

東濃鉦山における孔間レーダー

および間隙水圧計測の実施

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

平成 16 年 3 月

鹿島建設株式会社

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ください。

〒319-1184 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
Tel: 029-282-1122 (代表)
Fax: 029-282-7980
e-mail: jserv@jnc.go.jp

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 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2005

2004年3月

東濃鉱山における孔間レーダーおよび間隙水圧計測の実施

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

戸井田 克* 渥美 博行* 名児耶 薫* 須山 泰宏*

要 旨

東濃地科学センターでは、坑道周辺に生じる不飽和領域を把握する技術を確立するため、坑道近傍の間隙水圧計測、TDR法による計測、連続波レーダーといった異なる手法の原位置における適用性確認試験を実施し、結果を相互に補間した評価を進めている。このための事例研究の場として地質情報が豊富な東濃鉱山の NATM 坑道を選定し、坑道壁面における地表連続波レーダーと、壁面から掘削した試錐孔を利用した TDR 法による計測を実施した。

本件は、全ての不飽和領域調査手法を同じ試験サイトにおいて実施し、結果を相互に補間した評価事例を提示することを目的として、NATM 坑道において孔間連続波レーダー、坑道壁面近傍の間隙水圧計測を行った。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 孔間連続波レーダーによる比誘電率のトモグラフィ解析結果は、地表連続波レーダー計測で得られた比誘電率分布と調和的であり、また絶対値は異なるものの、変動の傾向として TDR 法の比誘電率解析結果とよく整合していた。
- ② 間隙水圧測定結果は、坑道壁面から 2.1m までの坑道側の 4 つの区間で不飽和であることを確認した。一方、孔端側の 2 区間は、透水性が非常に低いために水圧変化が遅く、測定期間中に水圧収束あるいは不飽和の確認はできなかった。

本報告書は、鹿島建設株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東濃地科学センター 地質環境研究グループ

* 鹿島建設（株）技術研究所

March, 2004

Assessment of unsaturated zones with ground penetrating radar with
modulating frequency in Tono mine;
A Technical Review

Masaru Toida*, Hiroyuki Atsumi *, Kaoru Nagoya *, Yasuhiro Suyama

Abstract

TONO Geoscience Center has applied some kinds of techniques to the in-situ measurement, such as the pore water pressure measurement, the TDR(Time Domain Reflectometry) wave analysis, and the ground penetrating radar with modulating frequency, to evaluate the unsaturated zone generated in the vicinity of a drift, and have estimated the results which interpolate mutually.

As a case study, the ground penetrating radar with modulating frequency at the wall of the gallery, and the TDR wave analysis in the borehole drilled from the gallery have been conducted at the NATM gallery in the Tono mine, where there are many geological informations.

In this study, in order to conduct all unsaturated territory investigation techniques in the same test sight, and to present the result of estimations which interpolate mutually, the continuous wave radar between the hole, and the pore water pressure measurement near the drift wall were executed, in the NATM gallery.

This report summarized as follows:

- 1) An electromagnetic wave tomography with modulating frequency could measure the dielectric constant distribution with a good correlation between the tomography and the TDR wave method at the second measurement gallery. Therefore it recognized that the tomography has a high possibility to interpolate the TDR wave method's results between boreholes.
The ground penetrating radar with modulating frequency could measure the dielectric constant, which has a good relationship with water content distribution, at the NATM gallery. Therefore it recognized that the radar has a high possibility to get information concerning water content distribution.
- 2) By the pore water pressure measurement, it was verified that the unsaturated zone is distributed to the range of 2m from the drift wall (in the four measurement interval),but in the other two measurement interval, water pressure is not stable due to very low permeability.

This work was performed by Kajima Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Geoscience Research Group, Tono Geoscience Center

* : Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

東濃鉱山における孔間レーダーおよび間隙水圧計測の実施

報告書目次

1. 業務概要	1
1.1 業務件名	1
1.2 目的	1
1.3 計測場所	1
1.4 実施数量	1
1.5 実施期間	1
1.6 実施機関	1
2. 業務内容	2
2.1 機器の搬入/搬出および準備	2
2.2 NATM 坑道における孔間連続波レーダー計測	2
2.3 孔間連続波レーダー計測結果の解析	2
2.4 NATM 坑道における坑道壁面近傍の間隙水圧計測	2
3. NATM 坑道における孔間連続波レーダー計測	4
3.1 ステップ式連続波レーダーの測定原理	4
(1)従来型探査装置（パルス・レーダー）との相違点	4
(2)パルス圧縮の原理	5
(3)測定原理	6
3.2 測定方法	8
3.3 伝搬時間（走時）の読み取り	10
3.4 データ品質管理	17
3.5 トモグラフィ解析方法	24
(1)逆投影法（BPT法）	25

(2)同時反復法（S I R T法）	26
(3)B P T法とS I R T法の相違点	27
(4)データの品質管理	27
(5)電磁波速度	27
3.6 トモグラフィ解析結果	29
3.7 注水に伴う電磁波伝播特性変化の測定	38
(1)測定方法	38
(2)測定結果	42
4. NATM 坑道における坑道壁面近傍の間隙水圧計測	55
4.1 まえがき	56
4.2 機器仕様	55
4.3 設置方法	56
(1)調査孔の地質状況とシステムの概要	56
(2)パッカーの設置	57
(3)区間のエア抜きとパッカーの遮水性確認	59
(4)透水性の評価	61
4.4 間隙水圧測定結果	63
5. まとめ	68
参考文献	69

東濃鉦山における孔間レーダーおよび間隙水圧計測の実施

表目次

孔間連続波レーダー計測

表 3.2-1	電磁波トモグラフィ探査使用機器一覧（ステップ式連続波レーダー）	8
表 3.3-1	走時読み取り結果（その1）	13
表 3.3-2	走時読み取り結果（その2）	14
表 3.3-3	走時読み取り結果（その3）	15
表 3.3-4	走時読み取り結果（その4）	16
表 3.3-5	走時読み取り結果（その5）	17
表 3.4-1	走時読み取り結果（その1）	19
表 3.4-2	走時読み取り結果（その2）	20
表 3.4-3	走時読み取り結果（その3）	21
表 3.4-4	走時読み取り結果（その4）	22
表 3.4-5	走時読み取り結果（その5）	23
表 3.6-1	同じ水平距離の伝播時間，電磁波速度，比誘電率	30
表 3.7-1	注水試験測定条件一覧	38
表 3.7-2	透水試験 A 測定条件一覧	39
表 3.7-3	透水試験 B 測定条件一覧	39
表 3.7-4	注水試験読み取り及び計算結果一覧	43
表 3.7-5	透水試験 A 読み取り及び計算結果一覧	48
表 3.7-6	透水試験 B 読み取り及び計算結果一覧	52

間隙水圧計測

表 4.2-1	使用機材内訳	55
表 4.3-1	測定区間一覧	58
表 4.3-2	各区間の透水係数概算値	61

東濃鉱山における孔間レーダーおよび間隙水圧計測の実施

図目次

孔間連続波レーダー計測

図 2.2-1	NATM 坑道ボーリング孔配置図	3
図 3.1-1	送信信号の比較	4
図 3.1-2	ステップ式周波数掃引方法	5
図 3.1-3	電磁波トモグラフィ測定装置の動作原理	6
図 3.2-1	電磁波の伝搬経路	9
図 3.2-2	トモグラフィ波線図	9
図 3.3-1	逆フーリエ変換後の波形	11
図 3.3-2	包絡線波形	12
図 3.3-3	伝搬距離－伝搬時間プロット	17
図 3.4-1	伝搬距離－伝搬時間プロット (不良データ削除後)	23
図 3.4-2	不良データ削除後の波線図	24
図 3.5-1	トモグラフィ解析の流れ	25
図 3.5-2	解析方法概念図	26
図 3.6-1	トレースごとの電磁波速度分布	29
図 3.6-2	トレースごとの比誘電率分布	29
図 3.6-3	同じ水平距離の伝搬速度分布	30
図 3.6-4	同じ水平距離の電磁波速度分布	31
図 3.6-5	同じ水平距離の比誘電率分布	31
図 3.6-6	電磁波速度分布図	32
図 3.6-7	比誘電率分布図	33
図 3.6-8	電磁波速度分布図	34
図 3.6-9	比誘電率分布図	35
図 3.6-10	電磁波速度分布図と地表レーダの重ね合せ	36
図 3.6-11	比誘電率分布図と地表レーダーの重ね合せ	37
図 3.7-1	計測配置図	38
図 3.7-2	注水設備図	38

図 3.7-3	電磁波伝播特性変化測定方法	41
図 3.7-4	伝播特性変化試験の時間領域波形	42
図 3.7-5	伝播特性変化試験の包絡線波形	43
図 3.7-6	各トレースの伝播時間	45
図 3.7-7	各トレースの電磁波速度	45
図 3.7-8	各トレースの比誘電率	45
図 3.7-9	各トレースの振幅値	46
図 3.7-10	伝播特性変化試験の振幅スペクトル	46
図 3.7-11	透過試験 A の時間領域波形	48
図 3.7-12	透過試験 A の包絡線波形	49
図 3.7-13	透過試験 A 注水前後の伝播時間	50
図 3.7-14	透過試験 A 注水前後の電磁波速度	50
図 3.7-15	透過試験 A 注水前後の比誘電率	50
図 3.7-16	透過試験 A 注水前後の振幅値	51
図 3.7-17	透過試験 B の時間領域波形	52
図 3.7-18	透過試験 B の包絡線波形	53
図 3.7-19	透過試験 B 注水前後の伝播時間	54
図 3.7-20	透過試験 B 注水前後の電磁波速度	54
図 3.7-21	透過試験 B 注水前後の比誘電率	54
間隙水圧計測		
図 4.3-1	システム全体の設置概念図	56
図 4.3-2	パッカーシステムの内部配管構造	57
図 4.3-3	試験位置と地質状況	58
図 4.3-4	エア抜き～リーク確認時の圧力変化(パッカー拡張圧 0.6MPa)	59
図 4.3-5	リーク確認～簡易注水試験までの圧力変化(パッカー拡張圧 1.0MPa)	60
図 4.3-6	Horner の解析図一覧	62
図 4.4-1	圧力計測値 経時変化 (全体図)	65
図 4.4-2	圧力計測値 経時変化 (P3～P6 拡大図)	65
図 4.4-3	圧力計測値 経時変化 (坑道内気温との関係)	66

図 4.4-4 絶対圧 経時変化(全体図)	66
図 4.4-5 区間の飽和確認試験	67
まとめ	
図 5.5-1 NATM坑道における調査結果 (総合図)	68

(巻末資料)

孔間連続波レーダー計測

- ・ 孔間レーダー包絡線波形
- ・ 孔間レーダー現場状況写真

間隙水圧計測

- ・ 圧力計負圧特性検定資料
- ・ 間隙水圧計測現場状況写真

1. 業務概要

1. 1 業務件名

「東濃鉱山における孔間レーダーおよび間隙水圧計測の実施」

1. 2 目的

東濃地科学センターでは、坑道周辺に生じる不飽和領域を把握する技術を確立するため、坑道近傍の間隙水圧計測、TDR 法による計測、連続波レーダーといった異なる手法の原位置における適用性確認試験を実施し、結果を相互に補間した評価をすることを進めている。このための事例研究の場として地質情報が豊富な東濃鉱山の NATM 坑道を選定し、坑道壁面における地表連続波レーダーと、壁面から掘削した試錐孔を利用した TDR 法による計測を実施している。

本件は、全ての不飽和領域調査手法を同じ試験サイトにおいて実施し、結果を相互に補間した評価事例を提示することを目的として、NATM 坑道において孔間連続波レーダー、坑道壁面近傍の間隙水圧計測を行うものである。

1. 3 計測場所

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 東濃鉱山坑内
岐阜県土岐市泉町河合字賤洞 1221-8

1. 4 実施数量

NATM 坑道における孔間レーダー計測
トモグラフィ測定・解析：1 断面
電磁波伝搬特性変化試験：1 式
NATM 坑道における坑道壁面近傍の間隙水圧計測
測定区間：6 区間

1. 5 実施期間

平成 16 年 3 月 12 日まで

1. 6 実施機関

鹿島建設株式会社 技術研究所 材料・LCE グループ
〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 (TEL 0424-89-7081)
作業責任者：戸井田 克

2. 業務内容

2. 1 機器の搬入/搬出および準備

計測に必要な機材は、調査立坑ケーシングを使用し、現場への搬入を行った。搬入にあたっては、以下に示す最大積載重量に準拠した。作業終了後は、機材の搬出を行った。ケーシング操作は、教育を受けた指定鉱山労働者により行った。

調査立坑ケーシング：最大積載重量：2.0トン，最大搭乗員数：10名

作業エリアは、カラーコーン等で明示し、関係者以外の立入り禁止措置を施した。

2. 2 NATM 坑道における孔間レーダー計測

NATM 坑道側壁に掘削した2本のボーリング孔 03SI-19 と 03SI-20 を利用し、両孔間で連続波レーダー計測を実施した。計測区間内において孔壁より 1.0m から送信アンテナを 3.90m、受信アンテナを 3.95m まで、25cm 間隔で移動させ、各々における計測位置、受信波形（周波数領域波形及び時間領域波形）を記録した。送受信周波数帯域は 1～80MHz とし、この間を 201 ステップに分割してデータを取得した（周波数領域波形）。取得データは、ほぼリアルタイムで逆フーリエ変換により、時間領域波形に変換した。

不飽和領域に坑内水を注入し、そのときの電磁波速度及び振幅の時間変化を測定する試験（電磁波伝搬特性変化試験）を実施した。注入孔は 03SI-19、送信孔は 03SI-17、受信孔は 03SI-18 である。ボーリング孔の配置を図 2. 2-1 に示す。電磁波伝搬特性変化試験は、注水直後から 5 分おきに 100 分後までと、翌日の 17 時間後にデータを取得した。

その外に補足的な測定として、注水試験前後の伝搬時間（電磁波速度、比誘電率）と振幅の測定（透過試験）を行った。

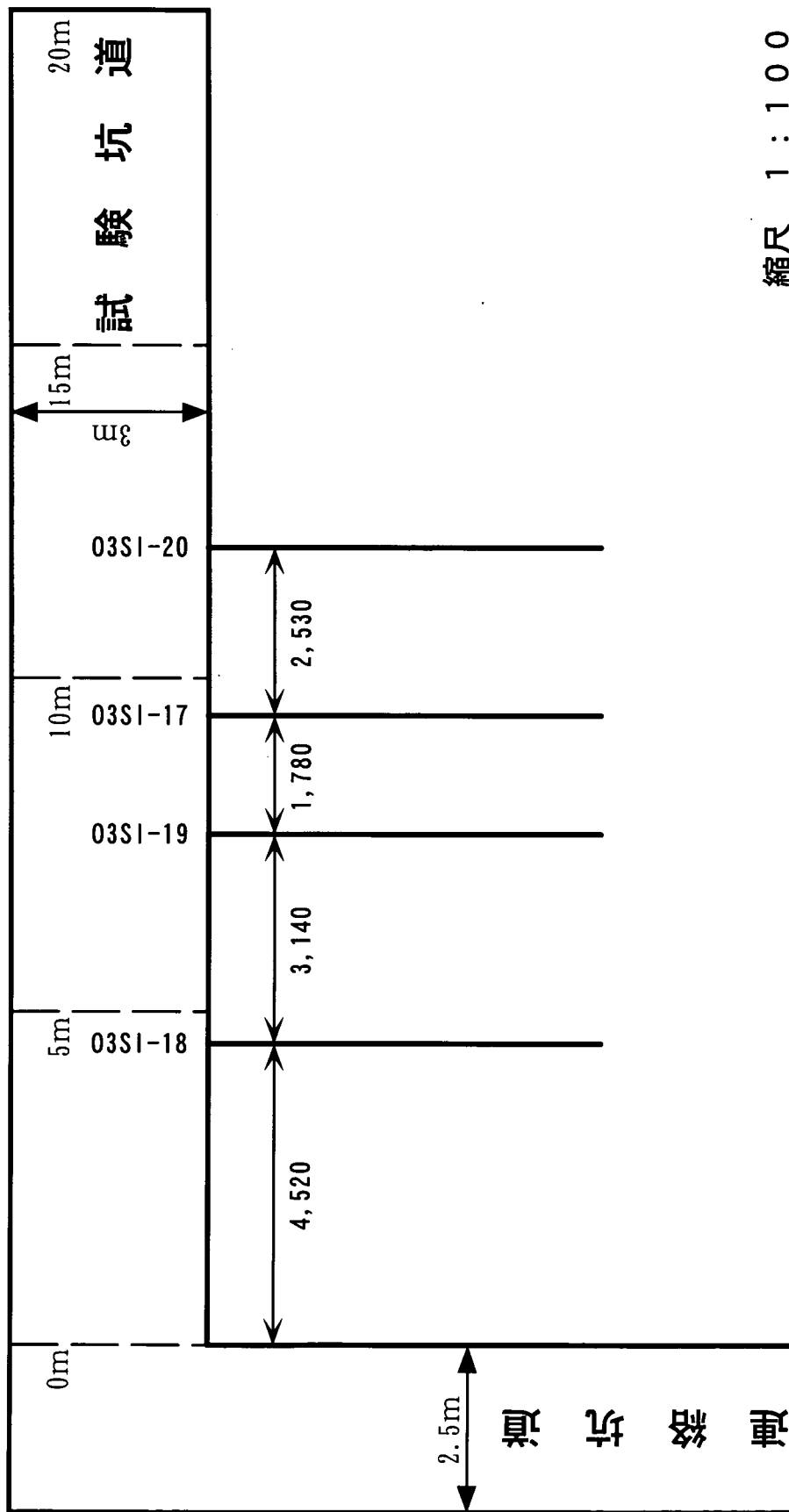
2. 3 孔間レーダー計測結果の解析

トモグラフィ測定データについては、SIRT 法によるインバージョンを実施し、昨年度実施した地表連続波レーダー探査結果と比較した。電磁波伝搬特性変化試験データについてはその時間変化をまとめた。

2. 4 NATM 坑道における間隙水圧測定

坑道壁面の 03SI-18 孔において、間隙水圧測定を実施した。孔内には 6 連のパッカーシステムを挿入し、計 6 区間で測定を実施した。パッカー拡張後は区間のエア抜きとパッカーの遮水機能の確認を行った。また、この際に区間の概略の透水性を把握するために簡易注水試験を実施した。

間隙水圧の本測定は、これらの準備の終了とともに開始し、1/21～2/26 までの期間測定を行った。各区間の圧力はゲージ圧タイプの圧力計にてデータを取得した。



縮尺 1 : 100

図2.2-1 NATM坑道ボーリング孔配置図

3. NATM 坑道における孔間レーダー計測（電磁波トモグラフィ）

3. 1 ステップ式連続波レーダーの測定原理

(1) 従来型探査装置（パルス・レーダー）との相違点

電磁波による探査（地中レーダーを含む）について探査可能な深度または距離を大きくするためには送信アンテナから放射する電磁波のパワーを上げる必要がある。送信信号の瞬間的なエネルギーは振幅の2乗に比例し、総エネルギー量は2乗振幅の送信時間内における時間積分で表される。

従来型の地中レーダー探査に用いられている送信波形は図3. 1-1 (a)に示すパルス波であり、パワーを上げるためにはパルス波の振幅を大きくすれば良い。このことは瞬間的に送信アンテナから大電力を送ることになる。地中における物標識別能力（分解能）はパルス波の時間幅（パルス幅）が小さいほど高くなる。パワーを上げるために振幅を大きくしても分解能を上げるためにパルス幅を小さくすれば、結果的に送信電力を大きくすることはできなくなる。

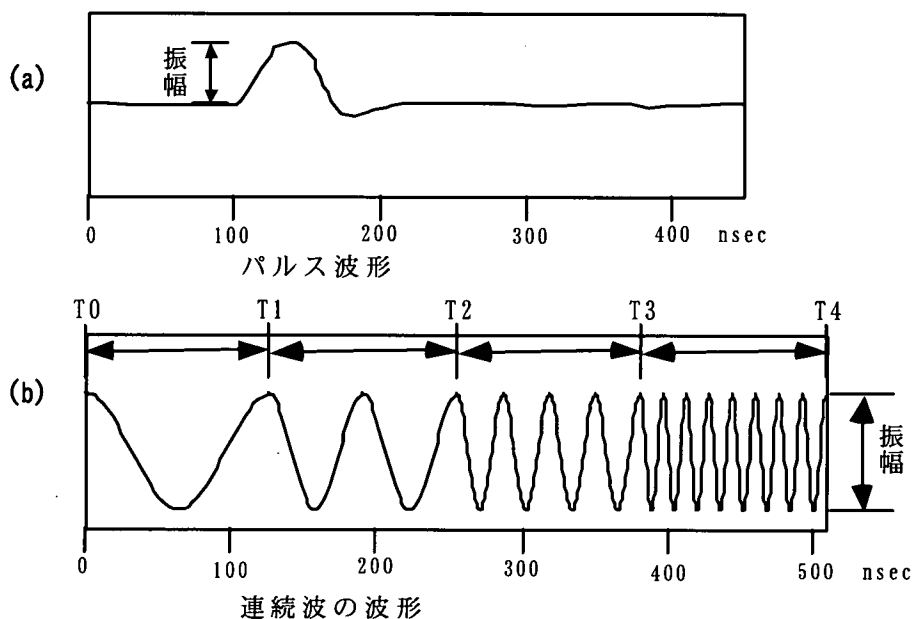


図3. 1-1 送信信号の比較

このパルス波による欠点を改良するために本探査装置では同図(b)に示す連続波波形を送信信号として用いている。この送信方法の特徴は振幅を一定に保ちながら、正弦波を低い周波数の信号から高い周波数の信号へと波形のもつ周波数を変化させながら送信することである。この方法によれば送信アンテナから瞬間的に大電力を送ることなく、送信時間を長くすることによって結果として送信アンテナから大きなパワーをもつ電磁波を送り出すことができる。送信信号の周波数の範囲を広く設定することによって後述するパルス圧縮の原理に従ってパルス幅の小さいパルス波形に復元することができ、従来のパルス・レーダーと同じように扱うことができる。

送信信号及び受信信号は解析時にデジタルデータとして扱くと都合が良いので、送

信周波数は図3. 1-2に示すように、不連続なステップ状に設定する(ステップ式)。

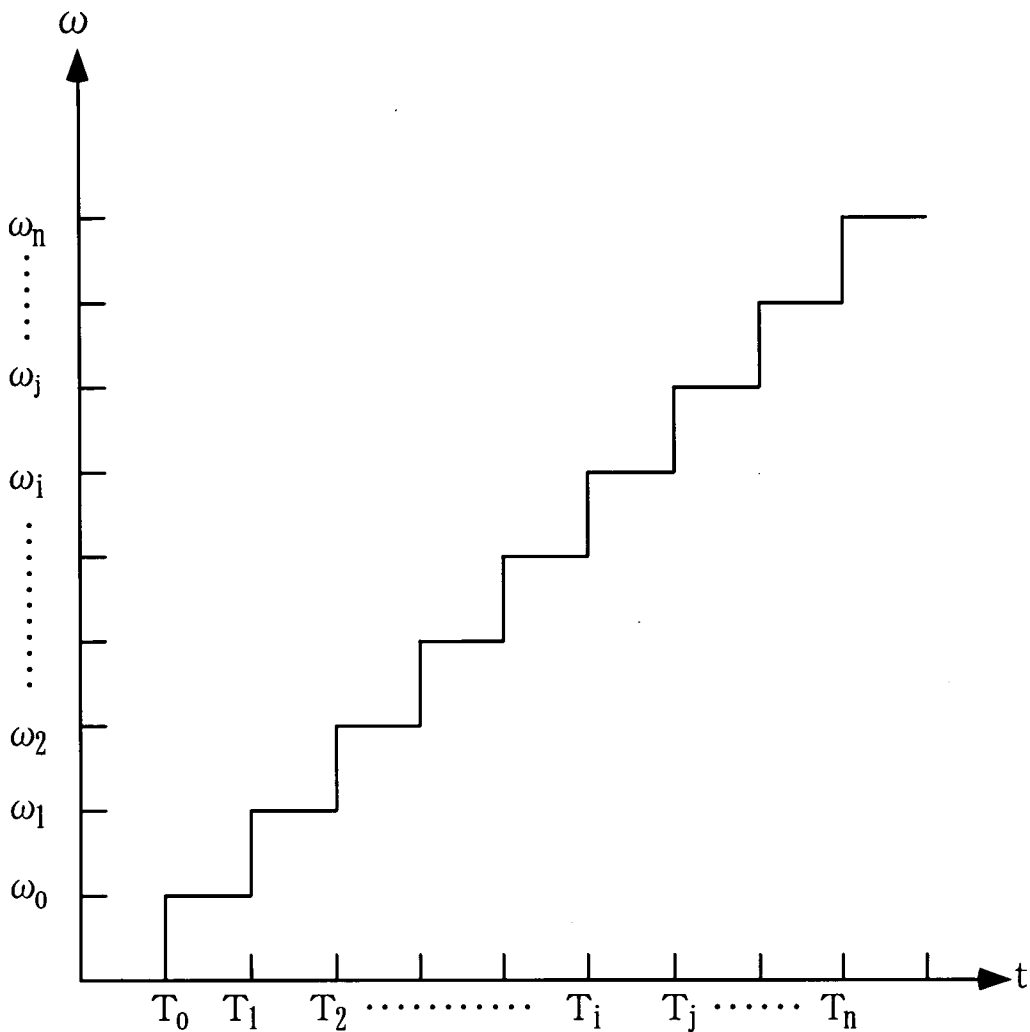


図3. 1-2 ステップ式周波数掃引方法

(2) パルス圧縮の原理

送信能力に優れた連続波信号でもそのままの形では地中から反射してくる電磁波の到達時刻等を読取ることはできない。そこで解析を行うためには受信した連続波信号を再びパルス波形に変換する必要がある。この変換をパルス圧縮と呼ぶ。

送信波形のスペクトルを $S_t(\omega)$ 、地中の伝搬特性を $H(\omega)$ 、電磁波の地中における伝搬時間及び距離をそれぞれ τ 及び r 、電磁波の減衰定数を α で表せば、パルス圧縮波形のスペクトル $S_p(\omega)$ は

$$S_p(\omega) = |S_t(\omega)|^2 H(\omega) \exp(-\alpha r) \cdot \exp\{-j\omega\tau(\omega)\} \quad (3.1)$$

と表すことができる。地中の伝搬特性よりも広い周波数帯域で、送信信号のスペクトルが周波数に対して平坦な特性でかつ適用周波数帯で分散が小さいと仮定すれば、パ

ルス圧縮波形は上式を逆フーリエ変換して、

$$\begin{aligned}
 S_p(t) &= C \cdot \exp(-\alpha r) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\eta - \tau) \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \exp\{j\omega(t - \eta)\} d\omega d\eta \\
 &= C \cdot \exp(-\alpha r) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\eta - \tau) H(t - \eta) d\eta
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

となる。(3.2)式の $\delta(\eta - \tau)$ はデルタ関数を表しているから、 $S_p(t)$ は電磁波の減衰を考慮した地中のインパルス応答に相当し、パルス波形となる。

(3) 測定原理

連続波レーダーの送信方式は、VCOで発生した送信信号を光信号に変換し、光ファイバーで送信器に伝送、パワーアンプで増幅してアンテナエレメントより放射する(図3.1-3)。

VCOは、10.8~18.7MHzの周波数帯で動作し、10.7MHzの中間周波数をミキシングして、1~80MHzの送信周波数帯域を有する。送信信号はE/O変換器を通して、光信号に変換され、送信器のO/E変換器で再び電気信号に変換される。パワーアンプの動作形式はB級プッシュプルで、全利得は58dBである。そのときの送信出力レベルは33dBm(2W)である。

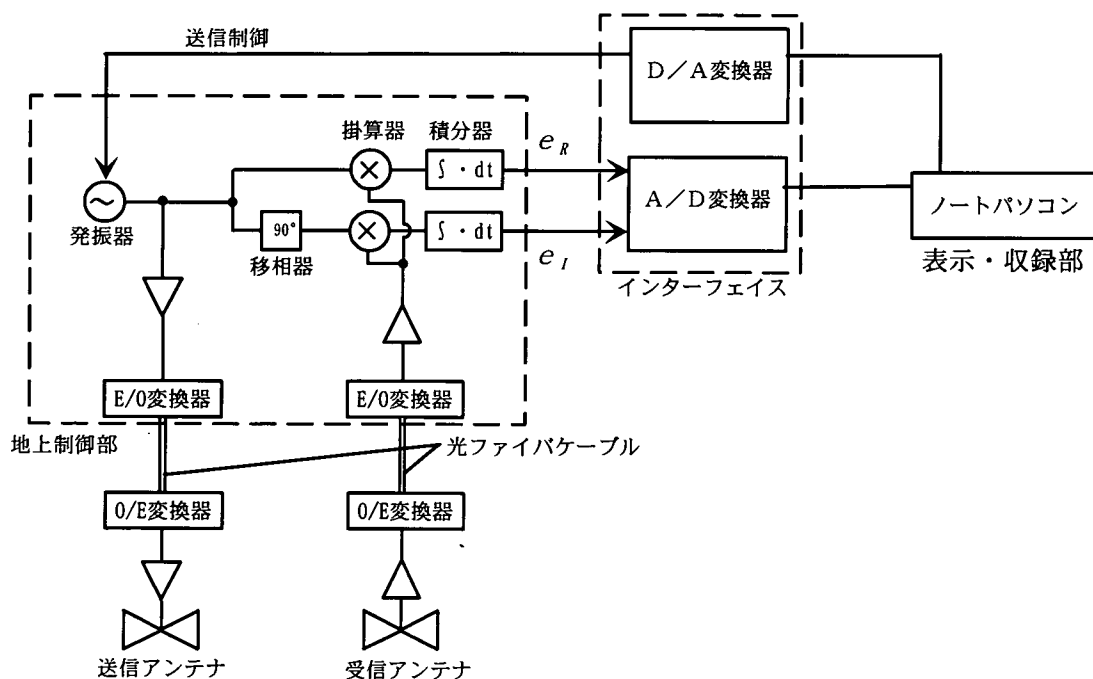


図3.1-3 電磁波トモグラフィ測定装置の動作原理

地中を伝搬した電磁波は受信アンテナで検出され、3段の増幅回路で増幅される。一方、送信信号は受信ケーブルを経由して(送信信号同様光伝送)受信器に伝送され、受

信信号とミキシングされる。すなわち、1~80MHzの受信信号は11.8~90.7MHzの送信信号とミキシングされ、10.7MHzの中間周波数に変換される（ヘテロダイン検波）。10.7MHzの受信信号は、再び光伝送され、制御器へ取り込まれる。10.7MHzの受信信号は2つに分岐され、そのうちの一方を位相器で $\pi/2$ 位相をずらす。そのずらされた信号と元の信号とは、10.7MHzの基準信号とミキシングされ、低周波の信号を得る。これが最終的に実数部 e_R 及び虚数部 e_I として収録される。 e_R 、 e_I を式で表せば、

$$e_R = |S_i(\omega)|^2 H(\omega) \cos(\omega\tau)$$

$$e_I = |S_i(\omega)|^2 H(\omega) \sin(\omega\tau)$$

である。ここで、 e_R と e_I の $\cos(\omega\tau)$ 及び $\sin(\omega\tau)$ に注目すると位相 θ は、

$$\theta = \omega\tau = 2\pi f\tau$$

となり、両辺を f で微分して整理すると、

$$\tau = \frac{d\theta}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{df} \quad (3.3)$$

である。よって、(3.3)式より、地中の伝搬時間 τ を求めることができる。すなわち、周波数と位相とをそれぞれ横軸、縦軸にプロットしたときの傾きが走時となる。

また、 θ は

$$\theta = \arctan\left(\frac{e_I}{e_R}\right)$$

から求めることができる。

3. 2 測定方法

表3. 2-1に使用測定機器の主な仕様を示す。

表3. 2-1 電磁波トモグラフィ探査使用機器一覧（ステップ式連続波レーダー）

項目	仕様
送信部	送信周波数 ; 1~80MHz 電力増幅方式 ; B級プッシュプル
受信部	受信周波数 ; 1~80MHz 雑音指数 ; 1.2dB 受信方式 ; スーパーヘテロダイン検波方式
アンテナ部	形状 ; 円筒形ダイポール・アンテナ 寸法 ; 全長約3.5m（ケーブルヘッド含む）, 外径 φ60mm
ケーブル	種類 ; 光ファイバー（GI 50/125, 4芯） 長さ ; 200m
地上制御器	回路構成 ; 送信信号発生部 受信中間周波部 局所信号発生部 同期検波部

03SI-20孔及び03SI-19孔の2つのボーリング孔を使用し、前者を送信孔として送信ゾンデ（送信用ボアホール型アンテナ）を、後者を受信孔として受信ゾンデ（受信用ボアホール型アンテナ）をそれぞれ設置して電磁波の透過波形を記録した。1つの受信点に対して送信ゾンデを0.25m間隔で移動させ、測定を繰り返す（図3. 2-1）。1つの受信点による一連の測定が終了した後、送信深度区間内で等間隔に送信ゾンデを移動して同種の測定を繰り返す。全測定が完了した段階で、送信孔と受信孔で囲まれた断面内において均等に電磁波を透過させたときの受信記録波形を取得することができる。測定した全ての波線を図3. 2-2に示す。なお、水平距離1mまではアンテナが孔内に収まらないため、測定を実施することができない。

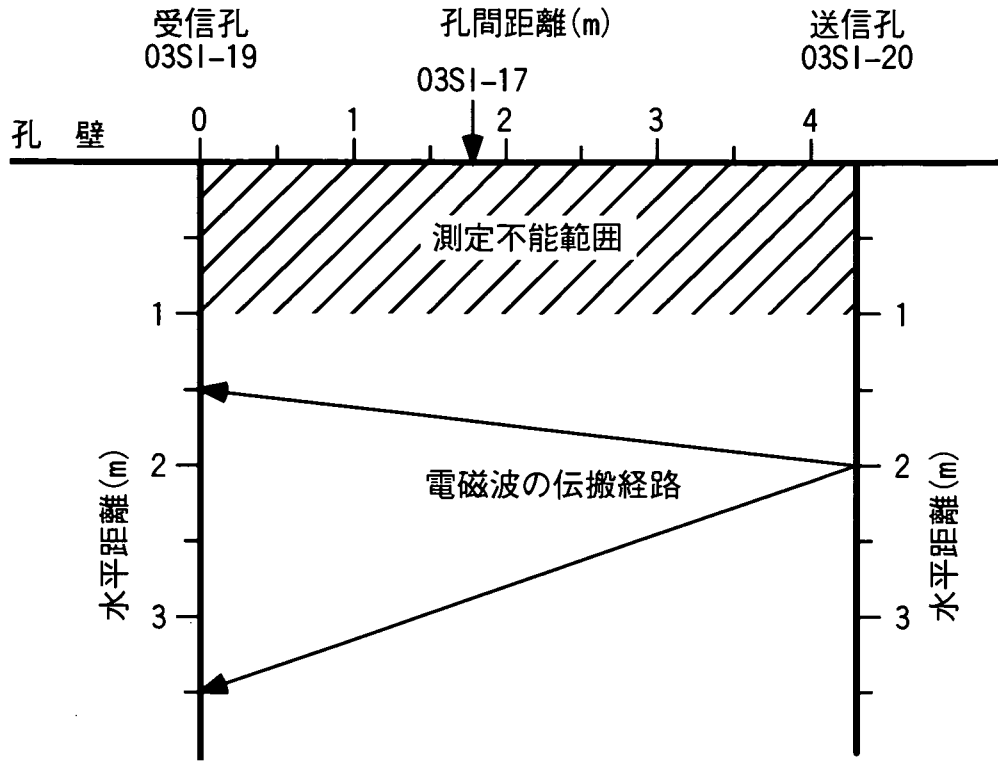


図 3. 2 - 1 電磁波の伝搬経路

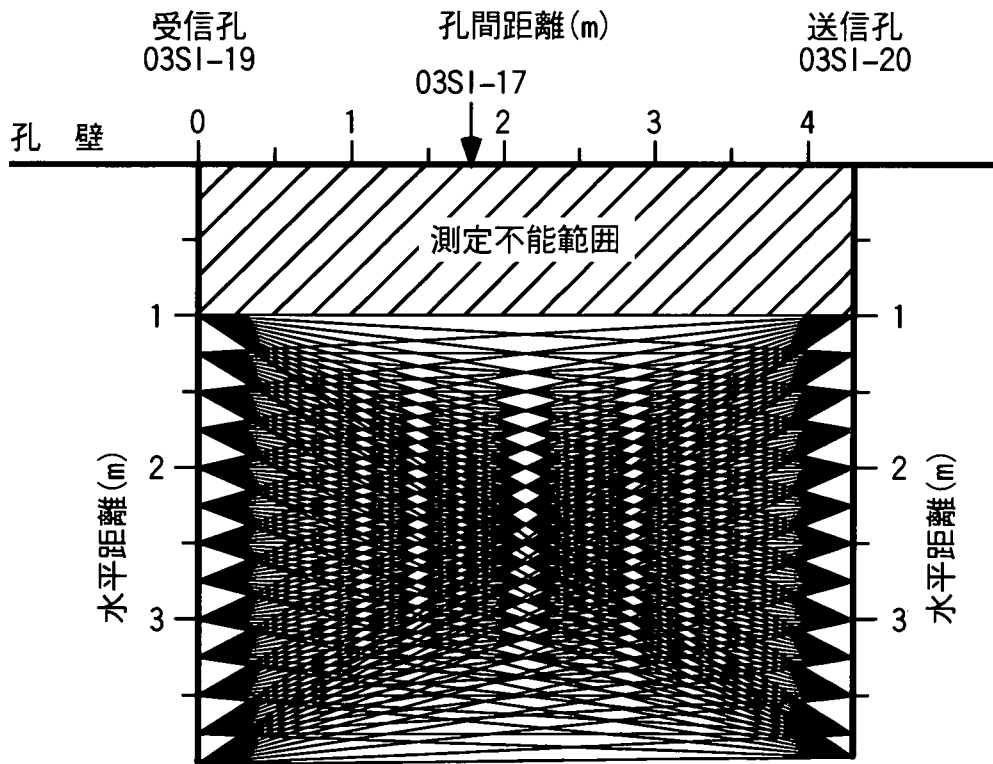


図 3. 2 - 2 トモグラフィ波線図

3. 3 伝搬時間（走時）の読み取り

収録したデータは、室内に持ち帰り (3.3) 式に基づき、伝搬時間の読み取りを実施した。逆フーリエ変換により時間領域波形に変換した波形の例を図 3. 3-1 に示す。表 3. 3-1 ~ 表 3. 3-3 に読み取った伝搬時間の一覧を示す。伝搬時間の読み取りは 10~30 MHz を基本とするが、波線経路により岩盤中を透過した波形のスペクトルが一様でないため、周波数帯を限定して伝搬時間の読み取りを行ったデータもある (表 3. 3-1 ~ 表 3. 3-3 参照)。5MHz ないし 10MHz 以下の周波数帯は、周波数により伝搬時間が大きく異なる (分散が生じている)、あるいはアンテナの感度が低下しているため読み取りを行わなかった。

