

JNC TJ7440 2003-001

東濃鉱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)

平成 15 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大字村松 4-49  
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,Ibaragi-ken,319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2003

JNC TJ7440 2003-001

**東濃鉱山における連續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)**

平成 15 年 3 月

**鹿島建設株式会社**

2003年3月

## 東濃鉱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)

戸井田 克\* 須山 泰宏\* 名児耶 薫\* 渥美 博行\*

### 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の現場計測手法の開発として、これまで岩盤の含水量分布の計測方法である TDR (Time Domain Reflectometry) 法の検討を行ってきた。この TDR 法に基づいたパッカ式プローブを製作し、昨年度は、東濃鉱山において、原位置適用試験を実施している。一方、近年実用化されつつある連続波レーダーは、堆積岩においても従来のレーダーに比べ透過度が大きく、電磁波速度構造から求められる含水量分布から不飽和領域の面的分布を把握できる特長を有している。

本件は、TDR 法の原位置計測結果を評価するための比誘電率等に関する情報を得るために、第 2 計測坑道において、孔間連続波レーダー計測と NATM 坑道において地表連続波レーダー計測を実施したものである。

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、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整合的であった。よって、絶対値の補正を行うことにより、孔間連続波レーダーを TDR 法の孔間におけるデータ補間に適用することは、十分に可能であると考えられる。

②地表連続波レーダーを適用することにより、坑壁から岩盤内部の比誘電率に関する情報を取得することができた。このことから、地表連続波レーダーを用いて不飽和領域に資する情報を取得することは、可能であると考えられる。

---

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, 2003

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

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

**Abstract**

The TDR ( Time Domain Reflectometry) wave analysis method has been developed for measuring unsaturated zones by TGC in Tono mine. The new packer type probe of the TDR wave analysis method has already been made by TGC. But it is impossible for the TDR wave analysis method to estimate distribution of unsaturated zones between boreholes. In the meantime, to overcome the reached penetration depth of the sedimentary rock, the ground penetrating radar with modulating frequency was developed and could have the ability of interpretation of water content distribution from electromagnetic velocity.

This report summarizes 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.
- 2) 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.

---

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

# 東濃鉱山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測

## 報告書目次

1. 業務概要.....	1-1
1.1 業務件名.....	1-1
1.2 目的.....	1-1
1.3 計測場所.....	1-1
1.4 実施数量.....	1-2
1.5 実施期間.....	1-2
1.6 実施機関.....	1-2
2. 業務内容.....	2-1
2.1 機器の搬入/搬出および準備 .....	2-1
2.2 第2計測坑道における孔間連続波レーダー計測 .....	2-1
2.3 NATM坑道における地表連続波レーダー計測 .....	2-2
2.4 連続波レーダー計測結果の解析 .....	2-2
3. 第2計測坑道における孔間連続波レーダー計測（電磁波トモグラフィ） .....	3-1
3.1 ステップ式連続波レーダーの測定原理.....	3-1
3.1.1 従来型探査装置（パルス・レーダー）との相違点 .....	3-1
3.1.2 パルス圧縮の原理.....	3-2
3.1.3 測定原理.....	3-3
3.2 測定方法.....	3-5
3.3 伝搬時間（走時）の読み取り .....	3-7
3.4 トモグラフィ解析方法 .....	3-13
3.4.1 逆投影法（BPT法） .....	3-14
3.4.2 同時反復法（SIRT法） .....	3-15
3.4.3 BPT法とSIRT法の相違点.....	3-16

3.4.4 データの品質管理.....	3-16
3.4.5 電磁波速度 .....	3-18
3.5 解析結果.....	3-19
3.6 考察.....	3-24
3.6.1 既存情報 <sup>3)</sup> .....	3-24
3.6.2 既存情報との比較.....	3-26
4. NATM 坑道における地表連続波レーダー計測 .....	4-1
4.1 測定方法.....	4-1
4.2 解析方法.....	4-4
4.3 解析結果.....	4-7
4.4 考察.....	4-17
5. まとめ .....	5-1

