                                   ← 0 を入力してプローブ定数を求める

>>> PROBE CONSTANT ANALYSIS <<<       ←プローブ定数の解析結果

initial reflection      =      447.1695     ← 反射点 A の位置
final   reflection      =      813.6748     ← 反射点 C の位置
trace length            =      0.3665 m     ← A-C 間の見かけの長さ
probe length            =      0.3000 m     ← プローブの実際の長さ
probe constant          =      0.0665 m     ← プローブ定数
```

図 5.4–3　波形データ解析プログラムの実行例（プローブ定数を求める場合）

```
  TDR-TRACE PROCESSOR (VER27JAN01)

Enter trace data file name to be processed...
test-1.dat                          ← 波形データファイル名を入力
Enter probe data file name to be read...
probe.dat                           ← コントロールデータファイル名を入力

Enter analysis type...
  compute probe constant       : 0   ← プローブ定数を計算するには0
  compute dielectric constant  : 1   ← 比誘電率を計算するには1

1                                   ← 1を入力して比誘電率を求める


>>> INPUT DATA INFORMATION <<<       ← 入力データの情報

number of data points          =  1201       ← データ数
actual probe length            =  30.00 cm   ← 実際のプローブ長
probe head constant (offset)   =  6.65 cm    ← プローブ定数
interval of data points        =  0.1000 cm  ← データの間隔

>>> TRACE-PROCESSING RESULTS  <<<    ←波形解析の結果

initial reflection (A)         =  447.050    ← 反射点Aの位置
final   reflection (C)         =  898.154    ← 反射点Cの位置
apparent trace length (B-C)    =  0.3851 m   ← B-C間の見かけの長さ
actual rod length              =  0.3000 m   ← プローブの実際の長さ