伝搬時間はいわゆる初動の立ち上がりではなく、包絡線のピークに相当する。波動エネルギーが最も集中した時間であると解釈される。

包絡線波形 $Env(t)$ は、ヒルベルト変換 $H[f(t)]$ を用いて計算することができる。元の時間領域波形を $f(t)$ とすると、 $H[f(t)]$ は次式で表される。

$$H[f(t)] = f(t) * \left(-\frac{1}{\pi t}\right)$$

ただし、* はたたみ込み積分を表す。このとき $Env(t)$ は、

$$Env(t) = \sqrt{\{f(t)\}^2 + \{H[f(t)]\}^2}$$

となる。時間領域では計算量が膨大になるため、フーリエ変換を用いて周波数領域で計算を行った後、逆フーリエ変換により時間領域の波形に戻し実際の計算を行った。ヒルベルト変換を用いて計算した包絡線波形の例を図 3. 3-2 に示す。位相の変化から読み取った伝搬時間と包絡線波形のピークとが一致していることがわかる。

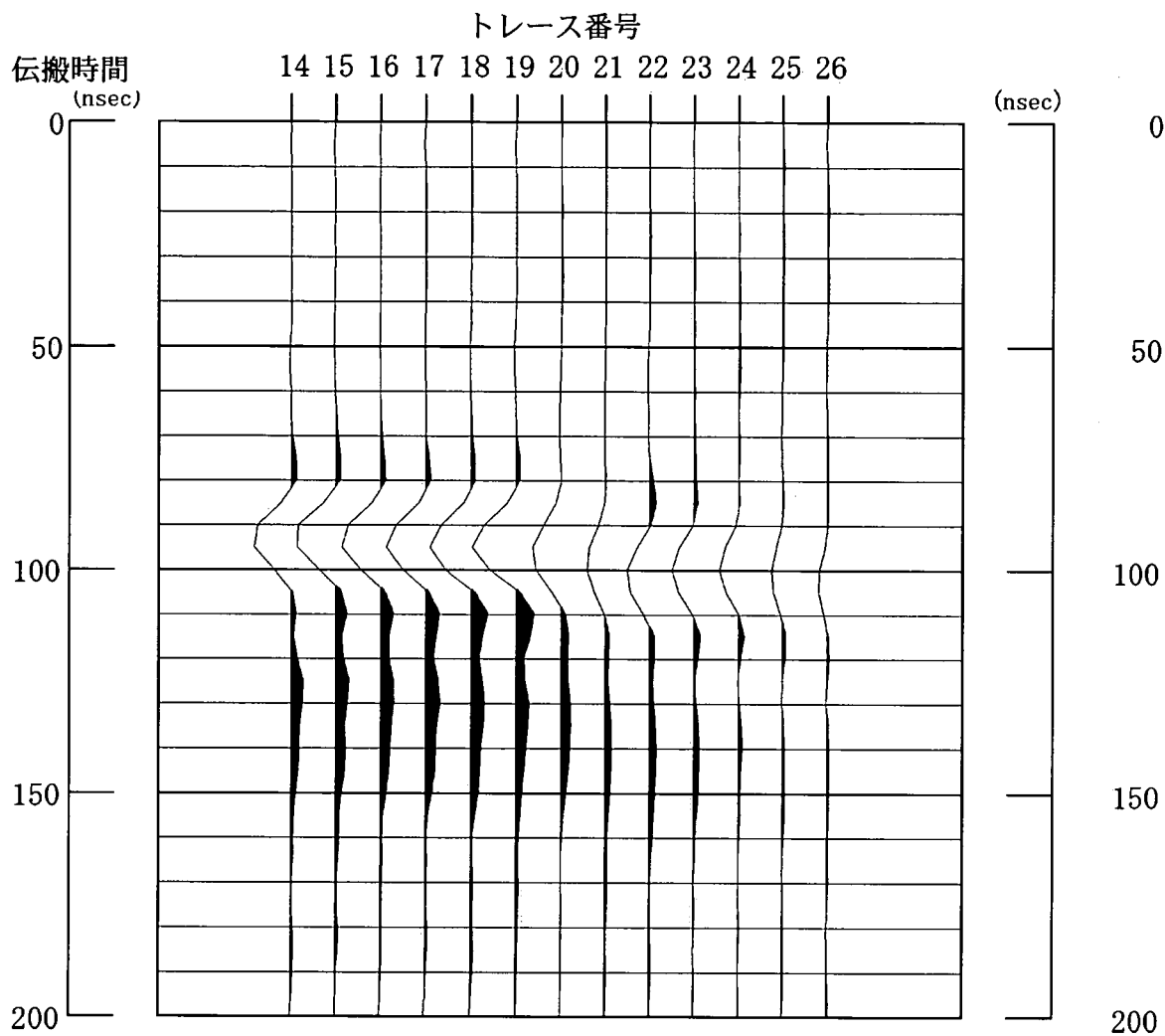


図 3. 3 - 1 逆フーリエ変換後の波形

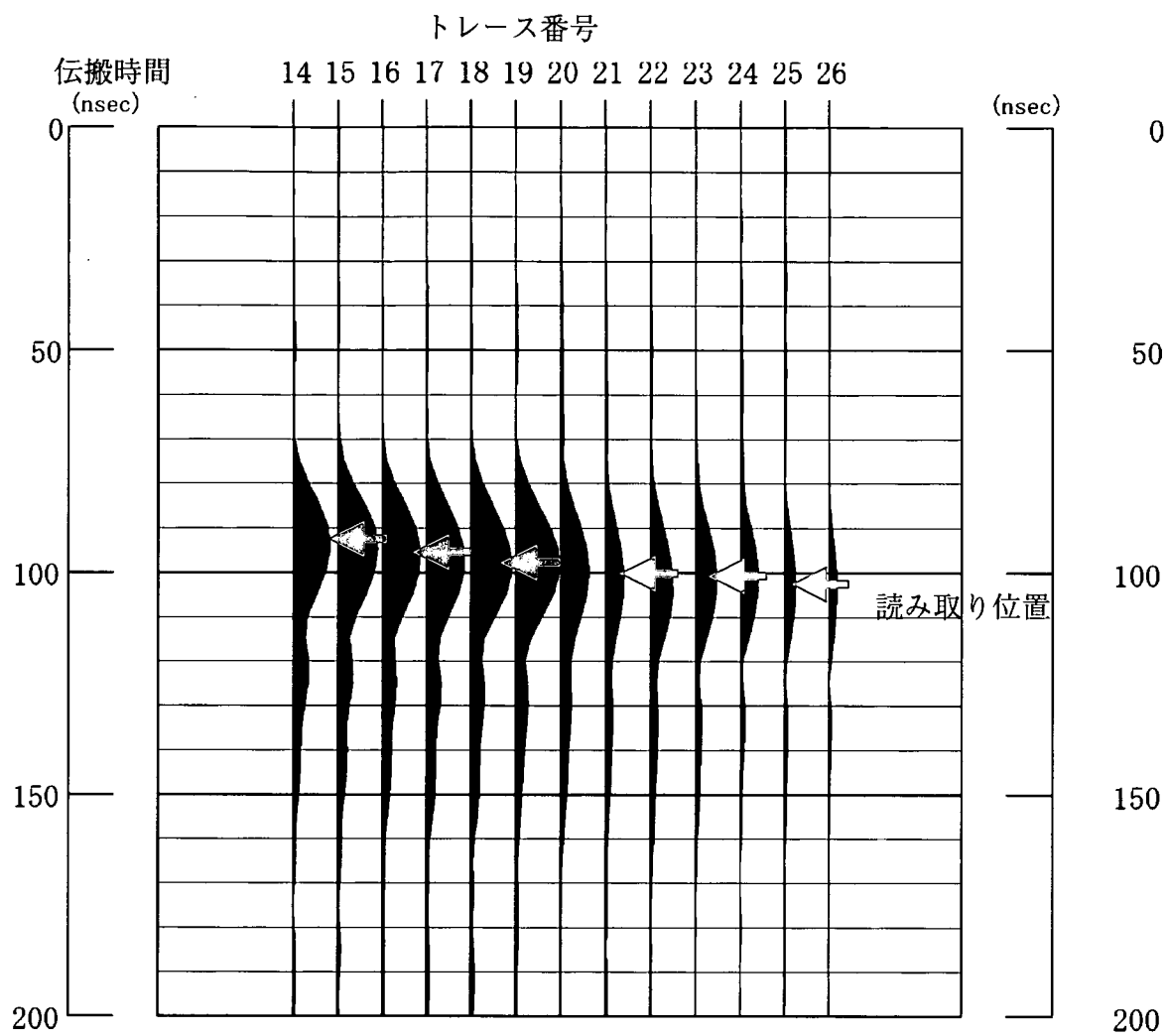


図 3. 3 - 2 包絡線波形

表3. 3-1 走時読み取り結果(その1)

トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
1	3.90	3.95	90.66613	10	30
2	3.75	3.95	92.39976	10	30
3	3.50	3.95	91.16487	10	30
4	3.25	3.95	91.69270	10	30
5	3.00	3.95	92.87068	10	30
6	2.75	3.95	96.68224	10	30
7	2.50	3.95	97.46696	10	30
8	2.25	3.95	94.44860	10	30
9	2.00	3.95	94.44388	10	30
10	1.75	3.95	93.29121	10	30
11	1.50	3.95	99.95455	10	30
12	1.25	3.95	100.55590	10	30
13	1.00	3.95	101.15725	5	30
14	3.90	3.75	91.33588	10	30
15	3.75	3.75	89.54518	10	30
16	3.50	3.75	92.03475	10	30
17	3.25	3.75	92.90257	10	30
18	3.00	3.75	93.34159	10	30
19	2.75	3.75	93.73427	10	30
20	2.50	3.75	97.44807	10	30
21	2.25	3.75	97.61240	10	30
22	2.00	3.75	96.23252	10	30
23	1.75	3.75	97.05531	10	30
24	1.50	3.75	101.32529	10	30
25	1.25	3.75	104.17544	5	30
26	1.00	3.75	102.04920	15	40
27	3.90	3.50	88.11224	10	30
28	3.75	3.50	94.76514	10	30
29	3.50	3.50	96.01469	10	30
30	3.25	3.50	94.90358	10	30
31	3.00	3.50	92.49551	10	30
32	2.75	3.50	92.10878	10	30
33	2.50	3.50	94.71479	10	30
34	2.25	3.50	93.96736	10	30
35	2.00	3.50	96.04351	10	30
36	1.75	3.50	96.04289	10	30
37	1.50	3.50	96.21574	10	30
38	1.25	3.50	106.71162	5	20
39	1.00	3.50	103.42608	15	40
40	3.90	3.25	89.91869	10	30

表 3. 3-2 走時読み取り結果 (その2)

トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
41	3.75	3.25	90.00776	10	30
42	3.50	3.25	91.10302	10	30
43	3.25	3.25	90.43227	10	30
44	3.00	3.25	91.34055	10	30
45	2.75	3.25	91.74364	10	30
46	2.50	3.25	92.20883	10	30
47	2.25	3.25	92.74500	10	30
48	2.00	3.25	96.19061	10	30
49	1.75	3.25	97.34877	10	30
50	1.50	3.25	95.07027	10	30
51	1.25	3.25	95.88058	10	30
52	1.00	3.25	98.59527	10	30
53	3.90	3.00	93.52563	10	30
54	3.75	3.00	92.74036	10	30
55	3.50	3.00	91.86736	10	30
56	3.25	3.00	90.87037	10	30
57	3.00	3.00	91.04498	10	30
58	2.75	3.00	91.91858	10	30
59	2.50	3.00	91.35072	10	30
60	2.25	3.00	91.89060	10	30
61	2.00	3.00	94.39778	10	30
62	1.75	3.00	98.87732	10	30
63	1.50	3.00	99.41743	10	30
64	1.25	3.00	95.18037	10	30
65	1.00	3.00	94.63680	10	30
66	3.90	2.75	93.45461	10	30
67	3.75	2.75	93.32408	10	30
68	3.50	2.75	94.47384	10	30
69	3.25	2.75	95.03130	10	30
70	3.00	2.75	97.02224	10	30
71	2.75	2.75	96.67609	10	30
72	2.50	2.75	95.24569	10	30
73	2.25	2.75	93.31474	10	30
74	2.00	2.75	93.71886	10	30
75	1.75	2.75	95.18605	10	30
76	1.50	2.75	95.10566	10	30
77	1.25	2.75	97.01666	10	30
78	1.00	2.75	97.87611	10	30
79	3.90	2.50	96.24493	10	30
80	3.75	2.50	96.57663	10	30

表 3. 3 - 3 走時読み取り結果 (その 3)

トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
81	3.50	2.50	94.59953	10	30
82	3.25	2.50	94.99707	10	30
83	3.00	2.50	93.88219	10	30
84	2.75	2.50	92.87349	10	30
85	2.50	2.50	91.62455	10	30
86	2.25	2.50	91.30375	10	30
87	2.00	2.50	93.89585	10	30
88	1.75	2.50	94.74216	10	30
89	1.50	2.50	95.59509	10	30
90	1.25	2.50	92.11225	10	30
91	1.00	2.50	91.66257	5	10
92	3.90	2.25	95.47739	20	30
93	3.75	2.25	97.37061	20	25
94	3.50	2.25	96.88080	5	40
95	3.25	2.25	96.84963	5	40
96	3.00	2.25	96.70778	15	30
97	2.75	2.25	98.97360	10	30
98	2.50	2.25	99.22227	10	30
99	2.25	2.25	99.48402	10	30
100	2.00	2.25	97.93781	10	30
101	1.75	2.25	100.22192	10	30
102	1.50	2.25	98.99271	10	30
103	1.25	2.25	93.79374	10	30
104	1.00	2.25	93.36876	5	30
105	3.90	2.00	118.86475	10	30
106	3.75	2.00	116.08628	10	30
107	3.50	2.00	117.95769	5	20
108	3.25	2.00	118.21954	5	20
109	3.00	2.00	118.22775	5	20
110	2.75	2.00	119.47744	5	20
111	2.50	2.00	120.23027	5	20
112	2.25	2.00	117.05927	5	20
113	2.00	2.00	93.99285	5	40
114	1.75	2.00	94.96308	5	40
115	1.50	2.00	95.90013	10	30
116	1.25	2.00	101.73985	5	20
117	1.00	2.00	124.65420	5	30
118	3.90	1.75	110.45623	5	20
119	3.75	1.75	114.87686	5	20
120	3.50	1.75	114.56144	5	20

表3. 3-4 走時読み取り結果(その4)

トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
121	3.25	1.75	121.44850	10	30
122	3.00	1.75	120.69309	10	30
123	2.75	1.75	124.65420	5	30
124	2.50	1.75	120.22377	10	30
125	2.25	1.75	121.66504	10	30
126	2.00	1.75	118.09616	5	20
127	1.75	1.75	92.05347	10	30
128	1.50	1.75	96.13635	5	40
129	1.25	1.75	103.84417	10	30
130	1.00	1.75	59.86295	15	40
131	3.90	1.50	126.11461	10	30
132	3.75	1.50	124.04237	10	30
133	3.50	1.50	121.31140	10	30
134	3.25	1.50	123.39941	10	30
135	3.00	1.50	124.95942	10	30
136	2.75	1.50	127.18896	10	30
137	2.50	1.50	123.58150	10	30
138	2.25	1.50	124.80437	10	30
139	2.00	1.50	124.33495	10	30
140	1.75	1.50	117.00271	5	20
141	1.50	1.50	95.86921	10	30
142	1.25	1.50	127.45576	5	30
143	1.00	1.50	38.09653	5	20
144	3.90	1.25	128.69525	10	30
145	3.75	1.25	130.95798	10	30
146	3.50	1.25	131.19586	10	30
147	3.25	1.25	127.49821	10	30
148	3.00	1.25	128.97301	10	30
149	2.75	1.25	127.67464	10	30
150	2.50	1.25	125.90979	5	30
151	2.25	1.25	126.26938	10	30
152	2.00	1.25	126.12754	5	30
153	1.75	1.25	91.99238	5	30
154	1.50	1.25	96.10667	5	30
155	1.25	1.25	63.70743	20	40
156	1.00	1.25	50.77265	5	20
157	3.90	1.00	73.60226	10	30
158	3.75	1.00	128.39938	5	30
159	3.50	1.00	126.90038	5	30
160	3.25	1.00	129.03658	10	30

表 3. 3-5 走時読み取り結果 (その5)

トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
161	3.00	1.00	133.02237	10	30
162	2.75	1.00	126.21146	15	40
163	2.50	1.00	135.29079	10	30
164	2.25	1.00	140.48679	5	30
165	2.00	1.00	134.47137	10	30
166	1.75	1.00	126.44333	5	20
167	1.50	1.00	114.31982	5	30
168	1.25	1.00	60.48629	15	40
169	1.00	1.00	51.08732	5	20

伝搬距離に対する伝搬時間をプロットしたものを図 3. 3-3 に示す。概ね100nsec付近と120nsec付近に伝搬時間が集中しているが、伝搬距離に対して伝搬時間が比例しないデータも存在する。これらのデータは波線が斜めになりアンテナの感度が低下したため読み取りがうまくできなかったものと考えられる。これらの不良データは、3. 4 で後述するように不良データとして削除してからトモグラフィ解析を実施した。

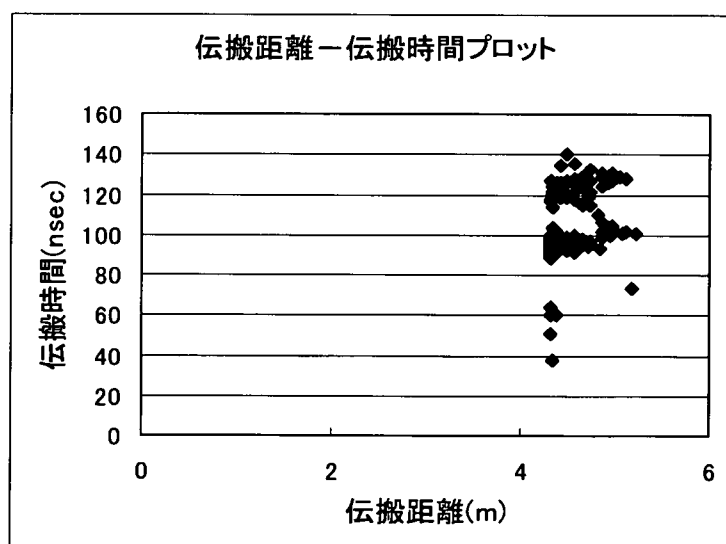


図 3. 3-3 伝搬距離-伝搬時間プロット

3. 4 データ品質管理

トモグラフィの計算 (インバージョン) は、理論的に計算される観測値が現実の観測値により整合する方向に向かうように進められる。理論的な観測値は、あくまで設定された数理モデルに従って計算される。現実の信号の伝搬状況が採用したモデルと異なっている

場合は、たとえ理論値と観測値との誤差が小さくなっているとしても、逐次近似は正しい方向に進まない。結果的に現実の岩盤や地層とは異なった物性値の分布を表す解析断面が得られることがある。

今回の解析では、以下の方法でデータの品質管理を実施した。

①全測定波線のデータを用いて解析を行う。各展開において、最も短い走時が得られるのは送受信同一深度の波線である。ある送信点に対するその水平対向の受信点データを各展開で拾い上げ、解析で求めた走時 (T_0) と各展開におけるボーリング孔の座標から算出した伝搬距離を用いて電磁波速度 (V_c) を算出する。

②①の段階で水平対向における V_c が展開毎に求められる (送信点数と同数)。この V_c を各展開での基準値として用い、新たな走時 (T_c) を再計算する。

③②の段階で全測定波線数と同数の T_c が求められる。 T_0 から T_c を差し引き、その絶対値をとる。展開毎に着目し、以下の式を用いて標準偏差 (S_i) を算出する。標準偏差は小さければ小さいほどデータの相関が良い。

$$S_i = \sqrt{\sum_n \left(\frac{T_0 - T_c}{n} \right)^2} \quad (n : \text{サンプル数を示し, 各展開で数は異なる})$$

④③の段階で全測定波線数と同数の $T_0 - T_c$ と、各展開につき1個の S_i が求まる。 S_i 毎 (=展開毎) の走時曲線を作成する。走時曲線の相関が悪くなる箇所を見つけ出し、それまでの S_i の平均値 R を算出する。

⑤ $|T_0 - T_c|$ が R の2倍以上になる波線のデータを削除する。

以上の品質管理を行い、削除したデータを表3. 4-1~5に黄緑色のマーカーにより示す。このときの伝搬距離に対する伝搬時間をプロットしたものを図3. 4-1に、波線図を図3. 4-2にそれぞれ示す。

表 3. 4-1 走時読み取り結果 (その1)

新トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
1	3.90	3.95	90.66613	10	30
2	3.75	3.95	92.39976	10	30
3	3.50	3.95	91.16487	10	30
4	3.25	3.95	91.69270	10	30
5	3.00	3.95	92.87068	10	30
6	2.75	3.95	96.68224	10	30
7	2.50	3.95	97.46696	10	30
8	2.25	3.95	94.44860	10	30
9	2.00	3.95	94.44388	10	30
10	1.75	3.95	93.29121	10	30
11	1.50	3.95	99.95455	10	30
12	1.25	3.95	100.55590	10	30
13	1.00	3.95	101.15725	5	30
14	3.90	3.75	91.33588	10	30
15	3.75	3.75	89.54518	10	30
16	3.50	3.75	92.03475	10	30
17	3.25	3.75	92.90257	10	30
18	3.00	3.75	93.34159	10	30
19	2.75	3.75	93.73427	10	30
20	2.50	3.75	97.44807	10	30
21	2.25	3.75	97.61240	10	30
22	2.00	3.75	96.23252	10	30
23	1.75	3.75	97.05531	10	30
24	1.50	3.75	101.32529	10	30
25	1.25	3.75	104.17544	5	30
26	1.00	3.75	102.04920	15	40
27	3.90	3.50	88.11224	10	30
28	3.75	3.50	94.76514	10	30
29	3.50	3.50	96.01469	10	30
30	3.25	3.50	94.90358	10	30
31	3.00	3.50	92.49551	10	30
32	2.75	3.50	92.10878	10	30
33	2.50	3.50	94.71479	10	30
34	2.25	3.50	93.96736	10	30
35	2.00	3.50	96.04351	10	30
36	1.75	3.50	96.04289	10	30
37	1.50	3.50	96.21574	10	30
38	1.25	3.50	106.71162	5	20
39	1.00	3.50	103.42608	15	40
40	3.90	3.25	89.91869	10	30

表3. 4-2 走時読み取り結果 (その2)

新トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
41	3.75	3.25	90.00776	10	30
42	3.50	3.25	91.10302	10	30
43	3.25	3.25	90.43227	10	30
44	3.00	3.25	91.34055	10	30
45	2.75	3.25	91.74364	10	30
46	2.50	3.25	92.20883	10	30
47	2.25	3.25	92.74500	10	30
48	2.00	3.25	96.19061	10	30
49	1.75	3.25	97.34877	10	30
50	1.50	3.25	95.07027	10	30
51	1.25	3.25	95.88058	10	30
52	1.00	3.25	98.59527	10	30
53	3.90	3.00	93.52563	10	30
54	3.75	3.00	92.74036	10	30
55	3.50	3.00	91.86736	10	30
56	3.25	3.00	90.87037	10	30
57	3.00	3.00	91.04498	10	30
58	2.75	3.00	91.91858	10	30
59	2.50	3.00	91.35072	10	30
60	2.25	3.00	91.89060	10	30
61	2.00	3.00	94.39778	10	30
62	1.75	3.00	98.87732	10	30
63	1.50	3.00	99.41743	10	30
64	1.25	3.00	95.18037	10	30
65	1.00	3.00	94.63680	10	30
66	3.90	2.75	93.45461	10	30
67	3.75	2.75	93.32408	10	30
68	3.50	2.75	94.47384	10	30
69	3.25	2.75	95.03130	10	30
70	3.00	2.75	97.02224	10	30
71	2.75	2.75	96.67609	10	30
72	2.50	2.75	95.24569	10	30
73	2.25	2.75	93.31474	10	30
74	2.00	2.75	93.71886	10	30
75	1.75	2.75	95.18605	10	30
76	1.50	2.75	95.10566	10	30
77	1.25	2.75	97.01666	10	30
78	1.00	2.75	97.87611	10	30
79	3.90	2.50	96.24493	10	30
80	3.75	2.50	96.57663	10	30

表 3. 4-3 走時読み取り結果 (その3)

新トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
81	3.50	2.50	94.59953	10	30
82	3.25	2.50	94.99707	10	30
83	3.00	2.50	93.88219	10	30
84	2.75	2.50	92.87349	10	30
85	2.50	2.50	91.62455	10	30
86	2.25	2.50	91.30375	10	30
87	2.00	2.50	93.89585	10	30
88	1.75	2.50	94.74216	10	30
89	1.50	2.50	95.59509	10	30
90	1.25	2.50	92.11225	10	30
91	1.00	2.50	91.66257	5	10
92	3.90	2.25	95.47739	20	30
93	3.75	2.25	97.37061	20	25
94	3.50	2.25	96.88080	5	40
95	3.25	2.25	96.84963	5	40
96	3.00	2.25	96.70778	15	30
97	2.75	2.25	98.97360	10	30
98	2.50	2.25	99.22227	10	30
99	2.25	2.25	99.48402	10	30
100	2.00	2.25	97.93781	10	30
101	1.75	2.25	100.22192	10	30
102	1.50	2.25	98.99271	10	30
103	1.25	2.25	93.79374	10	30
104	1.00	2.25	93.36876	5	30
105	3.90	2.00	118.86475	10	30
106	3.75	2.00	116.08628	10	30
107	3.50	2.00	117.95769	5	20
108	3.25	2.00	118.21954	5	20
109	3.00	2.00	118.22775	5	20
110	2.75	2.00	119.47744	5	20
111	2.50	2.00	120.23027	5	20
112	2.25	2.00	117.05927	5	20
113	2.00	2.00	93.99285	5	40
114	1.75	2.00	94.96308	5	40
115	1.50	2.00	95.90013	10	30
116	1.25	2.00	101.73985	5	20
117	3.90	1.75	110.45623	5	20
118	3.75	1.75	114.87686	5	20
119	3.50	1.75	114.56144	5	20

表 3. 4-4 走時読み取り結果 (その 4)

新トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
120	3.25	1.75	121.44850	10	30
121	1.75	1.75	92.05347	10	30
122	1.50	1.75	96.13635	5	40
123	1.25	1.75	103.84417	10	30
124	3.90	1.50	126.11461	10	30
125	3.75	1.50	124.04237	10	30
126	3.50	1.50	121.31140	10	30
127	1.50	1.50	95.86921	10	30
128	3.90	1.25	128.69525	10	30
129	3.75	1.25	130.95798	10	30
130	3.50	1.25	131.19586	10	30
131	1.75	1.25	91.99238	5	30
132	1.50	1.25	96.10667	5	30
133	1.25	1.25	63.70743	20	40
134	1.00	1.25	50.77265	5	20
135	3.90	1.00	73.60226	10	30

表 3. 4-5 走時読み取り結果 (その5)

新トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
136	1.25	1.00	60.48629	15	40
137	1.00	1.00	51.08732	5	20

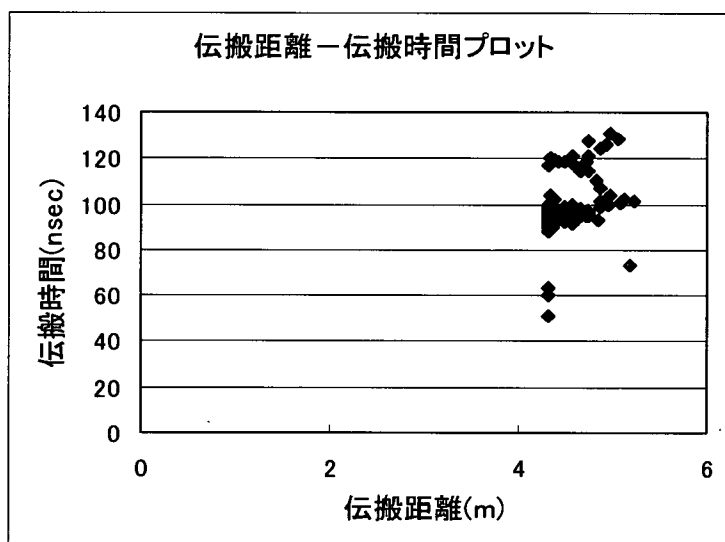


図 3. 4-1 伝搬距離-伝搬時間プロット (不良データ削除後)

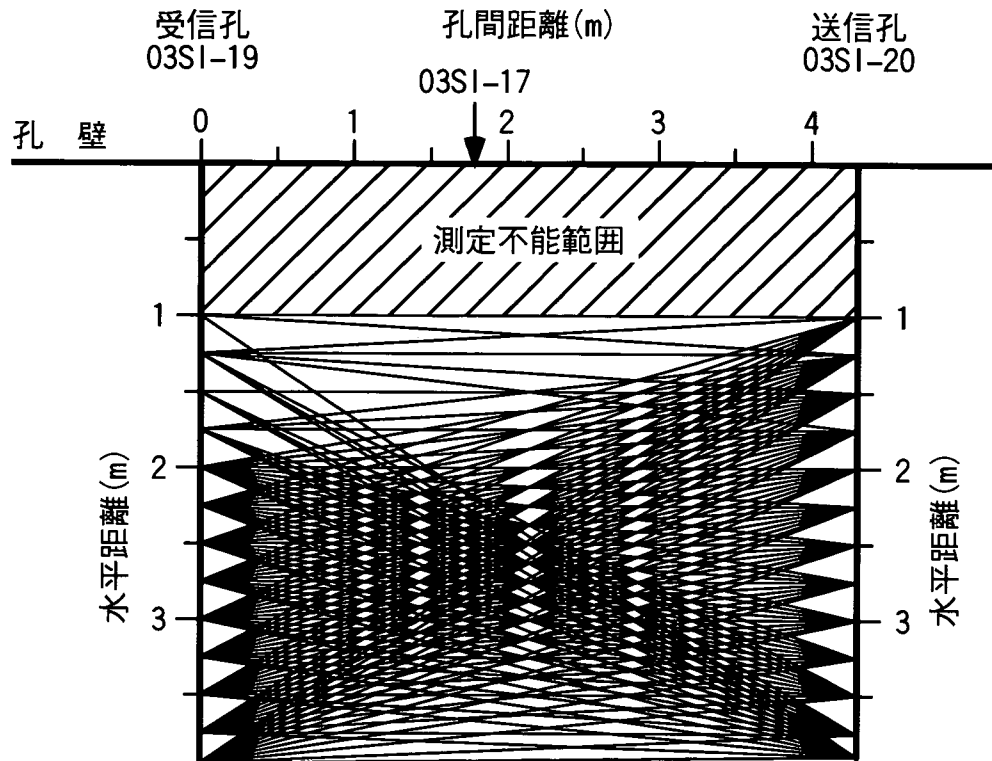


図3. 4-2 不良データ削除後の波線図

3. 5 トモグラフィ解析方法

ボーリング孔間で作る断面を適当に分割するとき、この分割した小ブロックをセルと呼び、送信点から放出された信号が受信点に到達する経路を波線、その距離を波線長と呼ぶ。

トモグラフィによる解析は、BPT法 (Back Projection Technique) あるいはフィルタリング等によってセルの物理量に対する初期値を求め、構造モデルの反復修正によって構造モデルから期待される理論値と観測の残差が十分小さくなったところで計算を終了し、最終的なセル内の物理量を決定する。図3. 4-1にトモグラフィ解析の流れを示す。

逆解析の方法には種々の方法があるがここではSIRT法 (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) を用いた。以下に初期値計算で用いたBPT法とSIRT法について述べる。

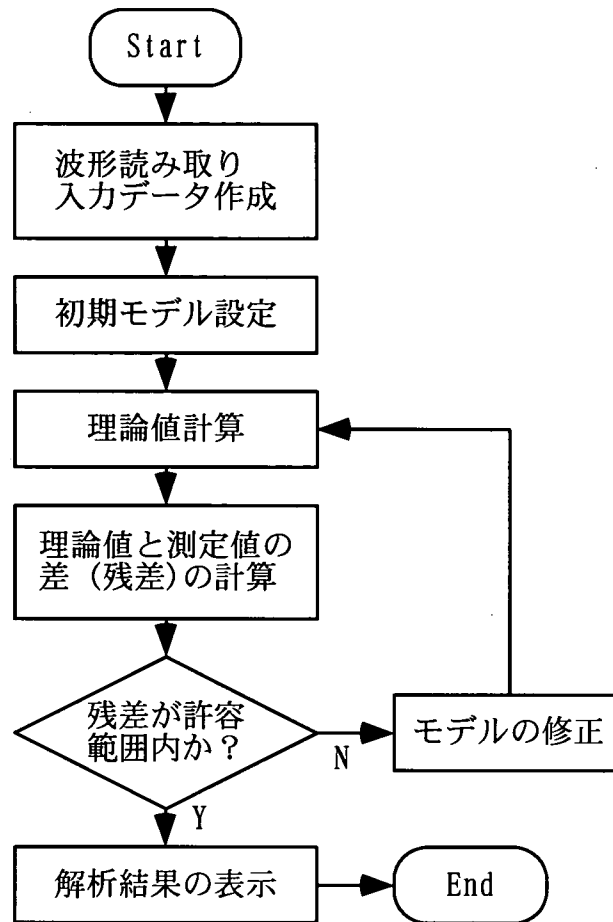


図3. 4-1 トモグラフィ解析の流れ

(1) 逆投影法 (BPT法)

2つの試錐孔が作る断面をN個のセルに分割するときi番目の波線長を L_i 、i番目の波線がj番目のセルを切る長さである波線長を l_{ij} で表すことにする。また、各セルに与えられる物理量を q_j で表すものとする(図3. 4-2)。受信側のi番目の波線に対する観測量を f_i とすれば、BPT法による物理量は次式で示される。

$$q_i = \frac{\sum_j f_i \cdot \frac{l_{ij}}{L_i}}{\sum_j l_{ij}} \quad (3.4)$$

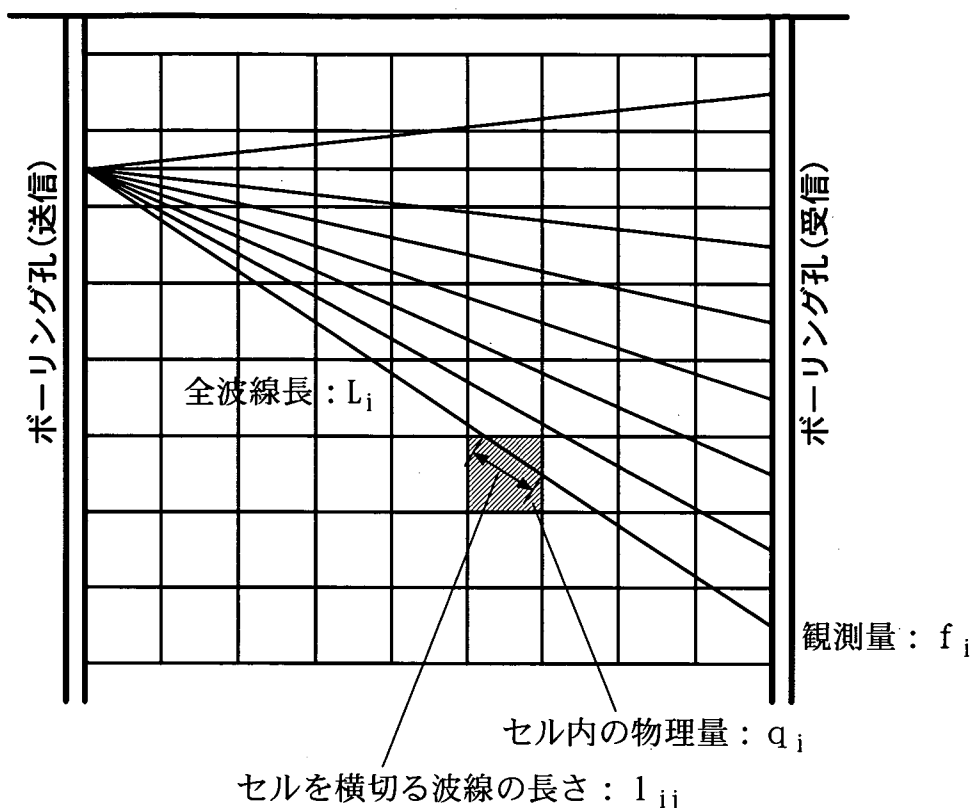


図3. 4-2 解析方法概念図

ここで、 $f_i \cdot l_{ij} / L_i$ は i 番目の観測量のうち、 j 番目のセルに振り分けられた観測量であり i 番目の波線が通過したセルについてそれぞれのセルに振り分けられた観測量の総和を求めると f_i に一致する。従って上式より BPT 法は j 番目のセルを通過する観測量総和を波線長の総和で割った値としてセル内の物理量を定義しておりセル内の平均的な物性を与えることがわかる。

(2) 同時反復法 (SIRT 法)

SIRT 法ではまずセル毎に各波線に対する観測量の理論値に対する残差をセル内の波線長に応じて振り分け、セル内に振り分けられた残差を加算してゆく。またこれと同時にセルを横切る波線長も加算してゆく。すべてのセルについて物理量の残差とセル内の波線長の加算作業を終了した段階で今度はセル毎に物理量の総残差をセル内の総波線長で割り物理量の変動量を求める。

次にセル内の物理量にこの変動量を加えて新しい物理量とし、再び同じ操作を繰り返して行く方法である。

したがって $n+1$ 回目の反復演算における j 番目のセル内の物理量 q_j^{n+1} は n 回目の物理量 q_j^n を用いて SIRT 法では次のように求める。

$$q_i^{n+1} = q_i^n + \frac{\Delta u_i}{\sum_i \ell_{ij}} \quad (3.5)$$

$$\Delta u_i = \sum_i \delta p_i^n \cdot \frac{\ell_{ij}}{\sum_i \ell_{ij}^2} \quad (3.6)$$

また、SIRT法の場合は各波線がセルの物理量に与える影響を1サイクルの反復演算が終了するまで一度蓄えておき、反復演算終了時にセル内における物理量の変動量を波線に対する平均値として求める。したがって1回の反復演算でセル内の変動は少なく、緩やかに収束する。

(3) BPT法とSIRT法の相違点

BPT法とSIRT法の相違は、BPT法では観測量と波線長から直接、物理量の平均値をセル毎に求めることに対して、SIRT法では、観測量と波線長からセル内の物理量の変動量を求めることにある。BPT法では初期モデルを計算するのみで反復演算は行わない。

(4) トモグラフィ解析パラメータ

トモグラフィ解析のパラメータを以下に示す。

- ・ 孔間方向：0.0～4.3m，4.3m区間
- ・ 水平方向：1.0～3.95m，2.95m区間
- ・ 解析セル数：孔間方向16×水平方向10セル＝160セル
- ・ セルサイズ：孔間方向0.269m，水平方向0.295m
- ・ 逐次近似回数：5回

(5) 電磁波速度

ここで結果を示す前に電磁波速度に与える誘電率と導電率の関係を整理しておく。岩盤中の誘電率、導電率及び透磁率をそれぞれ ϵ 、 σ 及び μ とし、用いる電磁波の角周波数を ω ($\omega=2\pi f$ ， f は電磁波の周波数) とすると、電磁波速度 v は次式で与えられる。

$$v = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2}} \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}\right)} + 1}} \quad (3.7)$$

上式から明らかなおりに、電磁波速度は媒質の誘電率、透磁率、導電率及び用いた電磁波の周波数の関数となる。したがって同一媒質中においても電磁波の周波数が異なれば、電磁波速度も変化し、速度式に示したとおり周波数の増加に伴い電磁波速度は対数的に速くなる。また、導電率が大きくなると電磁波速度は遅くなる。透磁率は真空中と岩盤では大きな差がないので岩盤の誘電率や用いた電磁波の周波数に対して導電率が無視できるほど小さい（非導電性媒質）場合、電磁波速度は次式で近似することができる。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.8)$$

ここで c 及び ϵ_r は光速度 ($=2.998 \times 10^8 \text{m/sec}$) 及び岩盤の比誘電率（真空の誘電率に対する媒質の誘電率の比）である。空気の場合、比誘電率はほぼ 1 と考えることができるため、空気中の電磁波速度は光の速度にほぼ等しい。

また幾つかの電氣的性質の異なる媒質から成る混合体における電磁波速度は混合体を構成する各媒質の容積比に対応して変化することが知られている。

岩盤中で亀裂が発達していて空隙が多く、かつ空隙に地中水が無い場合、岩盤中では相対的に空気層が多くなるので、本来、岩盤がもつ電磁波速度よりも速くなると考えることができる。一方、岩盤中の亀裂の発達状況が同じであっても、空隙が地中水で満たされている場合は岩盤中の電磁波速度は相対的に遅くなる。

3. 6 トモグラフィ解析結果

トレースごとの電磁波速度及び比誘電率を図3. 6-1, 図3. 7-2にそれぞれ示す。電磁波速度は、伝搬距離を伝搬時間で除して求めた。比誘電率は、(3.8)式を次式のように変形して算出した。

$$\epsilon_r = \left(\frac{C}{v}\right)^2 \quad (3.8)$$

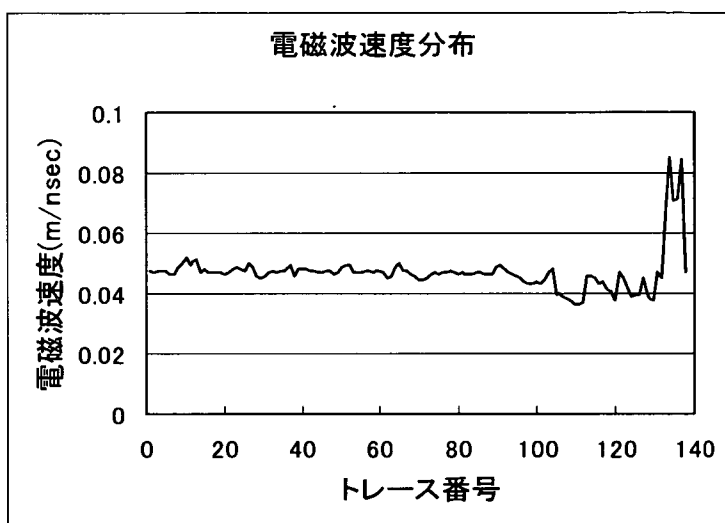


図3. 6-1 トレースごとの電磁波速度分布

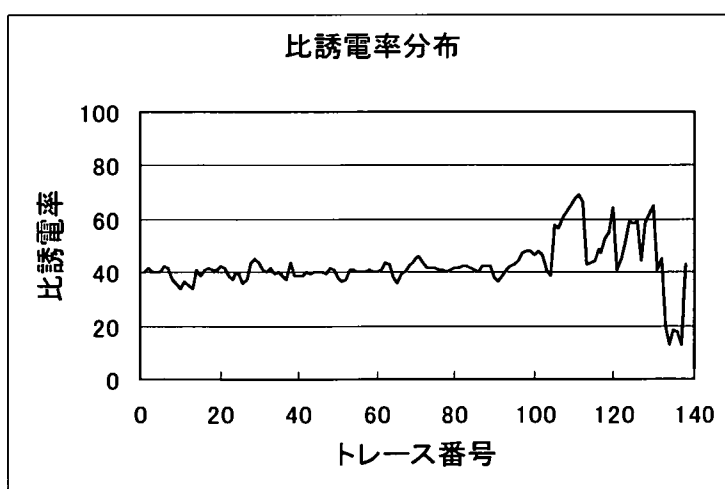


図3. 6-2 トレースごとの比誘電率分布

電磁波速度の平均値は、0.047(m/nsec)、比誘電率の平均値は42.7である。トレース番号130以降は孔壁の影響による異常な値が検出されている。トレース番号の若い方は電磁波

速度が大きく（従って比誘電率が小さく）、徐々に電磁波速度が小さく（従って比誘電率が大きく）なる傾向にある。

表3. 6-1に水平距離の同じ波線の伝搬時間、電磁波速度、比誘電率を示す。水平距離に対する電磁波速度及び比誘電率をプロットしたものを図3. 6-3と図3. 6-4にそれぞれ示す（ただし、送信距離3.90mに対する受信距離は3.95m）。

表3. 6-1 同じ水平距離の伝搬時間、電磁波速度、比誘電率

トレース番号	送信水平距離(m) O3SI-20(孔)	受信水平距離(m) O3SI-19(孔)	走時 (nsec)	電磁波速度 (m/nsec)	比誘電率
1	3.90	3.95	90.66613	0.04743	39.959
15	3.75	3.75	89.54518	0.04802	38.977
29	3.50	3.50	96.01469	0.04478	44.813
43	3.25	3.25	90.43227	0.04755	39.753
57	3.00	3.00	91.04498	0.04723	40.294
71	2.75	2.75	96.67609	0.04448	45.432
85	2.50	2.50	91.62455	0.04693	40.808
99	2.25	2.25	99.48402	0.04322	48.110
113	2.00	2.00	93.99285	0.04575	42.945
127	1.75	1.75	92.05347	0.04671	41.191
141	1.50	1.50	95.86921	0.04485	44.677
155	1.25	1.25	63.70743	0.06750	19.729
169	1.00	1.00	51.08732	0.08417	12.687

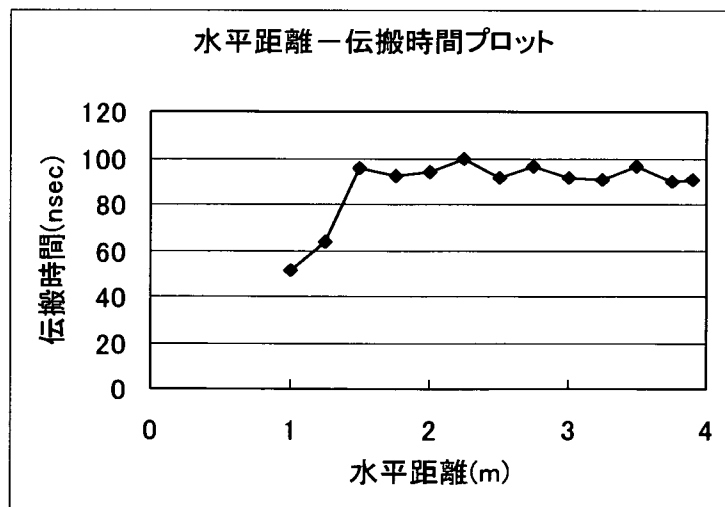


図3. 6-3 同じ水平距離の伝搬時間分布

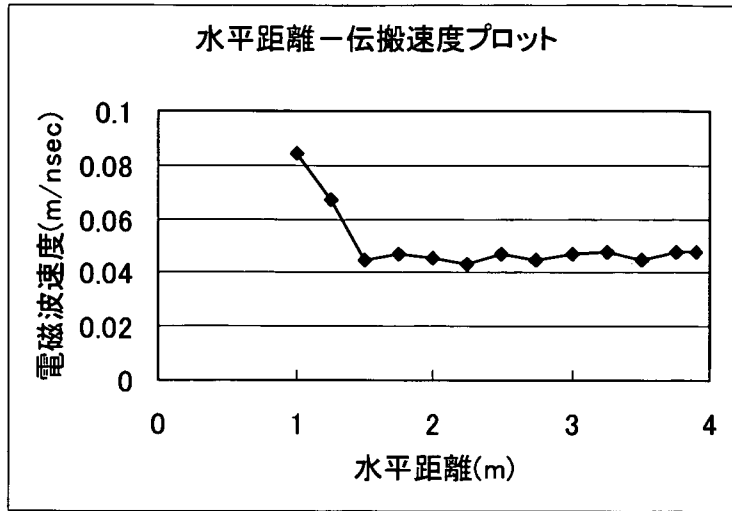


図3. 6-4 同じ水平距離の電磁波速度分布

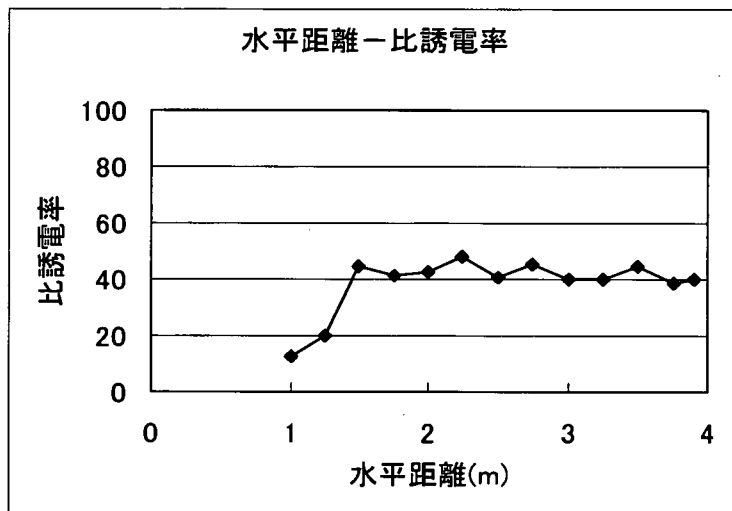


図3. 6-5 同じ水平距離の比誘電率分布

水平距離1~1.5mは孔壁表面近くの不飽和領域と考えられ電磁波速度が大きい（比誘電率が小さい）ため伝搬時間が小さくなったと考えられる。それ以降は、比誘電率40付近である。

図3. 6-6及び図3. 6-7にトモグラフィ解析による電磁波速度分布断面と比誘電率分布断面をそれぞれ示す。いずれの図も、縮尺は縦横とも1/50である。

図3. 6-8及び図3. 6-9にトモグラフィ解析による電磁波速度分布断面と比誘電率分布断面に昨年度実施した速度構造(WR4)を重ねて示した。電磁波速度0.095m/nsec（比誘電率9.9）と電磁波速度0.052m/nsec（比誘電率33.6）の境界が明瞭に現れている。

図3. 6-10及び図3. 6-11にトモグラフィ解析結果と昨年度実施した地表レーダーの断面を重ねたものをそれぞれ示す。いずれの図も、縮尺は縦横とも1/100である。電磁波速度、比誘電率とも図3. 6-6、図3. 6-7とは、昨年度実施した電磁波速度ま

たは比誘電率の値がほぼ同じになるようにカラーバーの範囲を変えている。

孔壁からの水平距離1.5m付近までは電磁波速度の大きい（比誘電率の小さい）不飽和領域が分布していると考えられ、地表レーダーの断面と調査和的である。ただし、トモグラフィ解析断面の4隅は、解析精度が低いため、整合していない部分もあると考えられる。連絡坑道側（図の左側）で電磁波速度が小さいことが地表レーダーの結果からも得られており、これについてもトモグラフィ解析結果と調和的である。

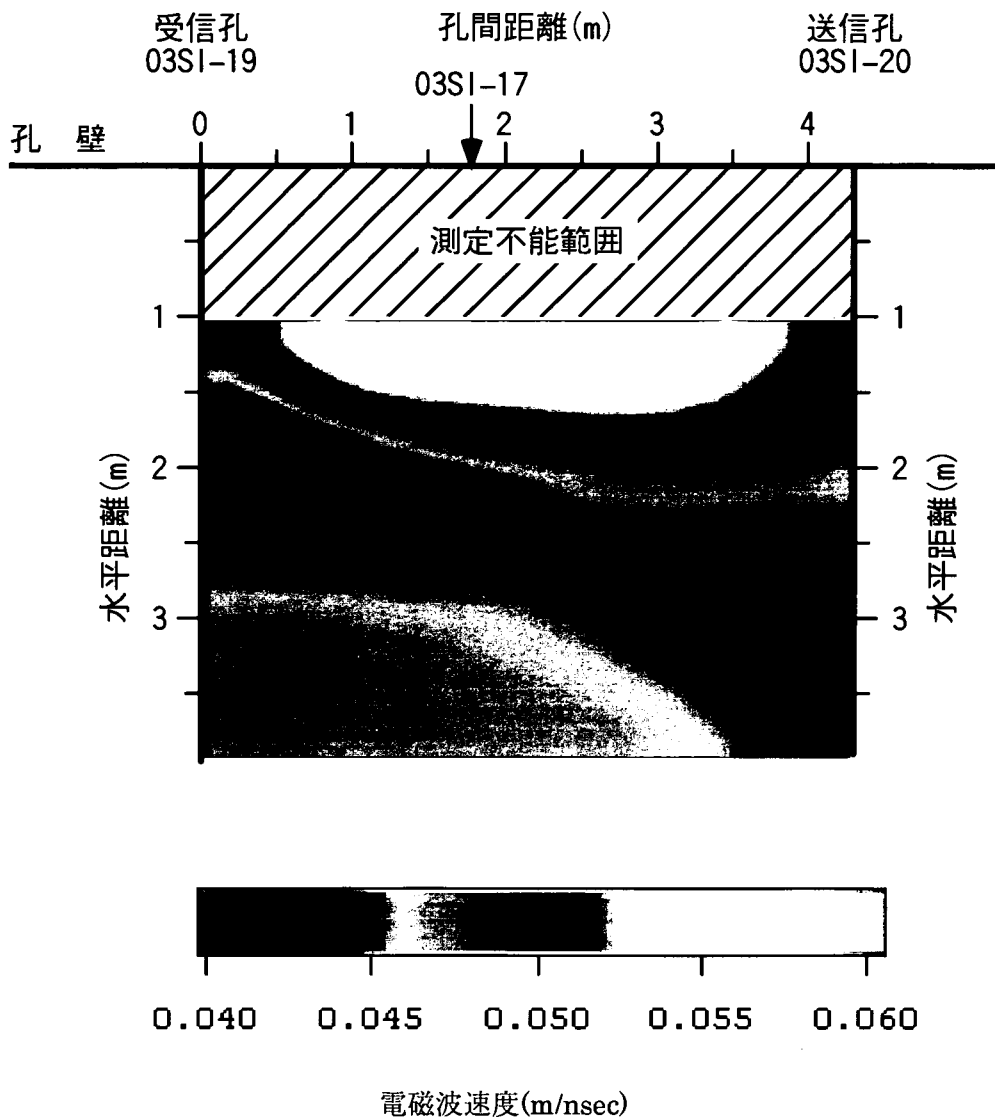


図3.6-6 電磁波速度分布図

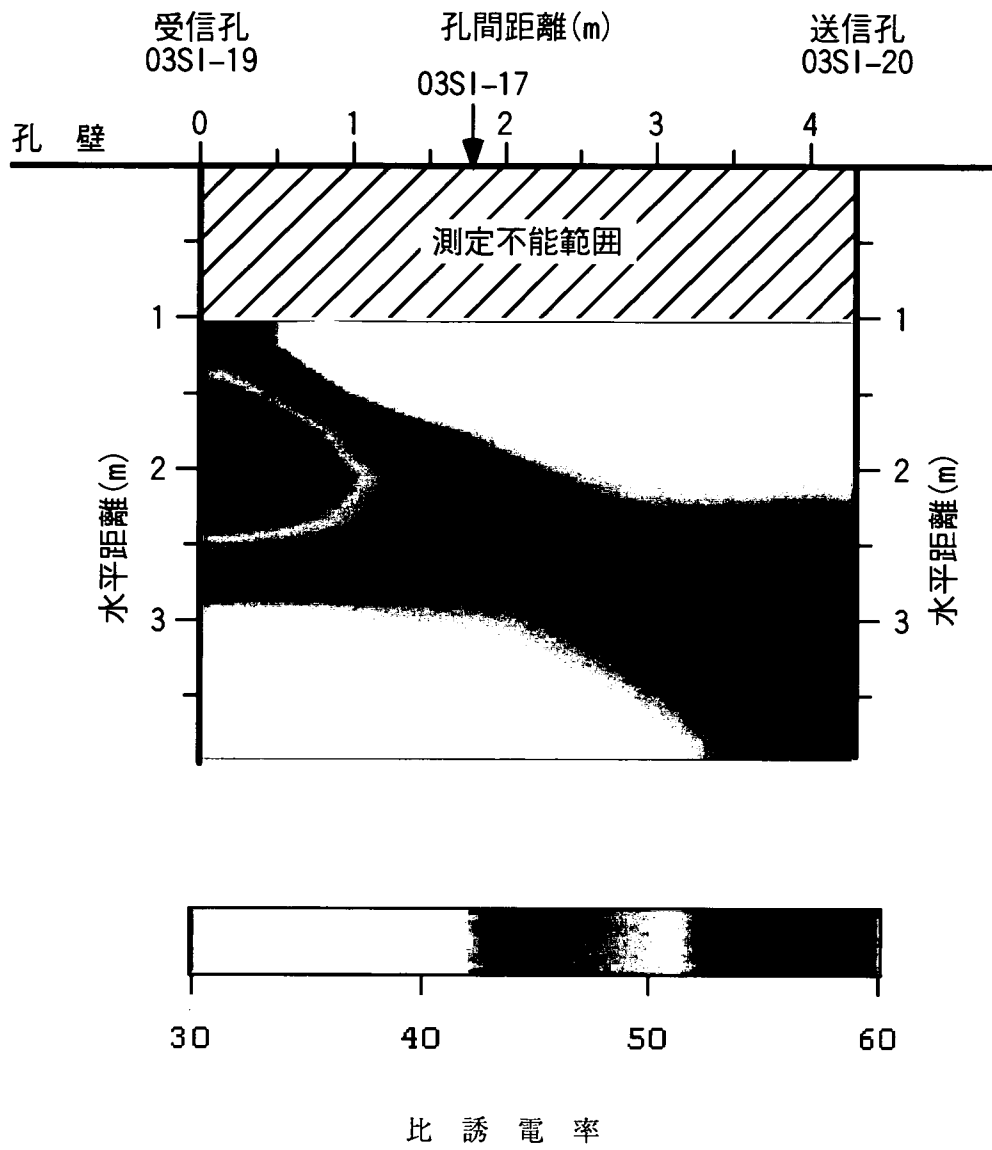


圖 3. 6-7 比誘電率分布圖

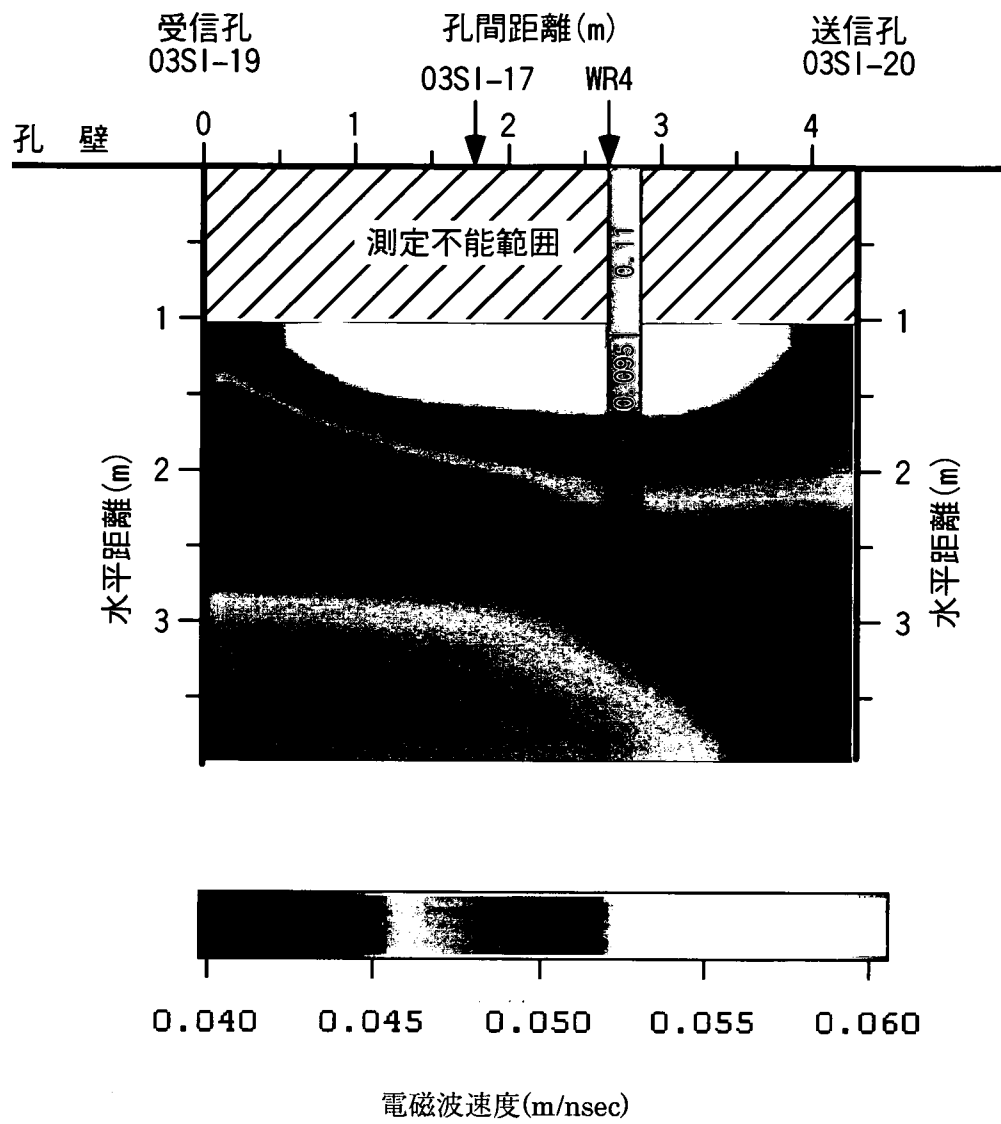


図 3. 6 - 8 電磁波速度分布図 (速度構造を加筆)

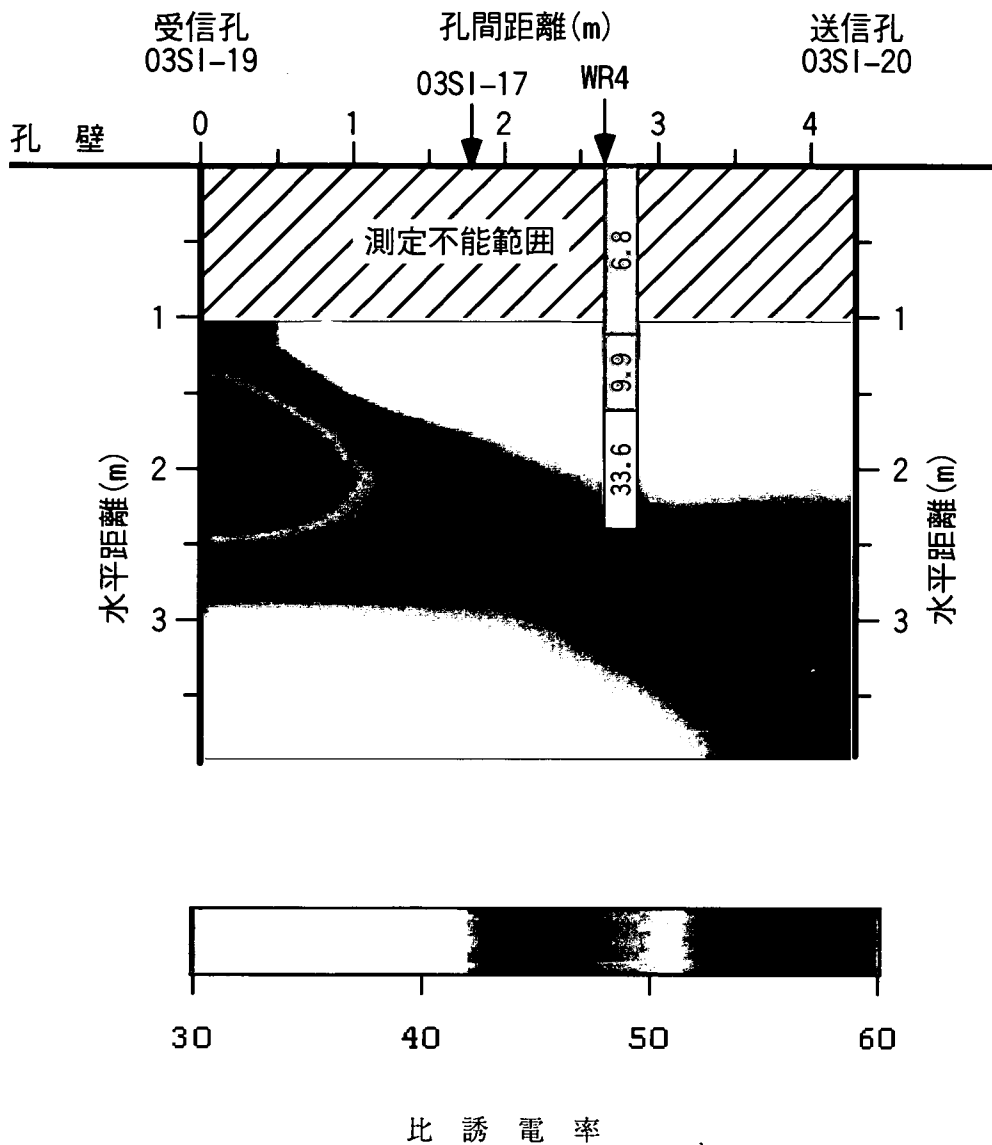


図 3. 6 - 9 比誘電率分布図 (速度構造を加筆)

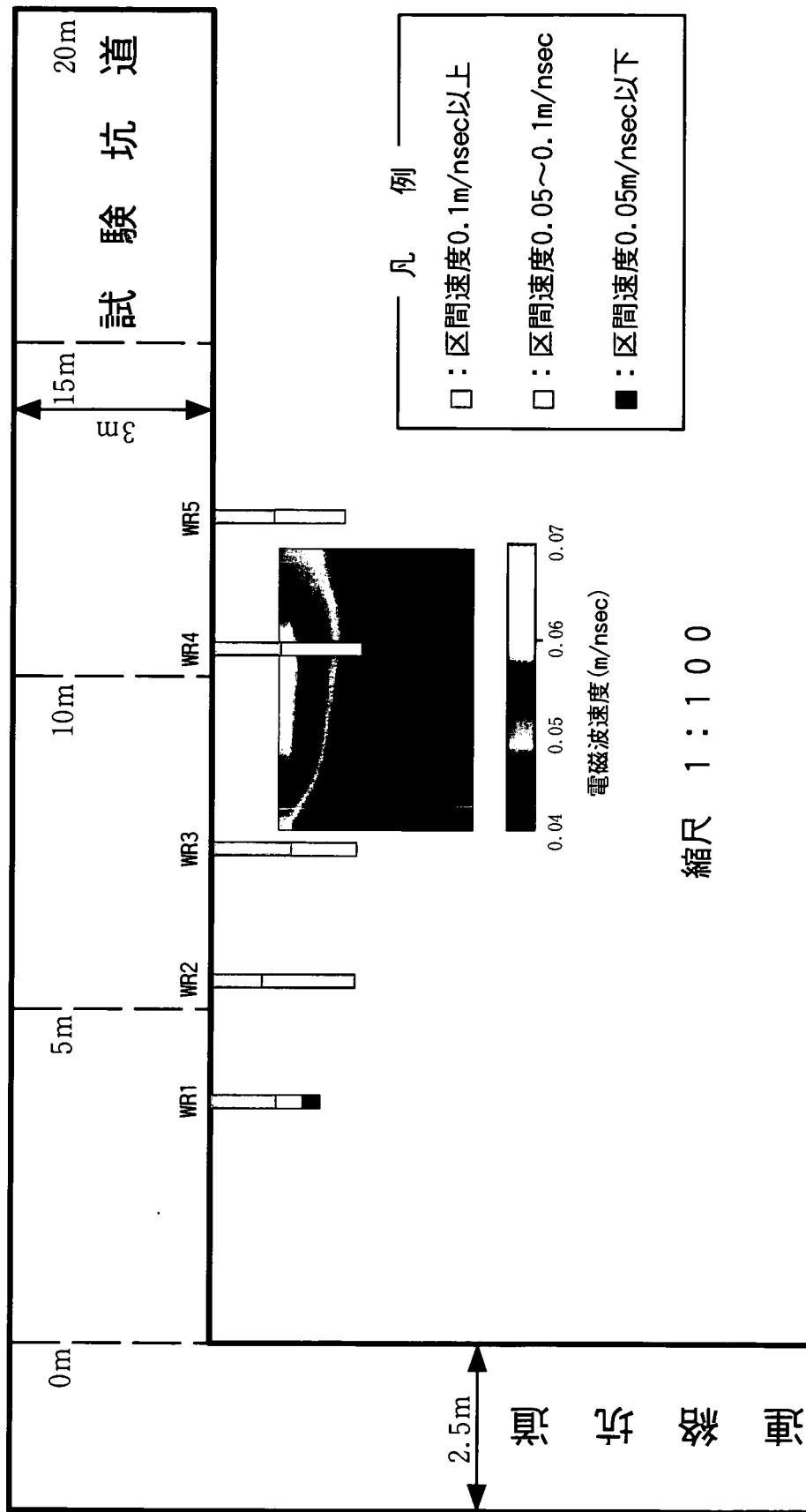


図3. 6-10 電磁波速度分布図と地表レーダーの重ね合わせ

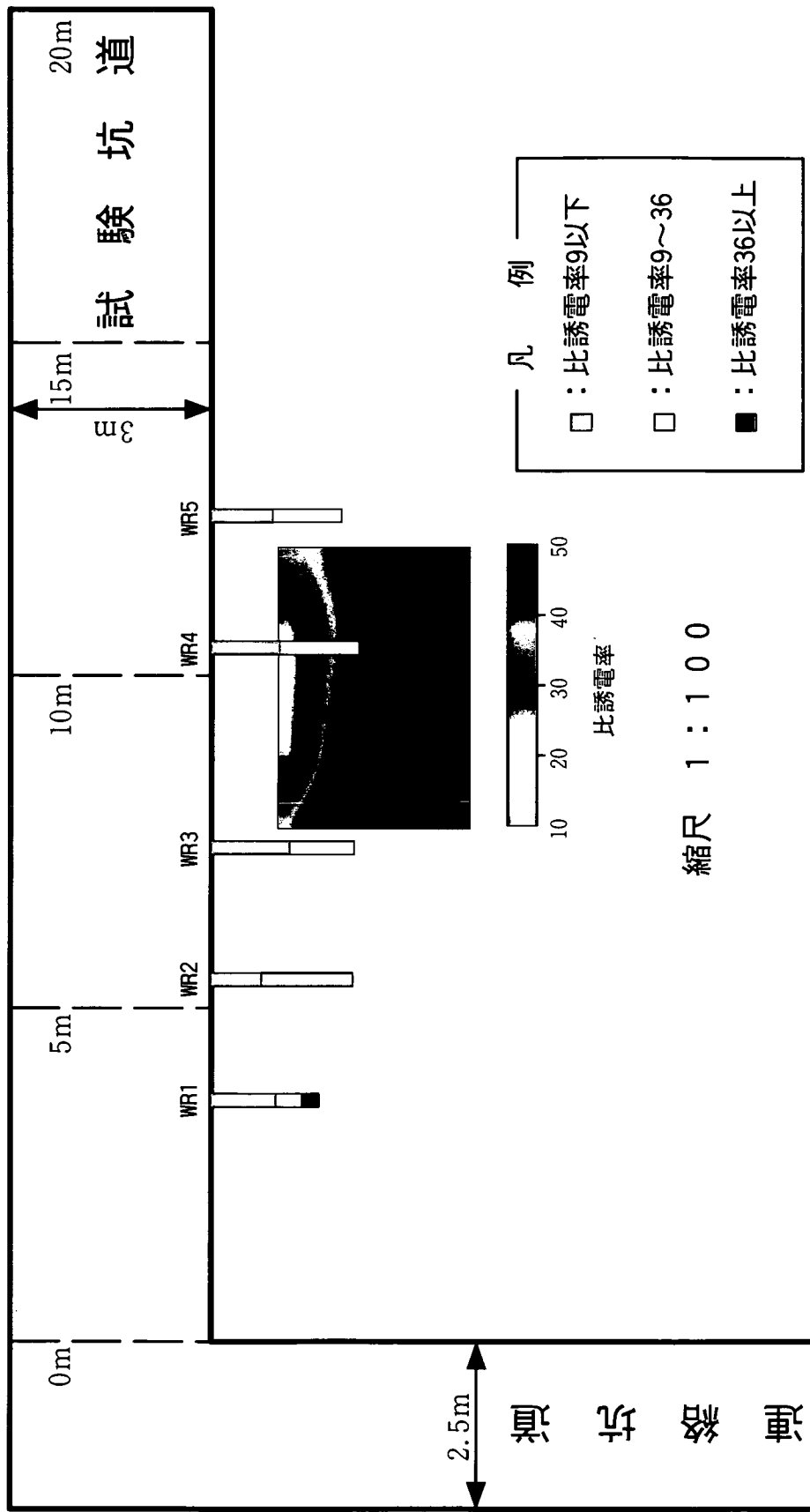


図3.6-11 比誘電率分布図と地表レーダーの重ね合わせ

3.7 注水に伴う電磁波伝搬特性変化の測定

(1) 目的

不飽和領域に水を注入すると、飽和部に比べ含水状態の変化が大きいため、注入前と比較して電磁波速度変化が大きくなると考えられる。このため、不飽和領域をより明瞭に評価できる計測手法の確立を目的として、注水に伴う電磁波速度モニタリングを実施した。