                                 ========
dielectric constant (Ka)       =  1.644      ← 得られた比誘電率
                                 ========
```

図 5.4–4　波形データ解析プログラムの実行例（比誘電率を求める場合）

5.5 波形解析プログラムによる読み取りとマニュアル法との比較

波形解析プログラムの有効性を検証するため、3.2 節で行ったパッカー式プローブ周面外側に対する電磁波の影響範囲を調べた実験について、プログラムによる読み取り値とマニュアル法による読み取り値との比較を行った。

マニュアル法においては、測定された波形データを横軸 1/10 の縮尺でプリンターに出力し、4.4.2 項で解説した方法によって反射点を求め、最小目盛が 1mm のスケールを用いて目測により 0.1mm の単位まで読み取りを行った。縮尺 1/10 の波形を 0.1mm 単位で読み取るため、マニュアル法での読み取り分解能は 1mm となる。

図5.5–1と**図5.5–2**に、波形解析プログラムを用いた場合と、マニュアル法によった場合について、水面からのプローブまでの距離と比誘電率との関係をまとめたものを示す。これによると、波形解析プログラムにより得られた比誘電率は、マニュアル法によるものよりも全体的に大きめの値となっているが、両者はほぼ同じ結果を与えており、結果から読み取れる傾向も同様であることがわかる。

図5.5–3には、波形解析プログラムを用いた自動読み取りによる測定値と、マニュアル法による測定値との対応を示す。先に述べたように、自動読み取りによる比誘電率がマニュアル法のそれよりも最大で 2%大きくなる傾向があるものの、グラフ上の点はほぼ 1:1 の直線の近傍にあり、両者はほぼ同じ値であることがわかる。また、**図5.5–4**には得られた比誘電率のばらつきを、標準偏差の平均値に対する比として示した。ここで、グラフ上のプロットは、比誘電率がほぼ一定値となると考えられる、プローブと水面との距離がプローブ間隔以上の場合について、プローブ間隔毎に集計したものである。縦軸に標準偏差を平均値で割った値を示したのは、一般に測定値自体が大きくなると標準偏差も大きくなると考えられることから、その影響を取り除くためである。これによると、両方法による測定値のばらつきは、同一プローブを用いている限りにおいてはほぼ同等であることがわかる。

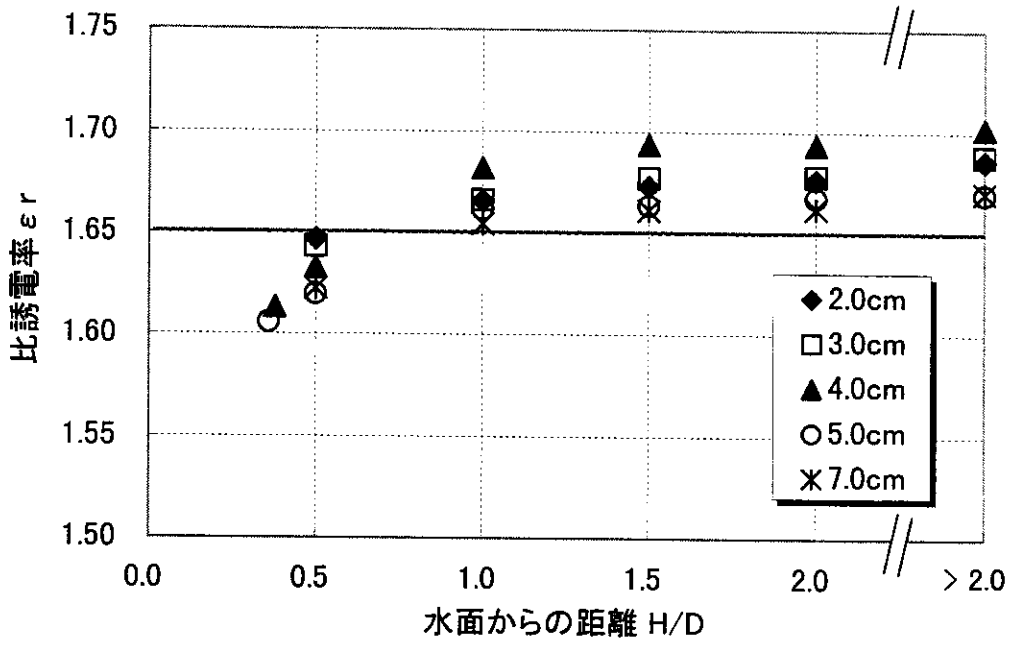


図 5.5–1　水面からの距離と比誘電率との関係（自動読み取りによる測定値）

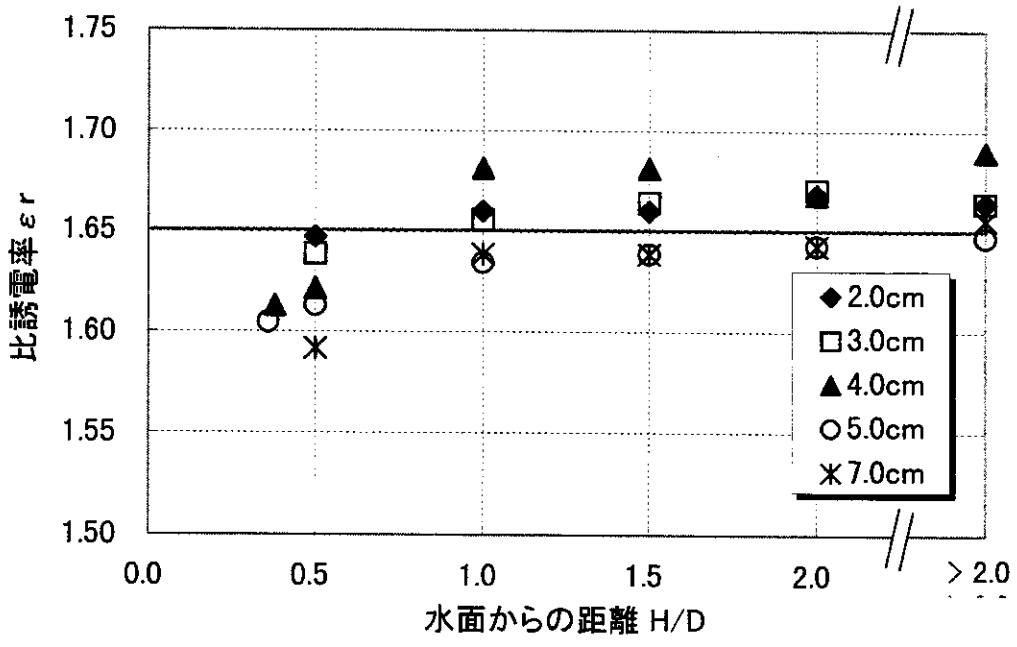


図 5.5–2　水面からの距離と比誘電率との関係（マニュアル法による測定値）

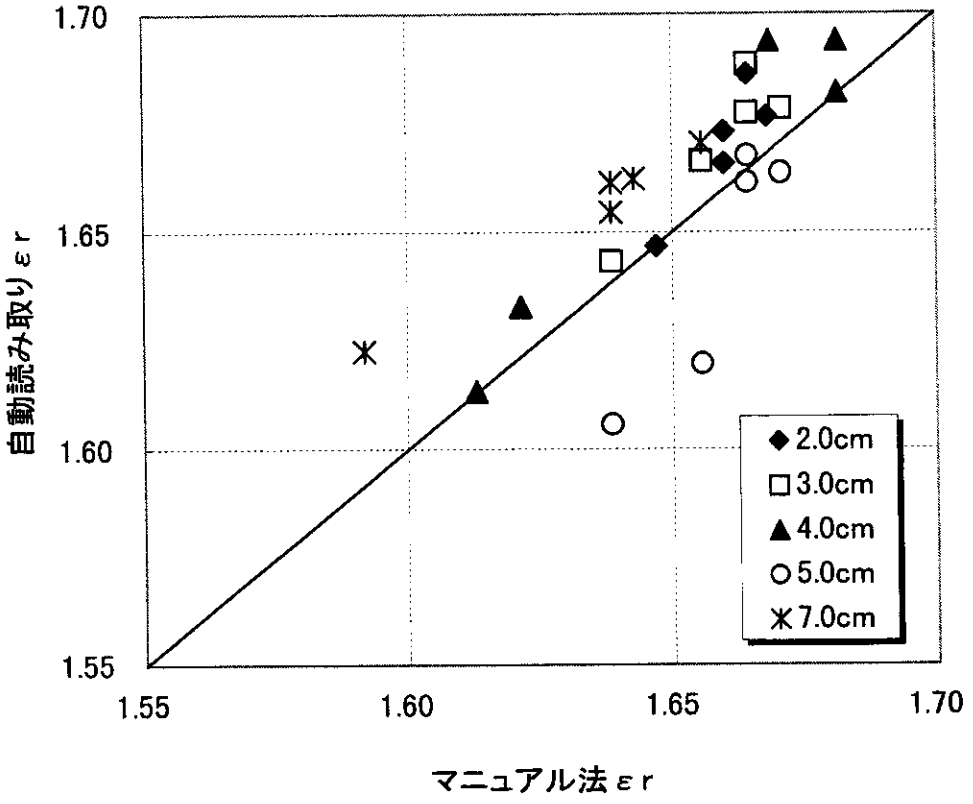


図 5.5–3　自動読み取りとマニュアル法による測定値の対応

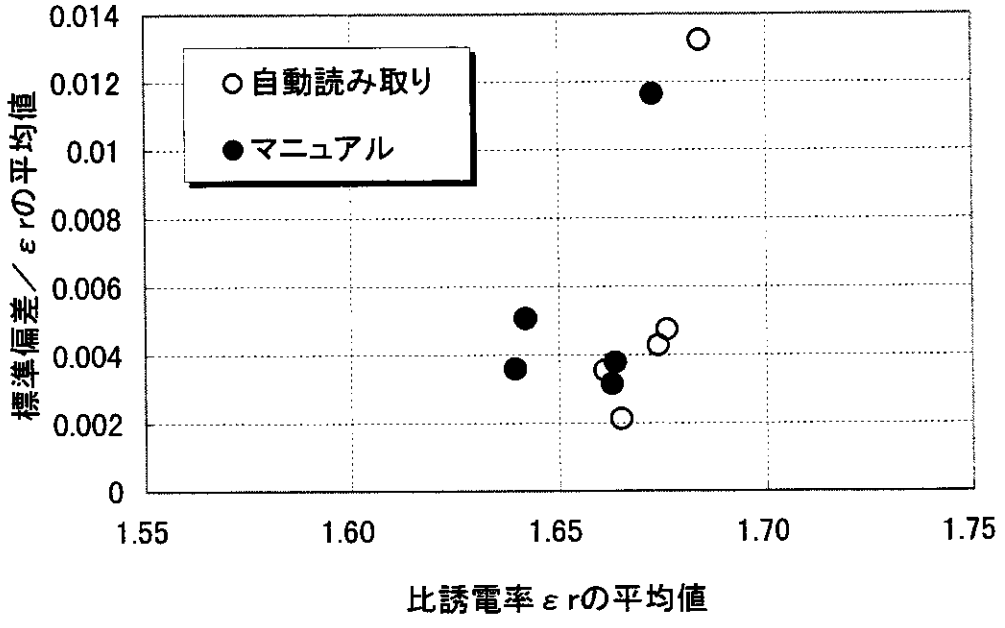


図 5.5–4　自動読み取りとマニュアル法による測定値のばらつき

今回実施したマニュアル法による波形読み取りは、作業を熟知した同一作業者の手によるものである。このため、もし習熟度の異なる複数の作業者による読み取り値を用いて同様の検討を行えば、マニュアル法の精度は自動読み取りに比較して低下するものと予想される。また、マニュアル法による読み取りの距離分解能は、習熟した作業者であっても縮尺 1/10 の図面上で 0.1mm，すなわち実際の読み取り長で 1mm が限界であると想定されるが、自動読み取りであればこの程度までの読み取りは容易に達成できる。さらに、マニュアル法による読み取りは、自動読み取りよりも多くの労力を必要とするため、大量の波形データを扱う場合には自動読み取りの優位性がさらに高まる。

なお、今回マニュアル法により求められた比誘電率が自動読み取りのそれよりもわずかに小さくなる傾向が見られたのは、作業者の反射点を求めるための接線を引く際の判断基準が一貫していたことを反映しているものと考えられる。

5.6 TDR 波形データの自動読み取りについてのまとめ

ここまでに述べたように、今回試行した波形解析プログラムによる自動読み取りは、従来のマニュアル法と同等か、それ以上の精度を与え、読み取りに必要な労力は大幅に軽減されることがわかった。これにより、微分法に基づく TDR 波形の自動読み取りの有効性が確認された。

一方、現在のプログラムは、波形や反射点の読み取り位置を図示する機能を有していないため、反射点の読み取り位置が妥当であるかどうかの判断は、別途波形図を参照しながら行わなくてはならない。また、反射点の探索が適切でない場合には、プログラム内のパラメータをエディタ等で修正する必要があり、プログラミング作業に慣れていないユーザーには扱いにくいものとなっている。今後は、プログラムのユーザーインターフェース部分の改良を進め、一般的なユーザーに扱いやすいものとする必要がある。

6. 岩盤中の含水量計測手法に関する研究情報の収集と整理

6.1 目的

最近では、TDR の岩石不飽和状態計測への適用が、他の機関でも取り上げられるようになってきた。また、含水率測定方法として、TDR 以外の新たな計測手法も登場してきている。そこで、NAGRA 等による Grimsel Test Site や、Mt. Terry Project における TDR 試験の情報などを含め、国内外の最近の同種・類似研究の動向を詳細に収集し、整理することとした。

6.2 海外の研究動向概要

核燃料サイクル開発機構では、岩盤中に掘削した坑道周辺に発生すると考えられる不飽和領域の拡がりを原位置にて計測するための手法に関する研究を平成 5 年度より実施してきた。初年度には広範囲の文献調査を実施し、その結果、弾性波速度（P 波、S 波），比抵抗，比誘電率が岩石中の含水量によって変化する性質を利用して、これらの物理量より含水量を推定できるものと考えられた。

同分野の海外の研究機関においては、スイスの NAGRA でサイクロメータによる水ポテンシャル測定や誘電法を用いた含水量測定が実施されており、その成果は最近になって次第に公開されてきている。

アメリカでは古くからは石油開発の分野において誘電率検層やレーダーが応用されているが、主として水または石油で飽和された岩石の空隙率の測定が着目されていたようである。1990 年代前半になって、不飽和岩石の含水量測定に関する誘電法の適用性検討の研究がネバダ州の Desert Research Institute (DRI) で実施された報告例がひとつあるが、その後これを原位置で応用したなどの報告はないようである。

6.3 本研究の経緯概要

図6.3–1から**図6.3–3**に、平成 6 年度に実施した多胡砂岩を用いた室内実験結果の一例を示す。数種類の岩石試料を用いた室内実験の結果、弾性波速度、比抵抗は岩種間のばらつきが大きいこと、また、ある含水量の範囲において、物理量の変化が非常に小さくなるなどの現象がみられた。一方、比誘電率は含水量とともに有意に変化し、岩種間のばらつきも他の物理量に比べて小さかった。以上より、岩石中の含水量を推定するには、上記 3 つの物理量のうち比誘電率が最も有効であるとの結論を得た。

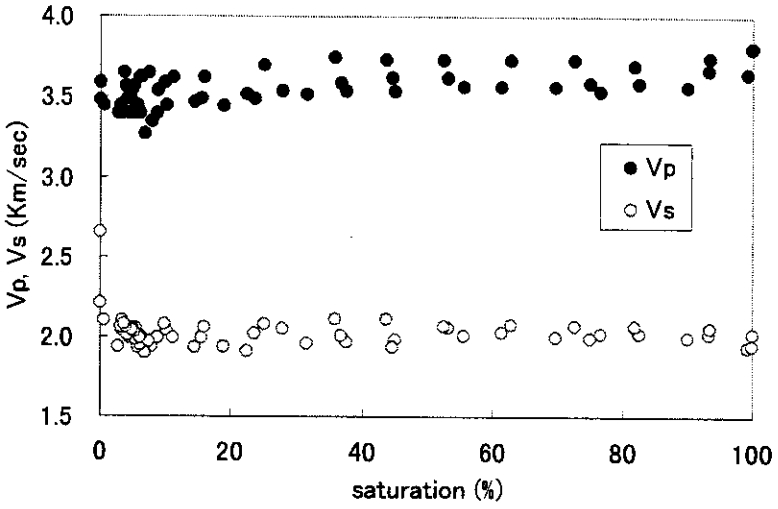


図 6.3–1　飽和度と弾性波速度の関係（多胡砂岩，平成６年度）

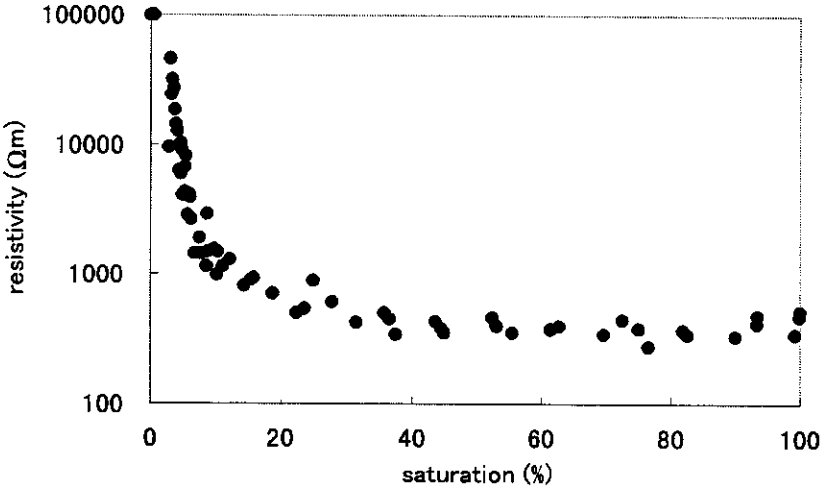


図 6.3–2　飽和度と比抵抗の関係（多胡砂岩，平成６年度）

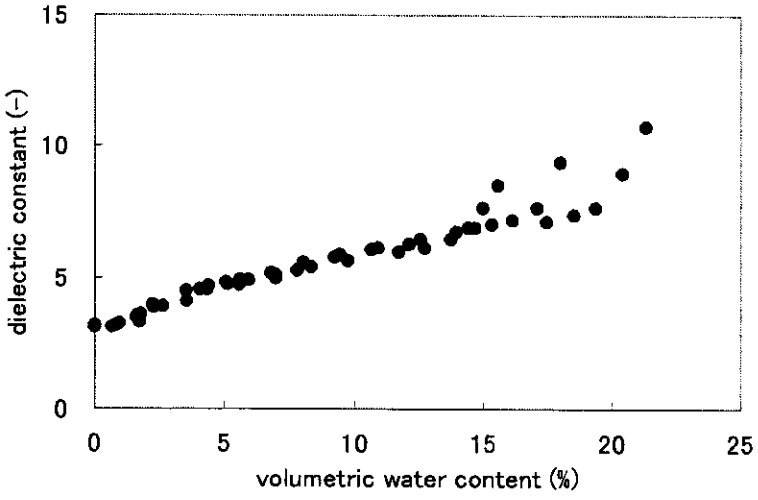


図 6.3–3　体積含水率と比誘電率の関係（多胡砂岩，平成６年度）

6.4 比誘電率と含水量の関係

前節の室内実験から、比誘電率が含水量の変化とともに有意な変化を示し、これを測定して含水量を推定することが可能であることが示唆された。ここでは、岩石の比誘電率が含水量に敏感に反応する理由を考える。土壌の分野では、20 年ほど前から土の含水量と比誘電率の関係についての研究がされてきた。Topp et al. (1980) は、土の含水量 θ_v と比誘電率 K_a の関係が土質の違いによらず次の 3 次式で表されることを実験的に示した。その後の研究で、この式は様々な土質に対して適用可能であることがわかり、その信頼性の高さから現在でも最も頻繁に使われている。

$$K_a = 3.03 + 9.3\ \theta_v + 146\ \theta_v^2 - 76.7\ \theta_v^3 \qquad (1)$$

このほか、θ_v と K_a の関係を表すモデルとして次式に示すような α mixing model とよばれる半経験式がある。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。経験的に α=0.5 とすると実験値とよく一致することが知られている。水の比誘電率は空気、土粒子のそれと比べてはるかに大きいため、3 相の混合体としてのみかけの比誘電率は含水量に強く依存する。

$$K_a{}^{\alpha} = (n - \theta_v) K_{air}^{\alpha} + \theta_v K_{water}^{\alpha} + (1 - n) K_{solid}^{\alpha} \qquad (2)$$

岩石試料を用いた実験において、比誘電率が含水量の変化によって有意に変化するのは、岩石も土と同様に、空気，水，固体の 3 相からなり、これら個々の比誘電率が土のそれとほぼ同じであるためと考えられる。

図6.4–1に、ネットワークアナライザを用いて計測した 4 岩種の岩石の含水量と比誘電率の関係を前述の α mixing model により求めた関係とあわせて示す。ネットワークアナライザとは、直径 50mm，厚さ 4mm 程度の円盤状に整形した岩石試料のインピーダンスを計測して比誘電率を求めるもので、岩石の比誘電率測定に通常用いられる手法である。ただし、同手法は試料の高精度の整形が必要であり、原位置計測には適さない。

図より、岩石の比誘電率は土と同様に含水量の変化によって有意に変化していることがわかる。 α mixing model によって岩石の K_a～θ_v 関係が概ね把握できているが、含水率が高い範囲では計算値より小さい傾向がみられる。また、土の K_a～θ_v 関係は Topp 式によって一義的に表すことができるのに対し、岩石の場合は各岩種ごとに得られる曲線は若干異なる。これは、岩石は土に比べて有効空隙率（ここで、有効間隙率とは一般に土についての間隙率と考えて良い）の範囲が大きく、一般的に有効空隙率が小さいほど固体の比誘電率の寄与率が大きくなり、曲線が上に移動するためと推

定される。したがって、比誘電率から岩盤中の含水量を精度よく推定するためには、各岩種ごとにキャリブレーションを実施するのが望ましいと言える。

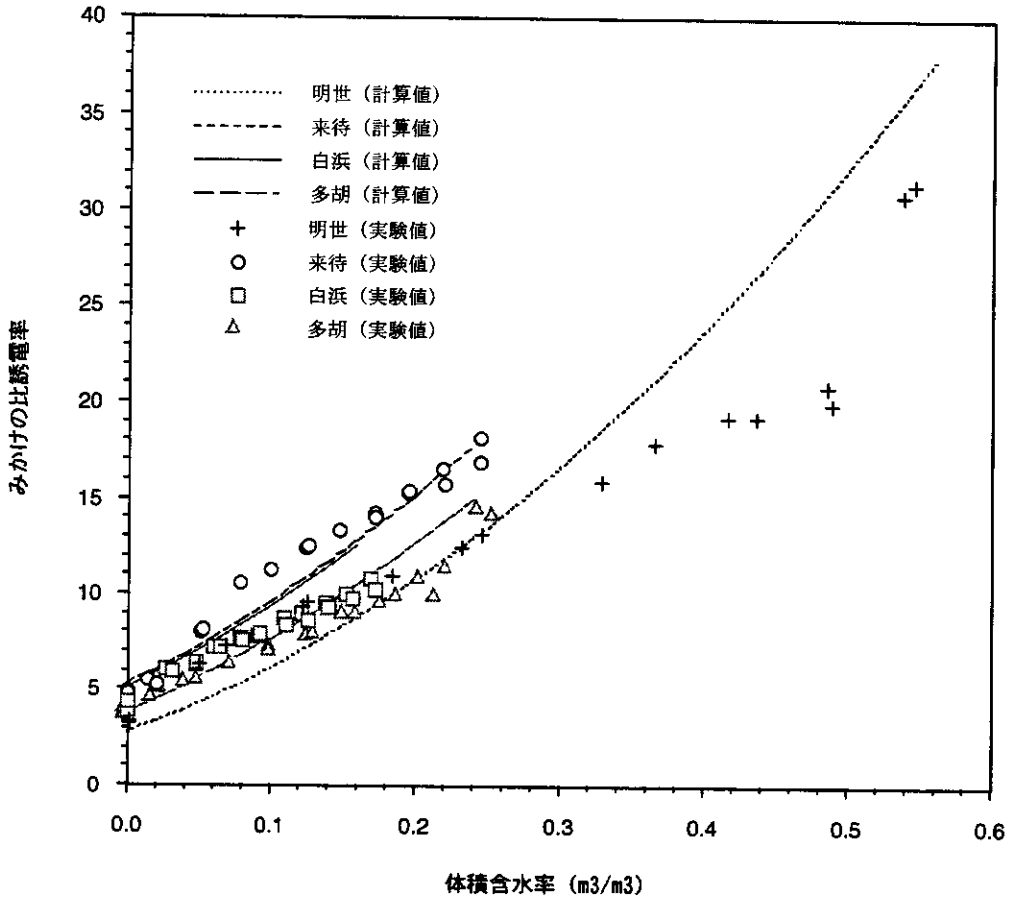


図 6.4–1　ネットワークアナライザによる岩石の K_a～θ_v 関係（平成９年度）

6.5 TDR の岩盤への適用事例

TDR を岩盤の含水率測定に適用した事例は次のとおりである。

Hokett et al. (1992) は TDR を砂岩（有効空隙率 10%）および凝灰岩（有効空隙率 15%）のブロックに適用し、ブロック内の含水量の推定を試みた。まず、前述の Topp 式をそのまま用いたところ含水量を過大に評価した。そこで、砂岩、凝灰岩のそれぞれについて個別に含水率と比誘電率とのキャリブレーションを行った結果、比較的精度良く含水量を推定できた。

Schneebeli et al. (1995) は TDR 法を Grimsel の花崗岩（有効空隙率 1%）に適用した。彼らは、岩盤表面に貼り付けるもの（表面プローブ）と試料中のガイド孔に挿入するもの（ロッド式プローブ）の 2 つのタイプのプローブを用いて、キャリブレーションを実施した。当時、TDR プローブの測定範囲や表面プローブの特性などがよく解明されていなかったこともあり、彼らの実施したキャリブレーションは、原位置プローブから得られるデータからそのまま含水量を推定するには若干の問題があったと考えられる。しかし、1%という低い空隙率にもかかわらず含水量の変化に対して比誘電率の変化が確認されたと報告している。

Sakaki et al. (1998) （過去に実施された本研究の成果の一部）は、砂岩、凝灰岩、花崗岩を含む 9 岩種について TDR を適用しキャリブレーションを実施した。その結果、全ての岩種において含水量の変化に対して比誘電率の有意な変化が認められた。しかし、プローブと岩石との間に残った微小な隙間の影響で、比誘電率が概ね過小評価されている可能性が示唆された。

林 (1999)（過去に実施された本研究の成果の一部）は、様々な温度条件下において TDR の適用性を調べた結果、岩石によっては温度の上昇とともに比誘電率が微増する現象がみられた。また、TDR プローブの測定範囲内に亀裂が存在する場合、測定値に若干の影響を及ぼす可能性も示唆された。

Marschall et al. (1999) は、スイスの Grimsel 試験場にて、原位置測定用プローブとして 2 種類のプローブを開発中である。ひとつは、長期測定のため全長 2m のプローブをボアホールに挿入後、レジン（樹脂）で埋設するものである。もうひとつは、短期測定用で、全長 2m のパッカー方式により設置と取り外しが簡単にできる構造である。Grimsel 試験場において実施されたガス注入試験では、岩盤中を浸透してきたガスの前線を計測できた。長期観測用プローブでは、2 年間にわたってトンネル周辺の含水量を計測してきた。その期間中、含水量に大きな変化は見られなかったが、システム自体の信頼性は非常に高く、含水量の変化も 0.2% の精度で計測できたものと

考えられる。

以上の研究より、TDR 法により岩石中の含水量を推定することが可能であることがわかってきている。しかし、これを岩石に適用する際には特に以下の点に注意する必要がある。

- それぞれの岩種に対して、個別に水分量と比誘電率のキャリブレーションを行う必要がある。
- プローブ設置時には、岩石とプローブとの間に隙間ができないようにする必要がある。

なお、上記のうち、岩石とプローブとの隙間を埋める方法については、本研究で平成 10 年度に 2 重管を用いた方法を提案しており、平成 10 年度と 11 年度に行った室内試験によってその有効性が確認されている。

6.6 TDR 以外の近年の研究事例

TDR 以外の含水量測定手法として比較的新しいものに X 線，FDR，ADR がある。これらのうち、FDR，ADR は TDR と同様に媒体の比誘電率の測定から含水量を求める方法である。

6.6.1 X 線を用いた方法

Tidwell et al. (1995) は、大きさが 50cm×15cm×2.5cm の Topopah Spring Tuff のスラブを用いて、内部の水分移動状況を X 線を用いた室内実験により把握することを試みた。本手法では、撮影した X 線デジタル写真のドット色（濃度）からあらかじめ求めておいたドット色と含水量の関係を用いて、試料中の水分量を推定した。この方法により、ドットスケールの精度で含水量分布が把握できる一方、データ量が大きいなどの問題も残した。

本手法は、岩盤中の水の流れのメカニズムを実験室内で詳細に調べる際には有効な手段となりうるが、原位置の測定に適用することは、装置の持ち込みや安全性の問題から極めて困難であり、現時点では実用から遠い位置にあると考えられる。

6.6.2 FDR

FDR（Frequency Domain Reflectometry：周波数領域反射法）は TDR と同様に誘電率を測定する方法であり、冀ら(1996)によって開発された。TDR が、電磁波が物質中を往復する速度を時間領域で測定して比誘電率を求めるのに対し、FDR では、様々な周波数の電磁波が物質中の電極を往復するときに生じる合成干渉波を周波数領域で測定して比誘電率を求めるものである。TDR では通常 2 または 3 本の電極を設置する

必要があるが、FDR では 1 本で良い。したがって、岩石を対象とした場合、プローブの設置に必要な労力が低減されることから、非常に大きな利点となりうる。

西垣ら (1998)によれば、FDR プローブの測定範囲はロッド（電極）周辺の 5mm 程度の範囲であることが報告されている。これは、局所的な測定値が必要な場合により精度よい測定ができることが期待できる。一方、プローブ周辺の測定感度が高くなるため、プローブ周辺に隙間が残らないようその設置を注意深く行う必要がある。同時に、飽和度 80％以上の範囲で測定値にばらつきが見られることも報告されている。

小松 (2000)によれば、2 種類の岩石試料について実施したキャリブレーションは、TDR 法による結果 (Sakaki et al., 1998)と同様に、プローブ設置時に電極周辺に若干の隙間が残って測定に影響を与えていることが推定された。

以上のことから、FDR は TDR と同様に、岩石の含水率測定法として有効であると期待されるが、プローブの設置において TDR よりも高い注意を払う必要があること、また、飽和度の高い領域での精度に問題があることから、解決すべき課題が多く残されていると言える。

6.6.3 ADR

ADR (Amplitude Domain Reflectometry：振幅領域反射法)は、Guskin and Miller (1996)により開発された方法である。同手法は、一定周波数の電磁波 (100MHz) が物質中の電極を往復するときに生じる電圧の差から比誘電率を求める方法である。現在までに、多くの会社が ADR を利用した土壌の含水率測定装置を販売しており、TDR と比較して装置価格が大幅に安いため、土壌の含水率測定法の主流になりつつある。一方で、ADR は TDR と比較して飽和度の高い領域での精度に問題があることが知られている。

小松 (2000)は土壌を用いて FDR および ADR によるキャリブレーションを実施し、両者の結果はほぼ同様であり、Topp et al. (1980) の結果と一致することを示した。ADR 法を岩石に適用した例は今のところ報告されていない。しかし、市販の ADR プローブはその設計上、芯線から 1 本の電極と、シールドから 3 本の電極の合計 4 本の電極があり、これを隙間なく岩石に設置することは困難であると考えられる。

したがって、ADR を岩石に適用する場合には、プローブ構造の検討およびその設置方法の改良が必要となる。

6.7 岩盤の含水率計測手法に関する研究動向のまとめ

TDR を岩盤の不飽和測定に適用した研究は、世界的に見ても未だに少ないのが現状である。海外の研究機関では、NAGRA が継続的に原位置計測機器に関する研究を実施しており、その成果は近年次第に公開されつつある。

TDR で岩石の含水量を計測する場合、比誘電率と含水率との関係は岩種ごとに異なることが複数の報告で指摘されており、土壌の場合に見られる Topp 式のような、幅広い岩種に適用できる経験式は得られないと考えられる。

比較的新しい含水量測定方法として、TDR の他にも、X 線，FDR，ADR がある。このうち、X 線は室内実験の規模での詳細な不飽和領域の計測には適用可能であるが、原位置測定への適用は困難である。FDR は使用するプローブが 1 本であることから、岩盤への設置における利点が期待されるが、プローブ周辺の測定感度が大きいため、設置に注意を要する。また、ADR は比較的廉価な水分計測機器として、様々な製品が開発されているが、これを岩石に適用した事例は未だなく、プローブ構造の検討など、これからの検討課題が多い。

以上のことから、岩石の不飽和状態の計測手法として様々な方法が提案されつつあるが、現状ではどの方法も手法が確立したとは言い難く、TDR がやや先行している状況であると判断される。

7. まとめ

7.1 本年度の研究成果

7.1.1 パッカー式プローブの実用化を目指した計測手法の問題点の調査と仕様・構造の改良

パッカー式プローブの実用化を目指すため、プローブ間隔の違いによる比誘電率の変化、電磁波の影響範囲とプローブ間隔との関係、緩衝材の材質および厚さと測定値への影響、計測値を測定対象の比誘電率に換算する手法について実験的な検討を行った結果、以下の結論が得られた。

1) 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の 1.0 倍程度である。
2) 孔軸方向プローブを用いて測定される比誘電率は、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) 周面内側に対する影響範囲を小さくするために、プローブ間隔は、なるべく小さい方が望ましい。
4) 測定対象の不均質性のスケールの影響が無視できる場合、少なくともプローブ間隔がプローブ幅の 3 倍程度であれば、プローブ幅が測定値に与える影響はほとんど無いと考えられる。
5) パッカー式プローブの緩衝材に求められる特性を検討し、緩衝材の材料を選定した。緩衝材の厚さはプローブ間隔が 1.8～2.4cm であるとき、それと同程度であれば良く、また厚さが 1.5cm 程度でも実用上は問題ないと考えられる。
6) 孔軸方向のパッカー式プローブを用いた測定において、緩衝材の比誘電率が既知であれば、実際のプローブの長さと見かけ上のプローブ長を用いて、周面外側の物質の比誘電率を計算することが可能である。

7.1.2 パッカー式プローブの試作

これまでのパッカー式プローブの構造、材質等に関する検討に基づき、仕様を決定して試作を行った。パッカー式プローブの主な仕様と検証結果は以下の通りである。

1) 測定対象とする孔径は、最小で HQ 程度とした。
2) パッカー本体は人力による取扱いが容易となるように、軽量なアルミニウム製とした。
3) パッカーの加圧媒体は空気あるいは窒素とした。また、小さい圧力でも孔壁との密着性が容易に得られるよう、パッカーの径やパッカーゴムの張力を決定した。

4) 同軸ケーブルの分岐部分が測定対象の比誘電率の影響を受けないようにするため、ケーブルをパッカー内に通すような構造とした。
5) 緩衝材の厚さは、実用上測定値に影響を及ぼさないと考えられる最小値として、1.5cm を選択した。
6) プローブは孔軸方向に平行な配置とし、間隔はプローブの中心軸と孔軸の成す角が 30°になるようにした。緩衝材表面には 2 個のプローブを軸対称に配置した。
7) 塩ビパイプに挿入してパッカー式プローブの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。これは同軸ケーブルが 30m と長く、かつ比誘電率の低いものを測定対象としたために、反射波形が不鮮明になっていることに起因すると考えられた。

7.1.3 TDR 波形データの自動読み取りの試行と手法の確立

微分法に基づく TDR 波形データの自動読み取りプログラムを作成し、実際の測定に適用するとともに、マニュアル法との比較も行ってその有効性を検証し、問題点の整理を行った。また、現有する波形記録プログラムと読み取りのための波形処理プログラムとを統合することを目指し、その仕様の検討を行った。

波形解析プログラムによる自動読み取りは、従来のマニュアル法と同等か、それ以上の精度を与え、読み取りに必要な労力は大幅に軽減されることがわかった。

7.1.4 岩盤中の含水量計測手法に関す研究情報の収集と整理

TDR を岩盤の不飽和測定に適用した研究は、世界的に見ても未だに少ないのが現状である。海外の研究機関では、NAGRA が継続的に原位置計測機器に関する研究を実施しており、その成果は近年次第に公開されつつある。

岩石の不飽和状態の計測手法として TDR の他にも FDR 等の様々な方法が提案されつつあるが、現状ではどの方法も手法が確立したとは言い難く、TDR がやや先行している状況であると判断される。

7.2 今後の課題

今回、構造に関する様々な検討を踏まえた形でパッカー式プローブを試作したことにより、原位置におけるより正確かつ効率的な不飽和領域の測定のツールを入手したことになる。今後、パッカー式プローブを用いた測定により、原位置での岩盤中の不飽和現象が解明されていくことが期待される。ただし、作成したパッカー式プローブは、まだ岩石を測定対象とした動作検証を実施していないため、原位置測定と併せて室内試験による検証も実施し、その結果を反映させて、より完成度の高い測定機器にしていくことが必要である。

また、TDR 波形データの自動読み取りについては、実際にプログラムを作成してそ

の有効性と問題点を確認できたことから、今後はプログラムの改良を進めて、より使いやすく、かつ問題の起こりにくいものとし、手法の確立を図ることが必要である。

参考文献

（第 3 章）

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)

（第 4 章）

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)

（第 5 章）

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

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

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)

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

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

（第 6 章）

Guskin, G. J., and J. D. Miller: Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, *J. Agrec. Engg. Res.*, 63, pp.153~160 (1996)

Hokett, S. L., J. B. Chapman, and C. E. Russel: Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock, *J. Hydrology*, 138, pp.89~96 (1992)

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)

小松 満：誘電法による地盤の浸透特性の計測手法に関する研究, 岡山大学学位論文 (2000)

林 為人： TDR 法による岩石の比誘電率測定に及ぼすプローブの設置方法、亀裂の有無および高温の影響, 日本水文学会誌, 29, pp.189~204 (1999)

Marschal, P., E. Fein, H. Kull, W. Lanyon, L. Liedtke, I. Muller-Lyda, H. Shao, Conclusions of the tunnel near-field programme (CTN), *NAGRA Technical Report*, 99-07 (1999)

冀北平, 三野徹, 赤江剛夫, 長堀金造: FDR 法による土壌誘電率測定と特定深さの土壌水分測定, 農業土木学会論文集, 182, pp.25~30 (1996)

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)

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

Tidwell, V. C., R. J. Glass, and W. Peplinski: Laboratory investigation of matrix imbibition from a flowing fracture, *Geophysical Res. Letters*, Vol. 22., No. 11, pp.1405~1408 (1995)

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.　TDR波形データ

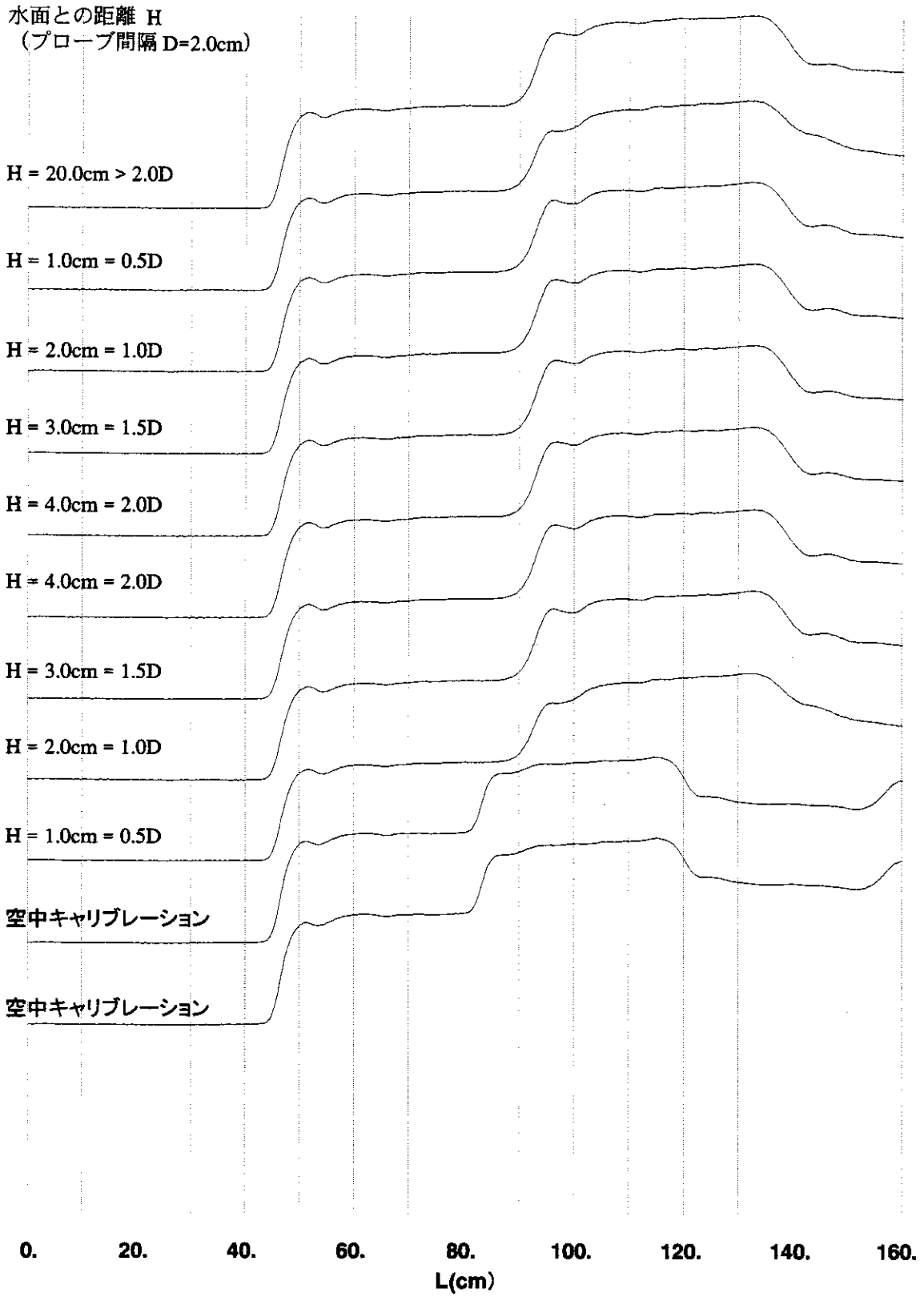


図 A3.2-1　周面外側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 2.0cm，空気中で測定）

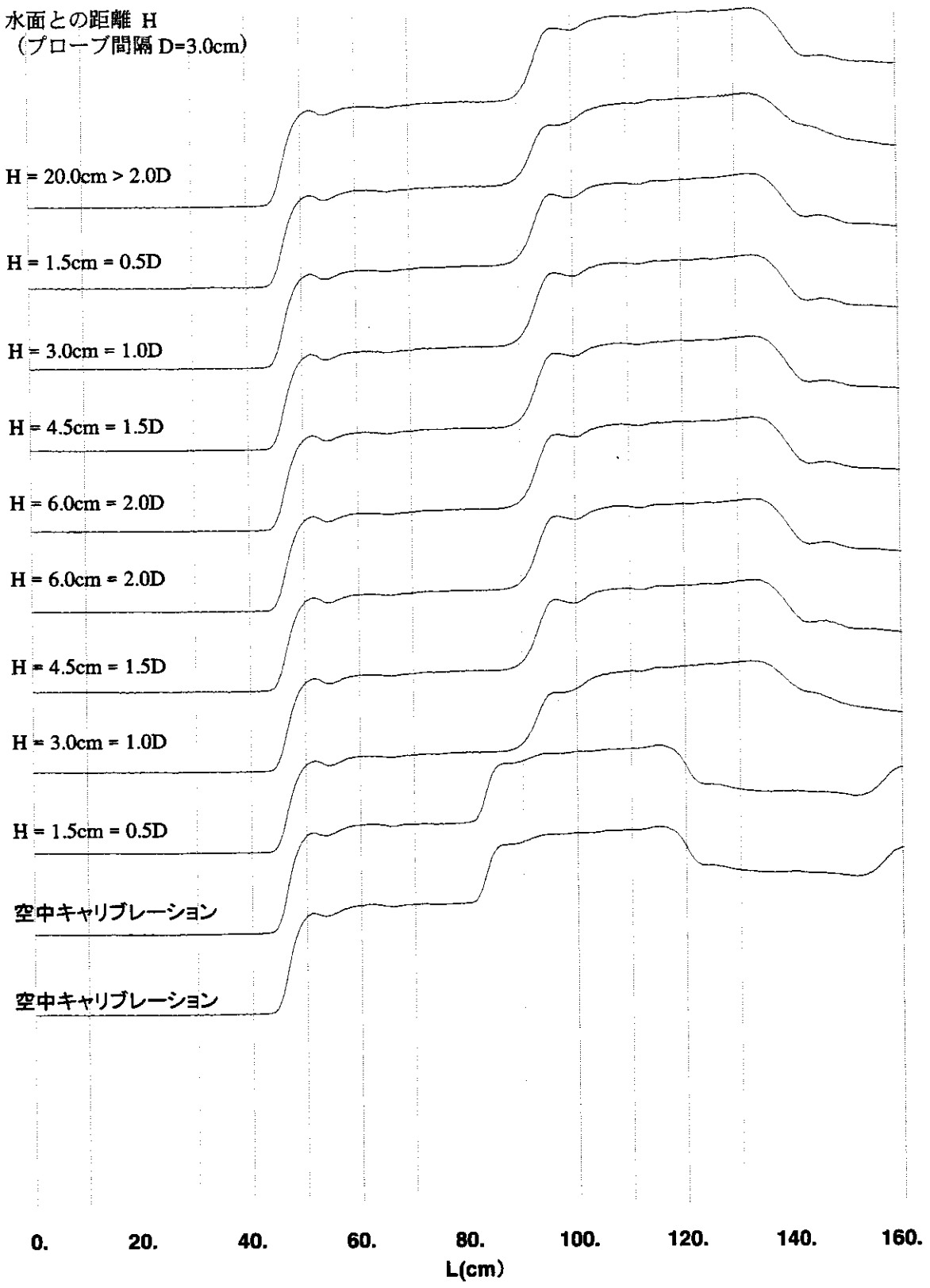


図 A3.2-2　周面外側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 3.0cm，空気中で測定）

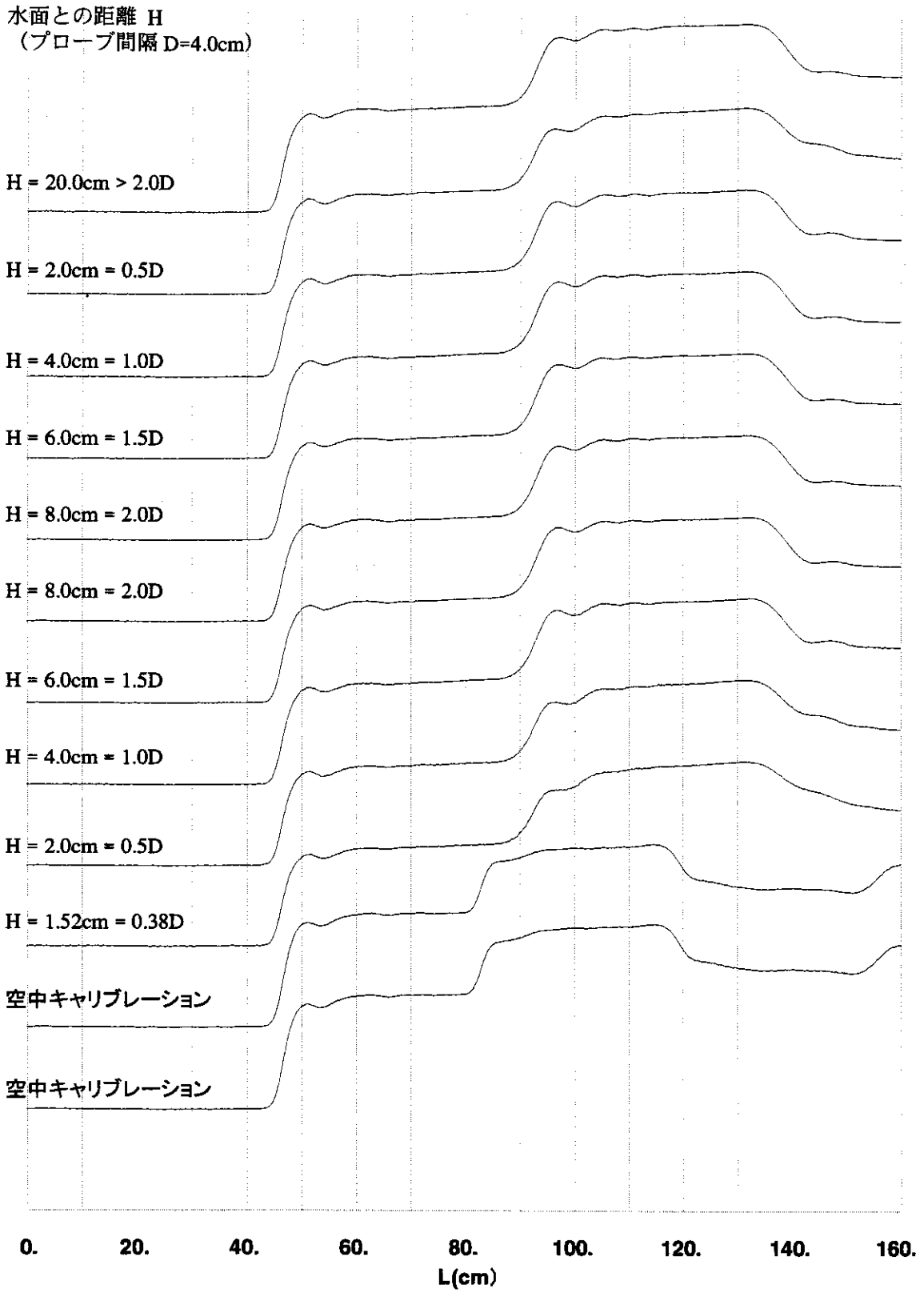


図 A3.2-3　周面外側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 4.0cm，空気中で測定）

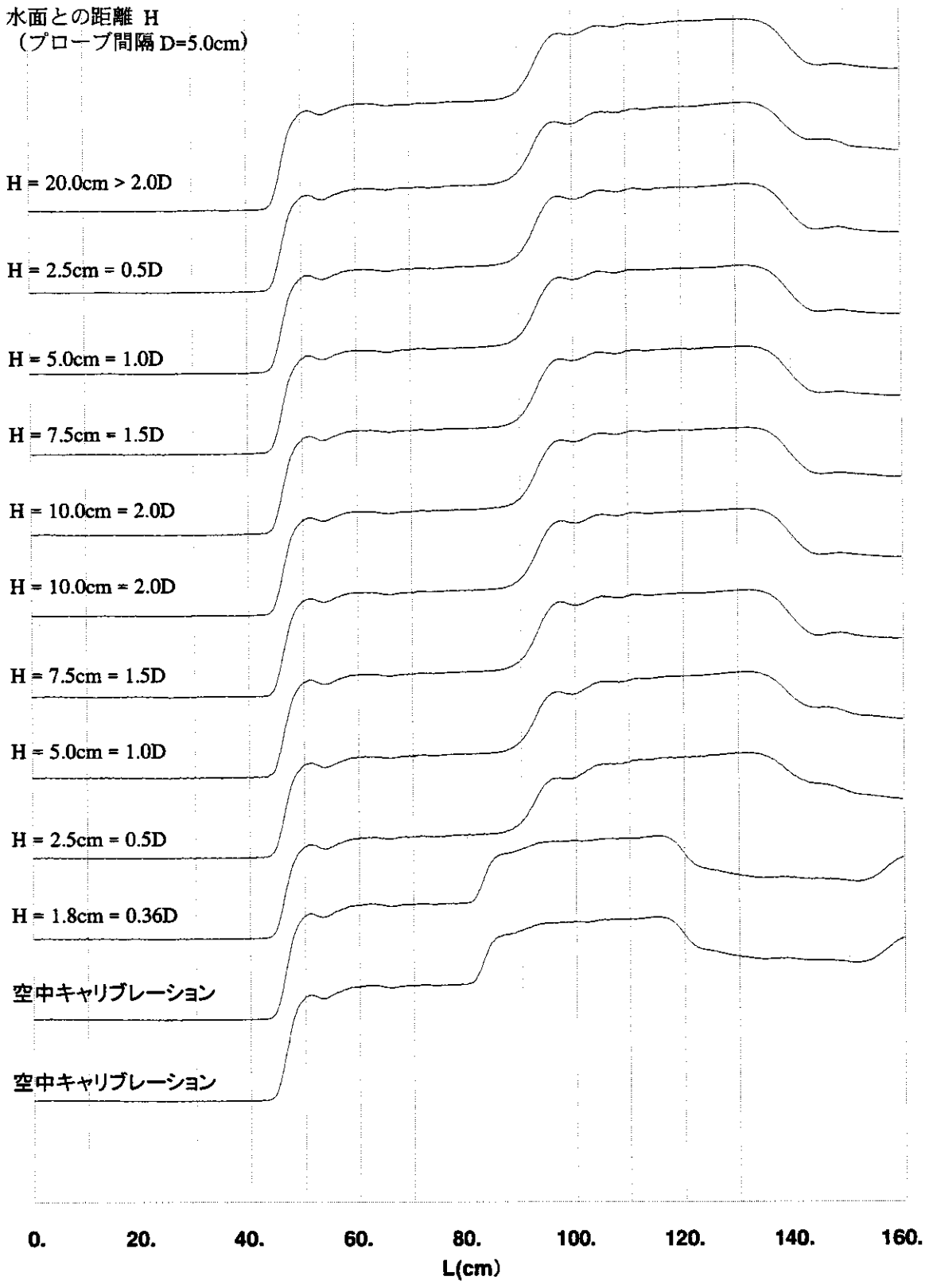


図 A3.2-4　周面外側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 5.0cm，空気中で測定）

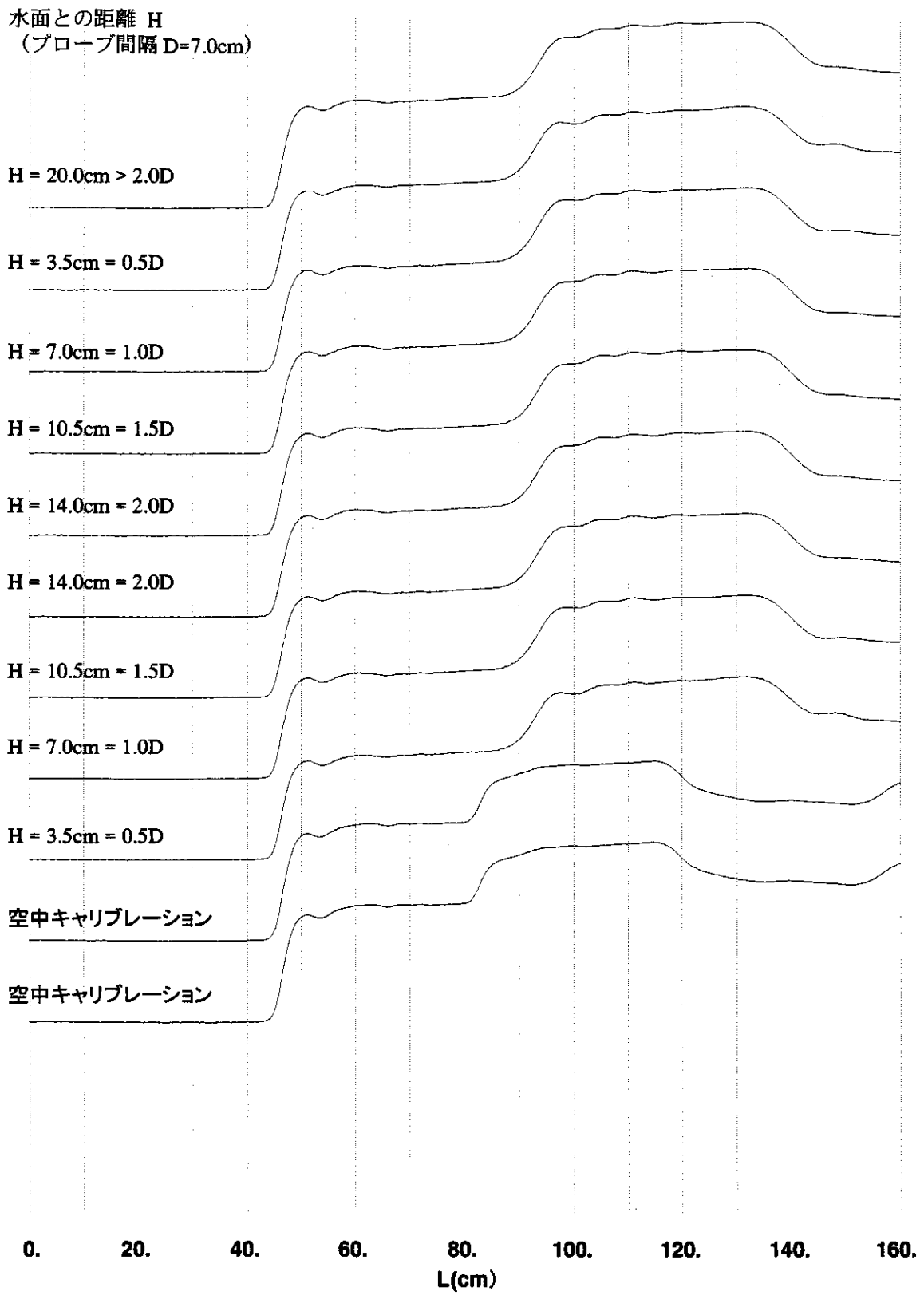


図 A3.2-5　周面外側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 7.0cm，空気中で測定）

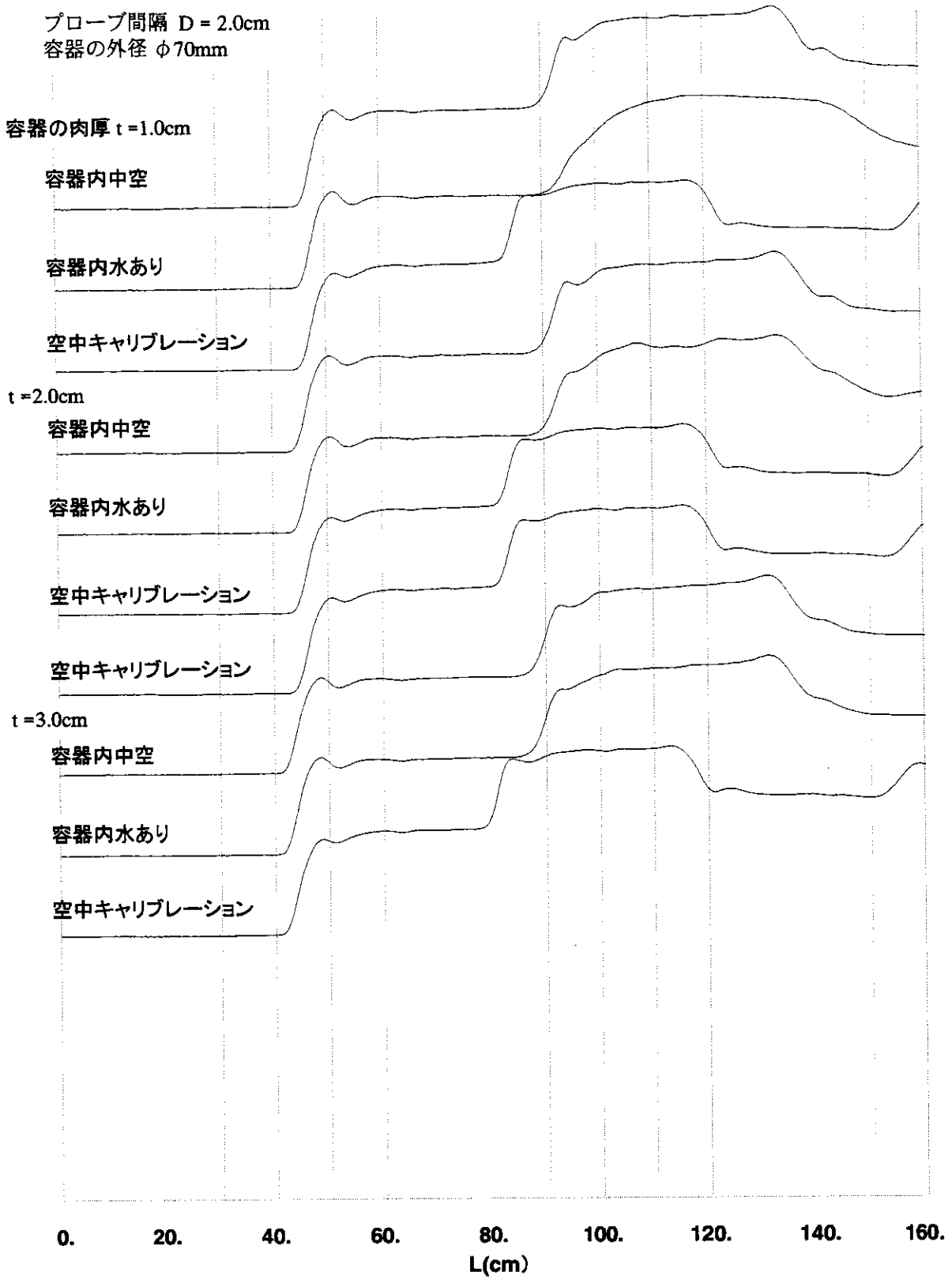


図 A3.2-6 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 2.0cm）

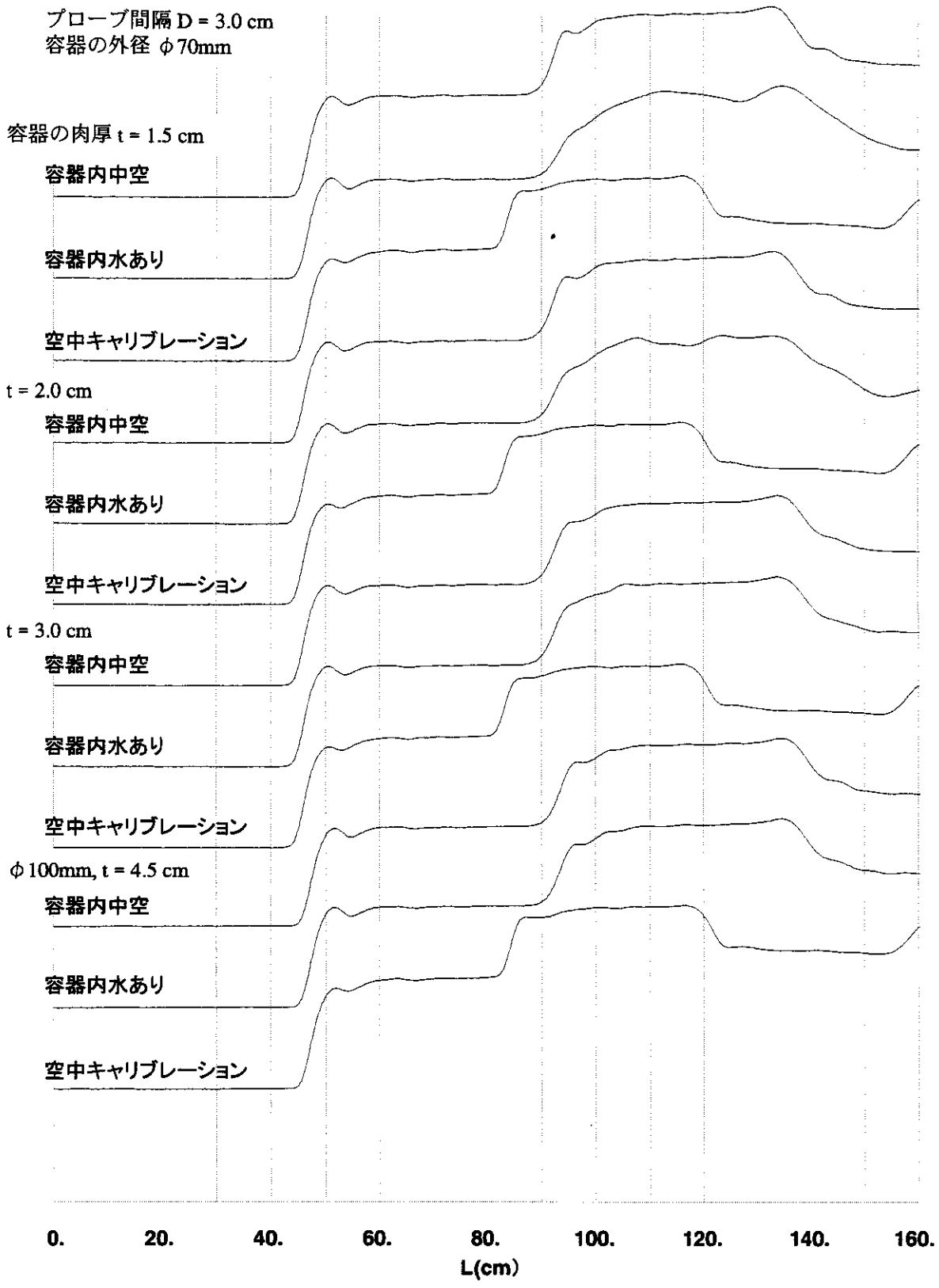


図 A3.2-7 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 3.0cm）

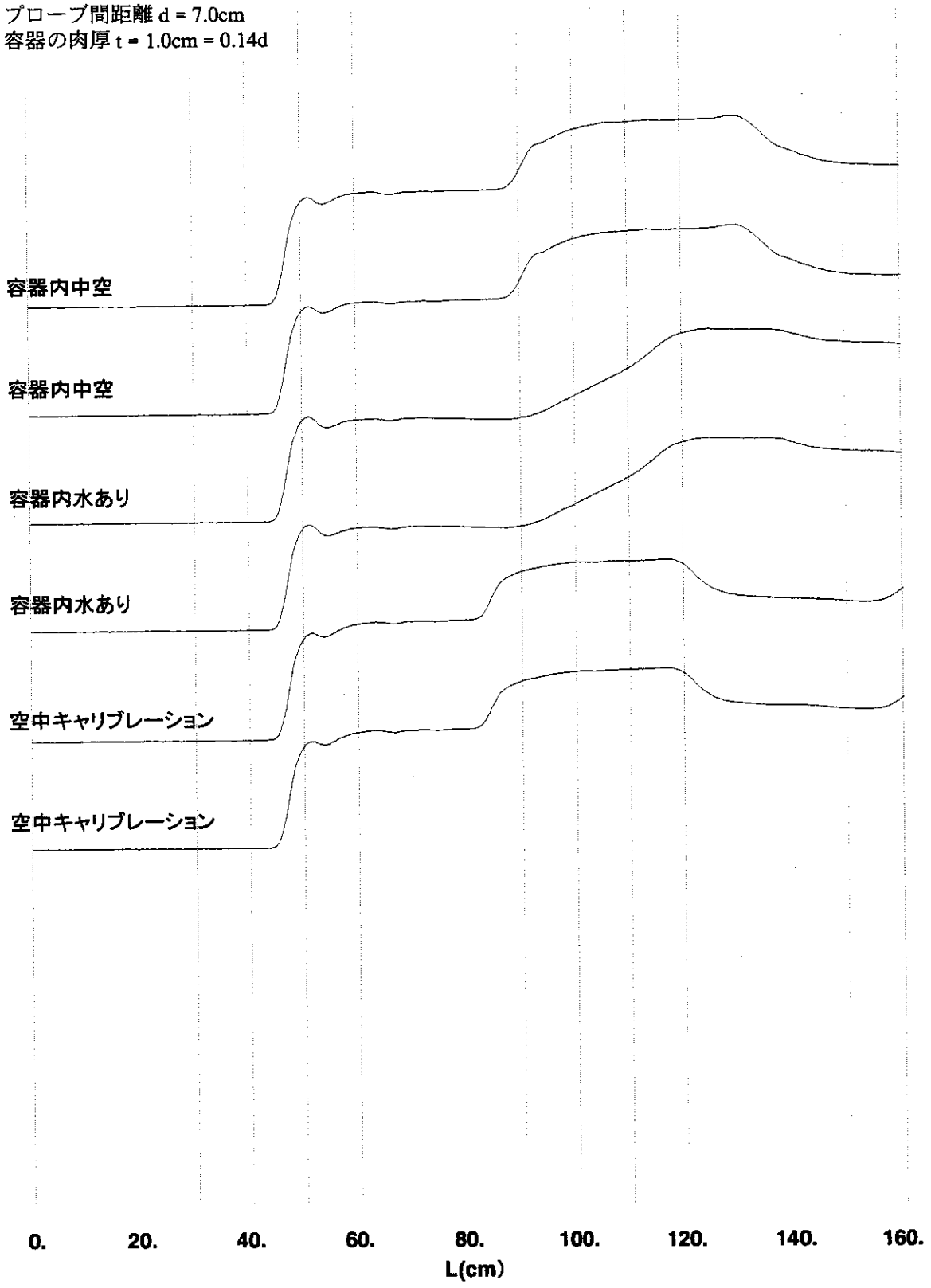


図 A3.2-8 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 7.0cm，容器の肉厚 1.0cm）

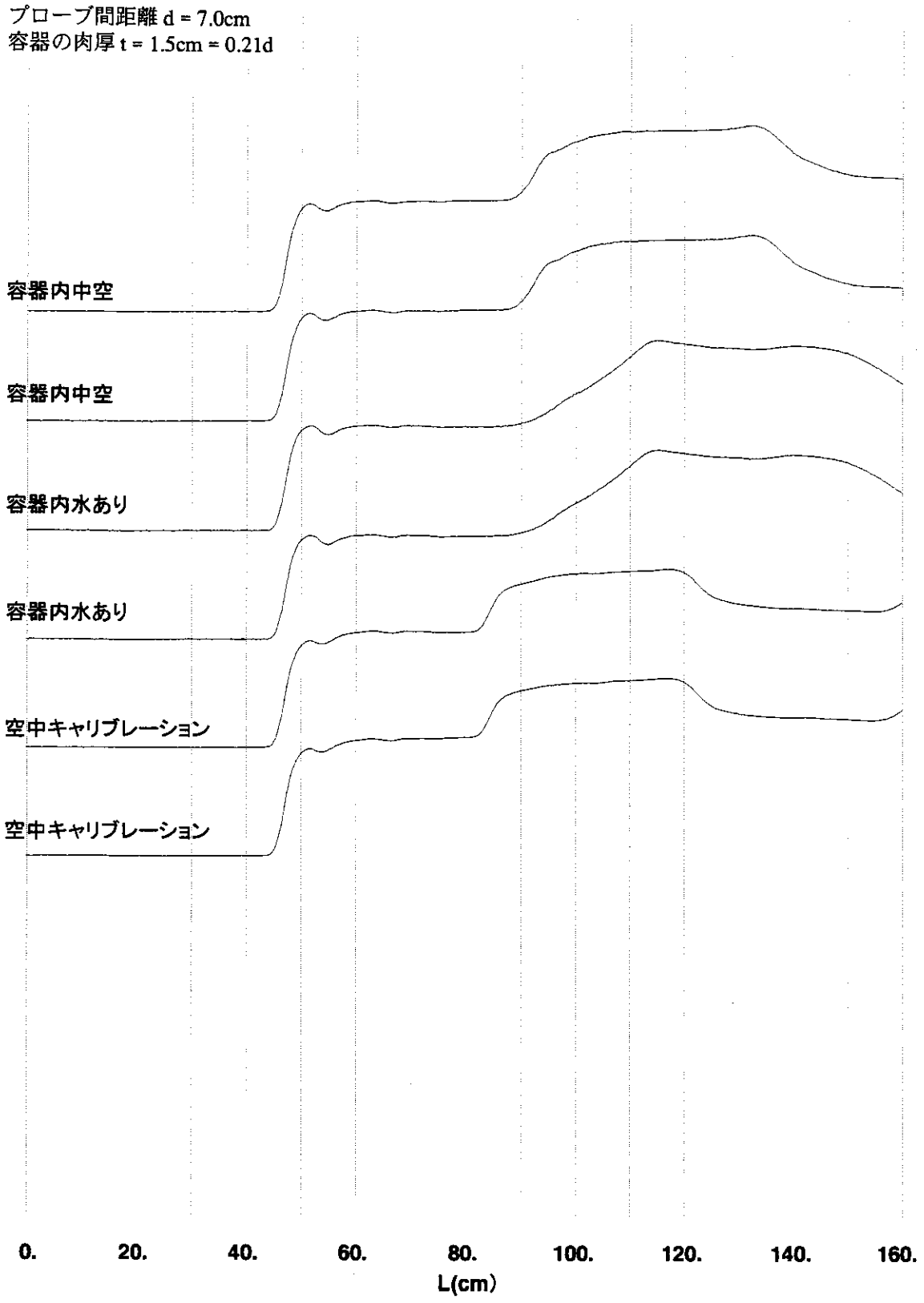


図 A3.2-9　周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 7.0cm，容器の肉厚 1.5cm）

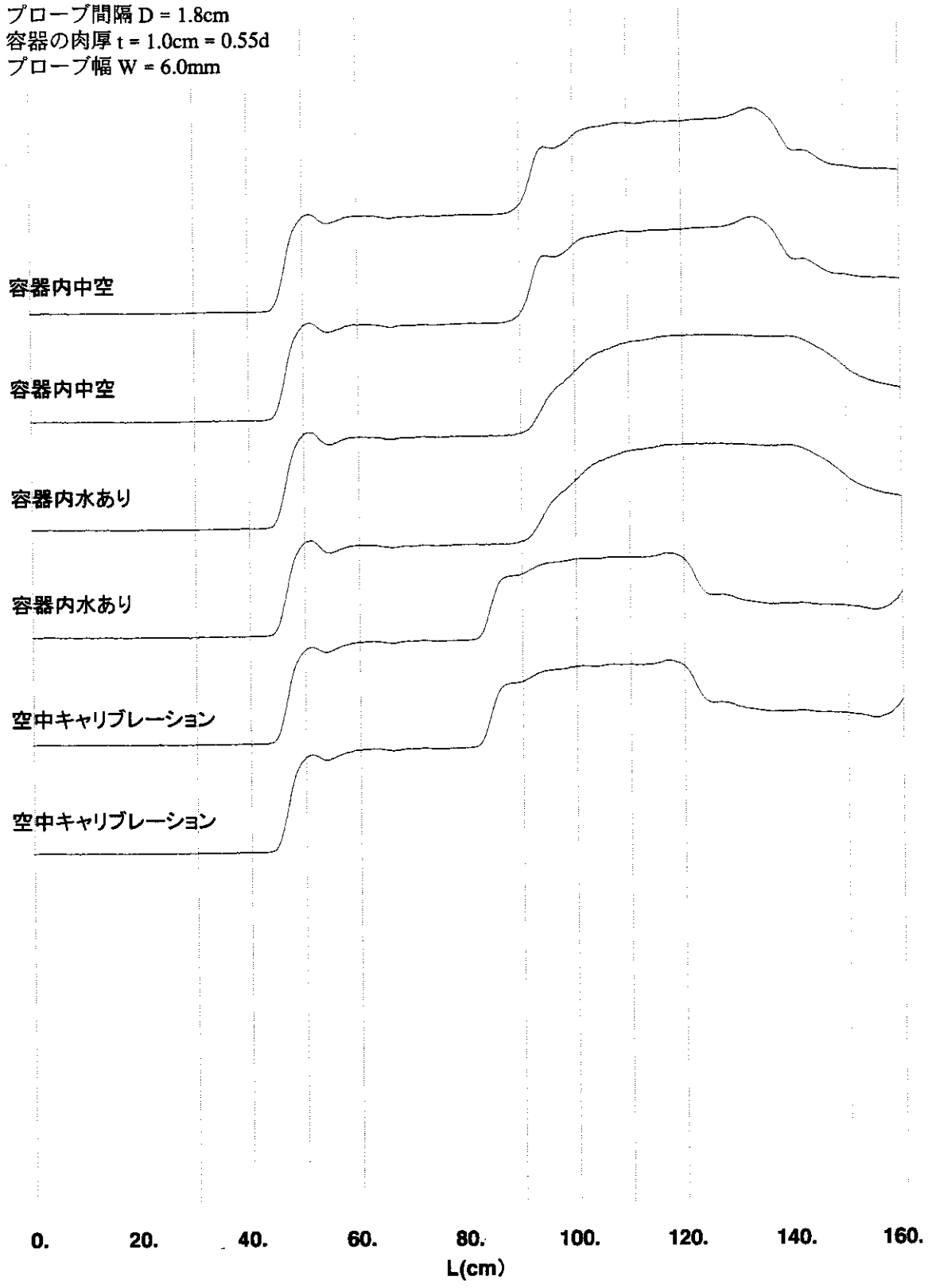


図 A3.2-10 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 1.8cm，容器の肉厚 1.0cm）

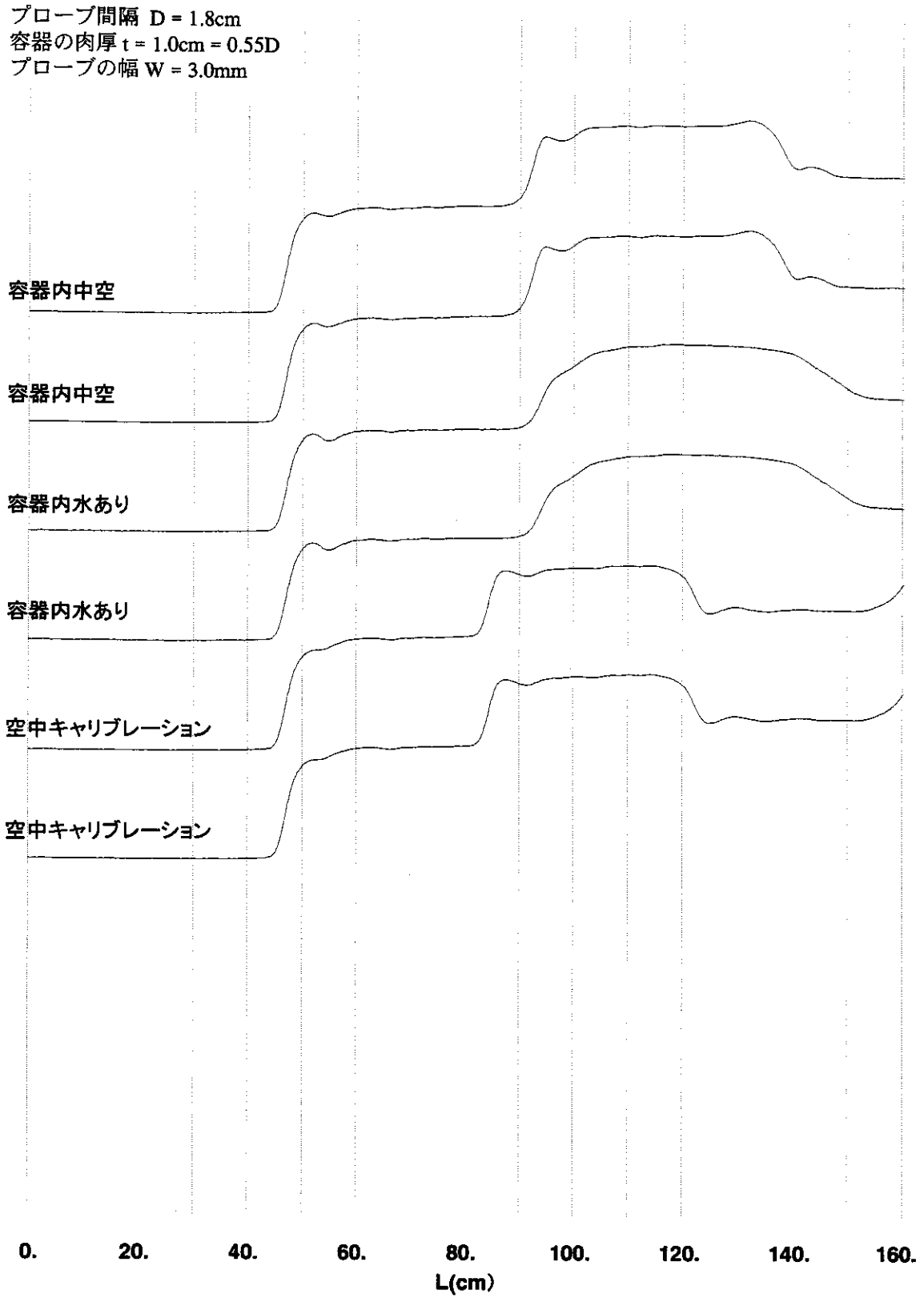


図 A3.2-11 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 1.8cm，幅 3mm，容器の肉厚 1.0cm）

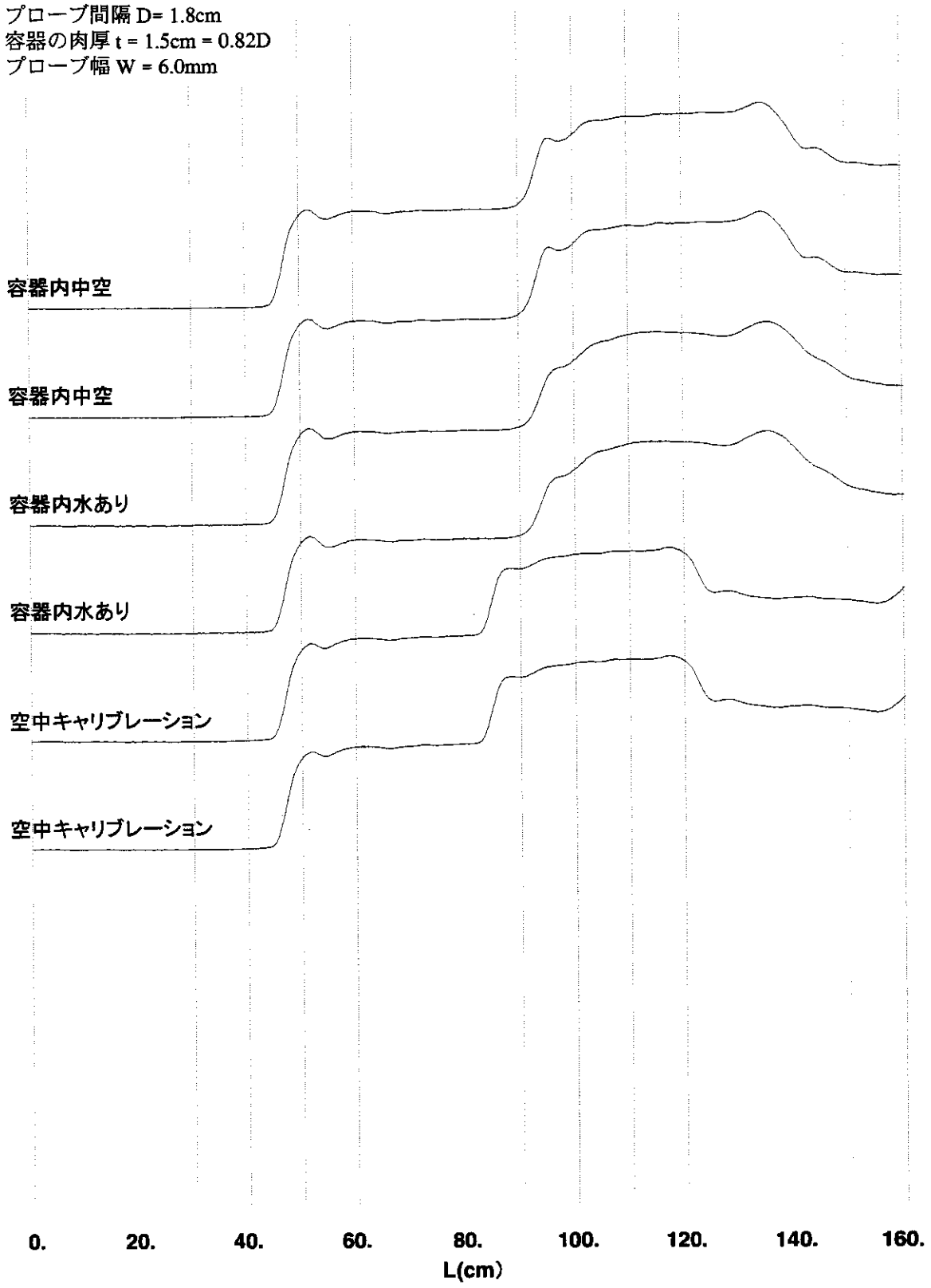


図 A3.2-12 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 1.8cm，容器の肉厚 1.5cm）

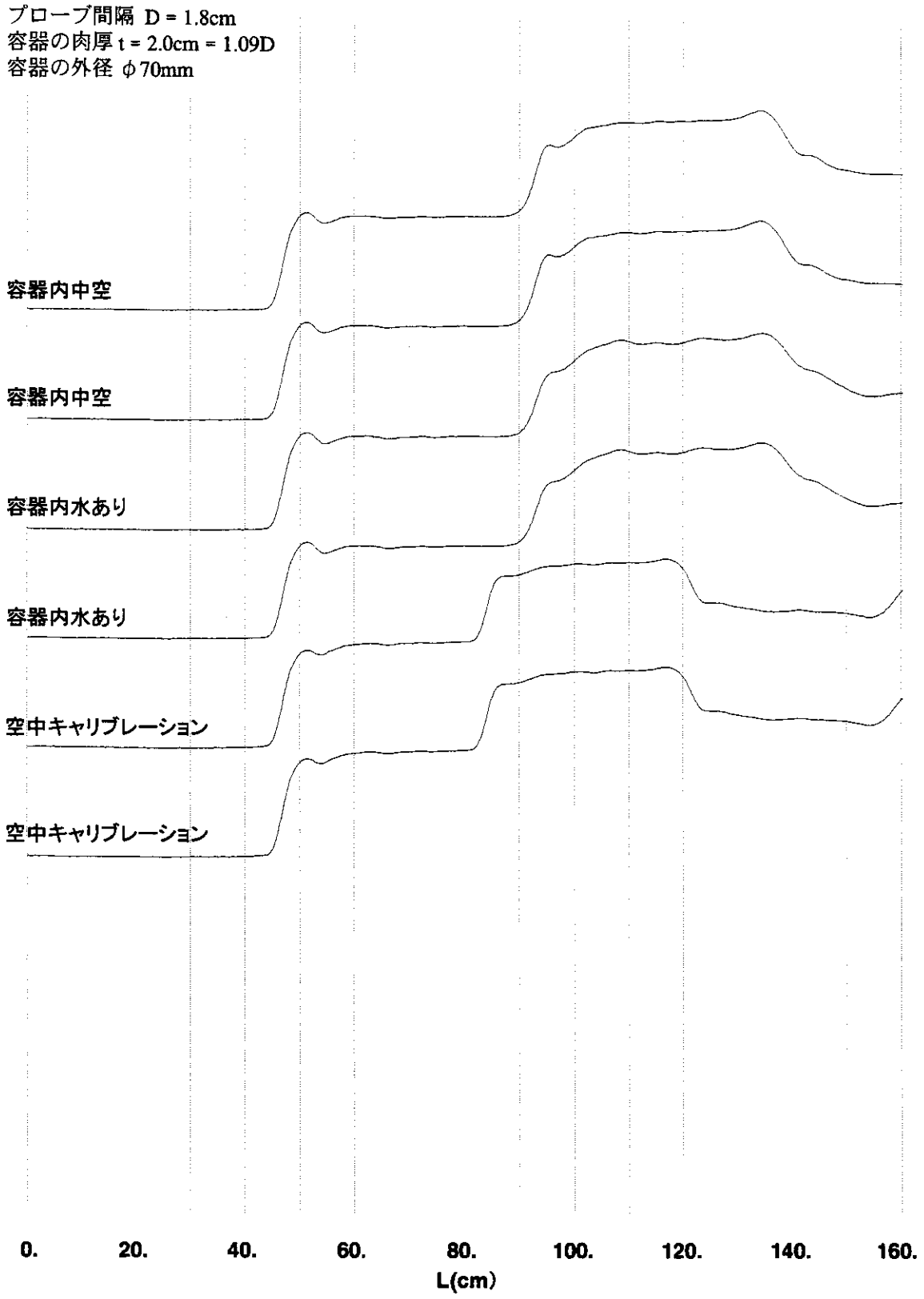


図 A3.2-13 周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 1.8cm，容器の肉厚 2.0cm）

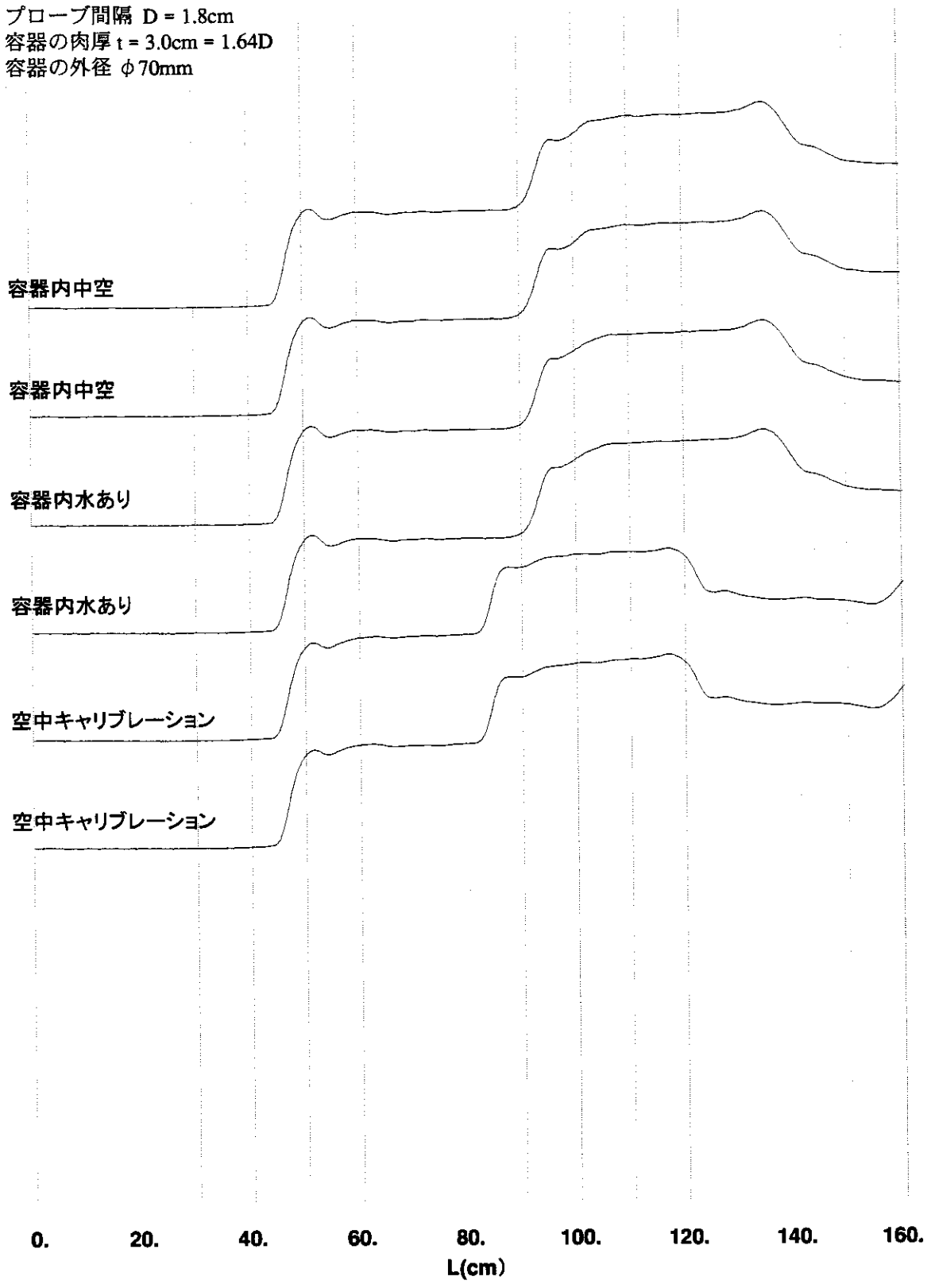


図 A3.2-14　周面内側の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 1.8cm，容器の肉厚 3.0cm）

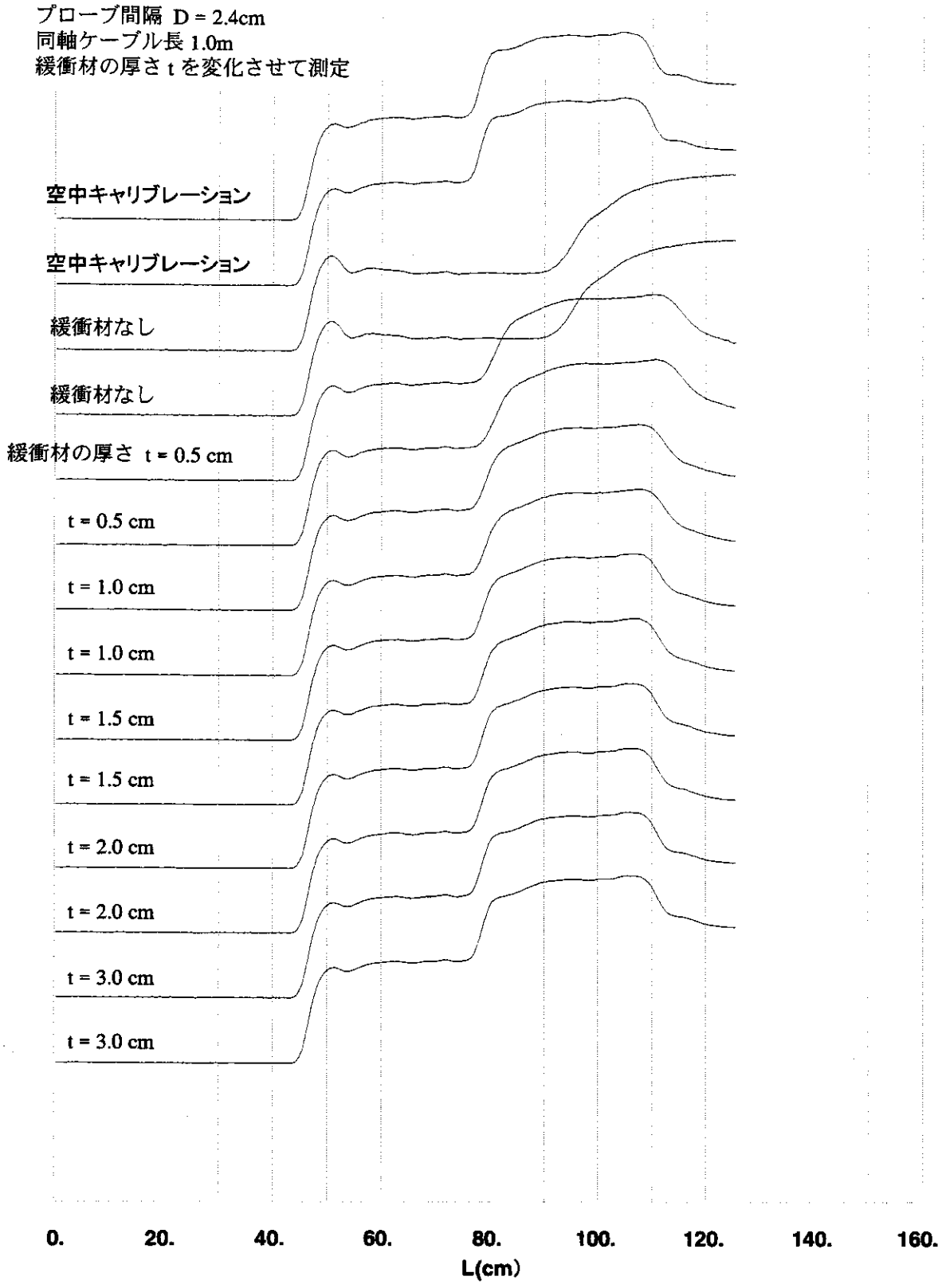


図 A3.3-1 緩衝材使用時の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 1.8cm）

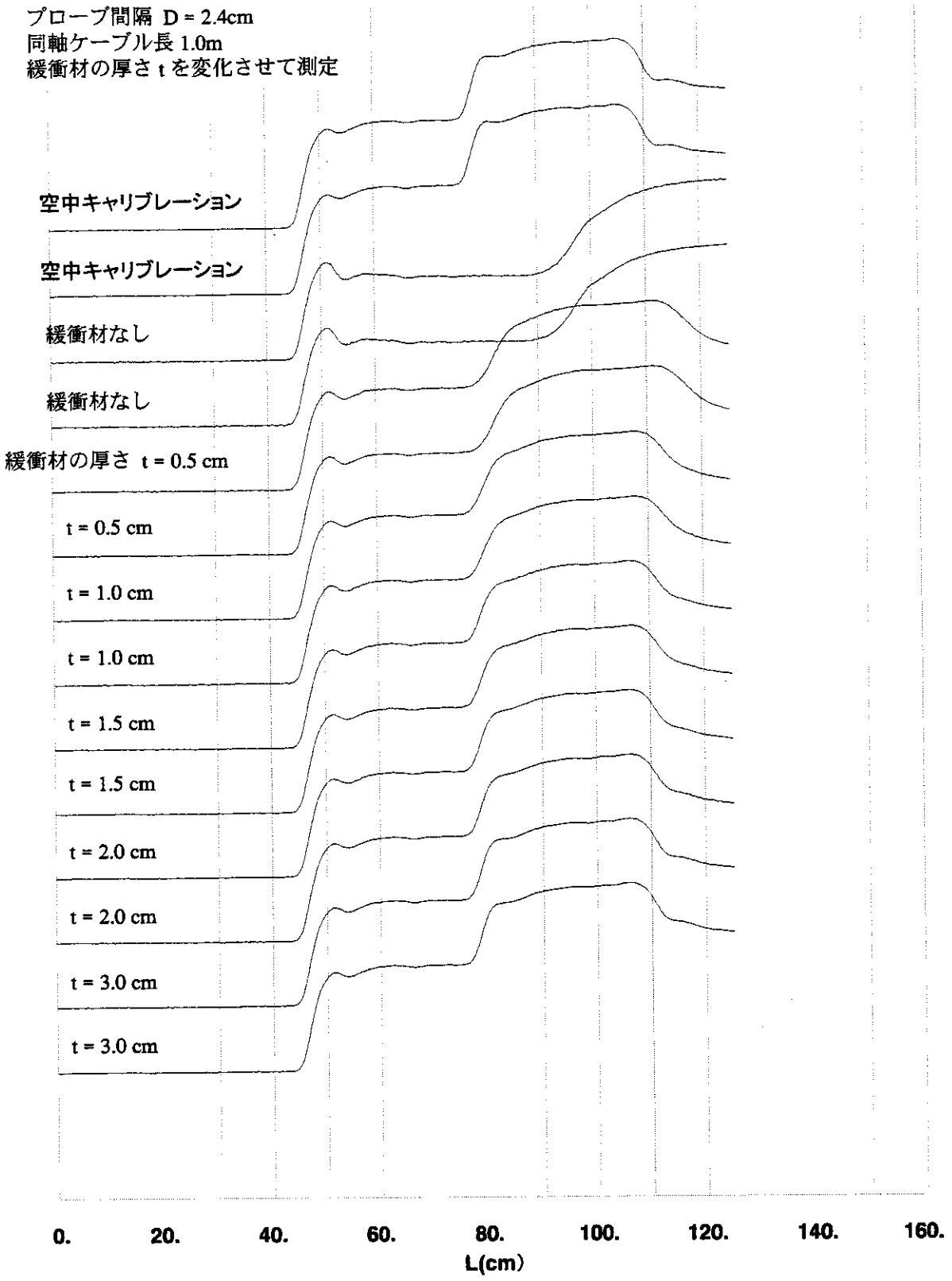


図 A3.3-2 緩衝材使用時の電磁波の影響範囲を調べる試験の TDR 波形

（孔軸方向プローブ，プローブ間隔 2.4cm）

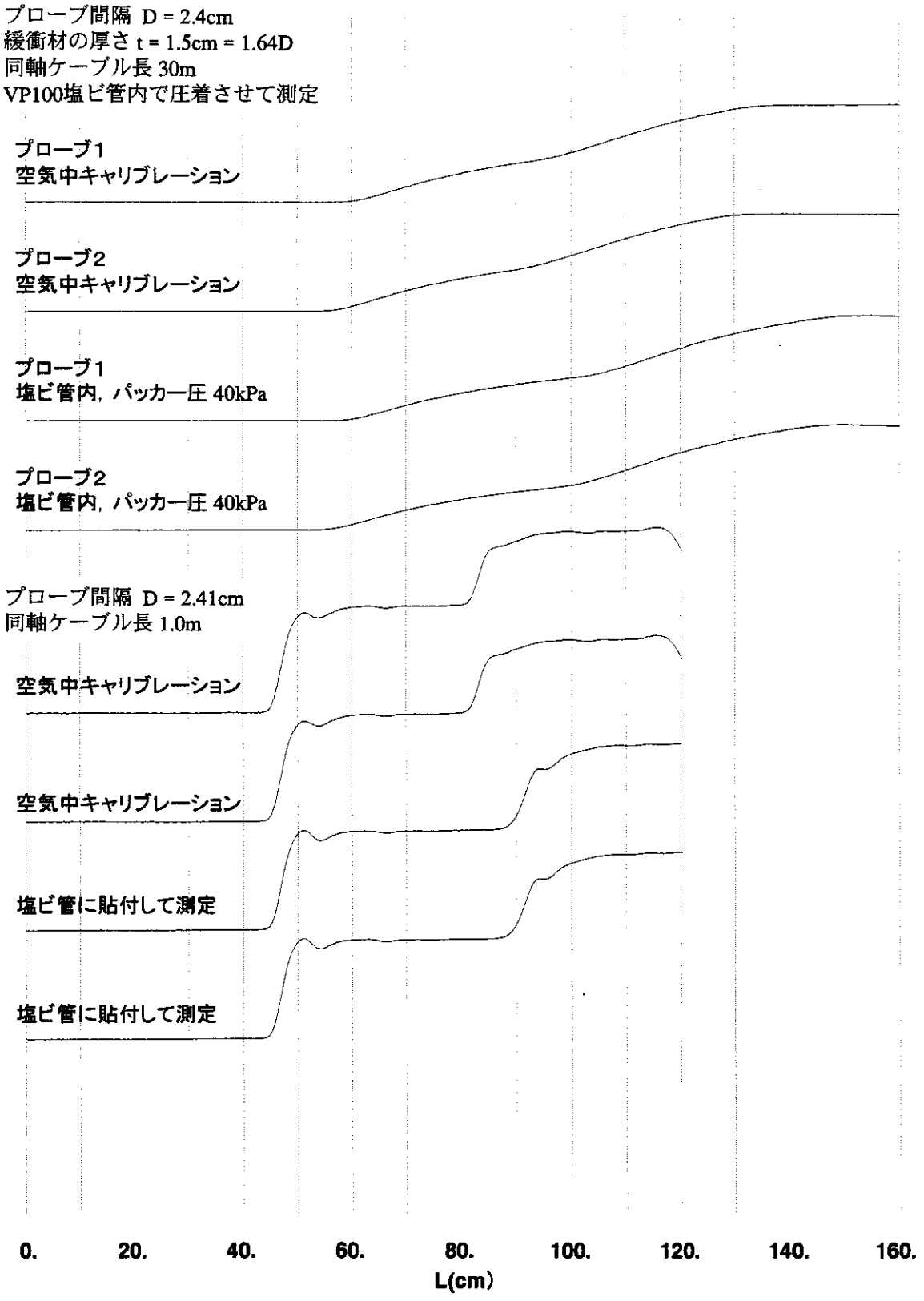


図 A4.3-1 パッカー式プローブの動作検証試験の TDR 波形

付　　録

2.　写　　真

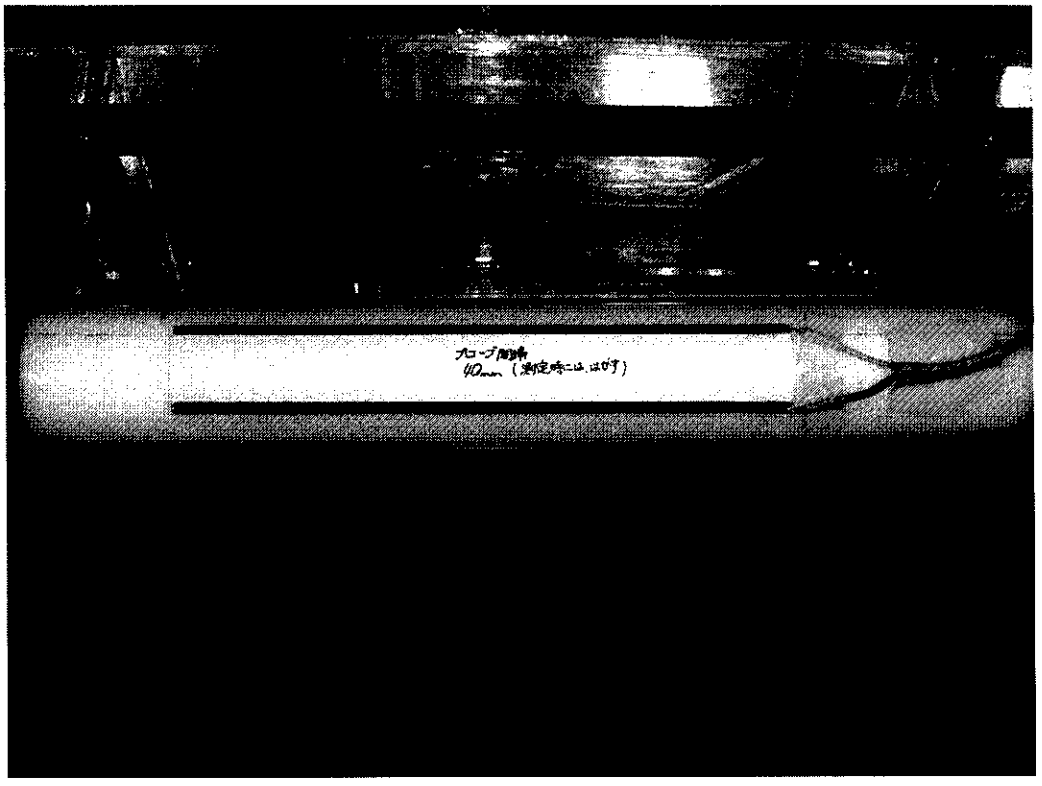


写真 3.2-1　プローブ電極の設置状況
（円周外側の電磁波の影響範囲を調べる実験）

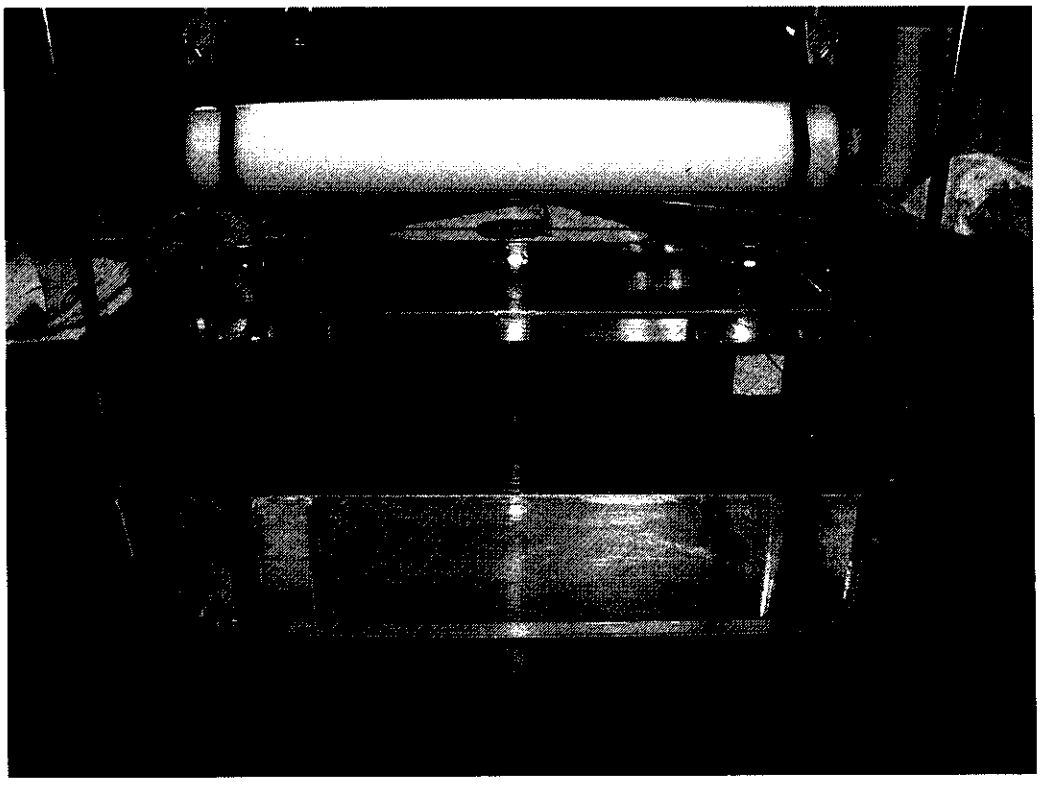


写真 3.2-2　円周外側の電磁波の影響範囲を調べる実験の状況

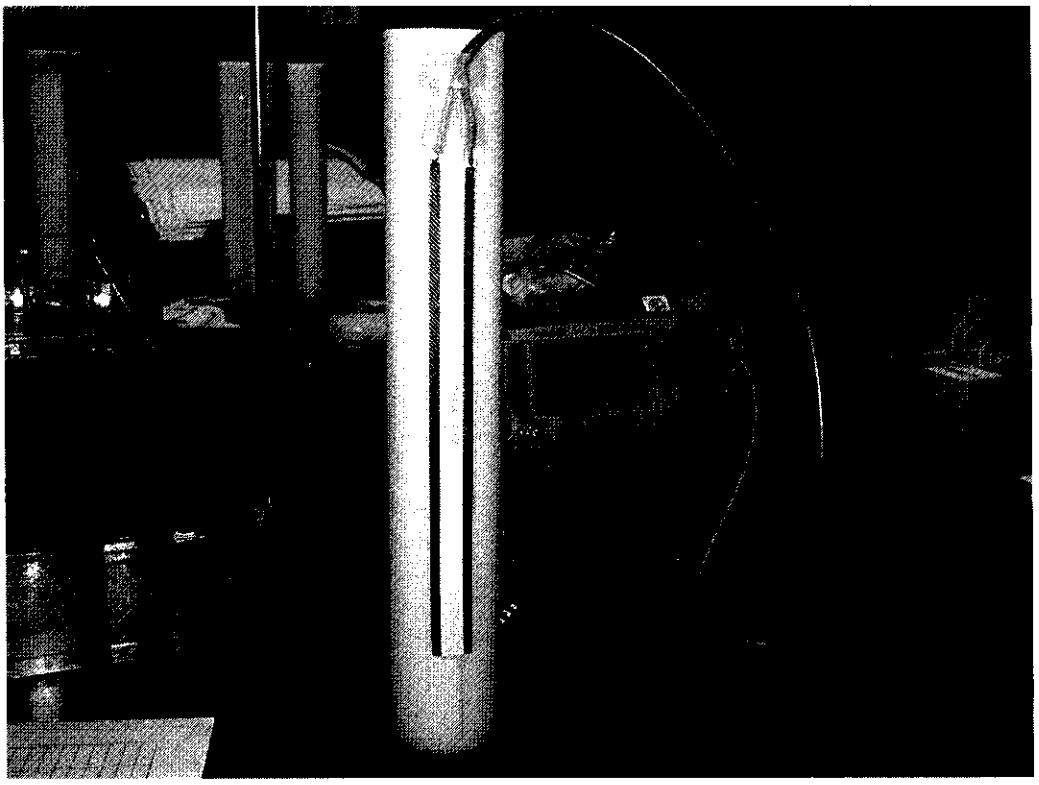


写真 3.2-3　円周内側の電磁波の影響範囲を調べる実験の状況

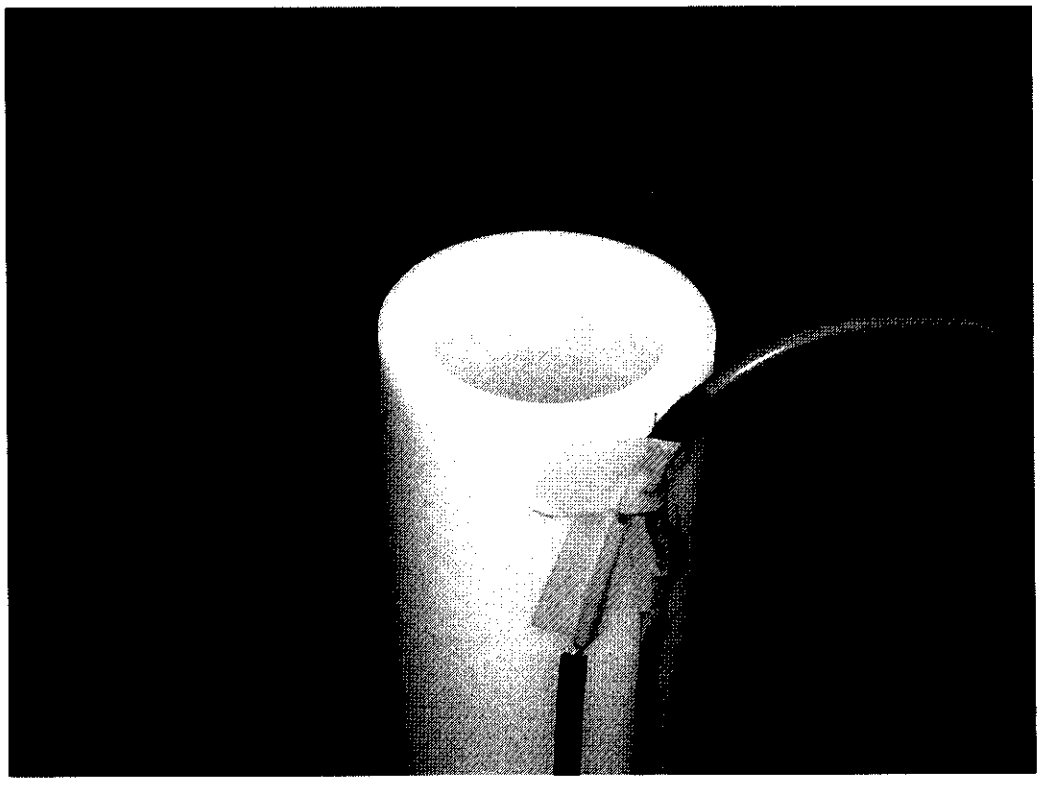


写真 3.2-4　円筒容器に水を入れた場合の測定状況
（円周内側の電磁波の影響範囲を調べる実験）

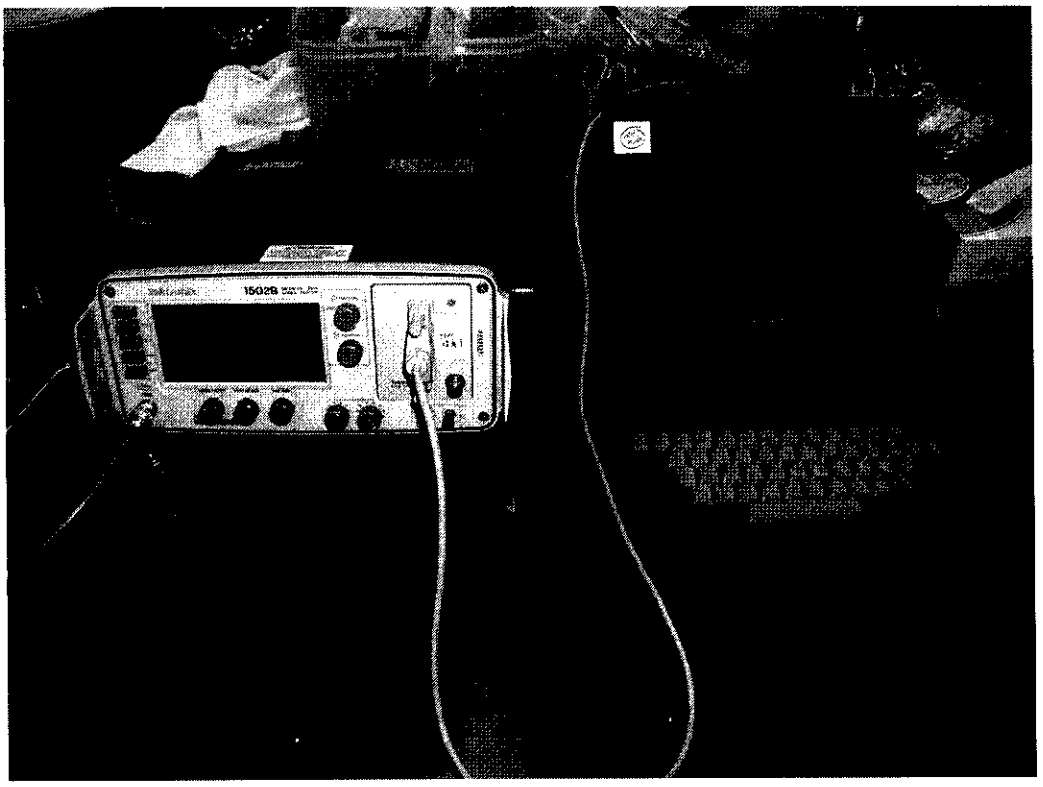


写真 3.2-5　ケーブルテスターとデータ回収用 PC

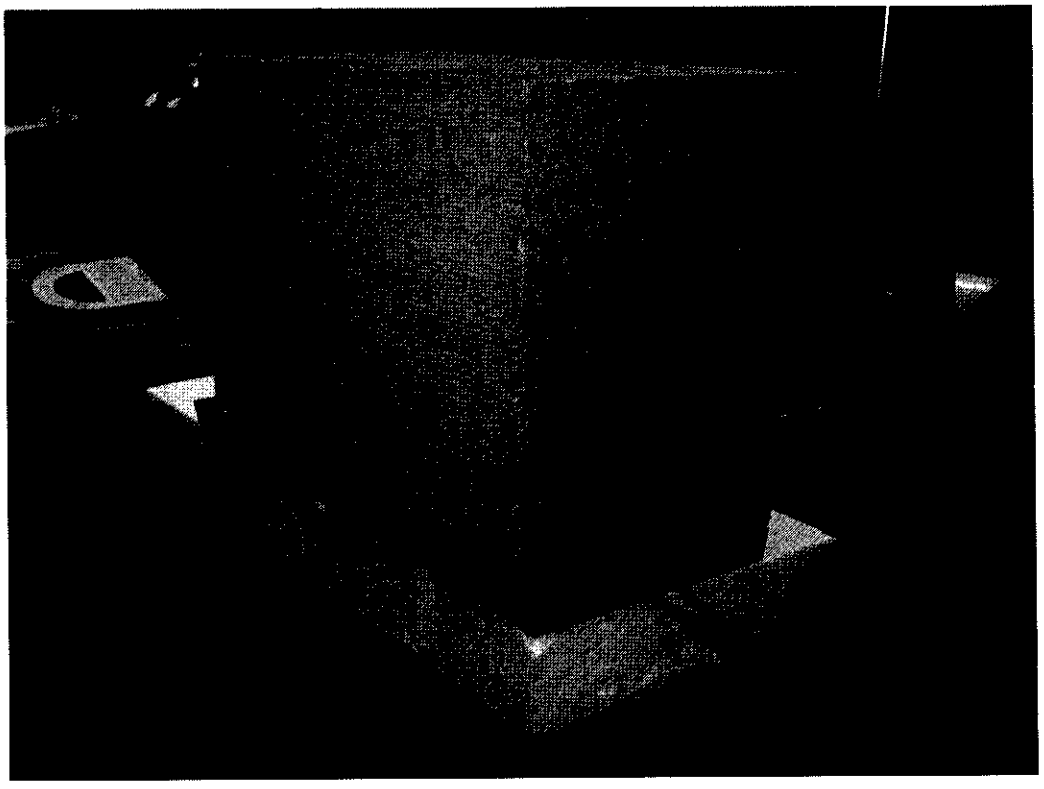


写真 3.3-1　緩衝材を用いたときの電磁波の影響範囲を調べる実験の状況
（岩石ブロックは白河熔結凝灰岩）

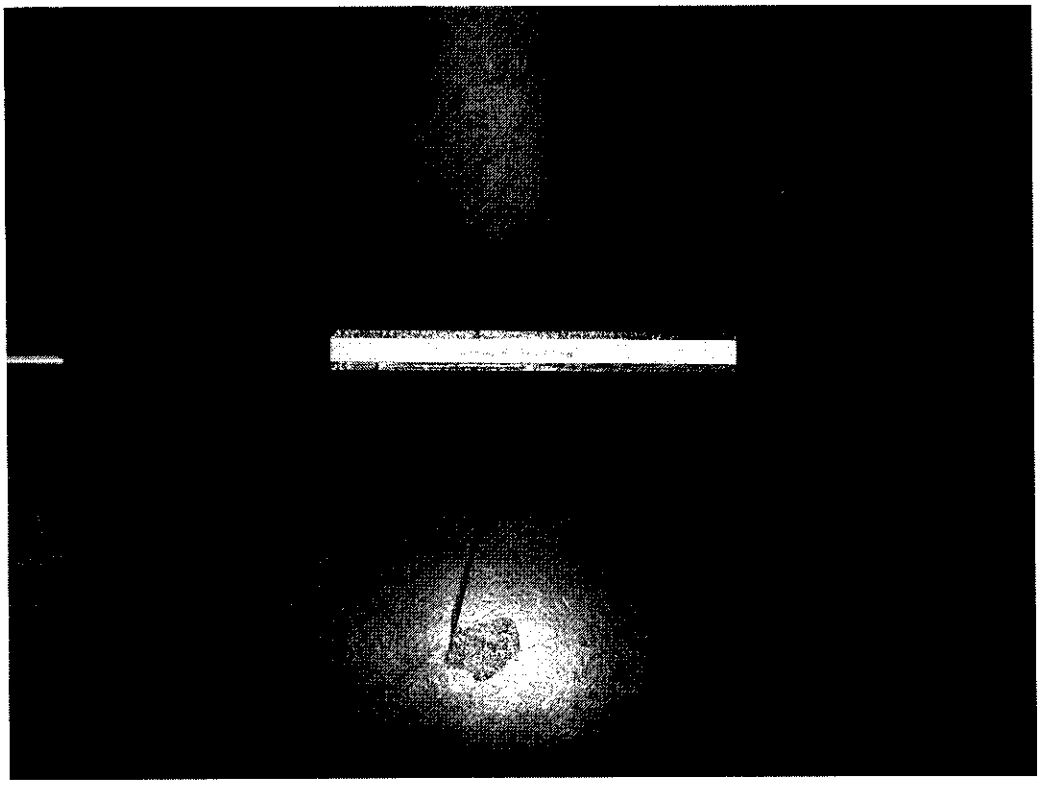


写真 4.2-1　パッカー式プローブの試作機
（反対側にもプローブあり）

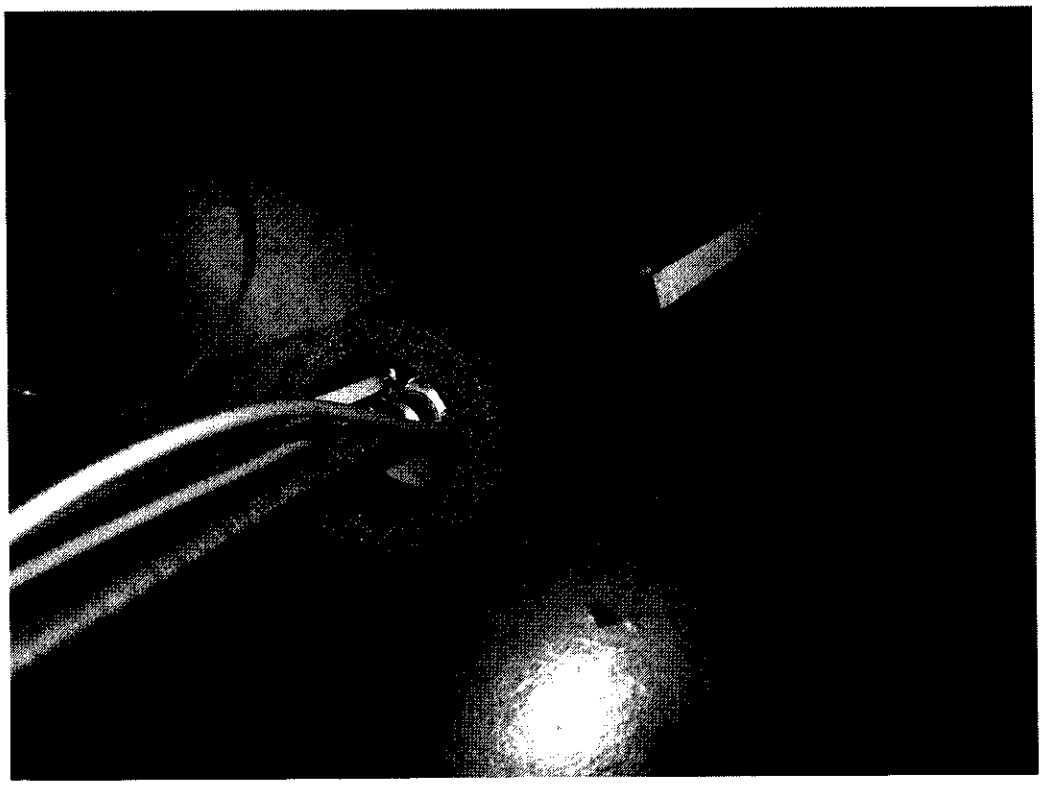


写真 4.2-2　パッカー式プローブの端部
（白いチューブは空気注入用、灰色の線は同軸ケーブル）

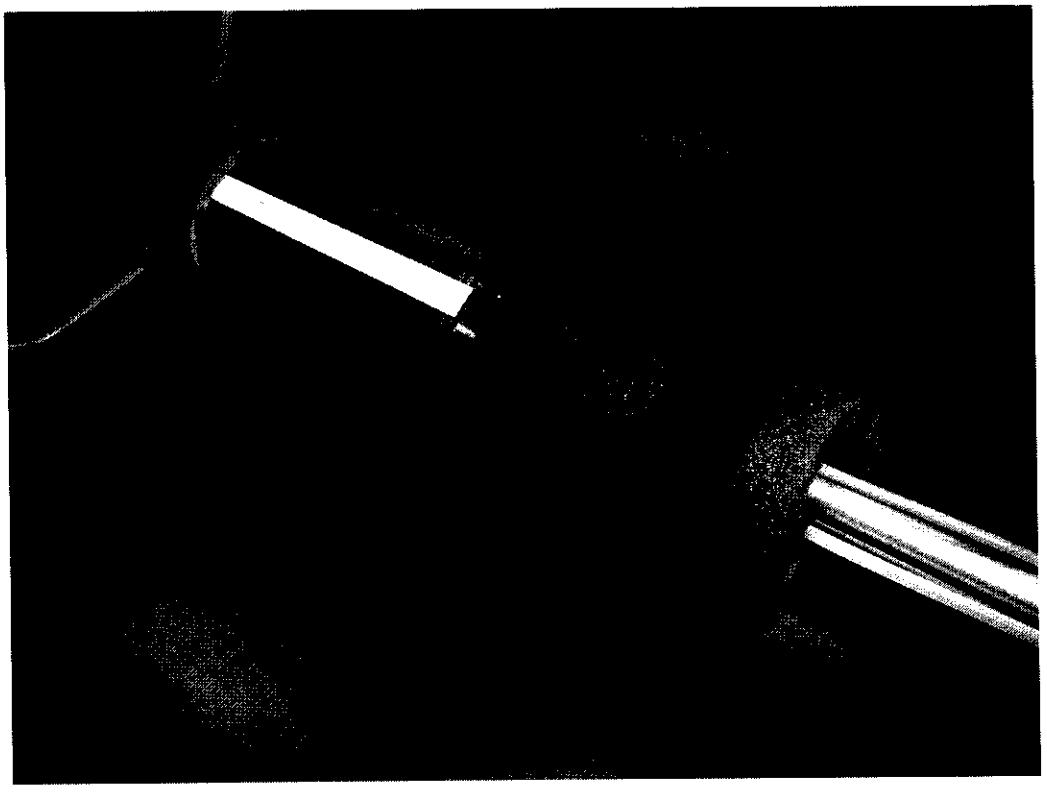


写真 4.2-3　パッカー式プローブを塩ビ管（内径 100mm）に挿入している状況

付　　録

3.　波形読み取りプログラムリスト