(2) 測定方法

注水に伴う電磁波伝搬特性の変化の測定するため、注水孔を 03SI-19 とし、送信アンテナを 03SI-17、受信アンテナを 03SI-20 に設置し、それぞれ孔壁から 1.5m の位置において、5 分ごとに注水開始後 100 分までのデータを取得した。その後、一晩おいて（17 時間後）再び測定を行った。なお、注水に使用したパッカーやロッドの影響を調べるためパッカー挿入とロッドの取り付け前後にも測定を行った。計測配置図および注水設備図を図 3.7-1、図 3.7-2 に示し、測定条件の一覧を表 3.7-1 に示す。

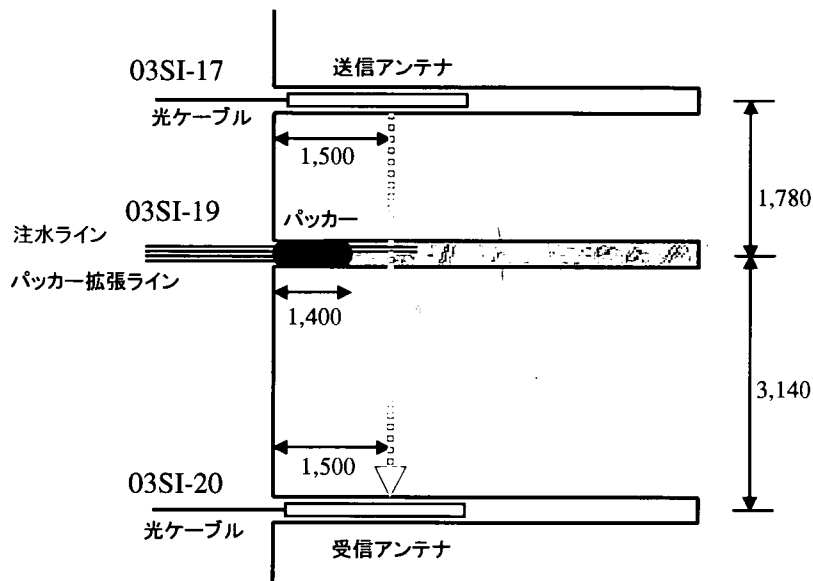


図 3.7-1 計測配置図

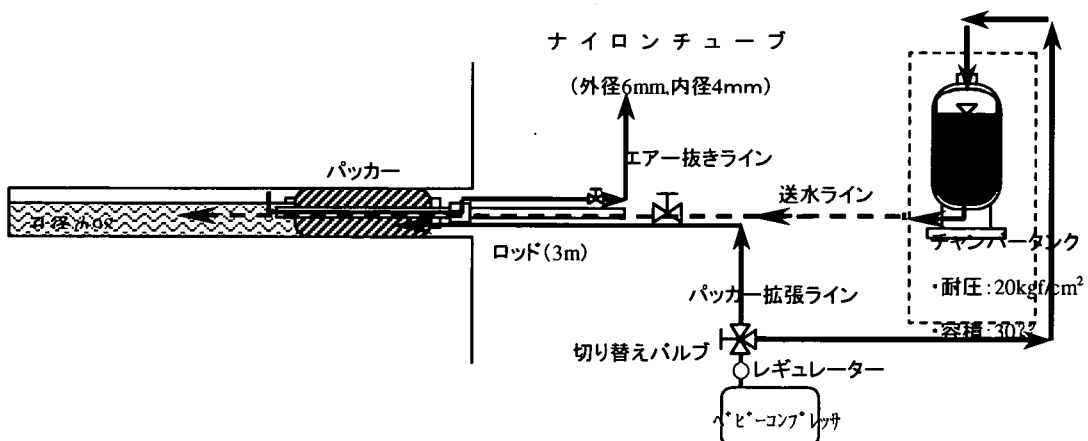


図 3.7-2 注水設備図

表 3. 7 - 1 注水試験測定条件一覧

トレース番号	測定条件	注水条件
1	注水前	
2	注水前, パッカー挿入	
3	注水前, パッカー+ロッド	注水開始(圧力はかけない)
4	注水 5 分後	
5	注水 10 分後	
6	注水 16 分後	
7	注水 20 分後	
8	注水 25 分後	
9	注水 30 分後	
10	注水 35 分後	
11	注水 40 分後	第 1 回圧入開始(0.3MPa)
12	注水 45 分後	圧入終了
13	注水 50 分後	
14	注水 55 分後	
15	注水 60 分後	第 2 回圧入開始(0.3MPa)
16	注水 65 分後	
17	注水 70 分後	圧入終了
18	注水 75 分後	
19	注水 80 分後	第 3 回圧入開始(0.3MPa)
20	注水 85 分後	
21	注水 90 分後	
22	注水 95 分後	圧入終了
23	注水 100 分後	
24	注水 17 時間後(翌日)	
25	パッカー引き抜き	

補足的な測定として注水前後で、送信アンテナを03SI-17に、受信アンテナを03SI-18に挿入し、同じ水平距離のデータを取得した（透過試験A）。測定条件の一覧を表3. 7-2に示す。

表3. 7-2 透過試験A測定条件一覧

トレース番号	送信水平距離 (m)	受信水平距離 (m)	条件
1	1.50	1.50	注水前
2	1.75	1.75	注水前
3	2.00	2.00	注水前
4	2.25	2.25	注水前
5	2.50	2.50	注水前
6	1.50	1.50	注水後 17 時間
7	1.75	1.75	注水後 17 時間
8	2.00	2.00	注水後 17 時間
9	2.25	2.25	注水後 17 時間
10	2.50	2.50	注水後 17 時間

次に注水前後で、送信アンテナと受信アンテナを異なる孔に挿入し、孔間距離の異なる、同じ水平距離のデータを取得した（透過試験B）。測定条件の一覧を表3. 7-3に示す。

表3. 7-3 透過試験B測定条件一覧

トレース番号	送信孔	受信孔	送受信 距離(m)	送信水平 距離(m)	受信水平 距離(m)	条件
1	03SI-17	03SI-19	1.78	3.00	3.00	注水前
2	03SI-17	03SI-20	2.53	3.00	3.00	注水前
3	03SI-20	03SI-19	4.31	3.00	3.00	注水前
4	03SI-17	03SI-19	1.78	3.00	3.00	注水後 17 時間
5	03SI-17	03SI-20	2.53	3.00	3.00	注水後 17 時間
6	03SI-20	03SI-19	4.31	3.00	3.00	注水後 17 時間

図3. 7-3に以上の試験の位置関係を示す。実線は、注水に伴う電磁波伝搬特性の変化試験の波線、点線は透過試験A、破線は透過試験Bの波線をそれぞれ示す。

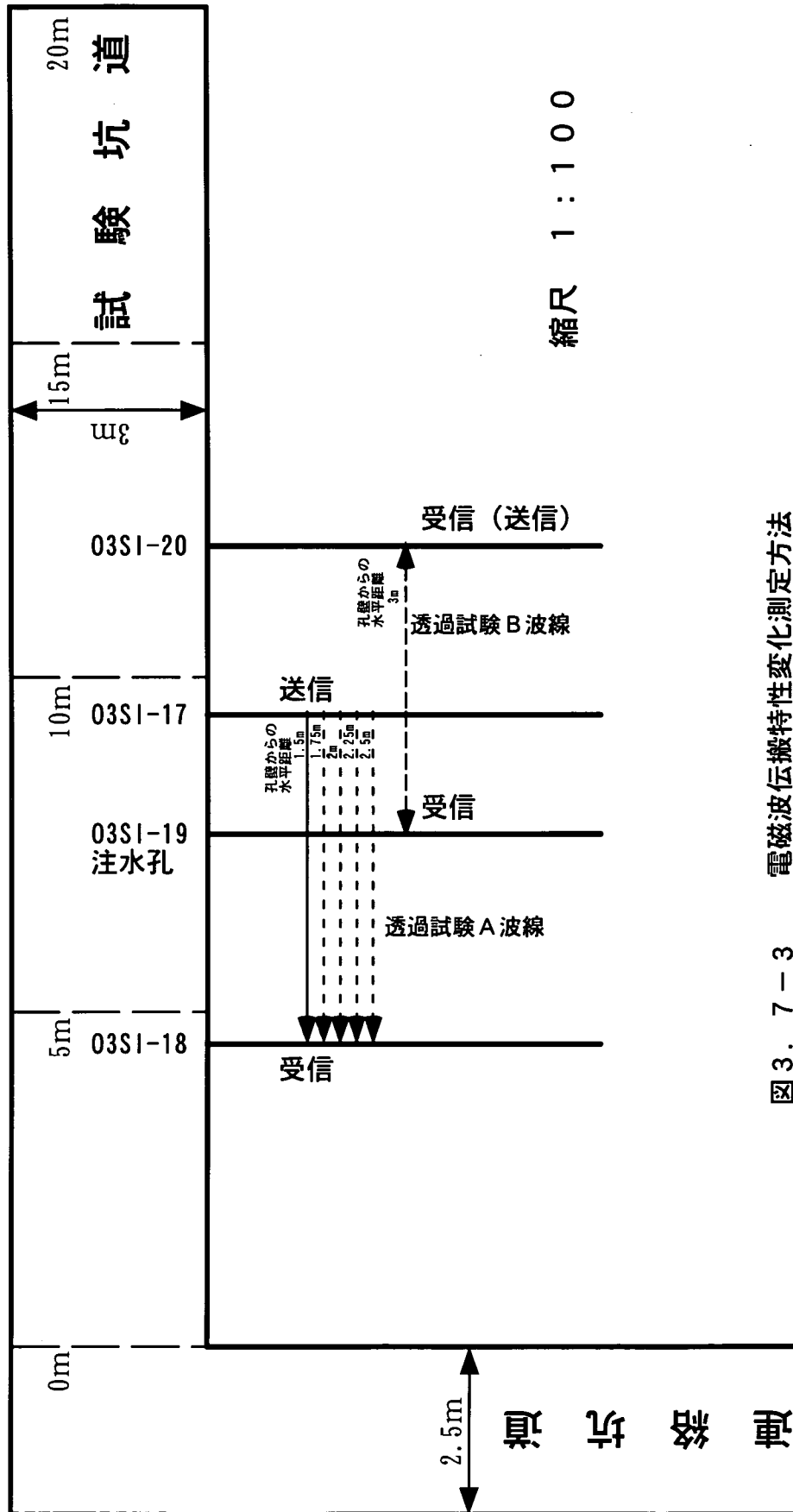


図3. 7-3 電磁波伝搬特性変化測定方法

(2) 測定結果

図3. 7-4に時間領域波形と、図3. 7-5にその包絡線波形(3. 3参照)を示す。

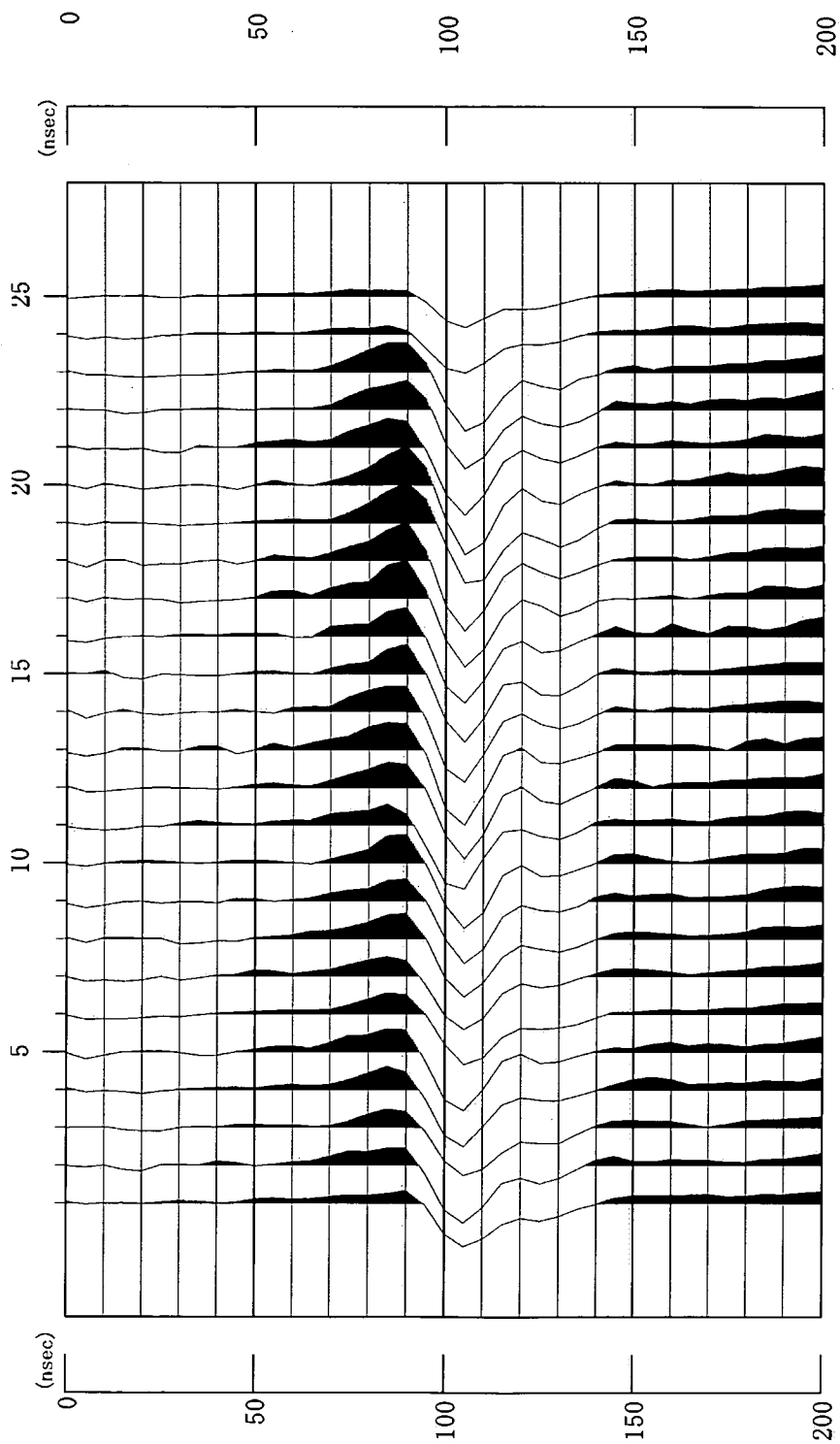


図3. 7-4 伝搬特性変化試験の時間領域波形

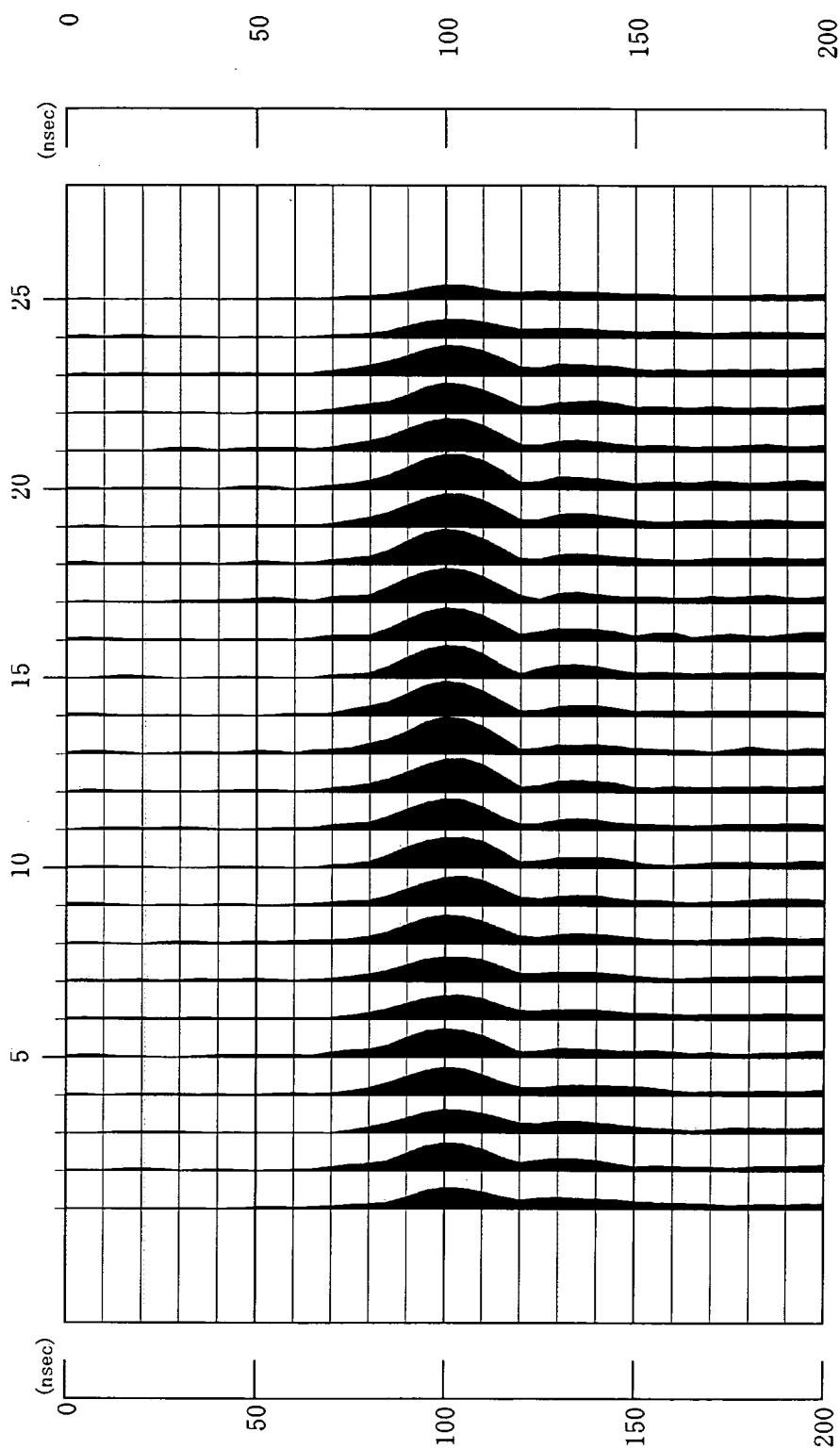


図 3. 7 - 5 伝搬特性変化試験の包絡線波形

伝搬時間の読み取りはトモグラフィ同様、(3.3)式に示す方法で行った。また、振幅値の計算を行った。周波数帯域はいずれも10~30MHzである。なお、振幅値Aは次式で求めた。

$$A = \frac{\sum \sqrt{A_{\text{Re}}(f_i)^2 + A_{\text{Im}}(f_i)^2}}{N}$$

ただし、

A : 振幅値

$A_{\text{Re}}(f_i)$: 各周波数の実数部振幅

$A_{\text{Im}}(f_i)$: 各周波数の虚数部振幅

N : 与えた周波数範囲のステップ数

表3. 7-4にそれぞれの読み取りの結果を示す。図3. 7-6に各トレースに対する伝搬時間、図3. 7-7に電磁波速度、図3. 7-8に比誘電率、図3. 7-9に振幅値をそれぞれ示す。

表3. 7-4 注水試験読み取り及び計算結果一覧

トレース番号	測定条件	伝搬時間 (nsec)	伝搬速度 (m/nsec)	比誘電率	振幅(A/D値)
1	注水前	99.4619751	0.04946614	36.73222	7079.883301
2	注水前、ハッカー挿入	99.4153366	0.049489346	36.69778	10138.96289
3	注水前、ハッカー→ロッド	100.7491074	0.04883418	37.68907	8866.514648
4	注水 5 分後	98.1491241	0.050127803	35.76893	10204.51367
5	注水 10 分後	98.6632538	0.04986659	36.14464	10561.05078
6	注水 16 分後	105.7666321	0.046517507	41.53655	9074.103516
7	注水 20 分後	105.6117096	0.046585743	41.41496	9723.866211
8	注水 25 分後	100.8593674	0.048780794	37.77161	10387.50098
9	注水 30 分後	103.4717102	0.047549229	39.75359	10581.84375
10	注水 35 分後	103.6880722	0.047450009	39.92001	11036.60352
11	注水 40 分後	101.3853607	0.048527716	38.16661	10794.28516
12	注水 45 分後	99.3119202	0.049540881	36.62147	11506.74512
13	注水 50 分後	101.8071213	0.048326678	38.48481	12539.38574
14	注水 55 分後	101.0256805	0.048700489	37.89628	11988.48438
15	注水 60 分後	100.807663	0.048805814	37.7329	10702.56934
16	注水 65 分後	99.5635147	0.049415692	36.80726	11334.20898
17	注水 70 分後	98.7739944	0.049810682	36.22583	12091.73535
18	注水 75 分後	98.4213715	0.049989143	35.96763	12421.23535
19	注水 80 分後	100.1055222	0.049148138	37.2091	12037.5791
20	注水 85 分後	98.0256653	0.050190937	35.679	12220.73438
21	注水 90 分後	101.7671204	0.048345674	38.45458	11947.45703
22	注水 95 分後	99.8733597	0.049262386	37.03671	11009.42676
23	注水 100 分後	100.0670547	0.049167031	37.18051	11737.9375
24	注水 17 時間後	102.5669556	0.047968666	39.06142	7776.027344
25	ハッカー引抜き	100.1357269	0.049133313	37.23155	5042.899414

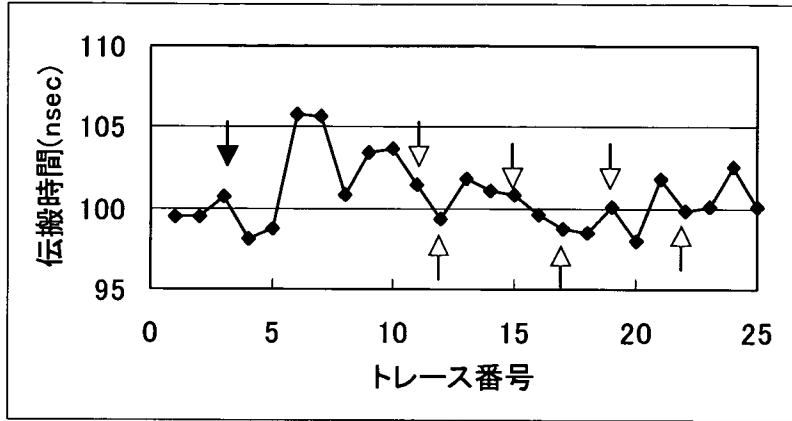


図 3. 7-6 各トレースの伝搬時間

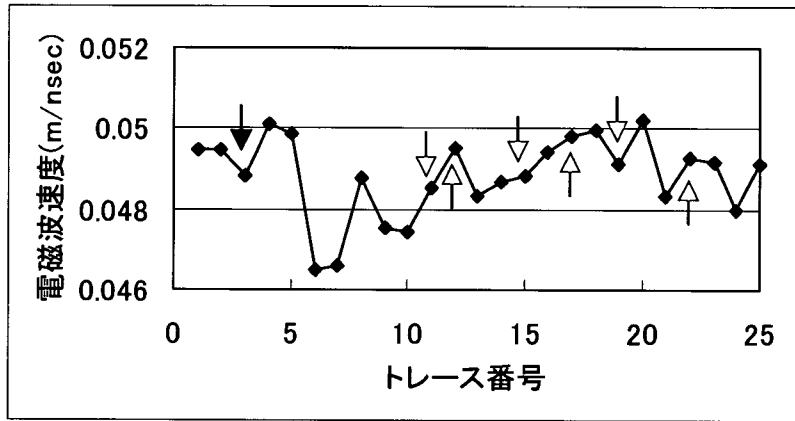


図 3. 7-7 各トレースの電磁波速度

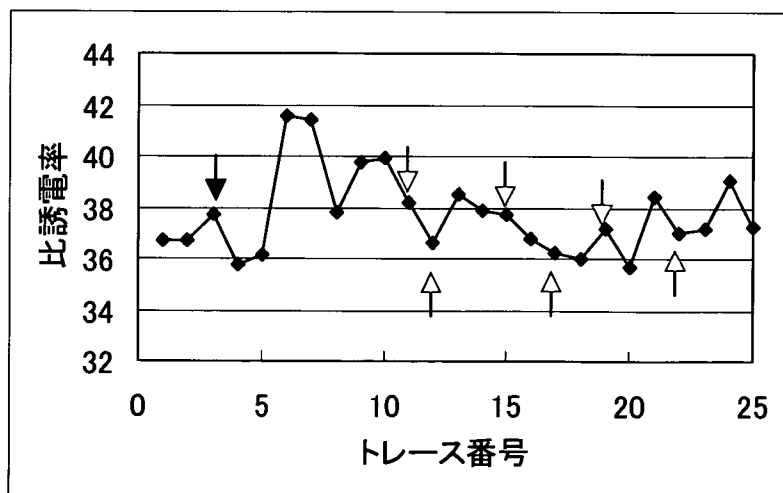


図 3. 7-8 各トレースの比誘電率

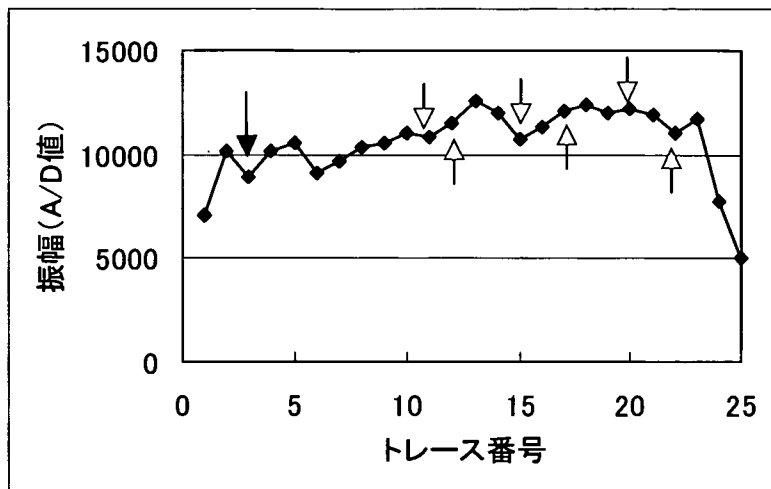


図3. 7-9 各トレースの振幅値

各図中の↓は注入開始，↓は圧入開始，↑は圧入終了を示す。

注入開始16分後の伝搬時間の増加（電磁波速度の低下，比誘電率の増加）が著しい。圧入時には，伝搬時間は減少（電磁波速度の増加，比誘電率の低下）が見られる。圧入と同時に電磁波速度が変化しないのは，岩盤中に圧入水が浸透するのにある程度の時間が必要なためと考えられる。

振幅は徐々に大きくなる傾向にあるが，注入・圧入時には若干の振幅の低下が見られる。17時間後（24トレース）には振幅が大幅に低下している。図3. 7-10に振幅スペクトル（11，22，24トレース）を示す。明らかに注入開始後に振幅が増加し，17時間後に低下していることが認められる。

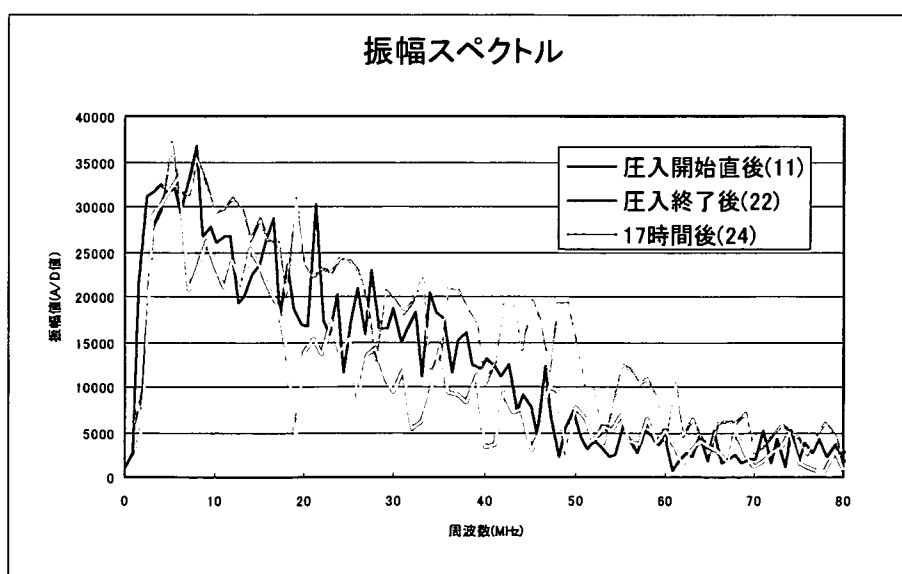


図3. 7-10 伝搬特性変化試験の振幅スペクトル

注水を行うと始めに孔壁周辺が湿潤するが、次第に拡散し、再び注水することにより孔壁周辺が湿潤する。このようなサイクルを反映しているのが伝搬時間（電磁波速度あるいは比誘電率）である。振幅値は、始めに孔壁周辺が湿潤したときにアンテナと岩盤とのインピーダンス整合が向上し、見掛けの振幅が増加したように見えるが、一晩置いて十分に水が拡散した後は、断面の平均的な導電率が上昇するために振幅が減少したものと考えられる。

従って、時間のずれはあるものの短い時間の変化を捉えるには伝搬時間（電磁波速度あるいは比誘電率）が適しており、長い時間の変化を捉えるには振幅値（減衰率）の方が適している可能性がある。

図3.7-11に透過試験Aの時間領域波形と、図3.7-12にその包絡線波形（3.3参照）を示す。伝搬時間、電磁波速度、比誘電率の読み取り及び計算結果を表3.7-5に示す。伝搬時間の読み取り及び振幅の計算は前述の通りである。図3.7-13に各トレースに対する伝搬時間、図3.7-14に電磁波速度、図3.7-15に比誘電率、図3.7-16に振幅値をそれぞれ示す。注水の前後で、伝搬時間が増加（電磁波速度が低下、あるいは比誘電率が増加）していることが確認できる。特に孔壁からの水平距離2.25mの変化が著しく、この付近にみずみちが存在する可能性がある。振幅についても同様であるが、孔壁からの水平距離2mのデータのみ傾向が異なる。

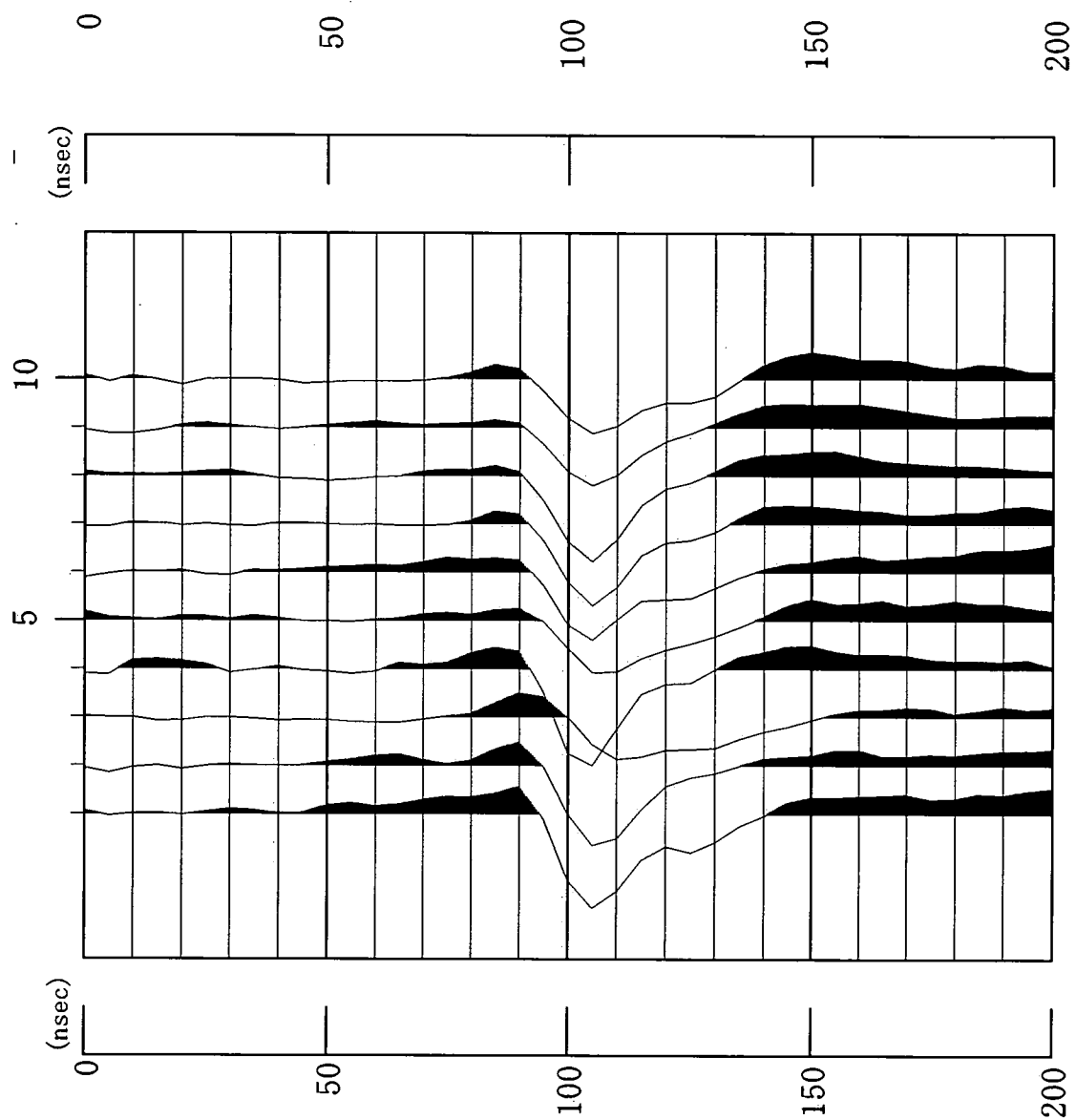


図 3. 7 - 1 1 透過試験 A の時間領域波形

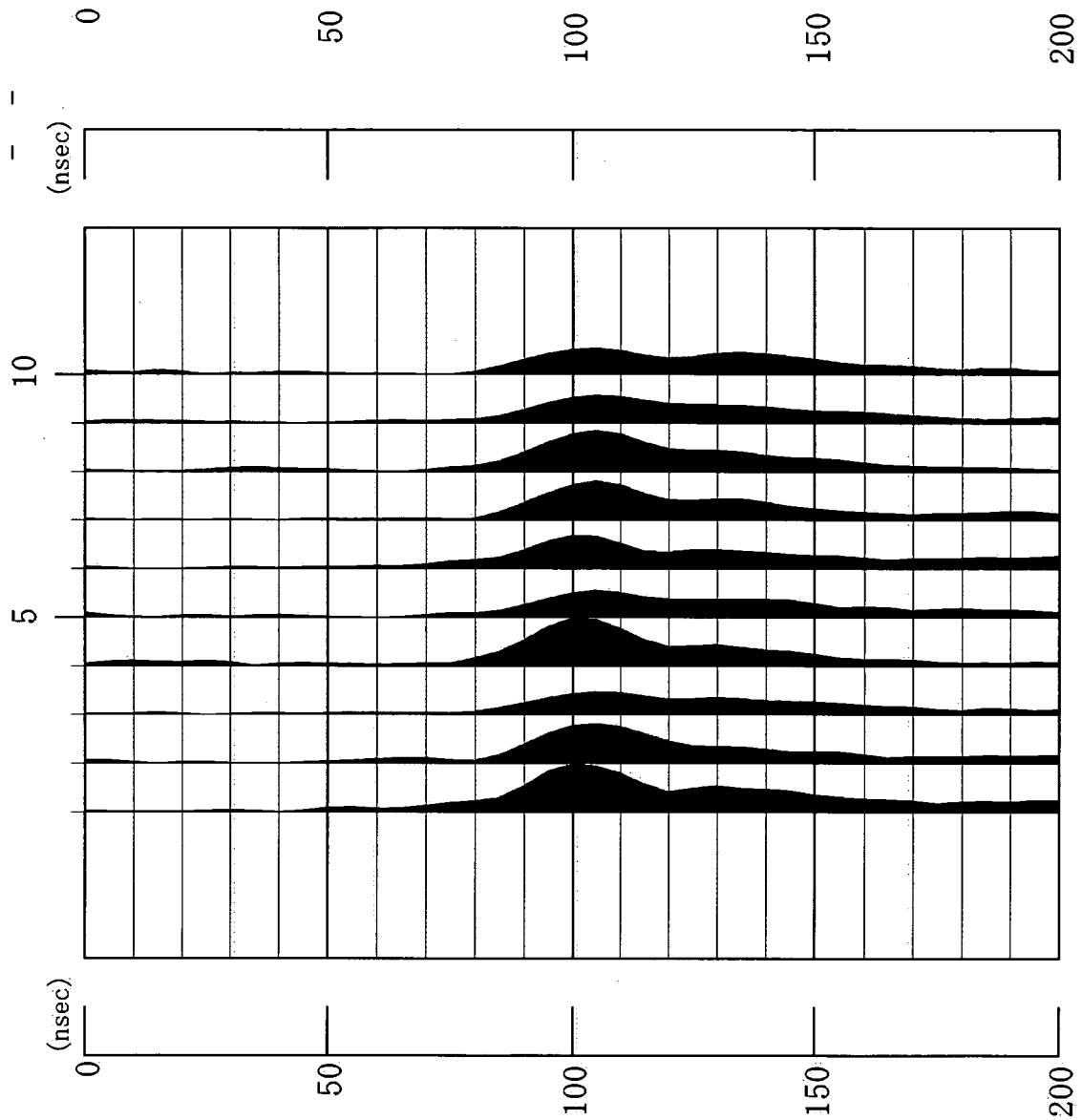


図3. 7-12 透過試験Aの包絡線波形

表3. 7-5 透過試験A読み取り及び計算結果一覧

孔壁 からの 距離(m)	伝搬時間(nsec)		電磁波速度(m/nsec)		比誘電率		振幅(A/D値)	
	注水前	注水後	注水前	注水後	注水前	注水後	注水前	注水後
1.5	100.7491	102.567	0.048834	0.047969	37.68907	39.06142	8866.515	7776.027
1.75	104.3097	107.7212	0.047167	0.045673	40.40006	43.0859	7381.713	7211.016
2	106.1724	106.8372	0.04634	0.046051	41.85584	42.38166	5417.406	8197.357
2.25	98.58044	106.4444	0.049908	0.046221	36.08399	42.07058	7867.795	6494.175
2.5	106.6365	106.7235	0.046138	0.0461	42.22255	42.29151	6679.918	1346.773

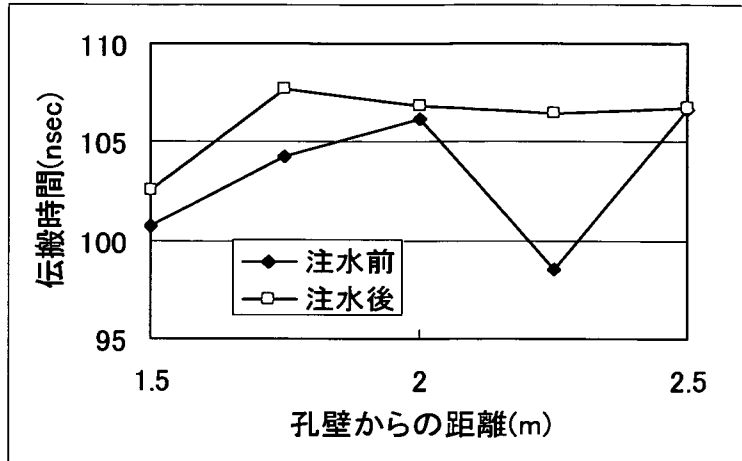


図 3. 7-1 3 透過試験 A 注水前後の伝搬時間

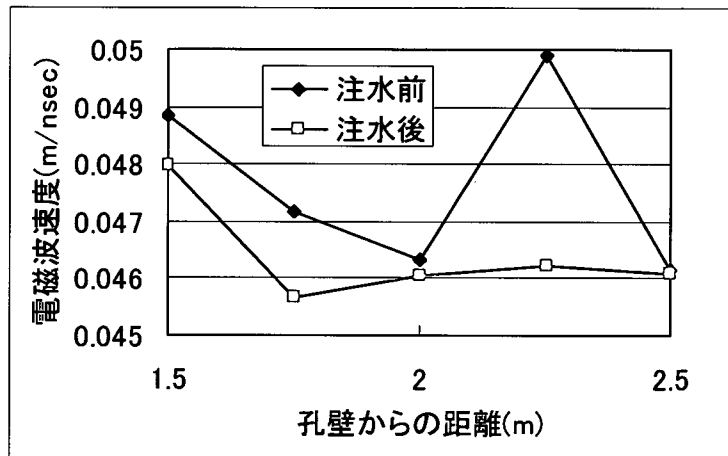


図 3. 7-1 4 透過試験 A 注水前後の電磁波速度

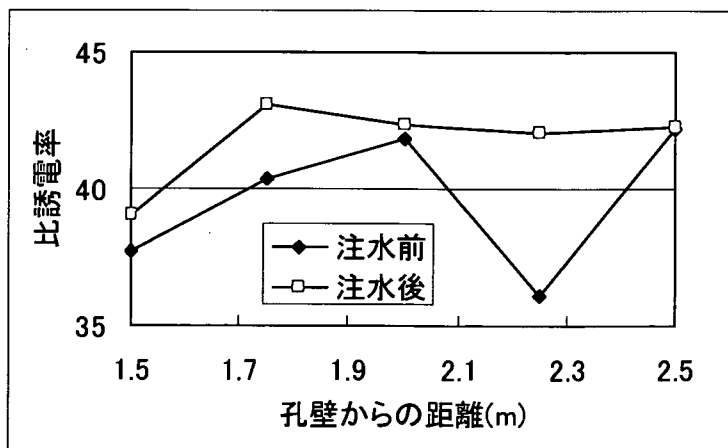


図 3. 7-1 5 透過試験 A 注水前後の比誘電率

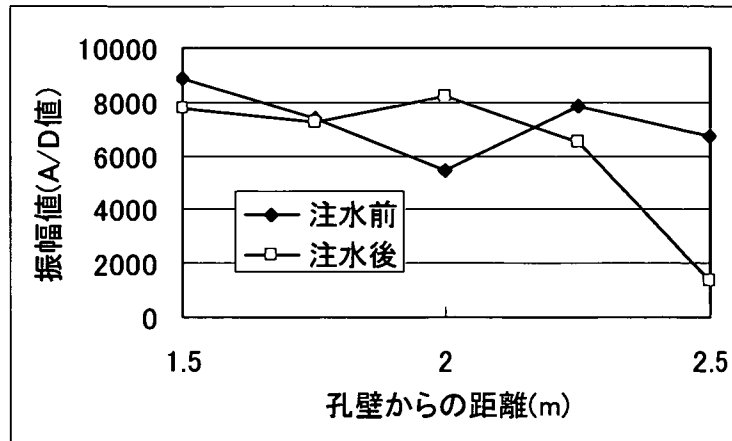


図 3. 7-16 透過試験A注水前後の振幅値

透過試験Bの伝搬時間、電磁波速度、比誘電率の読み取り及び計算結果を表3. 7-6に示す。伝搬時間の読み取りは前述のとおりである。なお、伝搬距離4.92mのデータは、十分な振幅が得られなかったため、伝搬時間を正確に読み取ることができなかった。図3. 7-17に時間領域波形と、図3. 7-18にその包絡線波形(3. 3参照)を示す。図3. 7-19に各トレースに対する伝搬時間、図3. 7-20に電磁波速度、図3. 7-21に比誘電率をそれぞれ示す。

注水の前後(17時間後)で、伝搬時間が増加(電磁波速度が低下、あるいは比誘電率が増加)していることが確認できる。

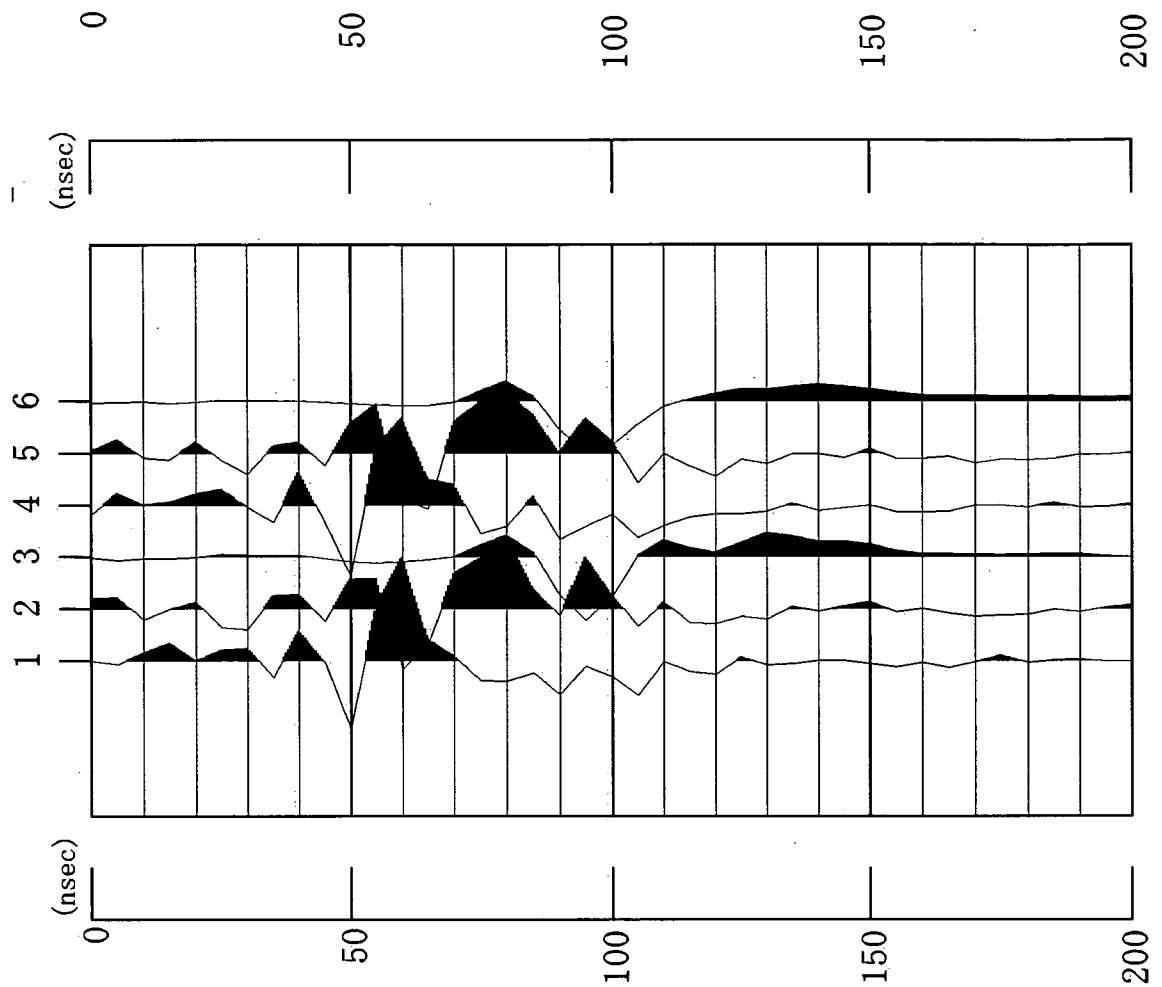


図 3. 7 - 1 7 透過試験 B の時間領域波形

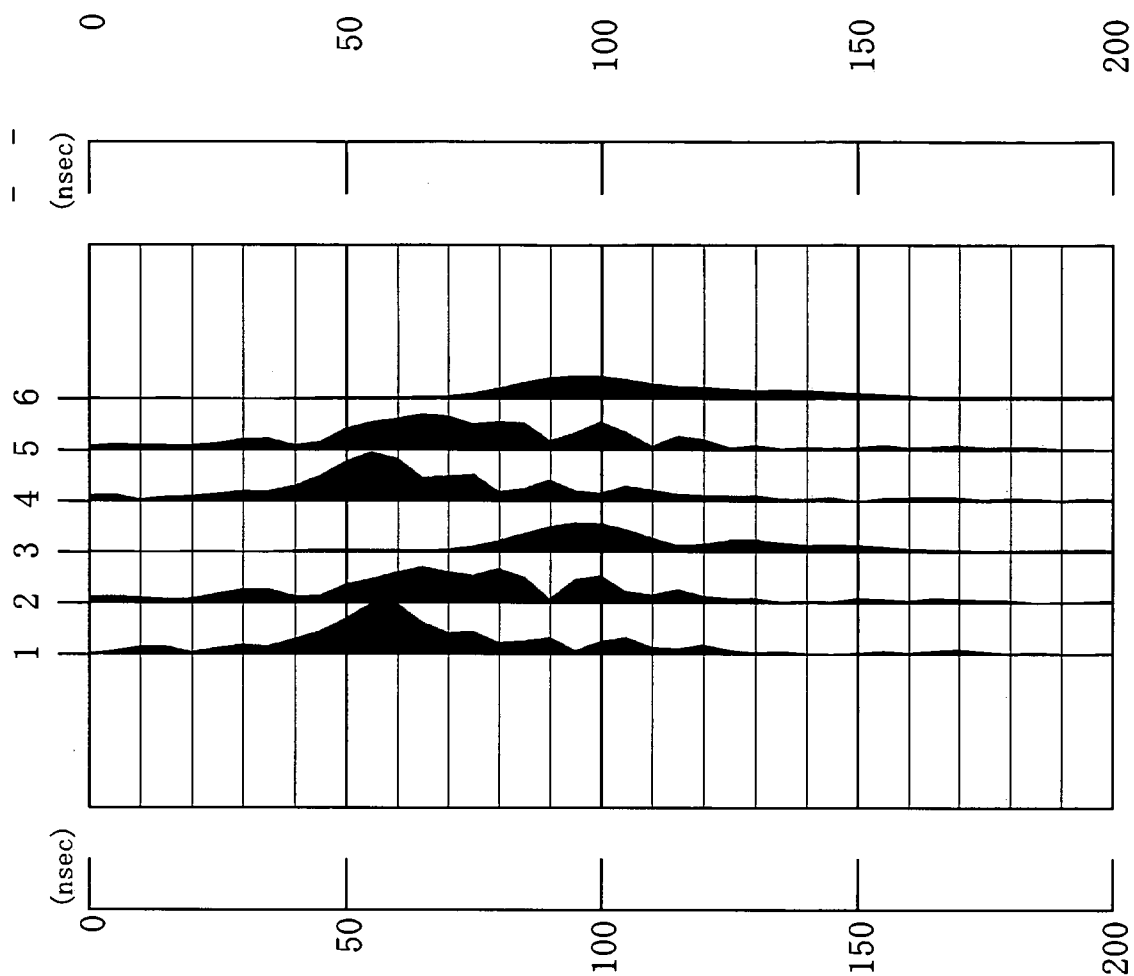


図3. 7-18 透過試験Bの包絡線波形

表3. 7-6 透過試験B読み取り及び計算結果一覧

トレース 番号	送受信 水平距離(m)	伝搬距離(m)	伝搬時間(nsec)	伝搬速度(m/nsec)	比誘電率
1	3.00	1.78	52.922	0.03363	79.44922
2	3.00	2.53	65.123	0.03885	59.55179
3	3.00	4.31	91.045	0.04734	40.10705
4	3.00	1.78	54.827	0.03247	85.27307
5	3.00	2.53	66.319	0.03815	61.75953
6	3.00	4.31	93.874	0.04591	42.63858

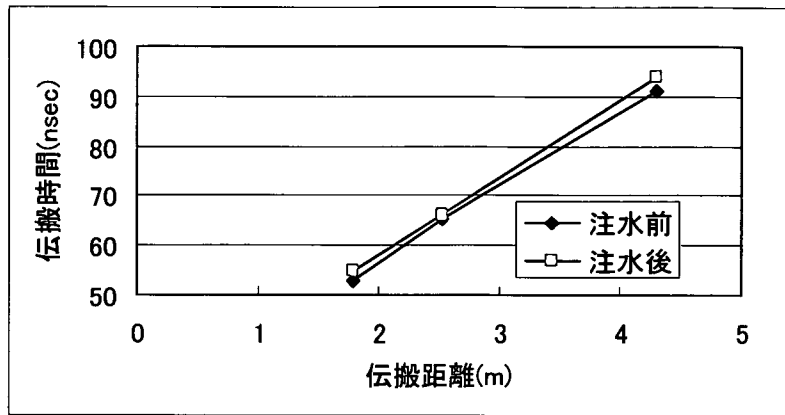


図 3. 7 - 1 9 透過試験 B 注水前後の伝搬時間

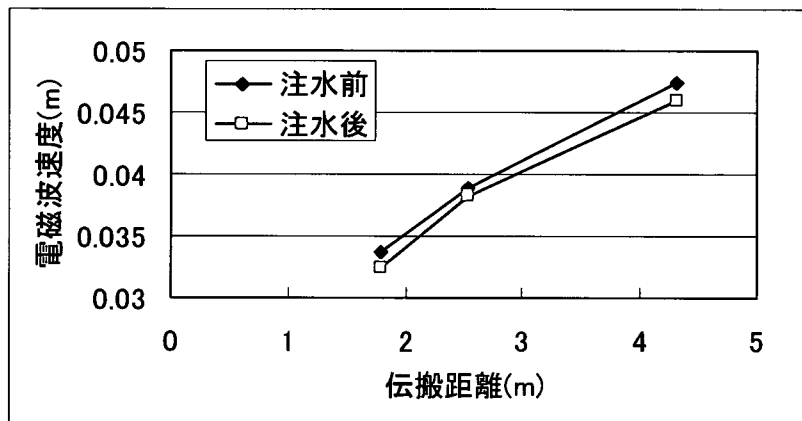


図 3. 7 - 2 0 透過試験 B 注水前後の電磁波速度

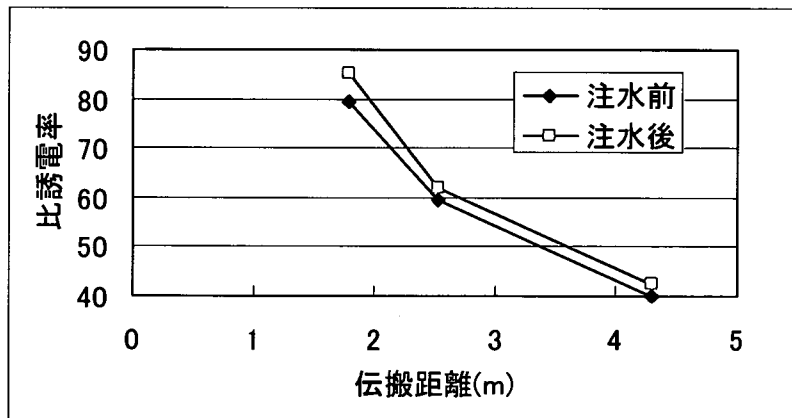


図 3. 7 - 2 1 透過試験 B 注水前後の比誘電率

4. NATM 坑道における坑道壁面近傍の間隙水圧計測

4. 1 まえがき

本件は、東濃鉱山において坑道周辺に生じる不飽和領域を把握することを目的に、坑道壁面近傍の間隙水圧測定を実施したものである。

4. 2 機器仕様

今回の間隙水圧測定は、下表4. 2-1に示す計器・機器類を使用して行った。

表4. 2-1 使用機材内訳

番号	項目	仕様・備考	数量	単位
1.	PCカード型データ収集システム	キーエンス製 NR-1000, 1010 (増設) 16bit×32ch	1	式
2.	パーソナルコンピュータ	DELL 製 Inspiron8200 CPU: 1.7GHz, メモリ: 256MB, HDD: 30GB, CD-R/RWドライブ OS: WindowsXP Professional,	1	台
3.	データ解析用ソフト	HydroSOLVE, Inc. 製 AQTESOLV PRO	1	式
4.	圧力計	大倉製 PT7011A21G10 ゲージ圧タイプ FS: 1MPa 精度: 0.1% (1kPa)	6	台
5.	大気圧計	ヴァイサラ製 PTB210 精度±0.30hPa (0.03kPa) (環境温度20℃)	1	台
6.	気温計	ヴァイサラ製 HMP45A 精度±1% (環境温度20℃)	1	台
7.	その他	SUS配管, ケーブル類 試験孔から5mの位置に装置を設置し試験 を実施するのに必要な資機材	1	式
8.	パッカーシステム	SOLEXPARTS製 6連パッカー 孔径φ66mm対応 (外径φ62mm) 許容拡張圧10MPa (孔径φ66mm時)	1	台

4. 3 設置方法

(1) 調査孔の地質状況とシステムの概要

調査対象は、NATM 坑道壁面の 03SI-18 孔（孔径 $\phi 66\text{mm}$ ，孔長 6.1m）である。NATM 坑道周辺の岩盤は新第三紀の瑞浪層群が分布し，試験孔は粗粒～細粒砂岩の互層である。概して 2.5mabH より坑道側は粗粒砂岩，孔奥側は細粒砂岩が卓越している。

測定区間の水圧は，パッカー内部の配管を通じて圧力計で検知する。圧力計の信号はデータ収集システムを介してコンピュータに保存される。

なお，今回，間隙水圧計測に用いた圧力計はゲージ圧タイプで，圧力感知するダイヤフラムの反対側が大気圧に開放されたものであり，計測値は大気圧からの差圧となる。間隙水圧の絶対圧は，別途大気圧計で測定した坑道内の大気圧を加算することにより求めた（絶対圧：真空でゼロ）。

システム全体の設置概念図を図 4. 3-1 に示す。

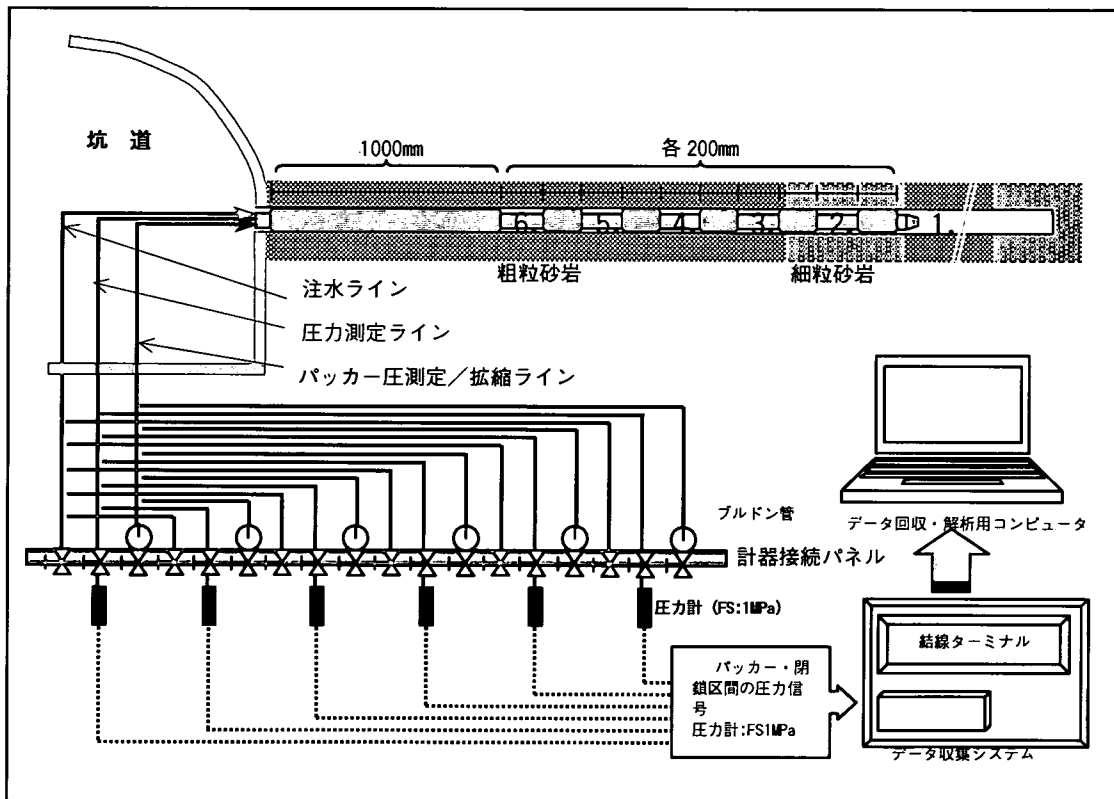


図 4. 3-1 システム全体の設置概念図（各区間は奥より P1, P2……P6 と称する）

(2) パッカーの設置

①パッカーシステムの構成

孔内のパッカーシステムは、図4. 3-2に示すように6連パッカーで構成されている。内訳は1000mm長のパッカーを孔口側とし、200mm長の5連パッカーが連なる。従って、測定区間は最大6区間の形成が可能である。区間長はP2～P6が200mmで固定されるが、シングルパッカーとなるP1は孔端までとなり、試験孔長に制約される。

各々のパッカーシステム内部には、試験区間への送水/圧力検知およびパッカー拡張用の3本の導水用内部配管（ステンレス製）を有する。

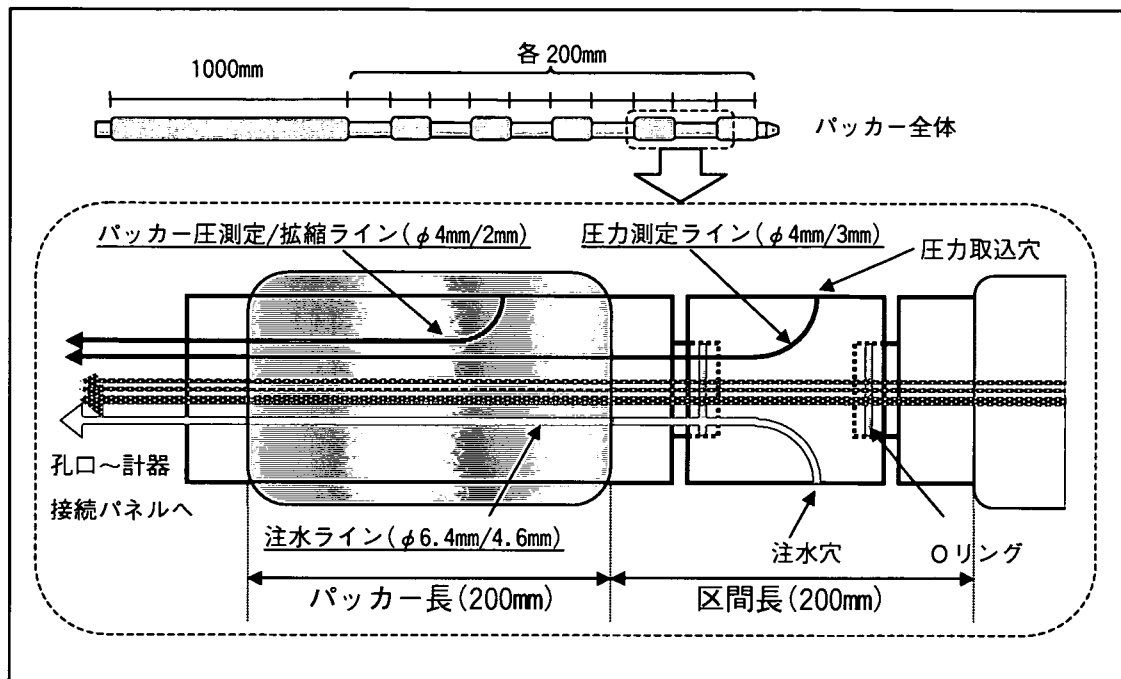


図4. 3-2 パッカーシステムの内部配管構造（1区間分）

②パッカーシステムの設置

パッカーシステムの全長は3134mmであり、さらに内部配管が突出する部分を含めると4.5m程度になる。坑道の幅は約3mであるので、内部配管/パッカーを分割して搬入を行った。パッカーの孔内挿入は、パッカー挿入～内部配管接続（ユニオン）を順次繰り返して行った。

測定区間は、表4. 3-1のようになる。また、測定区間と地質を対応させた模式図を図4. 3-3示す。概して、P1, P2は細粒砂岩が、P3～P6は粗粒砂岩が優勢である。

表 4. 3-1 測定区間一覧 (mabh は掘進長)

区間	測定区間 (mabh)	測定区間長 (m)	パッカー位置 (mabh)	備考
P1	3.1~6.1	3.0	2.9~3.1	シルト~細粒分優勢
P2	2.7~2.9	0.2	2.5~2.7	シルト~細粒砂岩
P3	2.3~2.5	0.2	2.1~2.3	粗粒砂岩
P4	1.9~2.1	0.2	1.7~1.9	粗粒砂岩
P5	1.5~1.7	0.2	1.3~1.5	粗粒分優勢? (コアス)
P6	1.1~1.3	0.2	0.1~1.1	粗粒分優勢? (コアス)

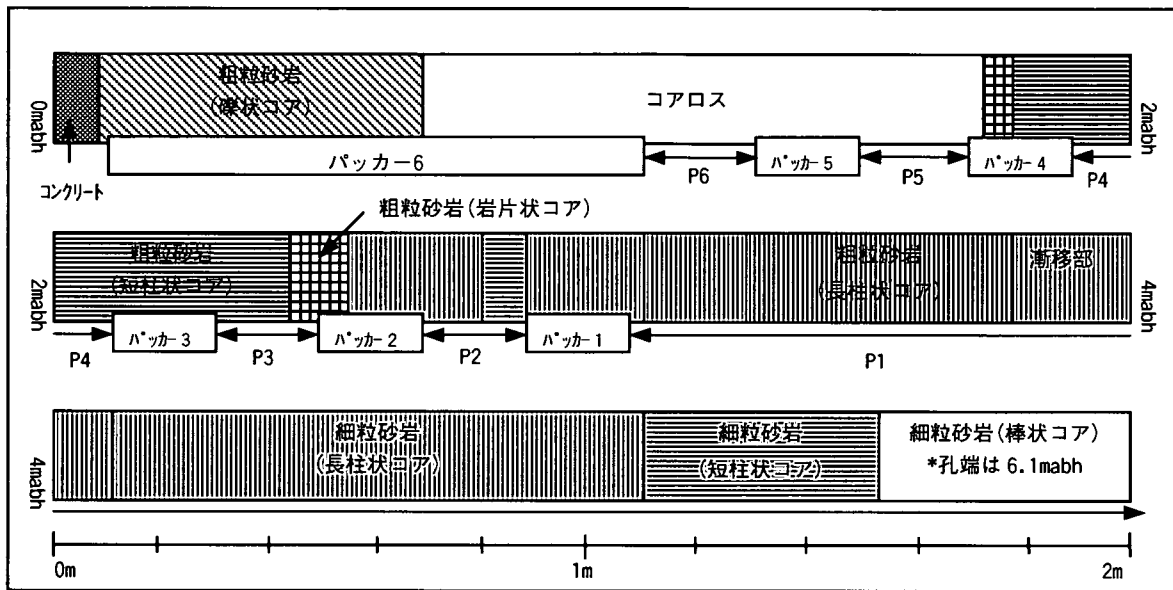


図 4. 3-3 試験位置と地質状況

③地上部配管の組み立て

パッカー挿入後、パッカー内部配管をステンレスパイプで計器接続パネルへ接続した。パッカー、圧力計測ラインはパネルのストップバルブを介して、それぞれパッカー用ゲージ、圧力計に通ずる。送水ラインはパイプ径がやや太く屈曲加工が容易でないので、パッカーの配管突出部にパネルから外したストップバルブを直接接続した。

④パッカーの拡張と区間のエア抜き

全ての配管を接続した後、パッカーの拡張を行った。パッカーはハンドポンプを用いた水圧拡張とし、拡張圧は予想される間隙水圧や孔壁の岩盤状態等を考慮して当初は約 0.6MPa とした。

孔内は目視確認できるような湧水が認められなかったため、水圧測定を実施するにはパッカー拡張後に各測定区間に送水して飽和させる必要が生じた。水は送水ラインから注水し、排水側(圧力計測ライン)のストップバルブを開放してエアを逃すようにした。

送水は、過剰な水圧が測定区間に掛からないよう家庭用のバスポンプを利用した。送水中にパッカーの遮水性を孔口からの水漏れで観察できるよう、送水は奥の P1 から 1 区間ずつ順に行った。

(3) 区間のエア抜きとパッカーの遮水性確認

各区間を水で満たした後、ある1区間に圧力インパクトを与え、その際の隣接区間への圧力応答の有無によりパッカーの遮水性を確認することとした。圧力インパクトはパルス試験のような瞬間的な加圧、あるいはバスポンプによる継続注水とすることとした。隣接区間にリークが認められた場合は、パッカー拡張圧をさらに上げることにした。図4. 3-4にエア抜き～リーク確認時の圧力変化（パッカー拡張圧 0.6MPa）を示す。

下図より、区間への注水の際にすでに、図中の丸囲み部のように P4 より孔口側で圧力応答が隣り合う区間にダイレクトに反応したため、パッカーの遮水が効いていないと判断し、翌日パッカー圧をさらに上げて再度リーク確認を実施した。なお、注水は奥の区間より順次行ったため、注水区間より坑道側の区間では圧力応答はしない。

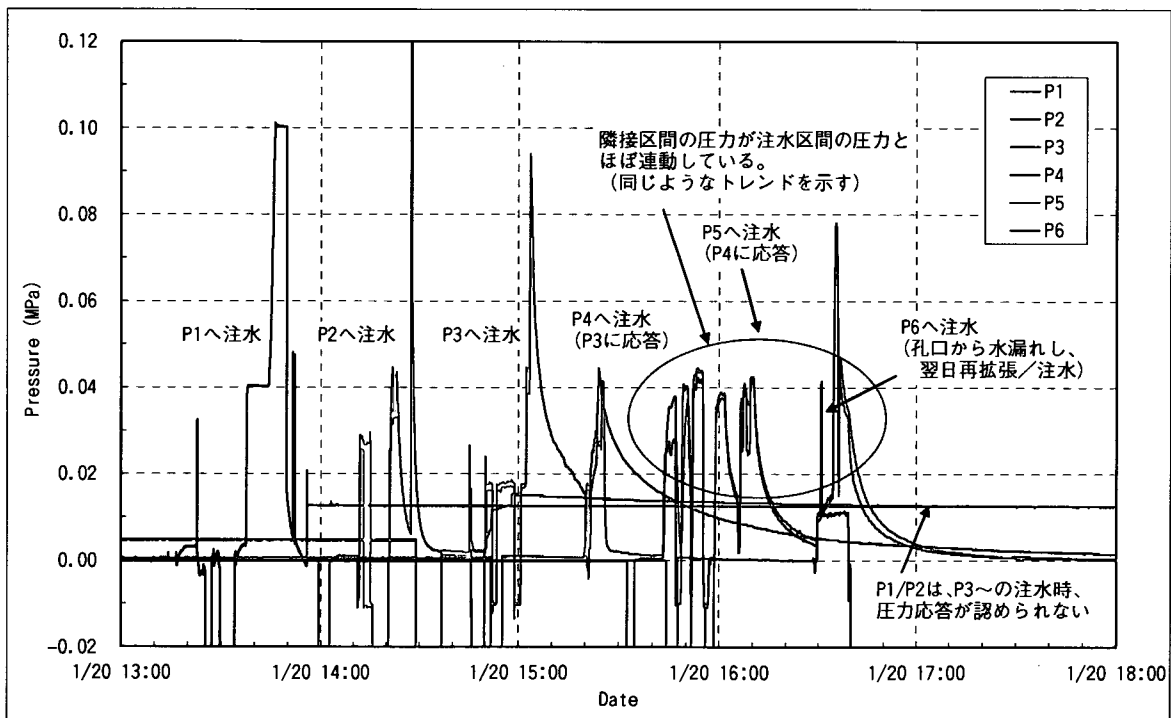


図4. 3-4 エア抜き～リーク確認時の圧力変化（パッカー拡張圧 0.6MPa）

翌日行ったリーク確認、および簡易注水試験の圧力変化図を図4. 3-5に示す。

パッカー拡張圧を 1.0MPa まで引き上げたが、P1, P2 は前日同様にリークがなく、圧力保持状態も良好であったので、ハンドポンプで約 1.0MPa まで加圧し間隙水圧の本測定へ移行した。

しかし、P4~P6 はリーク確認や簡易注水試験時に圧力応答が顕著に表れた。P3 は圧力応答が認められなかったが、圧力低下は P4~P6 と同様に大きくなった。

これらの区間は、

- ① 注水時に孔口から漏洩がなかった。
- ② パッカー拡張圧 0.6MPa 時（図4. 3-4）と比べて、隣接区間の注水に対する圧力応答はやや遅れて小さめに現れ変化傾向も類似しない。（図中丸囲み部）

③ 区間距離が非常に短いため、岩盤を介した水の流れであっても圧力応答の遅れは顕著ではないと考えられる。

以上より、拡張圧 1.0MPa により、パッカーの遮水性は十分確保されているものと判断した。

P3～P6 は、区間へ大きな圧力を加えると遮水性への影響が懸念されるため、ハンドポンプでの加圧を止め、本測定はバスポンプによる約 0.45MPa を開始圧力とした。