```
C---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7--
C
C     T D R - T R A C E   P R O C E S S O R   " T R A C E - 2 "
C
C     THIS PROGRAM SEARCHS FOR THE REFLECTION POINTS WHERE THE PULSE
C     ENCOUTERS THE SPLIT OF THE COAXIAL CABLE (A) AND THE OPEN END OF
C     THE PROBE RODS (B).  THEN, TRACE LENGTH AND DIELECTRIC CONSTANT
C     ARE CALCULATED.
C
C     --------------------------- REMARKS ----------------------------
C     ORIGINALLY CODED BY TOSHIHIRO SAKAKI ON APRIL 27, 2000
C     LAST UPDATED ON JANUARY 27, 2001
C     VERSION 1.0
C     ALL RIGHTS RESERVED...
C     LAST MODIFIED BY TSUNEYUKI MAEMURA, DIA CONSULTANTS CO., LTD. ON
C     FEBRUARY 26, 2001
C     VERSION 1.1
C     ------------------------------------------------------------------
C
C     ==================== PROGRAM'S CAPABILITY ========================
C     THE PROGRAM IS CAPABLE OF ;
C
C     (1) PROBE CONSTANT ANALYSIS
C       - THIS ANALYSIS IS DONE FOR OBTAINING THE PROBE CONSTANT
C         USING THE TRACE IN AIR WITH KNOWN PROBE LENGTH.
C     (2) GENERAL TRACE PROCESSING ANALYSIS
C       - AFTER THE PROBE CONSTANT IS OBTAINED, SPECIFY THE VALUE
C         AS THE VARIABLE "PRBCON" IN THE PROBE DATA FILE.
C         TYPICAL VALUES FOR THE PRBCON ARE ROUGHLY 0.03-0.10m.
C     ==================================================================
C
C     ------------- DESCRIPTION OF THE REFLECTION POINTS --------------
C
C     (1) GEOMETRICAL DESCRIPTION OF A TDR-PROBE (PARALLEL-WIRE) :
C
C                                 METAL RODS
C                           +-----------------------+
C                           +-----------------------+
C            COAX CABLE     +
C         ===============+
C         ===============+
C                        +
C                           +-----------------------+
C                           +-----------------------+
C
C                      (A) (C)                    (B)
C
C
C     (2) TYPICAL TRACE AND THE POINTS :
C
C       A : INITIAL REFLECTION (INITIALX)
C       B : FINAL   REFLECTION (FINALX)
C       C : LOCAL PEAK
C                           (C)
C                            *                              *
C                           *  *                         *
C                           *    *                     *
C                          *      *                  *
C                          *        *               *
C                         *            *          *
C                         *                 *     *
C                                             *  *
```

```
C           * * * * * * *
C                     (A)                       (B)
C
C     ----------------------------------------------------------------
C
C     --------------- FUNDAMENTAL IDEA OF THE PROGRAM -----------------
C     THE ALGORYTHM OF THIS PROGRAM IS BASED ON THE "TRACE41.PAS"
C     DEVELOPED BY J.BAKER AND E.SPAANS WRITTEN IN TURBO PASCAL 7.0.
C     FOR SMOOTHING AND DIFFERENTIATING THE TRACE, THE SAVITZKY-GOLAY
C     METHOD IS USED.  FOR MORE INFORMATION, REFER TO ;
C     P.A.GORRY, "GENERAL LEAST-SQUARES SMOOTHING AND DIFFERENTIATION
C     BY THE CONVOLUTION (SAVITZKY-GOLAY) METHOD", ANAL. CHEM.,
C     VOL. 62, 570-573, 1990.
C     ----------------------------------------------------------------
C
C     ----------------- DEFINITION OF VARIABLES ----------------------
C     DEFINITION OF VARIABLES ;
C
C     MMAX     : MAX NUMBER OF HALF WIDTH OF SMOOTH/DIFF. INTERVAL.
C                ACTUAL MAX INTERVAL WILL BE 2*MMAX+1
C     NMAX     : MAX NUMBER OF DATA POINTS ALLOWED.
C                INITIALLY SET TO 2500.  RECOMMENDED VALUE IS 251.
C     Y()      : ORIGINAL TRACE DATA
C     YS()     : SMOOTHED TRACE DATA
C     DERIV()  : 1ST DERIVATIVE OF THE TRACE
C     GRAM()   : GRAM POLYNIMIALS FOR SMOOTH/DIFF.
C     CONWT()  : CONVOLUTION WEIGHTS FOR SMOOTH/DIFF.
C     IMODE    : ANALYSIS MODE
C                IMODE=0 : COMPUTE PROBE CONSTANT
C                IMODE=1 : COMPUTE DIELECTRIC CONSTANT
C     VP       : VELOCITY FACTOR SETTING OF EQUIPMENT
C                USUALLY 0.99 or 1.0
C     MSMTH    : HALF WIDTH OF SMOOTH/DIFF INTERVAL
C     INITIALX : LOCATION OF THE FIRST REFLECTION
C                (DATA POINT NUMBER BUT NOT TRACE LENGTH)
C     FINALX   : LOCATION OF THE FINAL REFLECTION
C                (DATA POINT NUMBER BUT NOT TRACE LENGTH)
C     ----------------------------------------------------------------
C
C     ----------------- DEFINITION OF VARIABLES ----------------------
C
C     DEFINITION OF INPUT DATA IN PROBE DATA FILE "PROBE.DAT"
C
C     NUMPTS   : NUMBER OF DATA POINTS FOR A SINGLE TRACE
C                RECOMMENDED VALUE = 251
C     XINT     : INTERVAL BETWEEN THE DATA POINTS IN TRACE LENGTH (m)
C     PRBLEN   : ACTUAL ROD LENGTH (m)
C     PRBCON   : PROBE CONSTANT WHICH IS A SPECIFIC VALUE FOR EACH
C                PROBE (m)     (NOT REQUIRED IF IMODE=0)
C     ----------------------------------------------------------------
C
C
C     ================================================================
C     ================== M A I N   P R O G R A M ===================
C     ================================================================
C
      PARAMETER (MMAX=25,NMAX=2500)
C
      CHARACTER*32 FILE01,FILE02,FILE03,FILE04
C
      DIMENSION Y(NMAX),YS(NMAX),DERIV(NMAX),GRAM(-MMAX:MMAX,0:3,0:1),
```