約 1 ヶ月にわたるパッカーの遮水性を確実にするため、本測定開始に際し、パッカー拡張圧を 1.5MPa まで引き上げた (図 4. 3-5)。

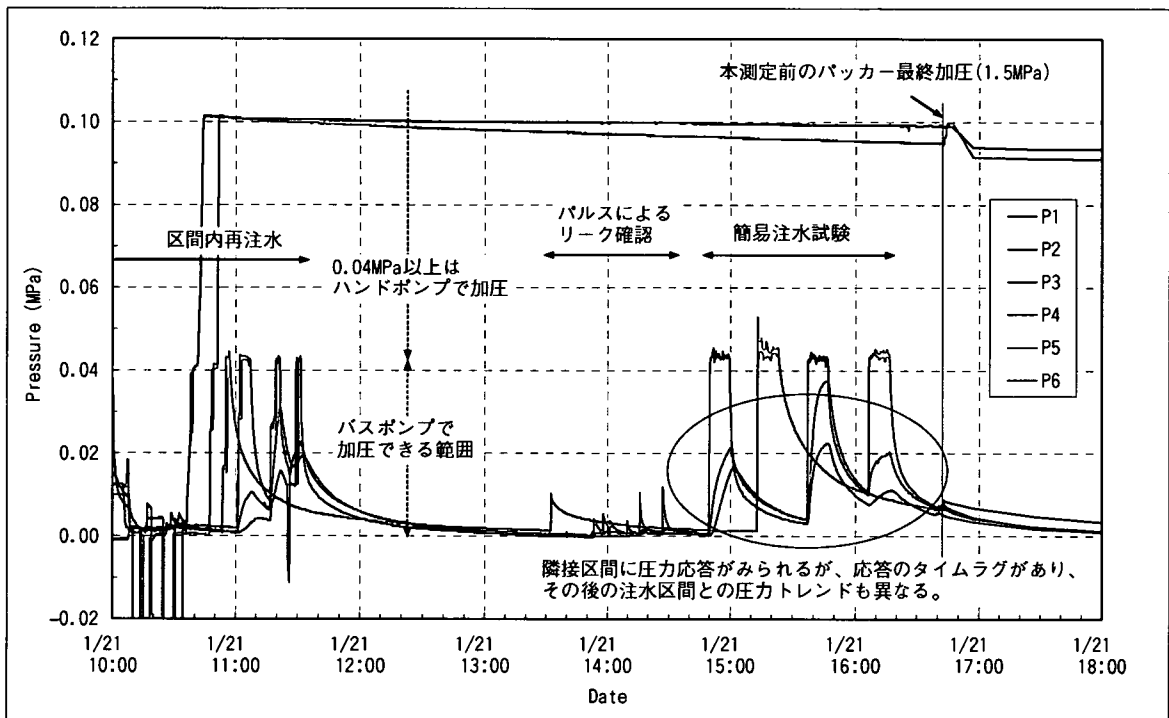


図 4. 3-5 リーク確認～簡易注水試験までの圧力変化 (パッカー拡張圧 1.0MPa)

(4) 透水性の評価

P3～P4 については、リーク確認のポンプ送水の際、各測定区間の圧力はポンプ能力によるほぼ一定の圧力に落ち着いたため、これを 10 分間継続した総注水量を計り、注水時および注水後の圧力収束過程における透水性の概略を把握した。

P1, P2 は透水性が低く本法の適用は不可能と判断し、そのまま水圧測定を継続した。

注水過程は Hvorslev の定常式 (下記参照)、圧力収束過程 (回復) は Horner の解析式 (下記参照) を用いて透水係数の算定を行った。算定結果を表 4. 3-2 に、Horner の解析図を図 4. 3-6 に示す。

Hvorslev 定常式 (揚水・注水)

$$T = \frac{Q \cdot \ln(L/r)}{2\pi s}$$

Horner (揚水・注水回復過程)

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_2 - s_1)} \cdot \ln \left(\frac{(tp + \Delta t_2)/\Delta t_2}{(tp + \Delta t_1)/\Delta t_1} \right)$$

ここに (Hvorslev 定常式)

T : 透水量係数 (m²/sec)

s : 水頭差 (m) ⇒表 4. 3-2 (初期水圧は擬似飽和と見なし 0 とする)

Q : 流量 (m³/sec) ⇒表 4. 3-2

L : 区間長 (m) = 0.20m r : 試錘孔半径 (m) = 0.033m

(Horner)

T, Q : 同上

Δ t_{1,2} : 注水停止後の経過時間 (sec) ⇒図 4. 3-6

s_{1,2} : Δ t_{1,2} における水頭差 (m) ⇒図 4. 3-6

s_x = h₀ - Δ h (h₀ : 初期水位 (m) Δ h : Δ t_x に対応する水位 (m))

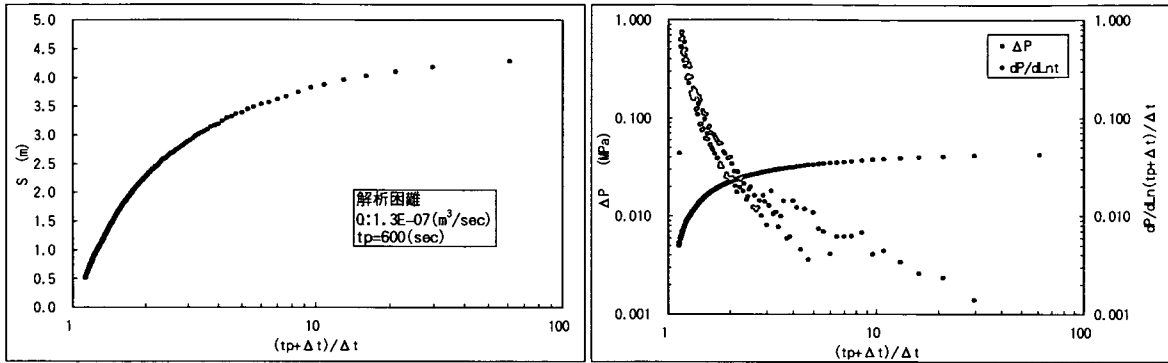
t_p : 注水時間 (sec) ⇒図 4. 3-6

表 4. 3-2 各区間の透水係数概算値 (※)

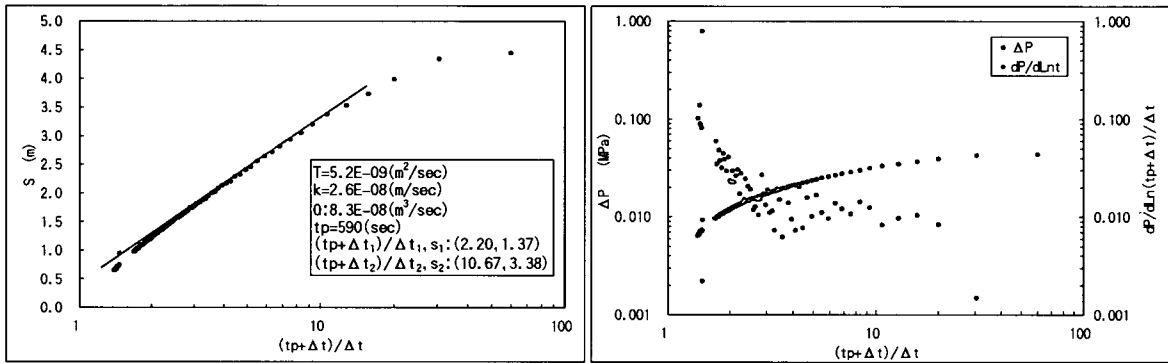
区間	透水係数 k (m/sec)		平均注水流量		変化圧力平均	
	Hvorslev	Horner	(L/min)	(m ³ /sec)	(MPa)	(m)
P1	測定不能	同左	—	—	—	—
P2	測定不能	同左	—	—	—	—
P3	4.2E-8	解析困難	0.008	1.33E-7	0.0440	4.49
P4	2.7E-8	2.6E-8	0.005	8.33E-8	0.0435	4.44
P5	2.6E-7	3.1E-7	0.047	7.83E-7	0.0425	4.33
P6	2.5E-7	3.7E-7	0.045	7.50E-7	0.0430	4.38

坑道近傍の P6, P5 区間が約 2~3×10⁻⁷(m/sec), 奥の P4, P3 区間が 2~4×10⁻⁸(m/sec), さらに奥の P2, P1 区間がより透水性が低い (測定不能) という傾向が確認された。

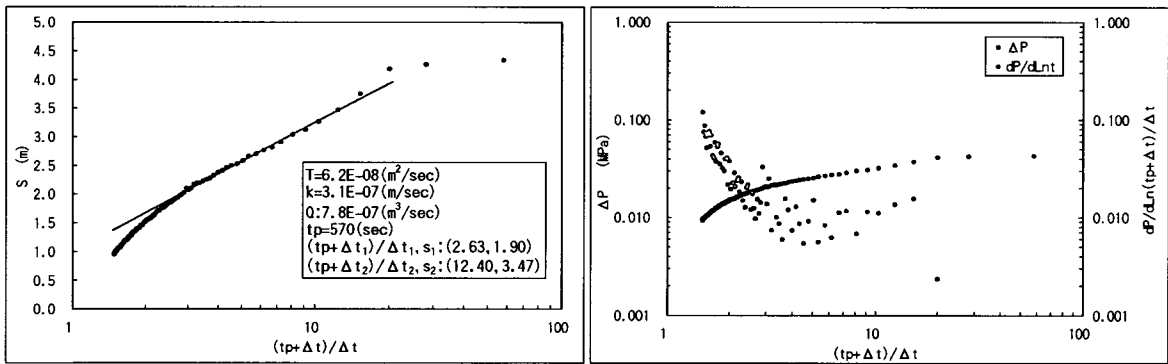
(※ 計算に用いた流量は 10 分間の平均値で、必ずしも定常状態に対応するものではない。一定圧で流量が減少しつつ定常に至ることを考えると、定常状態での流量はより小さく、実際の透水係数はここで得られた値よりも小さいものと考えられる。)



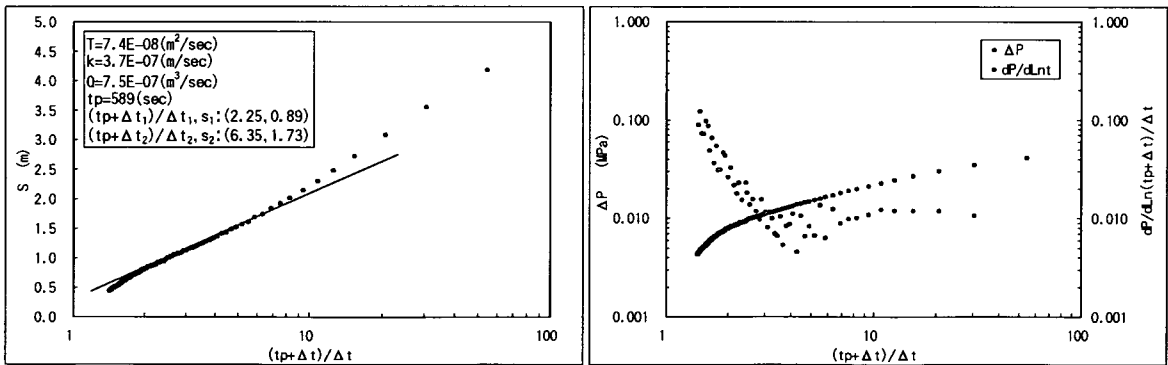
<P3の解析図と Derivative Plot>



<P4の解析図と Derivative Plot>



<P5の解析図と Derivative Plot>



<P6の解析図と Derivative Plot>

図4. 3-6 Hornerの解析図一覧

4. 4 間隙水圧測定結果

測定対象 03SI-18 孔は目視で湧水が確認されず、測定開始前、少なくとも孔周辺は不飽和になっていると考えられた。そのため、区間に注水/加圧した後の圧力低下・安定という形で坑道周辺間隙水圧の測定を試みた。間隙水圧の測定は1月21日から2月26日の36日間実施した。

圧力計測値（坑道内大気圧との差圧）の経時変化として、図4. 4-1に全体図、図4. 4-2にP3~P6計測部分の拡大図、図4. 4-3に坑道内気温との関係をそれぞれ示す。また、図4. 4-4に絶対圧力の経時変化として、計測値に坑道内大気圧を加算したグラフを示す。

測定開始後の圧力経時変化には、以下のとおり、P1, P2 と、P3~P6 の2つの傾向が認められた。

<P1, P2 圧力>

P1 は水圧下降が遅く、測定期間中に収束水圧を得る可能性はないと判断し、2月12日に圧力測定ライン用のストップバルブを一時開放し、強制的に水圧降下させて収束を時間の短縮を図った。この措置により、約0.014MPa水圧を下げた。

2/20以降は、P1・P2ともに水圧下降はやや収まりつつあるように見受けられる。

本調査での確認事項、および現段階で考えられることは以下の通りである。

- ① 透水性が低いため測定スタート時に加圧した水圧が長期間保持されている。本来の間隙水圧に移行中の段階である。
- ② 気温による圧力への影響はほとんど認められない。(図4. 4-3参照)
- ③ 圧力計がゲージ圧タイプであるため、図に示す計測値は絶対圧から気圧を減じた値である。P1・P2の値は気圧の影響が小さいために、計測値には気圧と逆位相の応答が見られる。
- ④ 絶対圧の表示図より、P1・P2は滑らかな曲線となり気圧の影響はほとんど認められない。また、圧力はまだ低下傾向(収束過程)にあることが判る(図4. 4-4参照)

<P3~P6 圧力>

図4. 4-2にP3~P6圧力の圧力スケールを拡大した図を示す。

P3~P6圧力は、開始直後から負圧に転じた後、水圧がやや回復して低水圧で安定するというほぼ一様な変化傾向が認められた。また、水圧回復は坑道側のP6から順に回復していた。

P4~P6圧力の負圧期間は約1~3日で、水圧回復は圧力0付近からはいずれの区間も数十分で安定圧力に収束した。P3圧力は圧力安定までに約9日を要し、圧力収束に至るまでやや圧力に乱れがみられる。

これらの区間では、圧力安定後に不飽和となった可能性が高いと考えられたが、不飽和であることの裏付けとして、パッカー回収前に擬似パルス試験を実施した。この措置により、飽和であれば圧力応答が大きく現れ、逆に不飽和であれば圧力応答はほとんど現れないであろうと考えた。その結果を図4. 4-5に示す。

また、パッカー回収時に孔口からの水漏れや、装置本体の表面を目視観察した。

これらの結果より、本調査での確認事項、および現段階で考えられることは以下のと

おりである。

- ① 擬似パルス試験結果より、飽和しているP2と比べ、P3～P6は極わずかな圧力応答しか示さなかった。P3がその中でも若干反応が大きいのは、配管長などによる内部配管内水のボリュームの違いであると考えられる。
- ② 回収時の装置目視観察の結果、P1、P2区間で装置表面全体が濡れていたのに対し、P4～P6区間部では装置表面に水滴が付着する程度で、P3区間部は装置表面が乾燥していた。
- ③ P3～P6は、①、②の結果よりいずれも不飽和であると判断した。
- ④ 測定開始当初、P3～P6が負圧となったのは、準備段階で満水にした測定区間の水に周辺が不飽和であるためサクションが働き、周辺に浸透していく過程に対応するものと考えられる。
- ⑤ P6から順に圧力回復したのは、孔口までの距離が小さいほど、また、周辺の透水性が高いほど水が抜けやすい、あるいは、大気が供給されやすいためであると考えられる。負圧期間および負圧の大きさは、坑道壁面からの深度、周辺地山の透水性/サクションの大きさ等に影響を受けるものと考えられる。透水性は簡易注水試験結果より、おおよそ坑道側の方が良い傾向にある。
- ⑥ 区間内の水が減少するにつれ区間内は大気圧へシフトし、圧力計は測定区間の残存水あるいは配管との水頭差分の圧力を検知し圧力が上昇した。圧力計（配管）の設置高さに相違は少ないので、最終的に圧力値はほぼ一律な値を示した。
- ⑦ 測定開始時に注水した水が抜けて、P3～P6は改めて不飽和となり、配管内の滞留水は気圧の応答をそのまま受け、表示される圧力はほぼ一定となった。絶対圧表示で表すと、ほぼ気圧と同様のトレンドを示した。（図4.4-4参照）
- ⑧ 気温による圧力への影響はほとんど認められない。（図4.4-3参照）

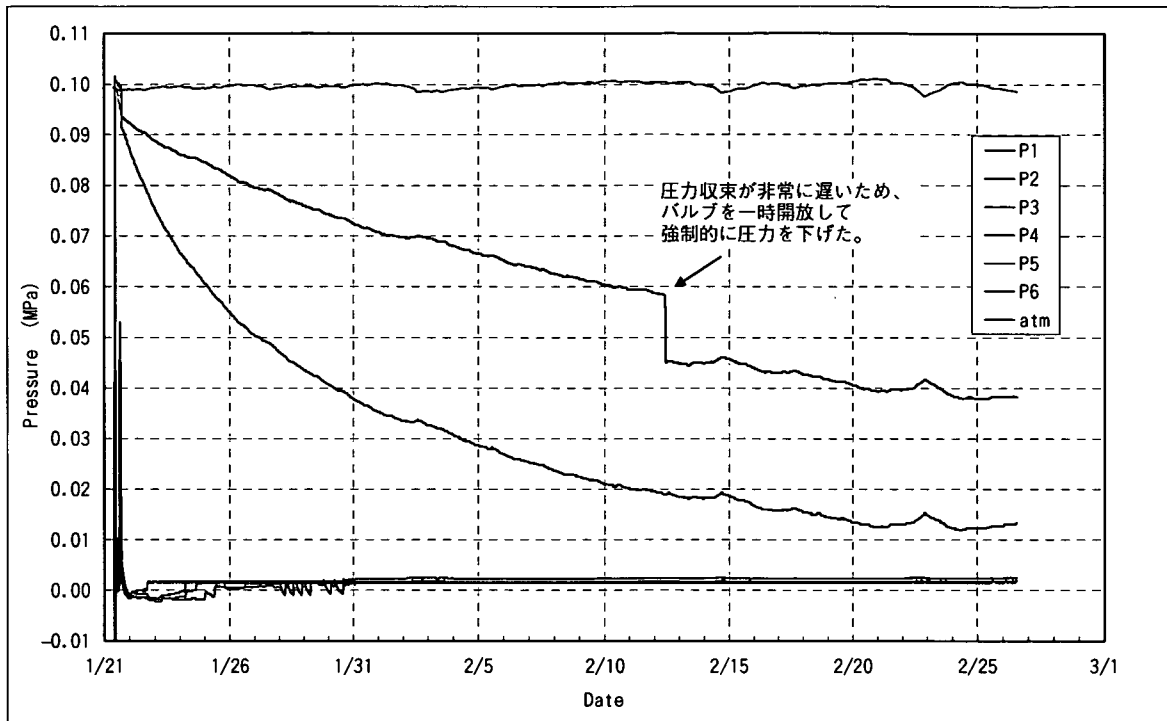


図 4. 4 - 1 圧力計測値 経時変化 (全体図)

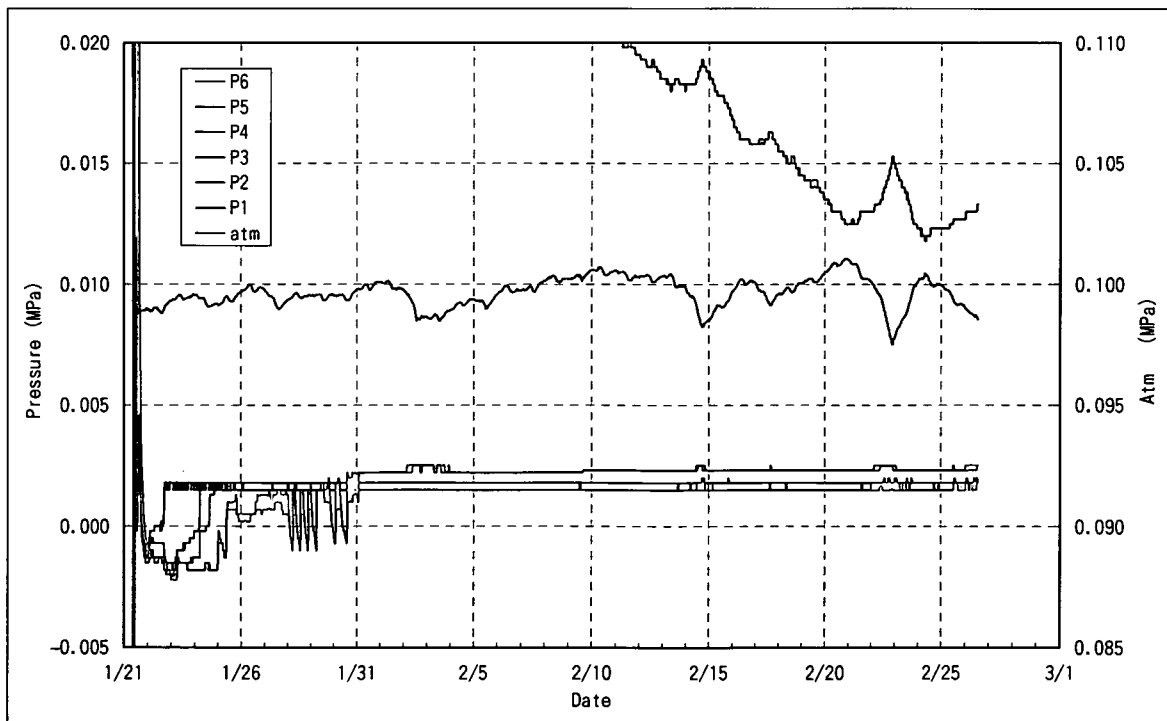


図 4. 4 - 2 圧力計測値 経時変化 (P3~P6 拡大図)

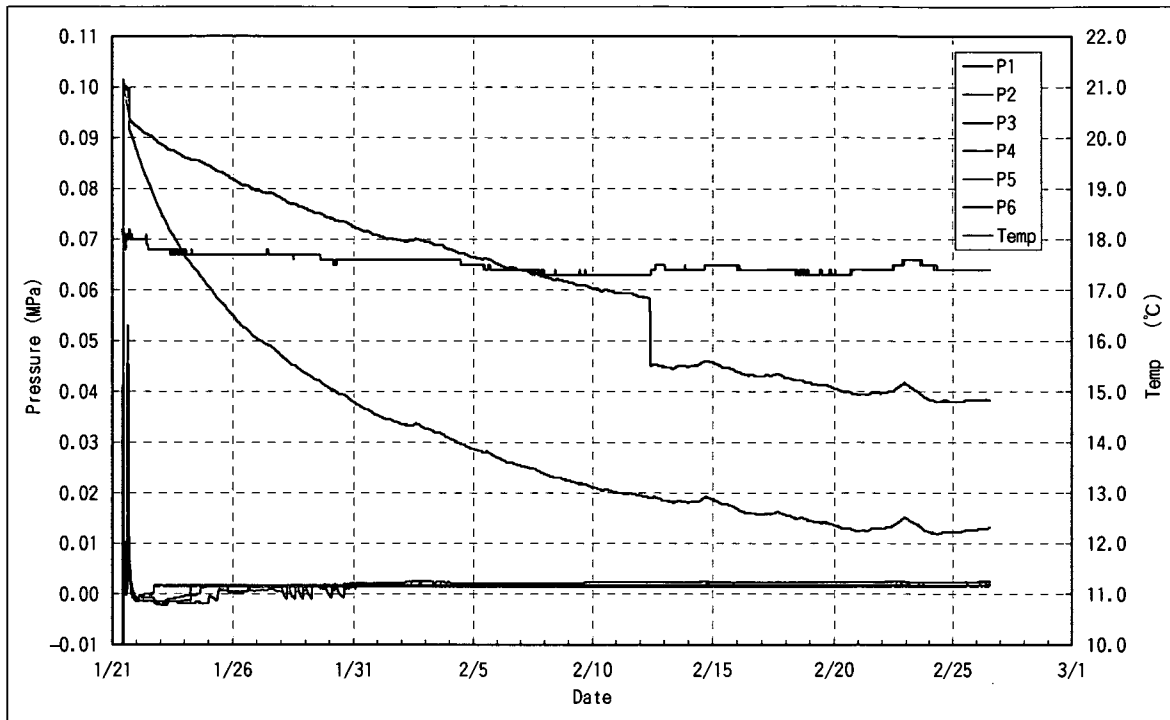


図 4. 4-3 圧力計測値 経時変化 (坑道内気温との関係)

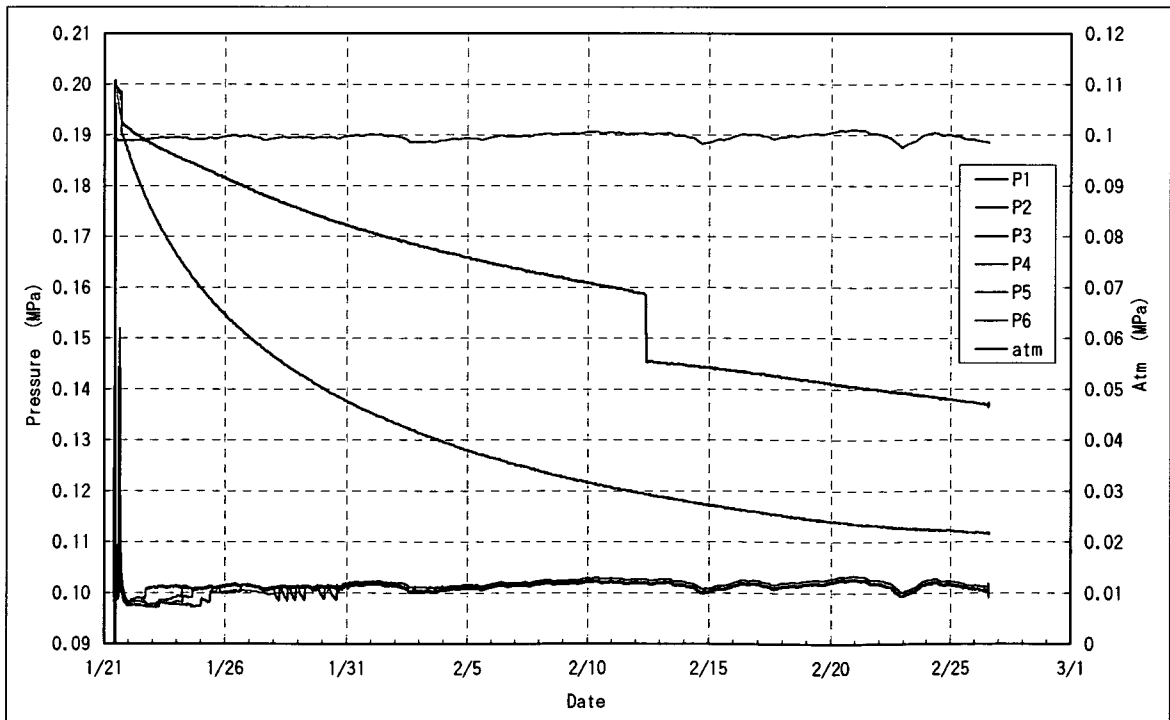


図 4. 4-4 絶対圧 経時変化(全体図)

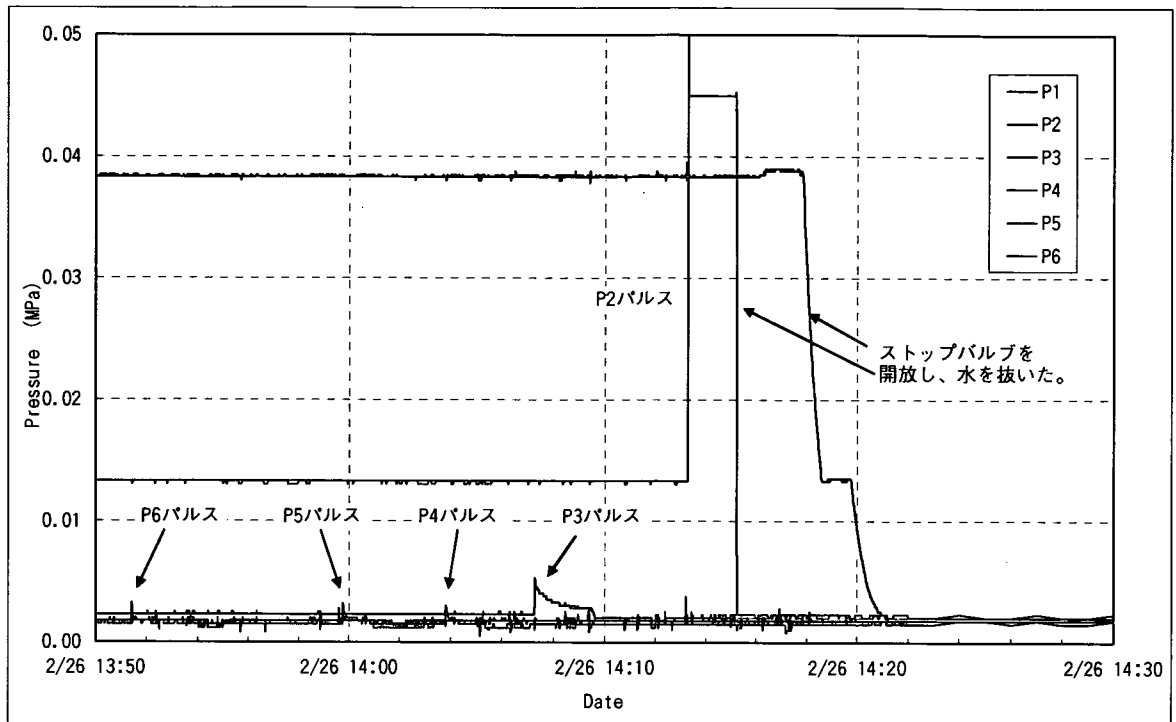


図 4. 4 - 5 区間の飽和確認試験

5. まとめ

NATM坑道において、今回実施した孔間連続波レーダー（03SI-19, 20孔）と間隙水圧測定（03SI-18孔）の結果を図5, 1-1に示す。また、同図には、昨年度、同一地点で実施した地表連続波レーダーの結果から評価した電磁波速度分布も合わせて示す。

別途、試錐孔コアを用いた室内試験により、当該地点の地山の飽和度と比誘電率の関係が求められており、比誘電率が40以下すなわち電磁波速度0.05m/ns以上の領域が不飽和であることが確認されている。

孔間連続波レーダーおよび地表連続波レーダーの結果は整合的で、ともに、坑壁から約2m以浅において電磁波速度0.05m/ns以上の領域が見られ、この範囲が不飽和であると判断された。

一方、約1ヶ月にわたる03SI-18孔での間隙水圧測定の結果、孔奥側のP1~P2区間は、透水性が低いため測定開始時に加圧した水圧が長期間保持され、本来の間隙水圧の確認に至らなかったが、少なくとも、孔口（坑道）側のP3~P6区間、坑道壁面より約2mまでは不飽和領域であることが確認された。

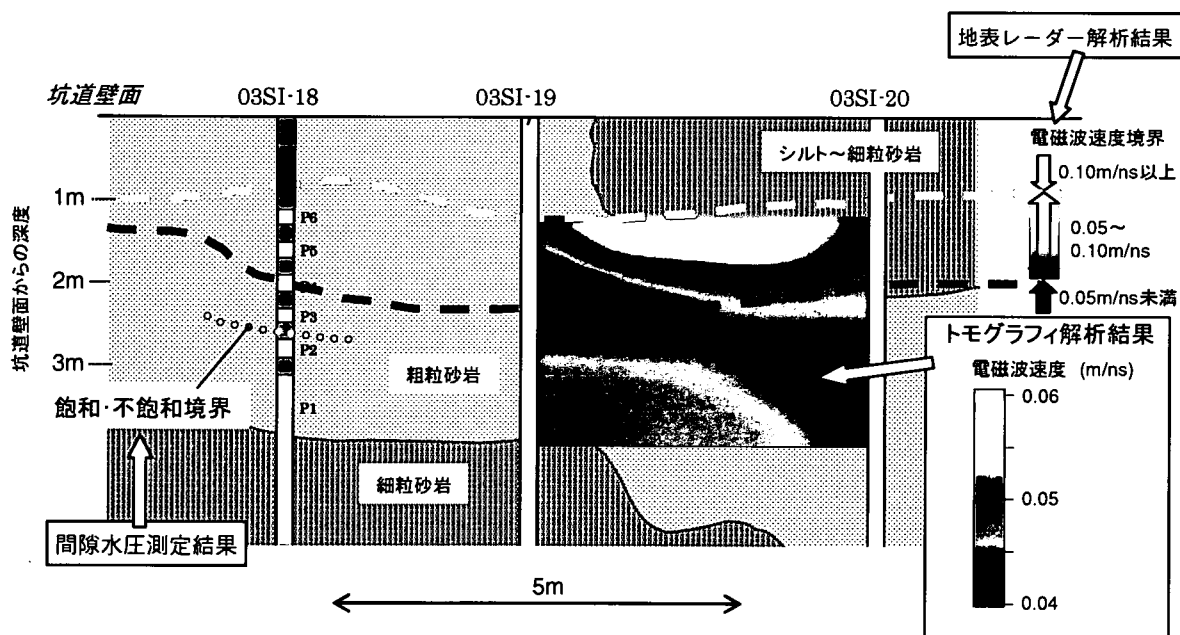


図5. 1-1 NATM坑道における調査結果（総合図）

参考文献

- (1) 西山英一郎, 他: G P Rにおけるデータ処理法, 第 537 号, pp.53~60(1999)
- (2) 鈴木敬一, 他: ステップ式連続波レーダ探査装置を用いた地中レーダ探査, 地質ニュース, 第 537 号, pp.44~52(1999)
- (3) 鈴木敬一: 連続波を用いた電磁波調査機器の実験機の製作, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ7410 99-001(1999)
- (4) 戸井田克, 須山泰宏, 名見耶薫, 渥美博行: 東濃鉦山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ7440 2003-001(2003)
- (5) 戸井田克, 渥美博行, 名見耶薫, 須山泰宏: 東濃鉦山岩石コアの比誘電率計測, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, (作成中) (2004)

巻末資料

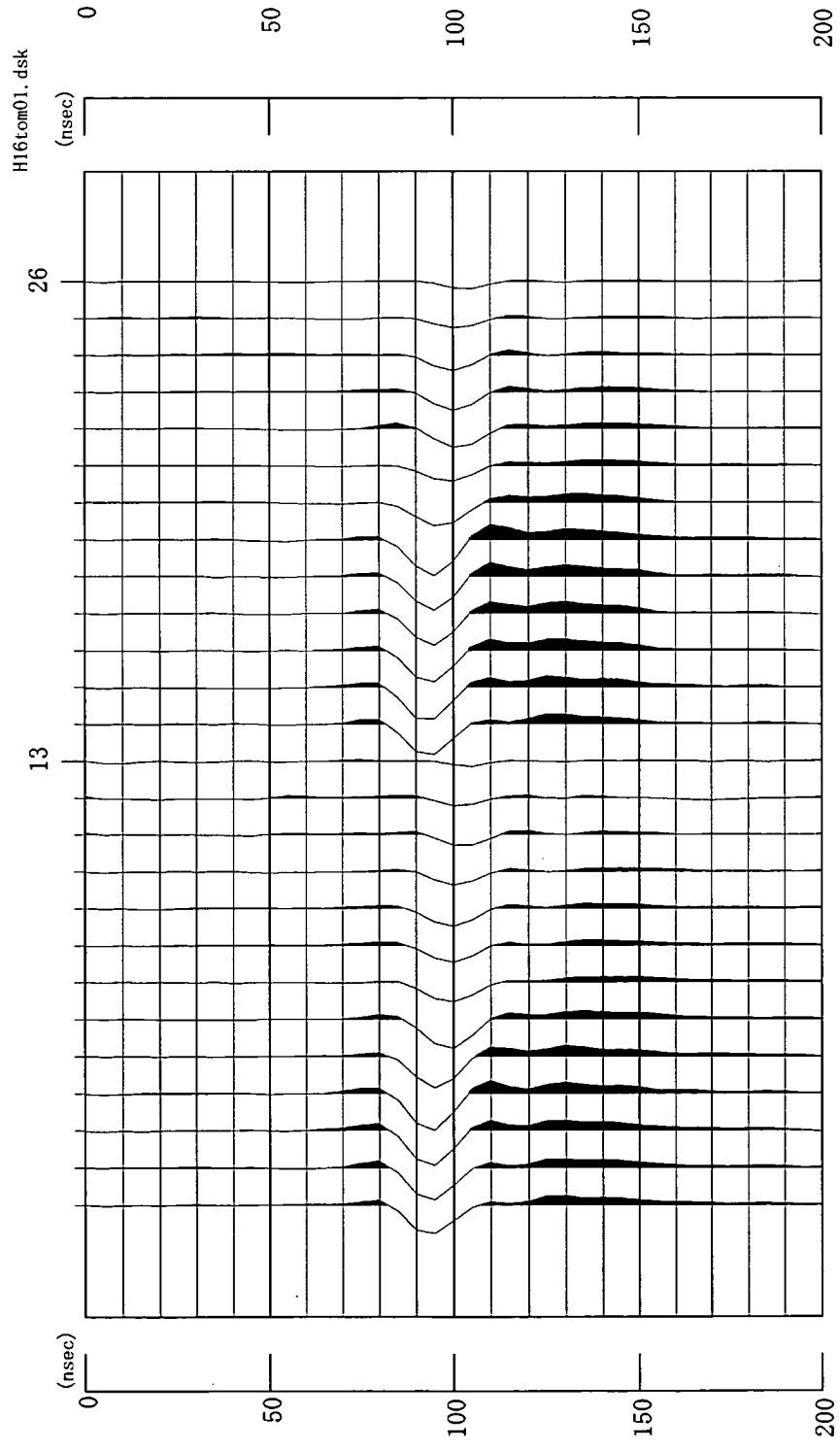
孔間連続波レーダー計測

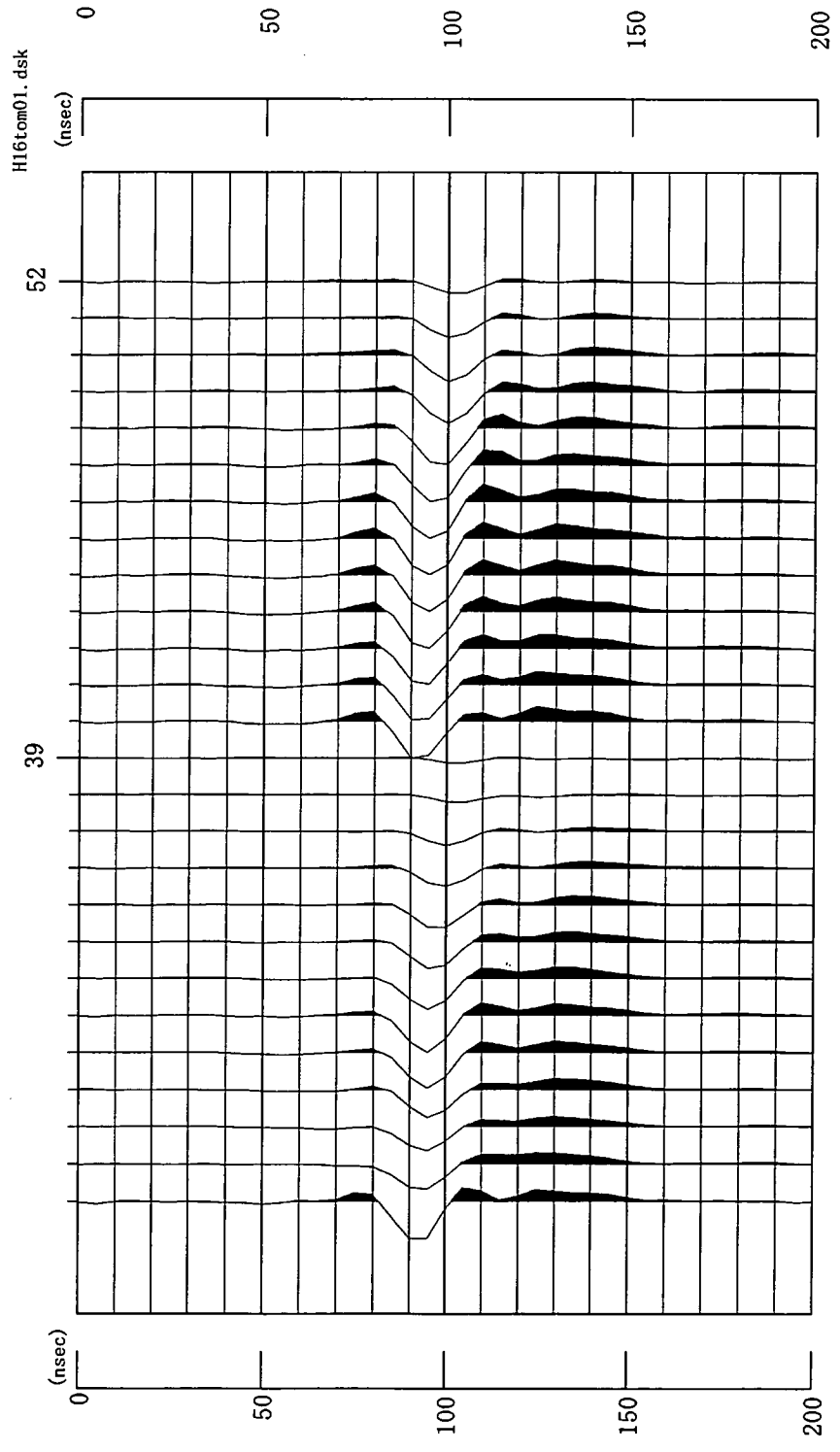
●

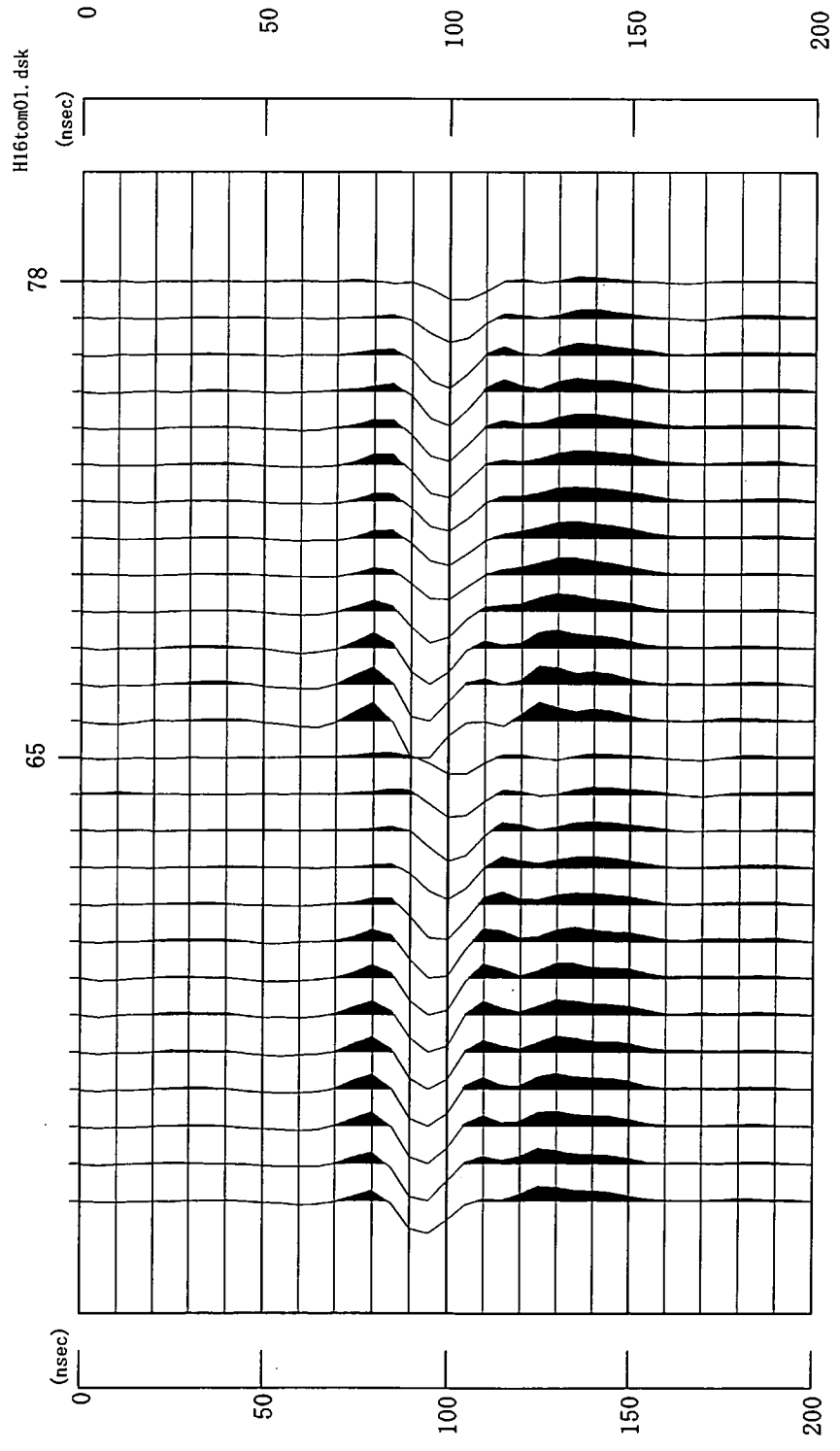
孔間連続波レーダー

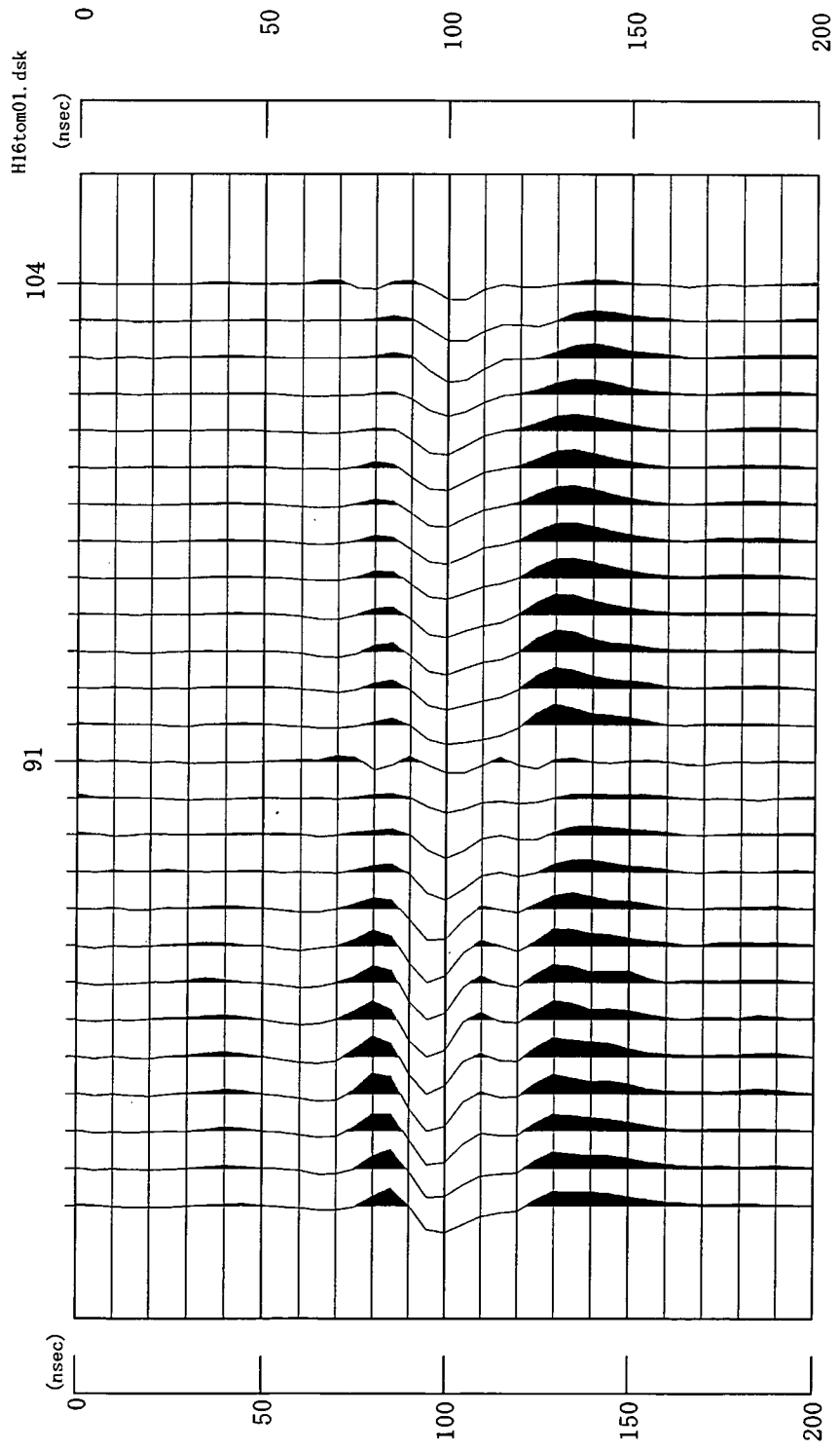
生波形

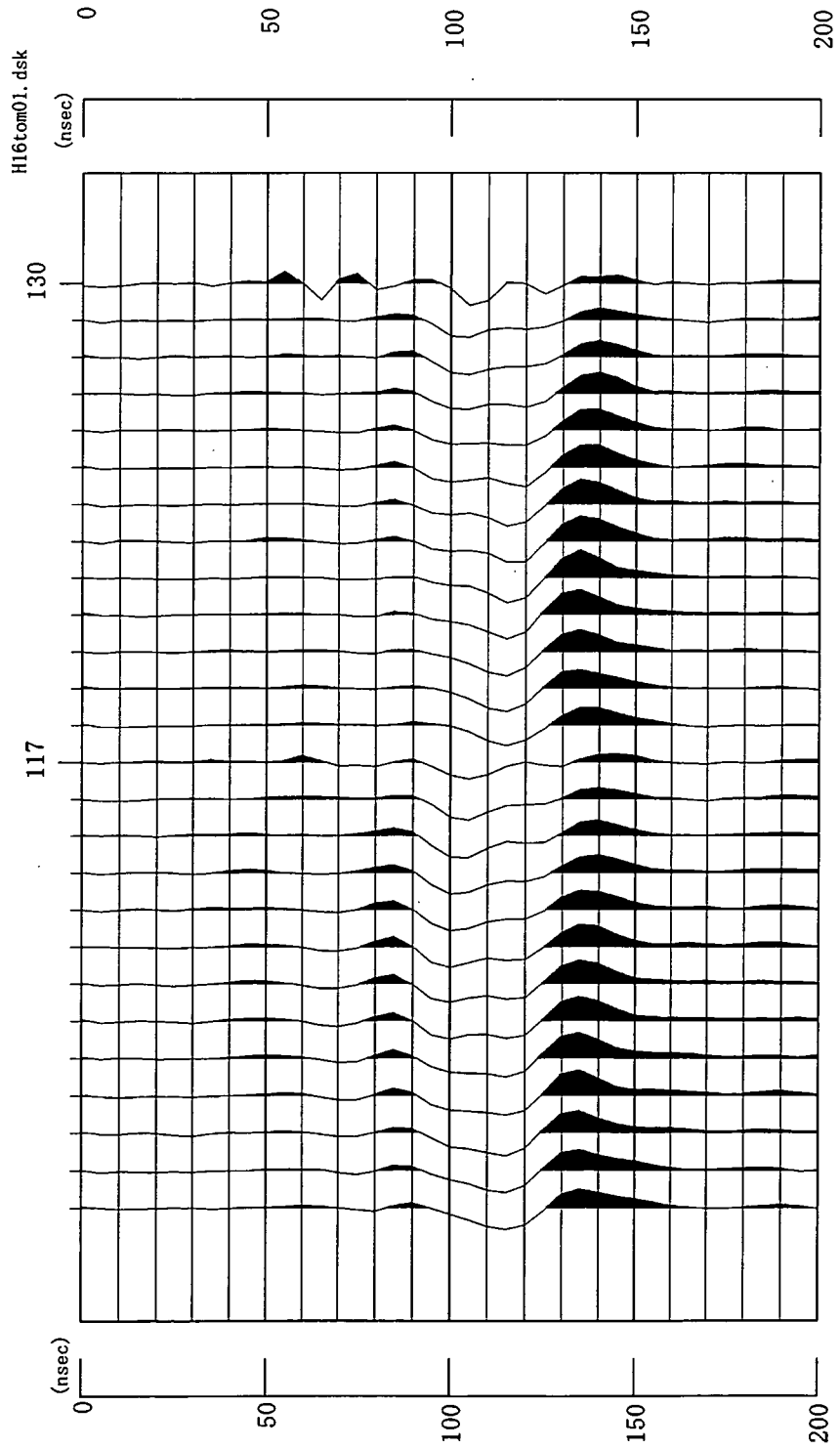
●

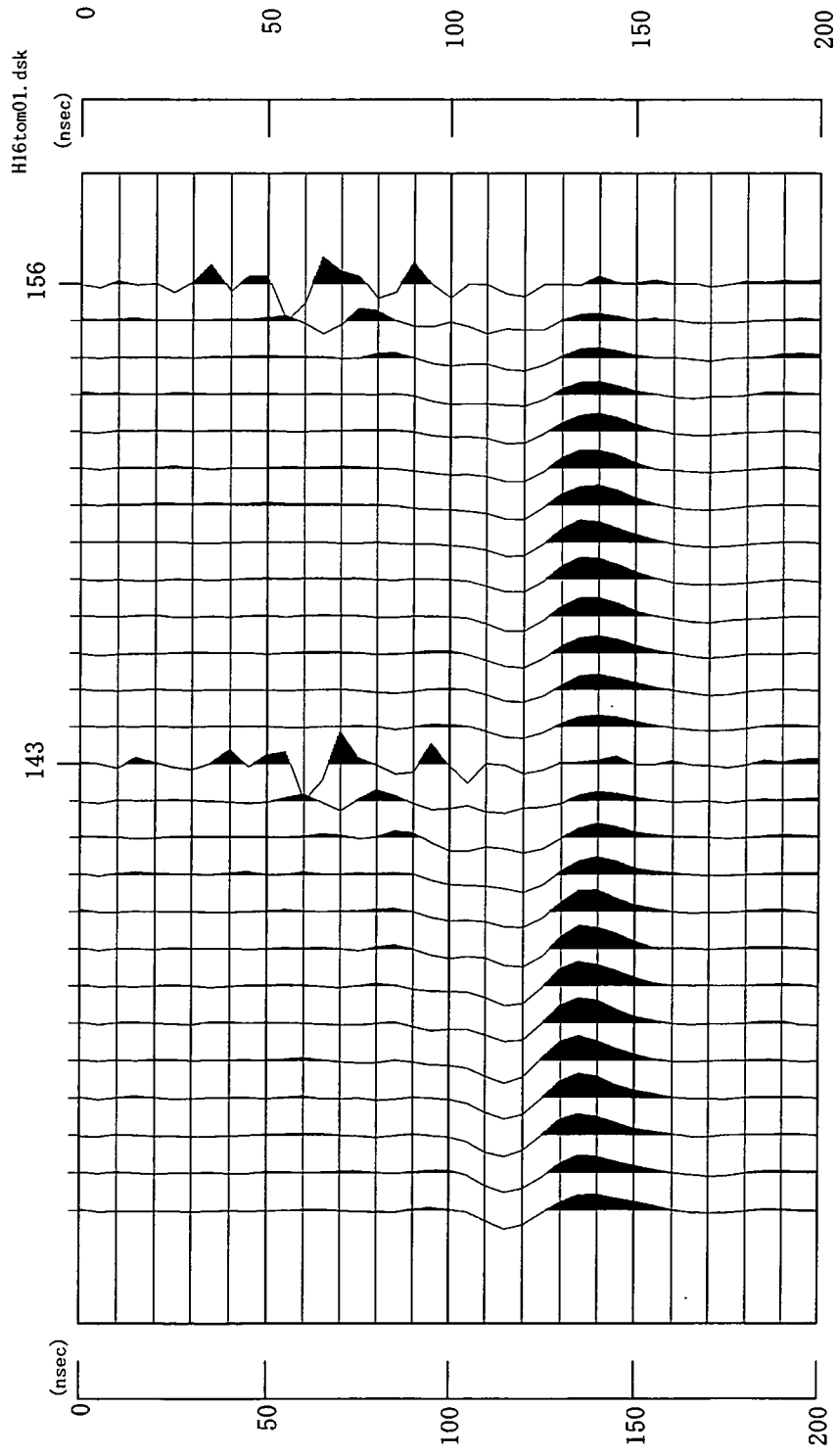


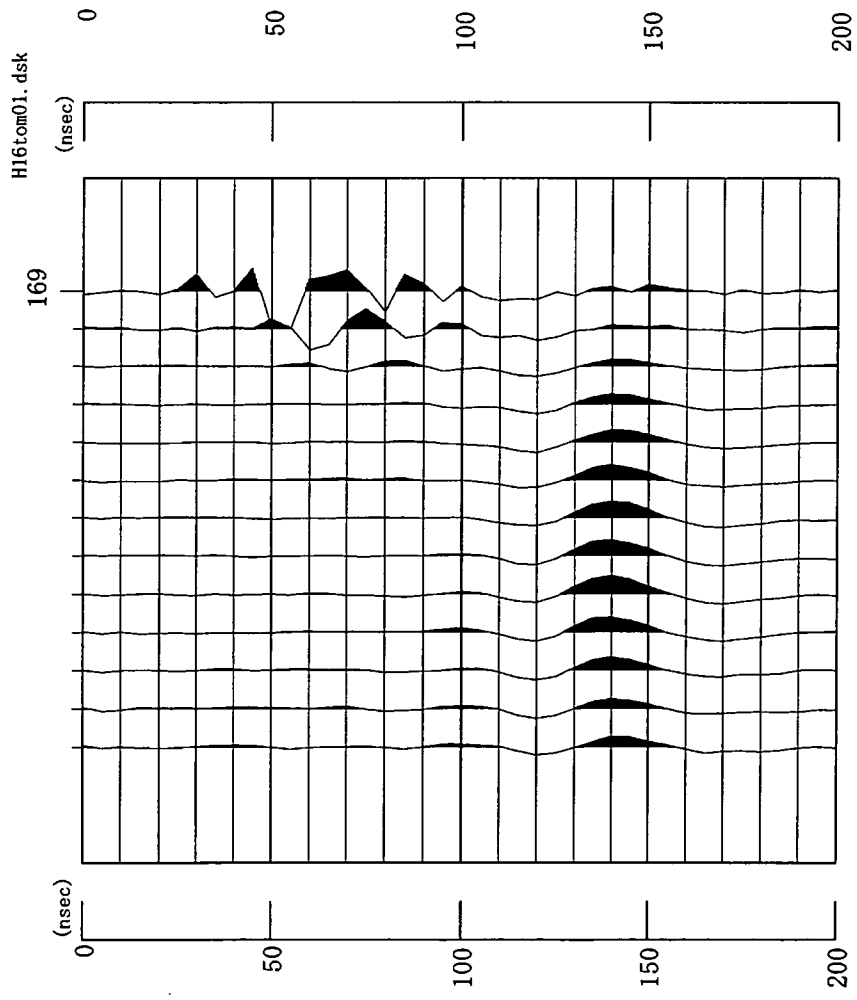










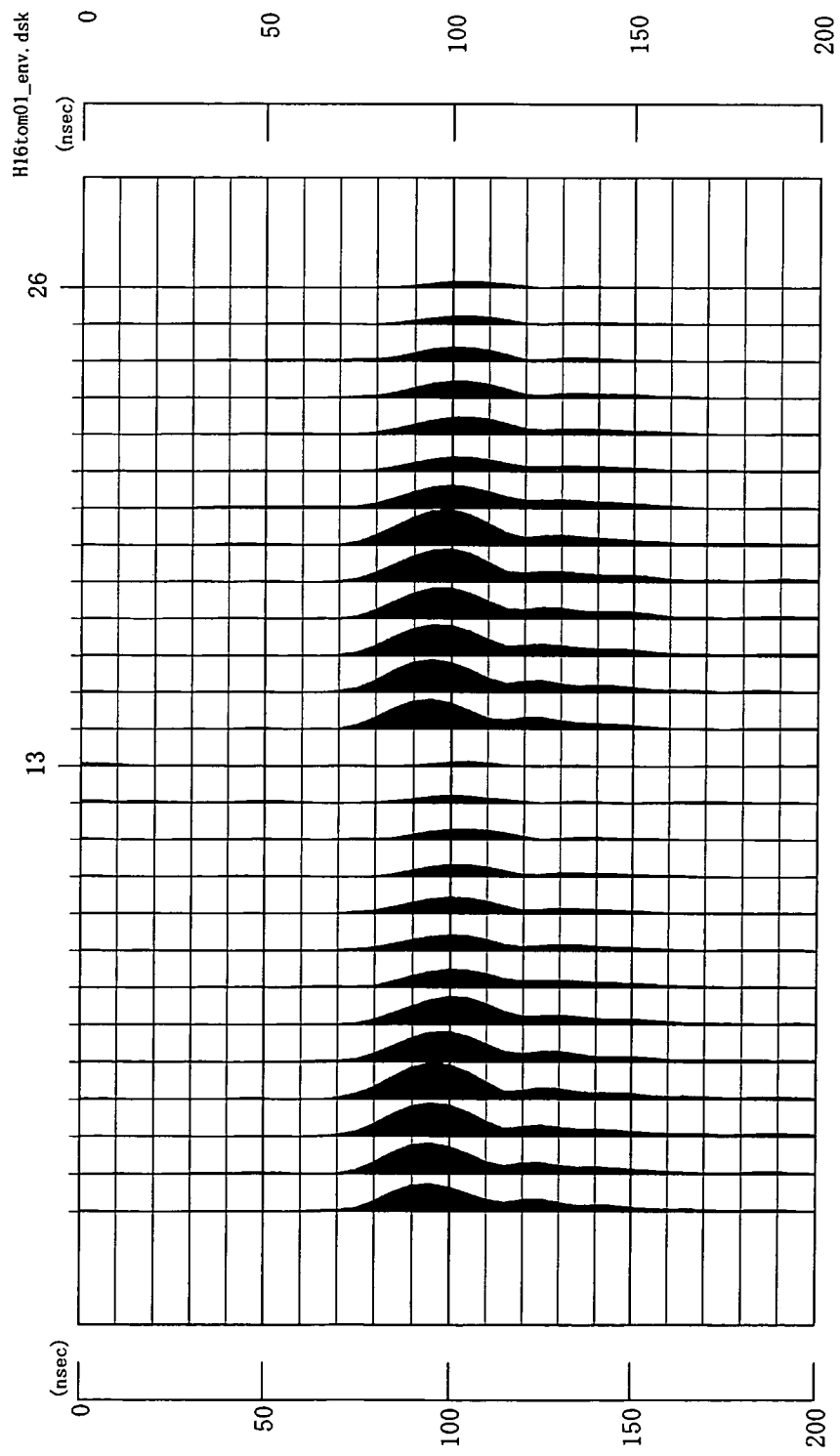


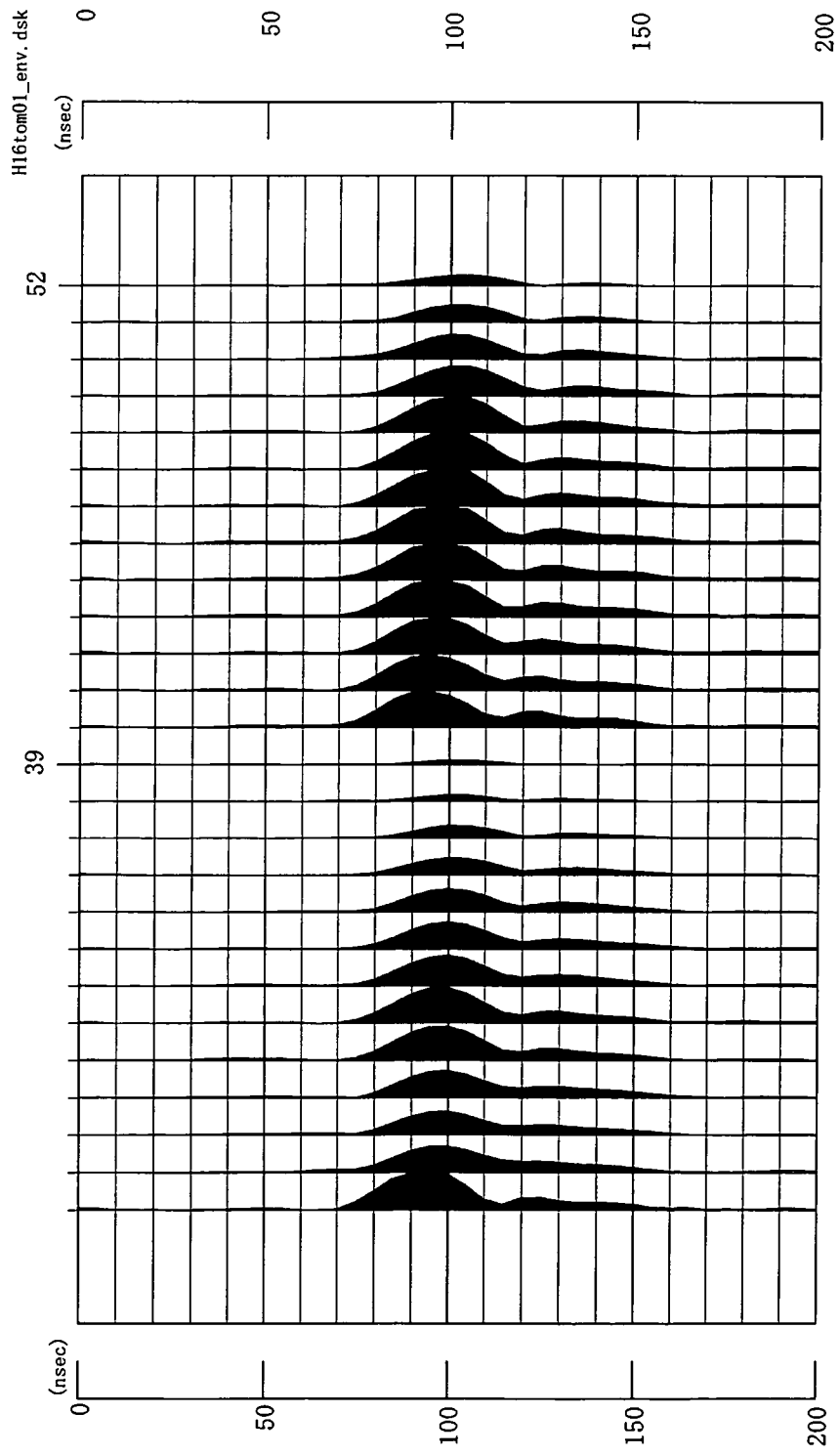
●

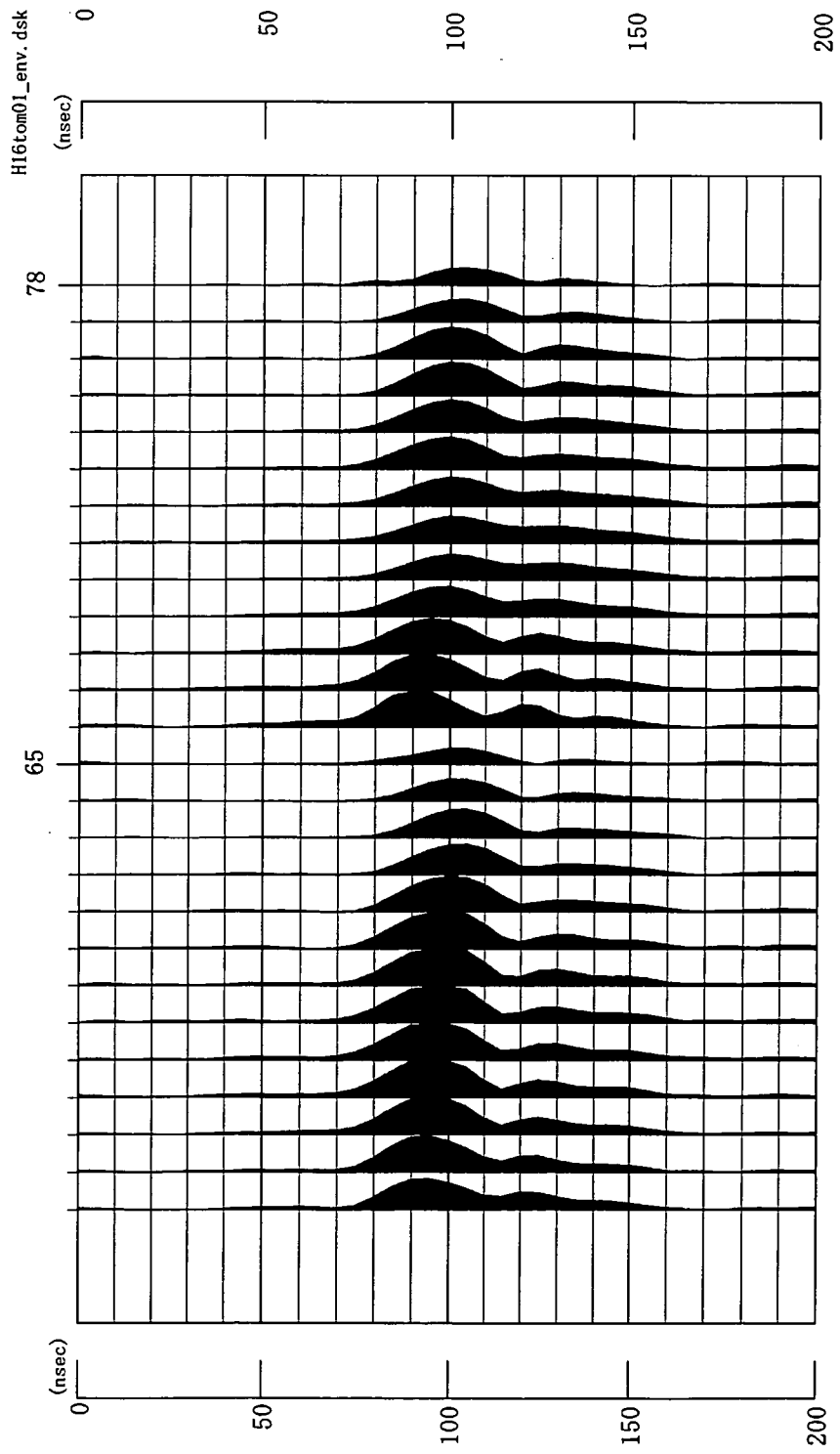
孔間連続波レーダー

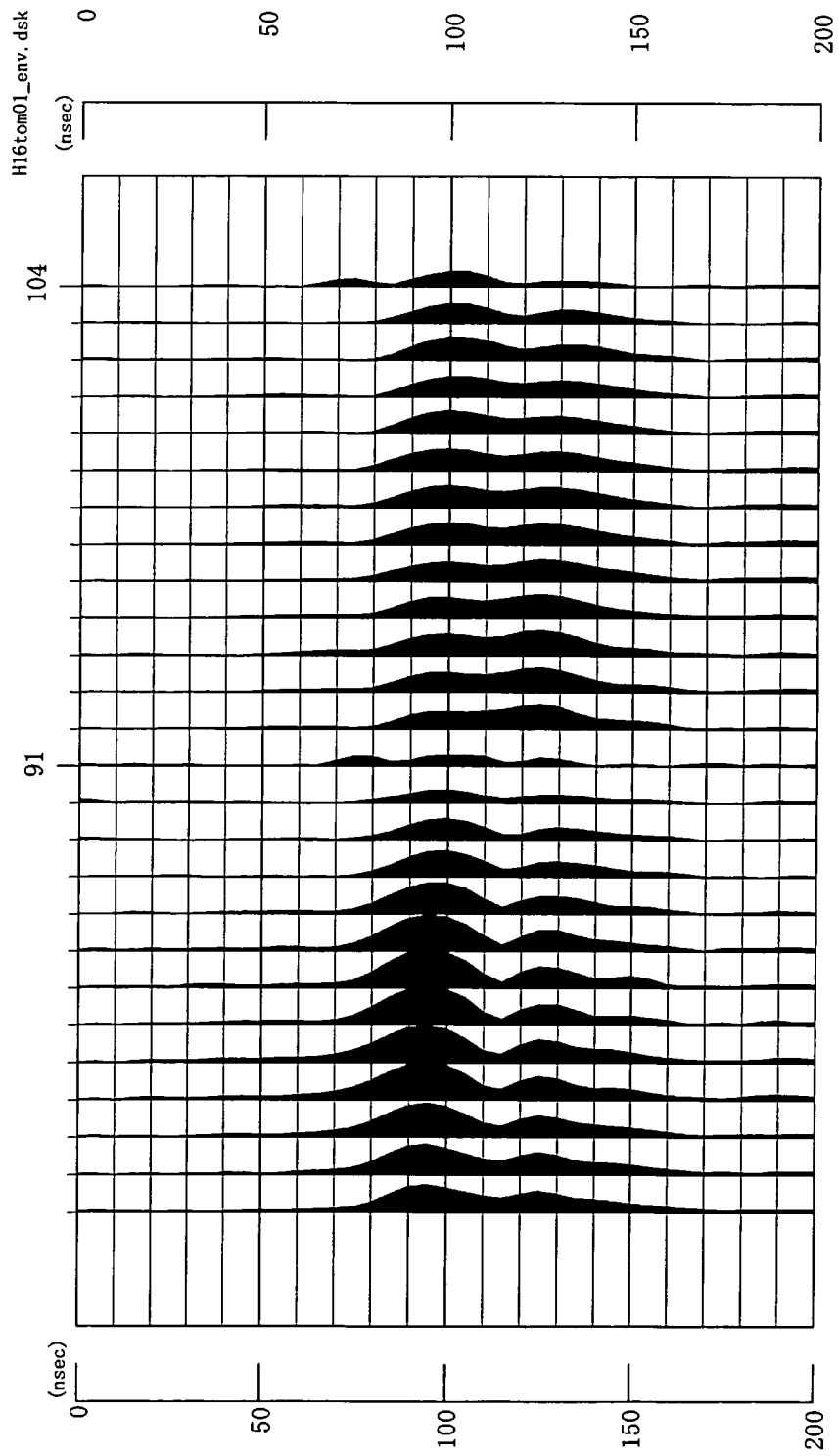
包絡線波形

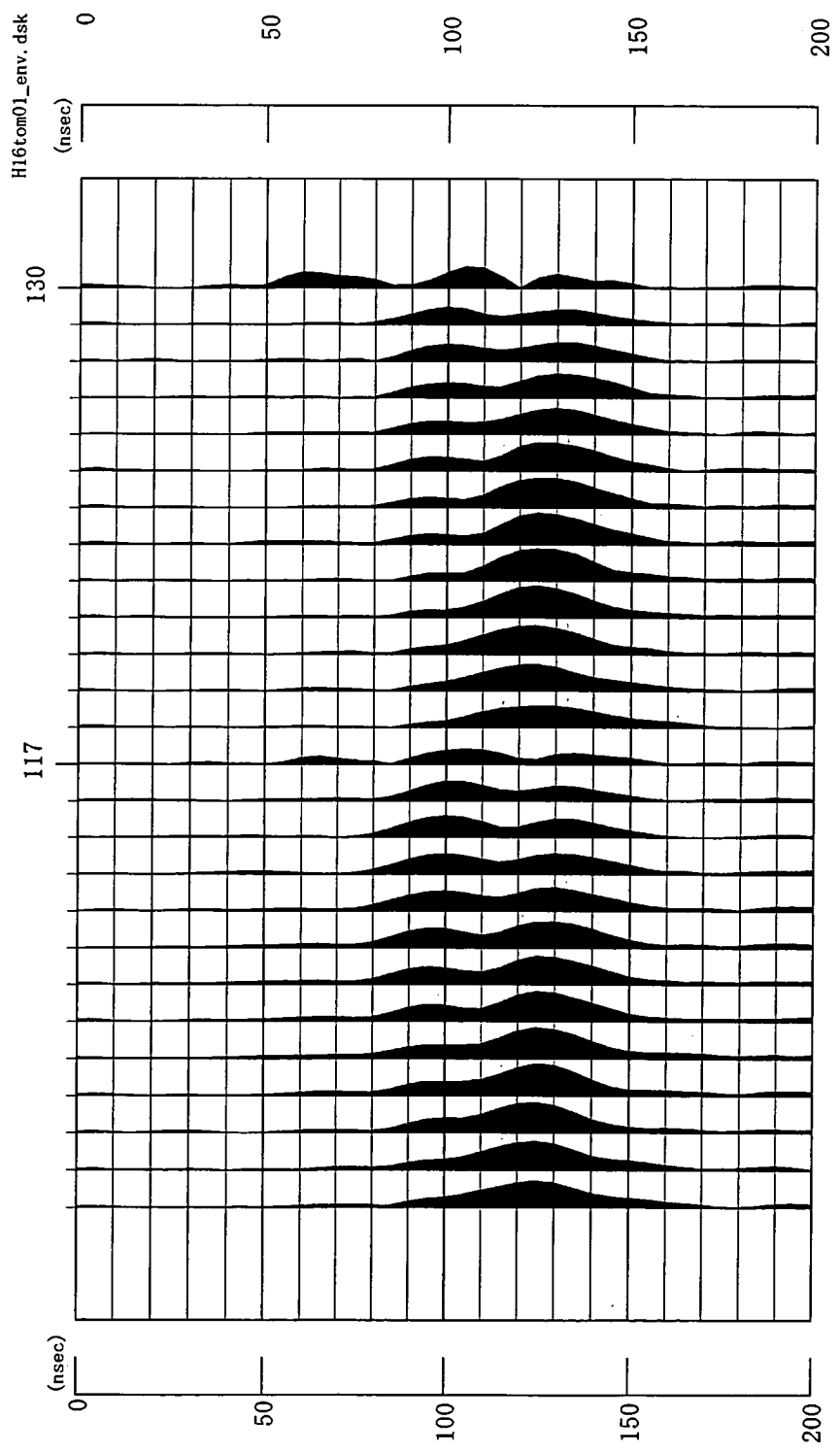
●

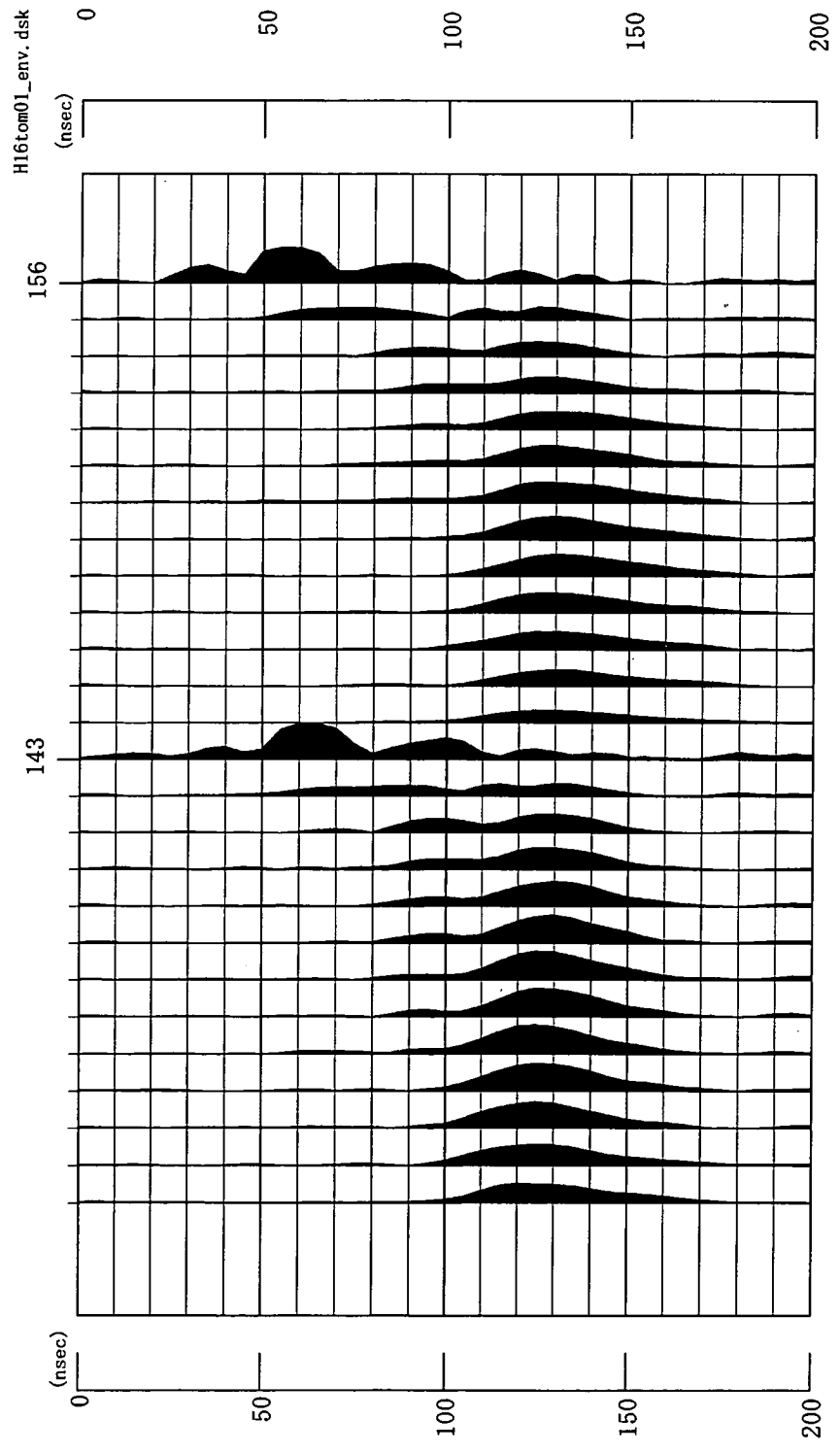


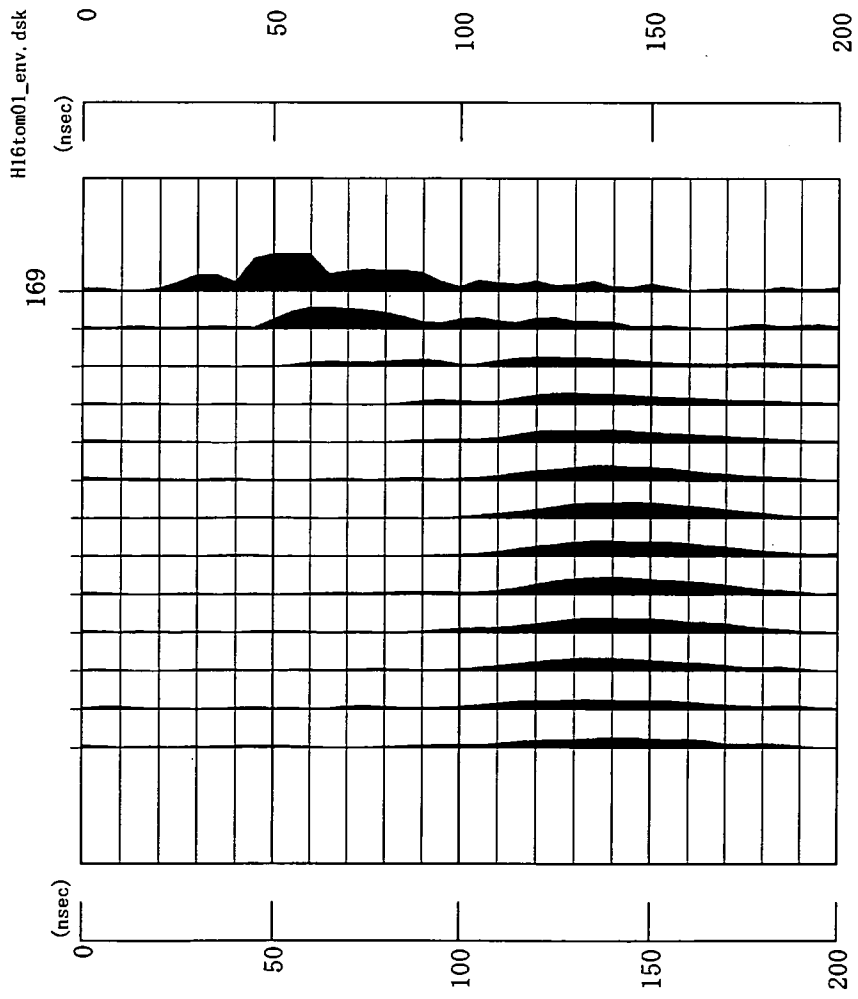










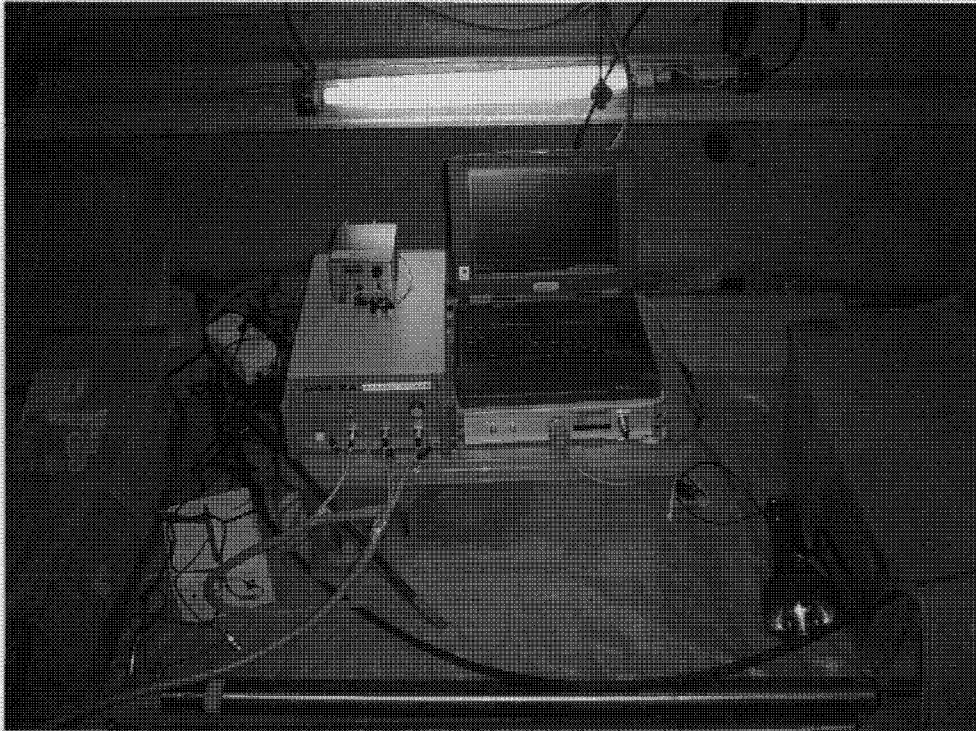


●

孔間連続波レーダー

現場状況写真

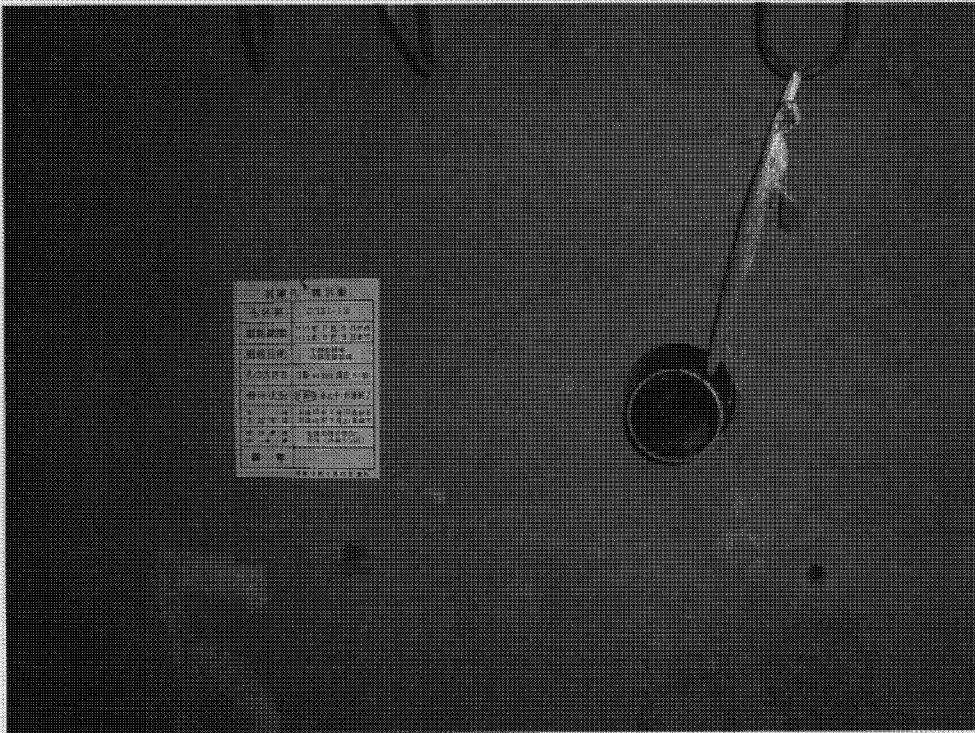
●



データ収録装置



計測用ゾンデ



NATM 坑道：03SI-19



NATM 坑道：03SI-20



計測用ゾンデ挿入状況 (03SI-20)



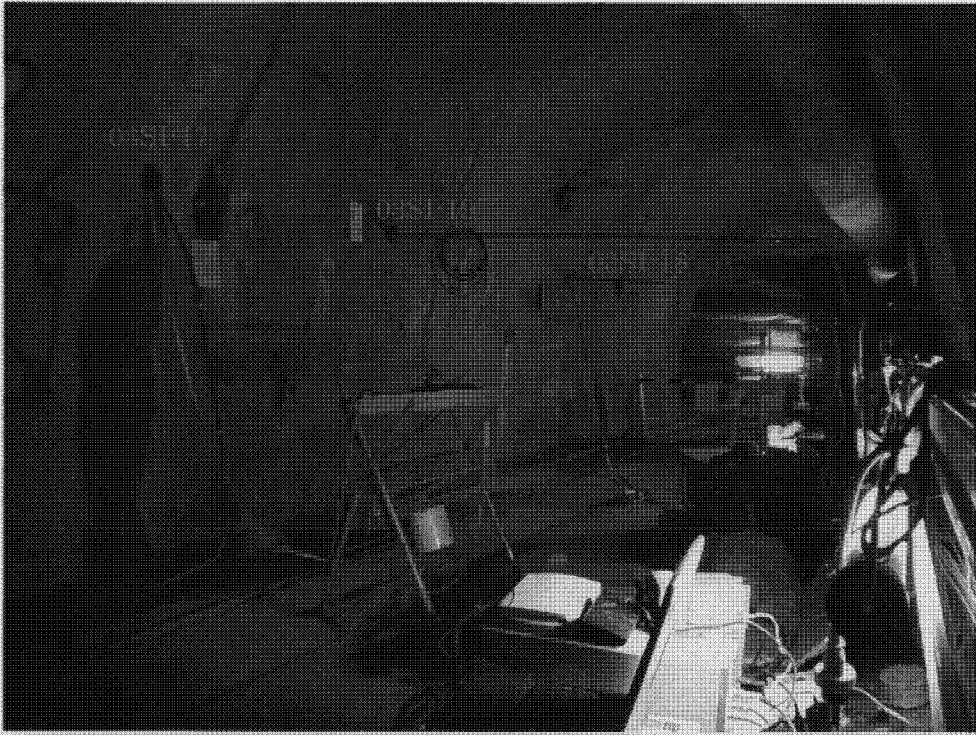
計測用ゾンデ設置状況 (03SI-20)



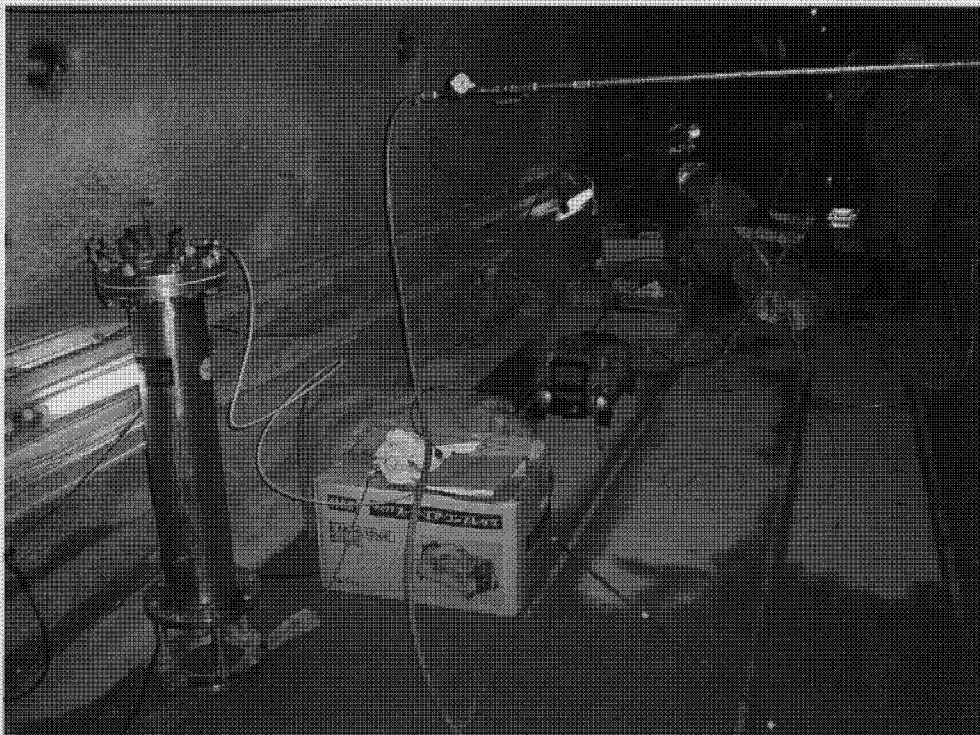
計測用ゾンデ設置状況 (03SI-19)



トモグラフィ計測状況



注水に伴う電磁波伝播特性試験状況



注水試験装置



止水パッカー設置状況 (03SI-19)



注水状況 (03SI-19)

卷 末 資 料

間隙水圧計測

間隙水圧計測

圧力計負圧特性検定資料

圧力計負圧特性検定

坑道内の大気圧に対して、坑道周辺の岩盤内が不飽和でサクションが作用する場合、測定値が大気圧以下（負圧）になることが想定される。