```
     +          CONWT(-MMAX:MMAX,-MMAX:MMAX,0:1)
C
      REAL INITIALX
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     FILE01 : trace data file
C     FILE02 : probe data file
C     FILE03 : output data file (original, smoothed & 1st deriv.)
C
      FILE01='test.dat'
      FILE02='probe.dat'
      FILE03='trace.out'
      FILE04='result.out'
C     ----------------------------------------------------------------
C
      WRITE(*,*) '     '
      WRITE(*,*) '     '
      WRITE(*,*) 'TDR-TRACE PROCESSOR (VER27JAN01)'
      WRITE(*,*) '     '
      WRITE(*,*) 'Enter trace data file name to be processed...'
      READ (*,*)  FILE01
      WRITE(*,*) 'Enter probe data file name to be read...'
      READ (*,*)  FILE02
ccc   WRITE(*,*) 'Enter output file name to be created...'
ccc   READ (*,*)  FILE03
      WRITE(*,*) '     '
      WRITE(*,*) 'Enter analysis type...'
      WRITE(*,*) '  compute probe constant      : 0'
      WRITE(*,*) '  compute dielectric constant : 1'
      WRITE(*,*) '     '
      READ (*,*) IMODE
C
      OPEN (UNIT=5,FILE=FILE01,STATUS='OLD')
      OPEN (UNIT=8,FILE=FILE02,STATUS='OLD')
      OPEN (UNIT=7,FILE=FILE03,STATUS='UNKNOWN')
      OPEN (UNIT=11,FILE=FILE04,STATUS='UNKNOWN')
C
C
C     ------------ MANNUAL SETTING OF SEARCHING INTERVAL --------------
C     USER-DEFINED SEARCHING INTERVAL LIMIT FOR POINT A,B,AND C.
C     SET APPROPRIATE VALUE IF DEFAULT DO NOT YILED PROPER RESULT.
C     THESE VALUES SHOULD BE DETERMINED FROM A GRAPH PLOTTED FOR
C     THE DATA WRITTEN IN THE OUTPUT FILE.
C     OTHERWISE, SET TO NMAX THEN EACH VALUE IS RESET IN CORRESPONDING
C     SUBROUTINE ANYWAY.  "NMAX" DOES NOT HAVE ANY MEANINGS ITSELF
C     BUT IS JUST AN INITIAL VALUE.
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
CCC   IBEGIN1=NMAX
      IBEGIN1=410
CCC   IENDPT1=NMAX
      IENDPT1=510
CCC   IBEGIN2=NMAX
      IBEGIN2=720
CCC   IENDPT2=NMAX
      IENDPT2=820
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C     ----------------------------------------------------------------
C
C     ------------------ DESCRIPTION OF INPUT DATA --------------------
C     THE NUMBER OF POINTS FOR A SINGLE TRACE CAN BE ANY NUMBER
```