今回の水圧モニタリングに用いた圧力計：大倉製 PT7011A21G10 は、ゲージ圧基準の圧力計（圧力計測用ダイヤフラム的一方が大気圧に解放）であり、計測値は大気圧が差し引かれた値となる（0 測定レンジ 0～1MPa、出力 4～20mA）。負圧が作用すると圧力計のダイヤフラムは通常（正圧）とは逆向きに変形し出力は 4mA 未満となるが、負圧に対する正確な圧力値を取得するため負圧側の圧力計検定を実施した。

検定は、真空ポンプで発生させた負圧（0、10、20、30、40、50kPa。基準圧力計で圧力を確認。）に対する検定圧力計（大倉製 PT7011A21G10）の出力を読み取ることで行われ、0～50kPa の範囲で、正圧と同じ校正係数（16mA/MPa）の使用で圧力算定できることを確認した。

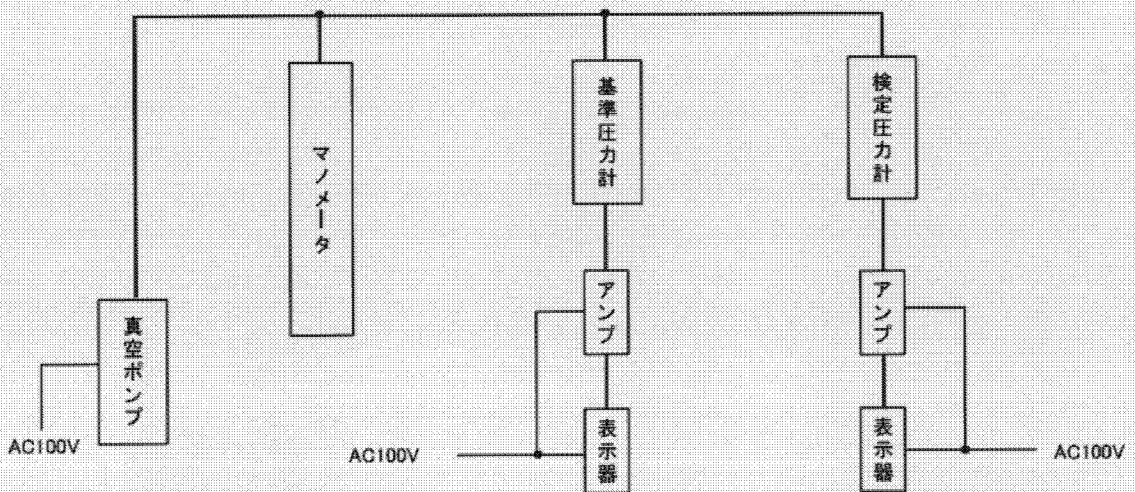


図 圧力計検定ブロックダイアグラム

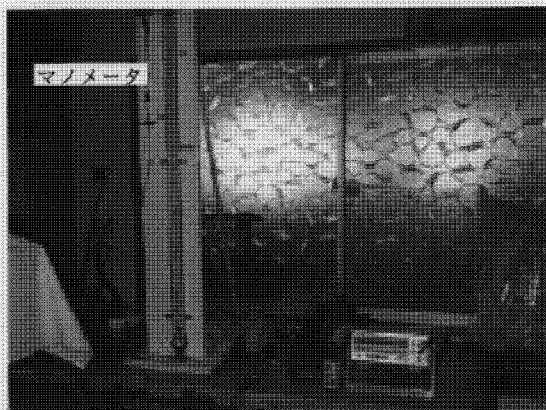



写真 圧力計検定

圧力計 試験成績表

納入先	鹿島建設株式会社 殿		
測定範囲	0~1Mpa で 4~20mA 出力	検定年月日	2004年2月2日
検出器形式	PT7011A21G10	検出器番号	2NA7042002
		検定者氏名	山崎 良次 

基準圧力 [KPa]	出力値 [mA]	差分 [mA]	
0	4.000		
-10	3.841	0.159	
-20	3.681	0.160	
-30	3.522	0.159	
-40	3.362	0.160	
-50	3.202	0.160	

基準圧力計

型式: PD64S

種別: 500K

製品番号: 7109

北 斗 理 研 株 式 会 社

〒189-0026 東京都東村山市多摩湖町1-25-2

TEL: 042-394-8101

FAX: 042-395-8731

●

間隙水圧計測

現場状況写真

●

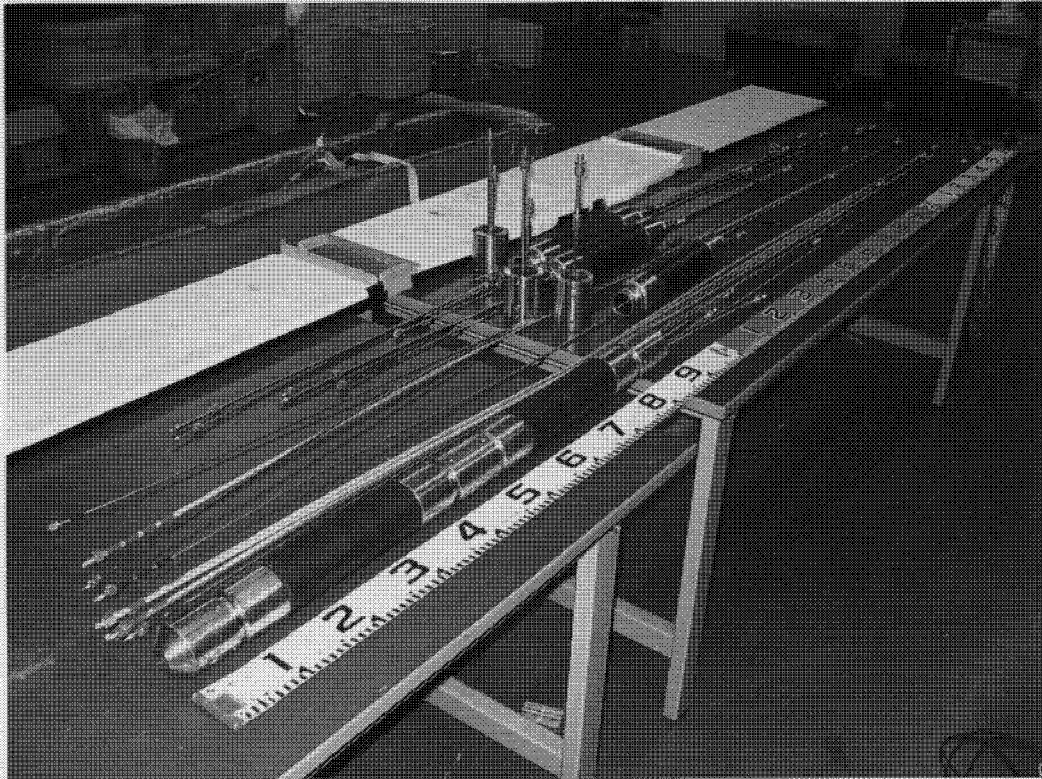


写真1 MMPS パッカー (配管をばらした状態)

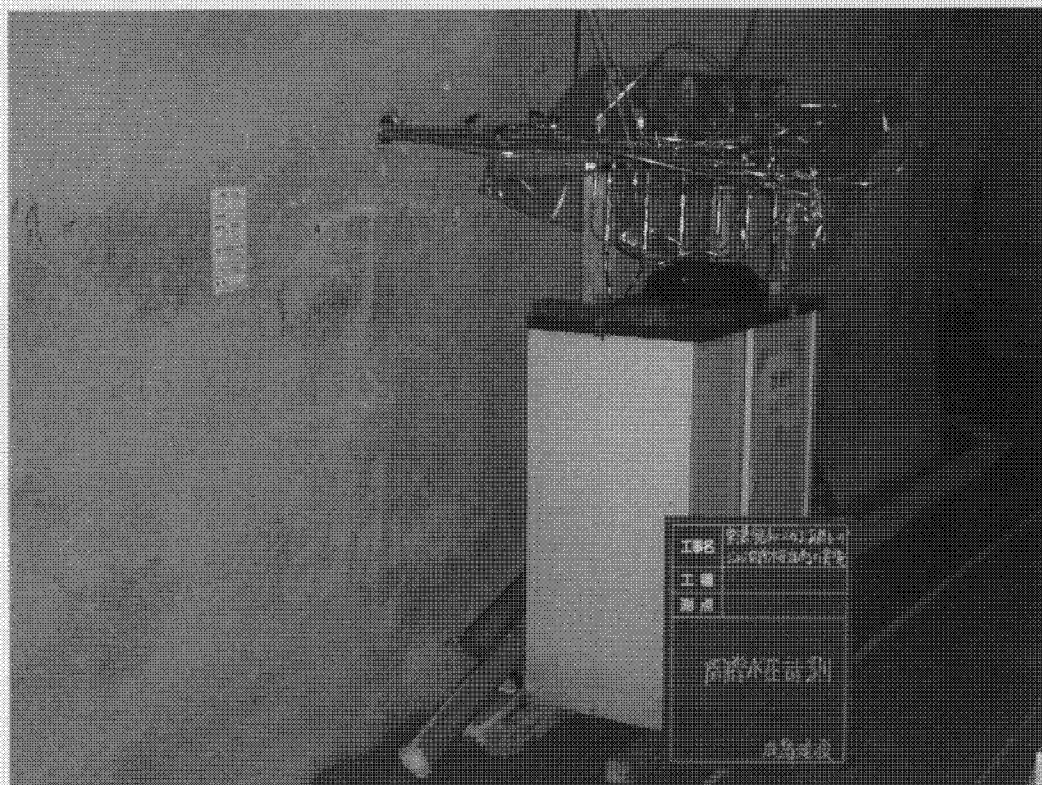


写真2 全景 (設置後)



写真3 パッカー挿入

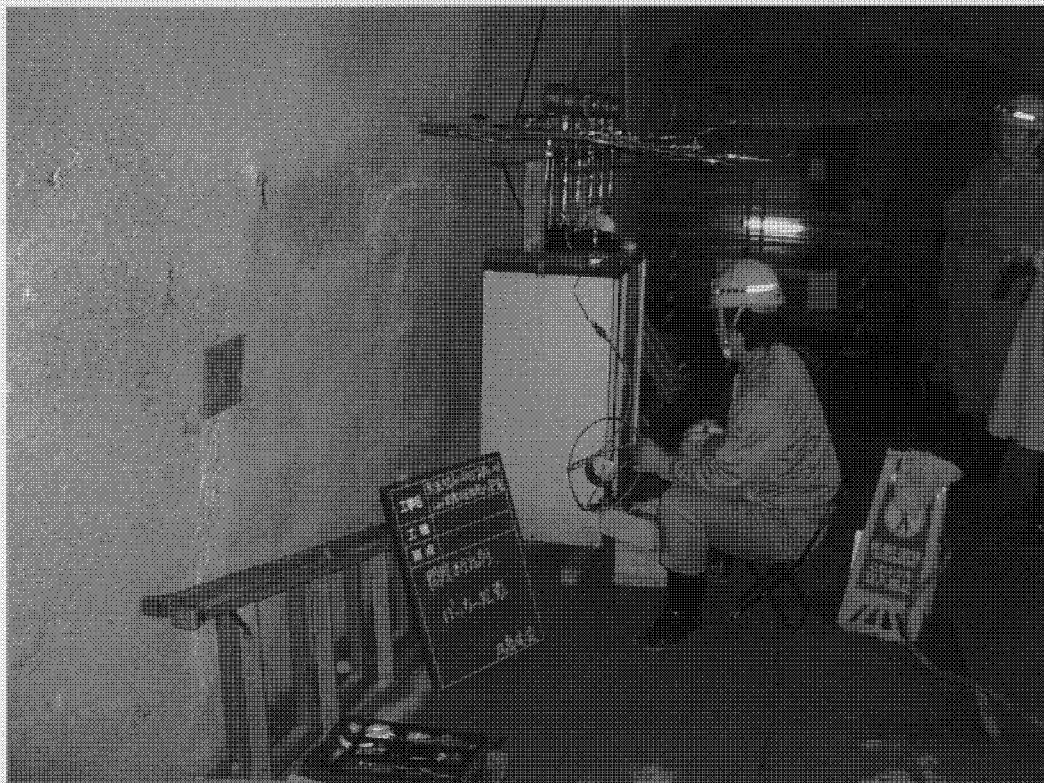


写真4 パッカー拡張

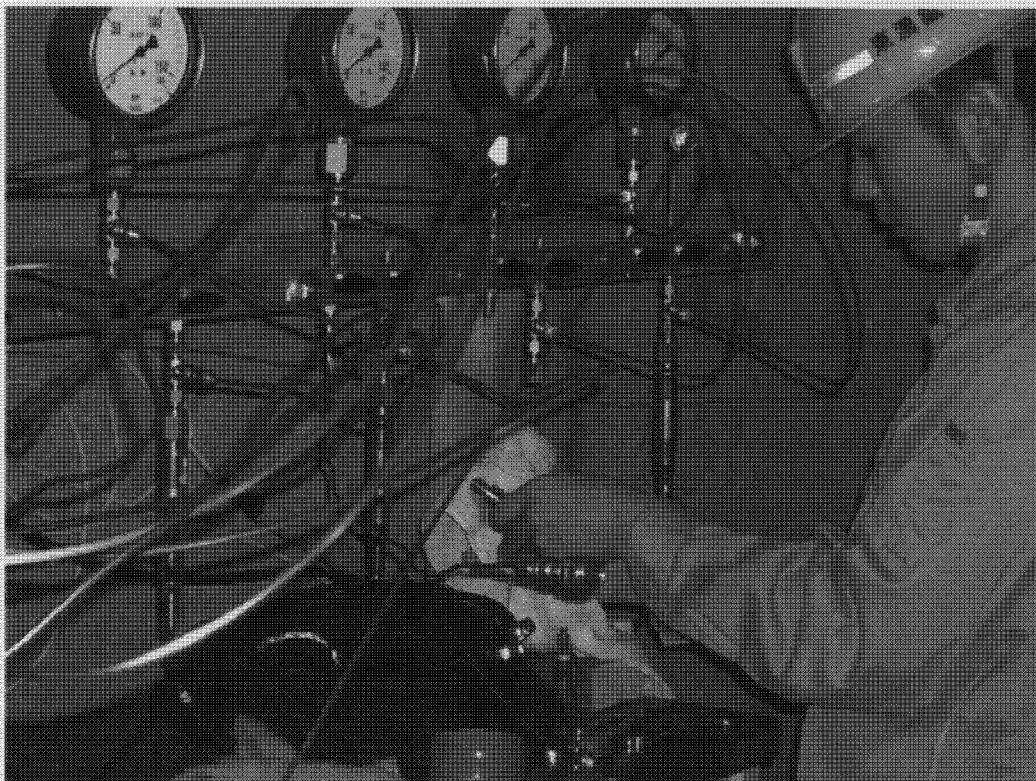


写真5 配管組立

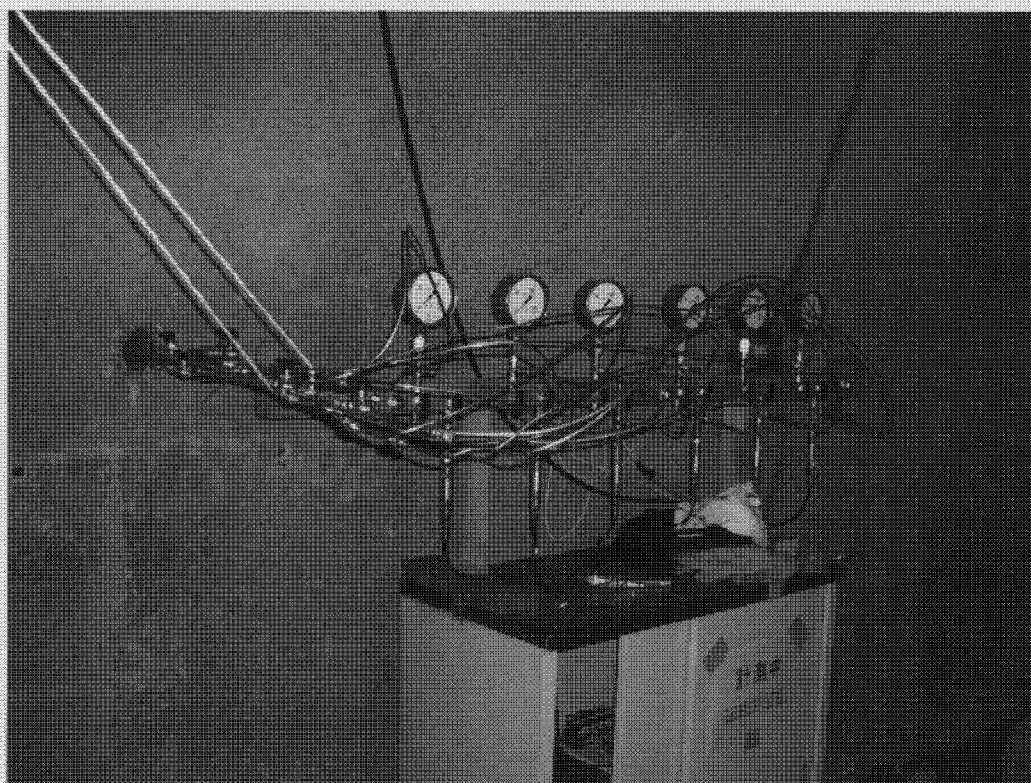


写真6 配管(全景)



写真7 パッカー遮水性確認（孔口のリーク）



写真8 透水性評価試験



写真9 間隙水圧計測



写真10 パッカー回収（表面に砂質分付着）