```
C     SMALLER THAN 'NMAX' SPECIFIED IN THE PARAMETER STATEMENT.
C     ONE TRACE DATA USUALLY CONSISTS OF 251 POINTS. HOWEVER,
C     IF THE DATA CONTAINS MORE POINTS TO ACHIEVE MORE PRECISION,
C     THE DATA CAN BE PROCESSED WITHOUT ANY MODIFICATION.
C     ONE CARD SHOULD CONTAIN ONE POINT DATA (INTEGER), THUS INPUT DATA
C     CONSISTS OF NUMBER OF DATA POINTS CARDS.
C     ------------------------------------------------------------------
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     READ TRACE AND PROBE DATA
C     ------------------------------------------------------------------
C
      CALL READER(NUMPTS,MSMTH,Y,XINT,VP,PRBCON,PRBLEN,IMODE,NMAX)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     CALCULATE SAVITZKY-GOLAY CONVOLUTION WEIGHTS
C     ------------------------------------------------------------------
C
      CALL SAVITZKY(GRAM,CONWT,MSMTH)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     SOMOOTH AND DIFFERENCIATE THE TRACE
C     ------------------------------------------------------------------
C
      CALL SMOOTH(NUMPTS,Y,YS,DERIV,CONWT,MSMTH,NMAX)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     SEARCH FOR THE INITIAL REFLECTION POINT
C     ------------------------------------------------------------------
C
      CALL INFLECT1(NUMPTS,DERIV,MSMTH,DMAX1,IDMAX1,YS,
     +              IBEGIN1,IENDPT1,INITIALX,NMAX)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     SEARCH FOR THE FINAL REFLECTION POINT
C     ------------------------------------------------------------------
C
      CALL INFLECT2(INITIALX,PRBLEN,PRBCON,VP,XINT,DERIV,IDMAX1,
     +              IBEGIN2,IENDPT2,MSMTH,YS,FINALX,NUMPTS,NMAX)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     WRITE RESULTS
C     ------------------------------------------------------------------
C
      CALL WRITER(NUMPTS,MSMTH,VP,XINT,INITIALX,FINALX,
     +            PRBCON,PRBLEN,IMODE)
C
      END
C
C
C
C
C     ==================================================================
      SUBROUTINE READER(NUMPTS,MSMTH,Y,XINT,VP,PRBCON,PRBLEN,IMODE,NMAX)
C
      DIMENSION Y(NMAX)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     READ PROBE AND TRACE DATA.
C     ------------------------------------------------------------------
C
```

```
      NUMPTS=0
      VP=1.0

      READ(8,*) NUMPTS
      READ(8,*) XINT
      READ(8,*) PRBLEN
      IF (IMODE.EQ.1) READ(8,*) PRBCON

      DO 10 I=1,NUMPTS
         READ(5,*) Y(I)
10    CONTINUE
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     SET HALF WIDTH OF SMOOTH/DIFF. INTERVAL.
C     FOR NUMPTS=251, MSMTH=3 SEEMS TO BE APPROPRIATE.
C     ----------------------------------------------------------------
C
      MSMTH=INT(REAL(NUMPTS)/100.)
CCC   MSMTH=5
C
      END
C
C
C
C
C     ================================================================
      SUBROUTINE SAVITZKY(GRAM,CONWT,MSMTH)
C
      DIMENSION GRAM(-MSMTH:MSMTH,0:3,0:1),
     +          CONWT(-MSMTH:MSMTH,-MSMTH:MSMTH,0:1)
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     S A V I T Z K Y - G O L A Y   A L G O R Y T H M
C     CALCULATES CONVLUTION WEIGHTS FOR SAVITZKY-GOLAY METHOD.
C     ----------------------------------------------------------------
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     DESCRIPTION OF VARIABLE ARRAYS
C     "GRAM"  : (2M+1,0:N,0:S)
C     "CONWT" : (2M+1,2M+1,0:S)
C     ----------------------------------------------------------------
C
      INTEGER S,T
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     ORDER OF USED POLYNOMIAL IS 2 OR 3.  THUS, GRAM POLYNOMIAL
C     CAN BE EXPLICITELY DEFINED AS IN THE SUBROUTINE "GRAMPOLY".
C     2ND-ORDER POLYNOMIAL (N=2) MAY BE ENOUGH FOR MOST CASES.
C     THIS PROGRAM IS CAPABLE UP TO 3RD-ORDER POLYNOMIALS.
C     ----------------------------------------------------------------
C
C     ================================================================
      M=MSMTH
      N=2
CCCCC N=3
C     ================================================================
C
      CALL GRAMPOLY(M,GRAM)
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     CALCULATES THE WEIGHT OF THE I'TH DATA POINT FOR THE T'TH LEAST-
```

```
C     SQUARE POINT OF THE S'TH DERIVATIVE, OVER 2M+1 POINTS, ORDER N.
C     ----------------------------------------------------------------
C
      DO 10 I=-M,M
         DO 20 T=-M,M
            DO 30 S=0,1
               W=WEIGHT(I,T,M,N,S,GRAM)
               CONWT(I,T,S)=W
30          CONTINUE
20       CONTINUE
10    CONTINUE
C
      END
C
C
C
C
C     ================================================================
      SUBROUTINE GRAMPOLY(M,GRAM)
C
      DIMENSION GRAM(-M:M,0:3,0:1)
C
      INTEGER S
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     CALCULATE THE GRAM POLYNOMIAL (S=0),
C     DERIVATIVE EVALUATED AT I, ORDER K, OVER 2M+1 POINTS.
C     ----------------------------------------------------------------
C
      S=0
C
      K=0
      DO 10 I=-M,M
         GRAM(I,K,0)=1.0
10    CONTINUE
C
      K=1
      DO 20 I=-M,M
         GRAM(I,K,0)=REAL(I)/REAL(M)
20    CONTINUE
C
      K=2
      DO 30 I=-M,M
         GRAM(I,K,0)=REAL(3*I*I-M*(M+1))/REAL(M*(2*M-1))
30    CONTINUE
C
      K=3
      DO 40 I=-M,M
         GRAM(I,K,0)=REAL(5*I*I*I+(1-3*M*M-3*M)*I)
     +              /REAL(M*(2*M-1)*(M-1))
40    CONTINUE
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     CALCULATE THE GRAM POLYNOMIAL FOR ITS 1ST-ORDER (S=1)
C     DERIVATIVE EVALUATED AT I, ORDER K, OVER 2M+1 POINTS.
C     ----------------------------------------------------------------
C
      S=1
C
      K=0
      DO 50 I=-M,M
```

```
         GRAM(I,K,1)=0.0
50    CONTINUE
C
      K=1
      DO 60 I=-M,M
         GRAM(I,K,1)=1.0/REAL(M)
60    CONTINUE
C
      K=2
      DO 70 I=-M,M
         GRAM(I,K,1)=REAL(6*I)/REAL(M*(2*M-1))
70    CONTINUE
C
      K=3
      DO 80 I=-M,M
         GRAM(I,K,1)=REAL(15*I*I-3*M*M-3*M+1)
     +              /REAL(M*(2*M-1)*(M-1))
80    CONTINUE
C
      END
C
C
C
C
C     ==================================================================
      FUNCTION GENFACT(A,B)
C
C     CALCULATES THE GENERALISED FACTORIAL (A)(A-1)...(A-B+1)
C
      INTEGER A,B
C
      GF=1.0
C
      DO 10 J=A-B+1,A
         GF=GF*REAL(J)
10    CONTINUE
C
      GENFACT=GF
C
      END
C
C
C
C
C     ==================================================================
      FUNCTION WEIGHT(I,T,M,N,S,GRAM)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     CALCULATES THE WEIGHT OF THE I'TH DATA POINT FOR THE T'TH LEAST-
C     SQUARE POINT OF THE S'TH DERIVATIVE, OVER 2M+1 POINTS, ORDER N.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DIMENSION GRAM(-M:M,0:3,0:1)
C
      INTEGER S,T
C
      SUM=0.0
C
      DO 10 K=0,N
         SUM=SUM+(2*K+1)*(GENFACT(2*M,K)/GENFACT(2*M+K+1,K+1))
     +       *GRAM(I,K,0)*GRAM(T,K,S)
```

```
10    CONTINUE
C
      WEIGHT=SUM
C
      END
C
C
C
C
C     ==================================================================
      SUBROUTINE SMOOTH(NUMPTS,Y,YS,DERIV,CONWT,MSMTH,NMAX)
C
      DIMENSION Y(NMAX),YS(NMAX),DERIV(NMAX),
     +          CONWT(-MSMTH:MSMTH,-MSMTH:MSMTH,0:1)
C
      M=MSMTH
C
C     ==================================================================
C     SMOOTH THE TRACE DATA
C     ==================================================================
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR END POINTS (I=<M)
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 10 I=1,M
         YS(I)=0.0
         DO 20 J=-M,M
            YS(I)=YS(I)+CONWT(I-M-1,J,0)*Y(J+M+1)
20       CONTINUE
10    CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR MID POINTS (M+1=<I=<NUMPTS-M-1)
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 30 I=M+1,NUMPTS-M
         YS(I)=0.0
         DO 40 J=-M,M
            YS(I)=YS(I)+CONWT(J,0,0)*Y(I+J)
40       CONTINUE
30    CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR END POINTS (I>=NUMPTS-M)
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 50 I=NUMPTS-M+1,NUMPTS
         YS(I)=0.0
         DO 60 J=-M,M
            YS(I)=YS(I)+CONWT(J,I-NUMPTS+M,0)*Y(NUMPTS-M-1+J)
60       CONTINUE
50    CONTINUE
C
C
C     ==================================================================
C     DIFFERENTIATE THE TRACE DATA
C     ==================================================================
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR END POINTS (I=<M)
```

```
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 70 I=1,M
         DERIV(I)=0.0
         DO 80 J=-M,M
CCCCC       DERIV(I)=DERIV(I)+CONWT(J,I-M-1,1)*Y(J+M+1)
           DERIV(I)=DERIV(I)+CONWT(J,I-M-1,1)*YS(J+M+1)
80       CONTINUE
70    CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR MID POINTS (M+1=<I=<NUMPTS-M-1)
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 90 I=M+1,NUMPTS-M
         DERIV(I)=0.0
         DO 100 J=-M,M
CCCCC       DERIV(I)=DERIV(I)+CONWT(J,0,1)*Y(I+J)
           DERIV(I)=DERIV(I)+CONWT(J,0,1)*YS(I+J)
100      CONTINUE
90    CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR END POINTS (I>=NUMPTS-M)
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 110 I=NUMPTS-M+1,NUMPTS
         DERIV(I)=0.0
         DO 120 J=-M,M
CCCCC       DERIV(I)=DERIV(I)+CONWT(J,I-NUMPTS+M,1)*Y(NUMPTS-M-1+J)
           DERIV(I)=DERIV(I)+CONWT(J,I-NUMPTS+M,1)*YS(NUMPTS-M-1+J)
120      CONTINUE
110   CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     WRITE ORIGINAL, SMOOTHED AND DIFF. DATA ON OUTPUT FILE.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 130 I=1,NUMPTS
         WRITE(7,200) Y(I),YS(I),DERIV(I)
130   CONTINUE
C
200   FORMAT(3F10.4)
C

      END
C
C
C
C
C     ==================================================================
      SUBROUTINE INFLECT1(NUMPTS,DERIV,MSMTH,DMAX1,IDMAX1,YS,
     +                    IBEGIN1,IENDPT1,INITIALX,NMAX)
C
      DIMENSION DERIV(NMAX),YS(NMAX)
C
      REAL INITIALX
C
      M=MSMTH
      N=NUMPTS
C
```

```
C     ------------------------------------------------------------------
C     THE STEEPEST SLOPE ON THE TRACE IS ALWAYS THERE WHERE
C     THE SIGNAL TRAVELS FROM THE CABLE SPLIT TO THE RODS.
C     START CHECKING AT POINT M+1 UNTIL N-M SINCE THE BOTH ENDS
C     MIGHT CONTAIN SOME ERROR.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DMAX1=0.0
      IDMAX1=M+1
      IBEGINPT=M+1
      IF (IBEGIN1.LT.IBEGINPT) IBEGINPT=IBEGIN1
C
      IENDTMP=N-M
      IF (IENDTMP.LT.IENDPT1) IENDPT1=IENDTMP
C
      DO 10 I=IBEGINPT,IENDPT1
         IF (DERIV(I).GT.DMAX1) THEN
            DMAX1=DERIV(I)
            IDMAX1=I
         END IF
10    CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FIND A FUNCTION Y=AX+B WHICH PASSES THROUGH (IDMAX1,YS(IDMAX1))
C     ------------------------------------------------------------------
C
      A=DMAX1
      B=YS(IDMAX1)-A*REAL(IDMAX1)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     TAKE THE AVERAGE OF THE FIRST 2*M+1 POINTS ON THE TRACE
C     AND ASSUME THE HORIZONTAIL LINE Y=YMIN1.
C     ------------------------------------------------------------------
C
C     YMIN1=0.0
C     DO 20 I=1,2*M+1
C        YMIN1=YMIN1+YS(I)
C20   CONTINUE
C     YMIN1=YMIN1/REAL(2*M+1)
C     IYMIN1=M+1
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FIND THE SMALLEST SLOPE PRIOR TO THE FIRST STEEPEST SLOPE IDMAX1.
C     SEARCHING IS STARTED FROM IDMAX1 TO IBEGINPT (RIGHT OT LEFT).
C     IF NEGATIVE DERIV() IS ENCOUNTERED MORE THAN "IMAX" TIMES
C     SUCCESSIVELY, THE "IMAX"TH VALUE IS TEMPORALY REGARDED AS
C     THE LOCAL MINIMUM.
C     IMAX IS SET EQUAL TO "M".
C     ------------------------------------------------------------------
C
      ICOUNT=0
      IMAX=M
      YMIN1=YS(IDMAX1)
      DMIN1=DMAX1
      IDMIN1=IDMAX1
      DO 20 J=I,IBEGINPT,-1
         IF (DERIV(J).LT.DMIN1) THEN
            DMIN1=DERIV(J)
            IDMIN1=J
            IF (ICOUNT.GT.0.AND.DERIV(J).GT.0.0) ICOUNT=ICOUNT-1
            IF (DERIV(J).LT.0.0) ICOUNT=ICOUNT+1
```

```
            IF (ICOUNT.EQ.IMAX) GOTO 30
          END IF
20      CONTINUE
C
30      CONTINUE
        I=J
C
C       ------------------------------------------------------------------
C       FOR CASES WHERE THE NEGATIVE DERIV() IS DETECTED BETWEEN
C       "IBEGINPT" AND "IDMAX1".
C       START SEARCHING FOR THE LOCAL MINIMUM VALUE "YMIN1"
C       FROM I-M TO IDMAX1 (LEFT TO RIGHT).
C       THEN, FIND X OF INTERSECTION OF Y=AX+B AND Y=YMIN1.
C       ------------------------------------------------------------------
C
        IF (I.GT.IBEGINPT) THEN
          DO 40 J=I-M,IDMAX1
            IF (YS(I).LT.YMIN1) THEN
              YMIN1=YS(J)
              IYMIN1=J
            END IF
40        CONTINUE
          INITIALX=(YMIN1-B)/A
C
C       ------------------------------------------------------------------
C       FOR CASES WHERE THE NEGATIVE DERIV() IS NOT DETECTED
C       BETWEEN "IBEGINPT" AND "IDMAX2".
C       FIND FUNCTION Y=PX+Q WHICH IS THE TANGENT PASSING THROUGH
C       (IDMIN1,YS(IDMIN1)).
C       THEN, "FINALX" IS ASSUMED AS THE INTERSECTION OF THE TWO
C       TANGENT LINES Y=AX+B AND Y=PX+Q.
C       ------------------------------------------------------------------
C
        ELSE
          YMIN1=YS(IDMIN1)
          DO 50 IYMIN1=IDMIN1,IDMIN1+M-1
            P=P+DERIV(IDMIN1)/REAL(M)
50        CONTINUE
          Q=YS(IDMIN1)-P*REAL(IDMIN1)
          INITIALX=(B-Q)/(P-A)
        END IF
C
ccc     WRITE(7,*) REAL(IYMIN1),YMIN1,INITIALX,YMIN1
ccc     WRITE(7,*) INITIALX,YMIN1,IDMAX1,YS(IDMAX1)

        END
C
C
C
C
C       ==================================================================
        SUBROUTINE INFLECT2(INITIALX,PRBLEN,PRBCON,VP,XINT,DERIV,IDMAX1,
     +                      IBEGIN2,IENDPT2,MSMTH,YS,FINALX,NUMPTS,NMAX)
C
        DIMENSION YS(NMAX),DERIV(NMAX)
C
        REAL INITIALX
C
        N=NUMPTS
        M=MSMTH
C
```

```
C     ------------------------------------------------------------------
C     FIND THE STEEPEST SLOPE AFTER FINAL REFLECTION.
C     SET 'SKIP' VALUE AS THE STARTING POINT OF SEARCHING FOR THE
C     STEEPEST SLOPE.
C     ------------------------------------------------------------------
C
CCCCC SKIP=(INITIALX+VP*PRBLEN/XINT)*0.9
      SKIP=INITIALX+PRBCON/XINT+(VP*PRBLEN/XINT)*0.7
      IBEGINPT=AINT(SKIP)
      IF (IBEGIN2.LT.IBEGINPT) IBEGINPT=IBEGIN2
      IENDTMP=N-M
      IF (IENDTMP.LT.IENDPT2) IENDPT2=IENDTMP
      DMAX2=0.0
      IDMAX2=IBEGINPT
C
ccc   write(*,*) 'ibegin,iend = ',IBEGINPT,IENDPT2
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     SEARCH FOR THE STEEPEST SLOPE AND ITS LOCATION
C     ------------------------------------------------------------------
C
      DO 10 I=IBEGINPT,IENDPT2
         IF (DERIV(I).GT.DMAX2) THEN
            DMAX2=DERIV(I)
            IDMAX2=I
         END IF
10    CONTINUE
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     SEARCH FOR THE LOCAL MINIMUM OF YS().
C     ------------------------------------------------------------------
C
      YMIN2=YS(IDMAX2)
      DMIN2=DMAX2
      IDMIN2=IDMAX2
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     TAKE THE AVERAGE VALUE OF FIVE DERIV()'S AS THE MAXIMUM SLOPE
C     OF THE DERIVATIVE.
C     THEN, CALCULATE THE SLOPE AND INTERCEPT OF THE TANGENT Y=AX+B.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      I=IDMAX2
      DMAX2=(DERIV(I-2)+DERIV(I-1)+DERIV(I)+DERIV(I+1)+DERIV(I+2))/5
      A=DMAX2
      B=YS(IDMAX2)-A*REAL(IDMAX2)
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FIND LOCAL "MINIMUM" AT FINAL REFLECTION
C     SET SKIP VALUE AS THE IDMAX1+0.6*(IDMAX2-IDMAX1)
C     THEN TAKE THE EITHER VALUE OF "SKIP" OR "IBEGINPT" WHICH IS
C     SMALLER AS THE LEFT BOUND OF SEARCHING FOR THE LOCAL MINIMUM.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      SKIP=0.6*REAL(IDMAX2-IDMAX1)+REAL(IDMAX1)
      IF (IBEGINPT.LT.AINT(SKIP)) THEN
         IBEGINPT=AINT(SKIP)
      END IF
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     SEARCH FOR THE FIRST VALLEY PRIOR TO THE STEEPEST SLOPE
```

```
C     SEARCHING IS STARTED FROM IDMAX2 TO IBEGINPT (RIGHT OT LEFT).
C     IF NEGATIVE DERIV() IS ENCOUNTERED MORE THAN "IMAX" TIMES
C     SUCCESSIVELY, THE "IMAX"TH VALUE IS REGARDED AS THE LOCAL
C     MINIMUM.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      ICOUNT=0
      IMAX=M
      DO 20 J=I,IBEGINPT,-1
         IF (DERIV(J).LT.DMIN2) THEN
            DMIN2=DERIV(J)
            IDMIN2=J
            IF (ICOUNT.GT.0.AND.DERIV(J).GT.0.0) ICOUNT=ICOUNT-1
            IF (DERIV(J).LT.0.0) ICOUNT=ICOUNT+1
            IF (ICOUNT.EQ.IMAX) GOTO 30
         END IF
20    CONTINUE
C
30    CONTINUE
      I=J
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR CASES WHERE THE NEGATIVE DERIV() IS SUCCESSFULLY DETECTED
C     BETWEEN "IBEGINPT" AND "IDMAX2".
C     START SEARCHING FOR THE LOCAL MINIMUM VALUE "YMIN2"
C     FROM I-M TO IDMAX2 (LEFT TO RIGHT).
C     THEN, FIND X OF THE INTERSECTION OF THE TANGENT LINE
C     Y=AX+B AND THE HORIZONTAL LINE Y=YMIN2.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      IF (I.GT.IBEGINPT) THEN
         DO 40 J=I-M,IDMAX2
            IF (YS(J).LT.YMIN2) THEN
               YMIN2=YS(J)
               IYMIN2=J
            END IF
40       CONTINUE
         FINALX=(YMIN2-B)/A
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     FOR CASES WHERE THE NEGATIVE DERIV() IS NOT DETECTED
C     BETWEEN "IBEGINPT" AND "IDMAX2".
C     FIND FUNCTION Y=PX+Q WHICH IS THE TANGENT PASSING THROUGH
C     (IDMIN2,YS(IDMIN2)).
C     THEN, "FINALX" IS ASSUMED AS THE INTERSECTION OF THE TWO
C     TANGENT LINES Y=AX+B AND Y=PX+Q.
C     ------------------------------------------------------------------
C
      ELSE
         YMIN2=YS(IDMIN2)
C        IYMIN2=IDMIN2
C        P=(DMIN2+DERIV(IDMIN2+1)+DERIV(IDMIN2+2))/3
         DO 50 IYMIN2=IDMIN2,IDMIN2+M-1
            P=P+DERIV(IDMIN2)/REAL(M)
50       CONTINUE
         Q=YS(IDMIN2)-P*REAL(IDMIN2)
         FINALX=(B-Q)/(P-A)
      END IF
C
      WRITE(7,*)
C
```

```
      END
C
C
C
C
C     ==================================================================
      SUBROUTINE WRITER(NUMPTS,MSMTH,VP,XINT,INITIALX,FINALX,
     +                  PRBCON,PRBLEN,IMODE)
C
      REAL INITIALX,K
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     OUTPUT RESULTS FOR PROBE CONSTANT ANALYSIS (IMODE=0)
C     ------------------------------------------------------------------
C
      IF (IMODE.EQ.0) THEN
         TRACELEN=XINT*(FINALX-INITIALX)/VP
         PRBCON=TRACELEN-PRBLEN
         WRITE(*,400)
         WRITE(*,410) INITIALX
         WRITE(*,420) FINALX
         WRITE(*,430) TRACELEN
         WRITE(*,435) PRBLEN
         WRITE(*,440) PRBCON
         WRITE(11,400)
         WRITE(11,410) INITIALX
         WRITE(11,420) FINALX
         WRITE(11,430) TRACELEN
         WRITE(11,435) PRBLEN
         WRITE(11,440) PRBCON
         WRITE(7,*) INITIALX,INITIALX+PRBCON*VP/XINT,FINALX
         RETURN
      END IF
C
C     ------------------------------------------------------------------
C     OUTPUT RESULTS FOR TRACE ANALYSIS (IMODE=1)
C     ------------------------------------------------------------------
C
C     --- CALCULATE ELECTROMAGNETIC TRACE LENGTH
C
      TRACELEN=XINT*(FINALX-INITIALX-PRBCON*VP/XINT)/VP
C
C
C     --- CALCULATE APPARENT DIELECTRIC CONSTANT
C
      K=(TRACELEN/PRBLEN)**2
C
C
C     --- CALCULATE VOLUMETRIC WATER CONTENT BY LEDIEU'S EQUATION
C
      TH1=0.1138*TRACELEN/PRBLEN-0.1758
C
C
C     --- CALCULATE VOLUMETRIC WATER CONTENT BY TOPP'S EQUATION
C
      TH2=-5.3E-2+K*2.92E-2-K*K*5.5E-4+K*K*K*4.3E-6
C
C
C     --- WRITE INPUT DATA INFORMATION
C
      WRITE(*,100)
```

```
CCC   WRITE(*,120) VP
CCC   WRITE(*,190) MSMTH
      WRITE(*,130) NUMPTS
      WRITE(*,160) PRBLEN*100.
      WRITE(*,170) PRBCON*100.
      WRITE(*,180) XINT*100.
C
C     ----------------------------------------------------------------
C     WRITE RESULTS
C     ----------------------------------------------------------------
C
      WRITE(*,200)
ccc   WRITE(*,210)
ccc   WRITE(*,220)
ccc   WRITE(*,230)
ccc   WRITE(*,240)
ccc   WRITE(*,250)
ccc   WRITE(*,260)
ccc   WRITE(*,270)
ccc   WRITE(*,280)
      WRITE(*,300) INITIALX
      WRITE(*,310) FINALX
      WRITE(*,320) TRACELEN
      WRITE(*,340) PRBLEN
      WRITE(11,200)
      WRITE(11,300) INITIALX
      WRITE(11,310) FINALX
      WRITE(11,320) TRACELEN
      WRITE(11,340) PRBLEN
ccc   WRITE(*,350) TH1
ccc   WRITE(*,360) TH2
      WRITE(*,*) '    '
      WRITE(*,365)
      WRITE(*,370) K
      WRITE(*,365)
      WRITE(*,*) '    '
      WRITE(11,370) K

      WRITE(7,*) INITIALX,INITIALX+PRBCON*VP/XINT,FINALX
C
100   FORMAT(//,'>>> INPUT DATA INFORMATION <<<',/)
120   FORMAT(' velocity setting Vp          = ',F8.2)
130   FORMAT(' number of data points        = ',I8)
160   FORMAT(' actual probe length          = ',F8.2,' cm')
170   FORMAT(' probe head constant (offset) = ',F8.2,' cm')
180   FORMAT(' interval of data points      = ',F8.4,' cm')
190   FORMAT(' half width of moving average = ',I8,//)
200   FORMAT(//,'>>> TRACE-PROCESSING RESULTS  <<<',/)
210   FORMAT(5X,'          C                          ')
220   FORMAT(5X,'          *                        * ')
230   FORMAT(5X,'         *  *                    *    ')
240   FORMAT(5X,'        *    *                *       ')
250   FORMAT(5X,'       *       *            *         ')
260   FORMAT(5X,'      *            *       *          ')
270   FORMAT(5X,'******                  *  *           ')
280   FORMAT(5X,'      A                  B            ',/)
300   FORMAT(' initial reflection (A)       = ',F8.4)
310   FORMAT(' final   reflection (B)       = ',F8.4)
320   FORMAT(' apparent trace length (B-C)  = ',F8.4,' m')
340   FORMAT(' actual rod length            = ',F8.4,' m',/)
350   FORMAT(' volumetric water content by Ledieu"s equation = ',F8.4)
```

```
360   FORMAT(' volumetric water content by  Topp"s equation = ',F8.4)
365   FORMAT('                                =========')
370   FORMAT(' dielectric constant (Ka)     = ',F8.3)
400   FORMAT(//,'>>> PROBE CONSTANT ANALYSIS <<<',/)
410   FORMAT(' initial reflection           = ',F8.4)
420   FORMAT(' final  reflection            = ',F8.4)
430   FORMAT(' trace length                 = ',F8.4,' m')
435   FORMAT(' probe length                 = ',F8.4,' m')
440   FORMAT(' probe constant               = ',F8.4,' m')
C
      END
C
C
C
C
C---+----1----+----2----+----3----+----4----+----5----+----6----+----7--
```

付　　録

4.　プローブ関係の用語の定義

プローブ関係の用語の定義

用語	定義	H11年度までの呼称
(TDR)プローブ	TDR測定を行うための伝送線路のうち、測定対象物質に接触する部分と同軸ケーブルの分岐部を含んだ部分の総称。	プローブ
プローブ電極	TDR測定を行うための伝送線路のうち、測定対象物質に接触するそれぞれの線路。	プローブ，電極，テーププローブ，ロッド
プローブ長	プローブ電極の長さ	プローブ長さ，プローブ長
プローブ電極幅	プローブ電極の幅	プローブ幅
表面プローブ	薄い帯状のプローブ電極を測定対象物質の表面に貼付する方式のプローブ	テーププローブ
ロッド式プローブ	棒状のプローブ電極を測定対象物質に挿入する方式のプローブ	棒状プローブ
プローブ間隔	ある面に沿った、プローブ電極の中心線間の距離	プローブ間隔
円周方向プローブ	円筒の周方向に沿ってプローブ電極を貼付した表面プローブ	円周方向プローブ，円周プローブ
孔軸方向プローブ	円筒の軸方向に沿ってプローブ電極を貼付した表面プローブ	軸方向プローブ
パッカー式プローブ	孔内のTDR測定を目的として、パッカーにより表面プローブを孔壁に圧着させるためのシステムのうち、表面プローブ、パッカーおよび緩衝材部分の総称。	パッカープローブ