## 東濃鉱山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測

### 表目次

表 2-1 試験孔の概要 .....	2-2
表 3-1 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） ...	3-5
表 3-2 走時読み取り結果（その1） .....	3-10
表 3-3 走時読み取り結果（その2） .....	3-11
表 3-4 走時読み取り結果（その3） .....	3-12
表 3-5 同じ坑壁からの距離の伝搬時間、伝搬速度、比誘電率.....	3-20
表 4-1 地表連続波レーダー使用機器一覧（ステップ式連続波レーダー） .....	4-1
表 4-2 測定位置一覧 .....	4-4

## 東濃鉱山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測

### 図目次

図 1-1 計測場所 .....	1-1
図 2-1 孔間レーダー計測方法.....	2-1
図 2-2 地表レーダー計測方法.....	2-2
図 3-1 送信信号の比較 .....	3-1
図 3-2 ステップ式周波数掃引方法.....	3-2
図 3-3 電磁波トモグラフィ測定装置の動作原理.....	3-4
図 3-4 電磁波の伝搬経路 .....	3-6
図 3-5 トモグラフィ波線図.....	3-7
図 3-6 逆フーリエ変換後の波形.....	3-8
図 3-7 包絡線波形 .....	3-9
図 3-8 伝搬距離－伝搬時間プロット.....	3-13
図 3-9 トモグラフィ解析の流れ.....	3-14
図 3-10 解析方法概念図 .....	3-15
図 3-11 トレース番号ごとの電磁波速度分布.....	3-19
図 3-12 トレース番号ごとの比誘電率分布.....	3-20
図 3-13 同じ坑壁からの距離の伝搬速度分布.....	3-21
図 3-14 同じ坑壁からの距離の比誘電率分布.....	3-21
図 3-15 電磁波速度分布図 .....	3-22
図 3-16 比誘電率分布図 .....	3-23
図 3-17 01SI-10孔におけるTDR法測定結果 <sup>3)</sup> （上段：プローブ15、下段：プローブ16） .....	3-25
図 3-18 孔間レーダーのトモグラフィ解析結果と既存情報との比較結果（プローブ15） .....	3-26
図 3-19 孔間レーダーのトモグラフィ解析結果と既存情報との比較結果（プローブ16） .....	3-27
図 4-1 NATM坑道測定位置図 .....	4-3

図 4-2 連続波レーダーの解析フロー.....	4-5
図 4-3 WL4 位置でのプロファイルとワイドアングル波形の対比 .....	4-6
図 4-4 WR 1 速度解析結果.....	4-7
図 4-5 WR 2 速度解析結果.....	4-8
図 4-6 WR 3 速度解析結果.....	4-9
図 4-7 WR 4 速度解析結果.....	4-10
図 4-8 WR 5 速度解析結果.....	4-11
図 4-9 WL 1 速度解析結果.....	4-12
図 4-10 WL 2 速度解析結果 .....	4-13
図 4-11 WL 3 速度解析結果 .....	4-14
図 4-12 WL 4 速度解析結果 .....	4-15
図 4-13 WL 5 速度解析結果 .....	4-16
図 4-14 NATM 坑道計測の解析結果 .....	4-18

(巻末資料)

- ・ 孔間レーダーオリジナル波形
- ・ 孔間レーダー包絡線波形
- ・ 対話型速度解析画面
- ・ 現場状況写真

## 1. 業務概要

### 1.1 業務件名

東濃鉱山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測

### 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の現場計測手法の開発として、これまで岩盤の含水量分布の計測方法である TDR (Time Domain Reflectometry) 法の検討を行ってきた。この TDR 法に基づいたパッカ式プローブを製作し、昨年度は、東濃鉱山において、原位置適用試験を実施している。一方、近年実用化されつつある連続波レーダーは、堆積岩においても従来のレーダーに比べ透過度が大きく、電磁波速度構造から求められる含水量分布から不飽和領域の面的分布を把握できる特長を有している。

本件は、TDR 法の原位置計測結果を評価するための比誘電率等に関する情報を得るために、既に TDR 法の計測を実施している第 2 計測坑道と今後実施予定の NATM 坑道において連続波レーダーによる計測を実施し、その計測結果を取りまとめたものである。

### 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（図 1-1 参照）

岐阜県土岐市泉町河合字賤洞 1221-8

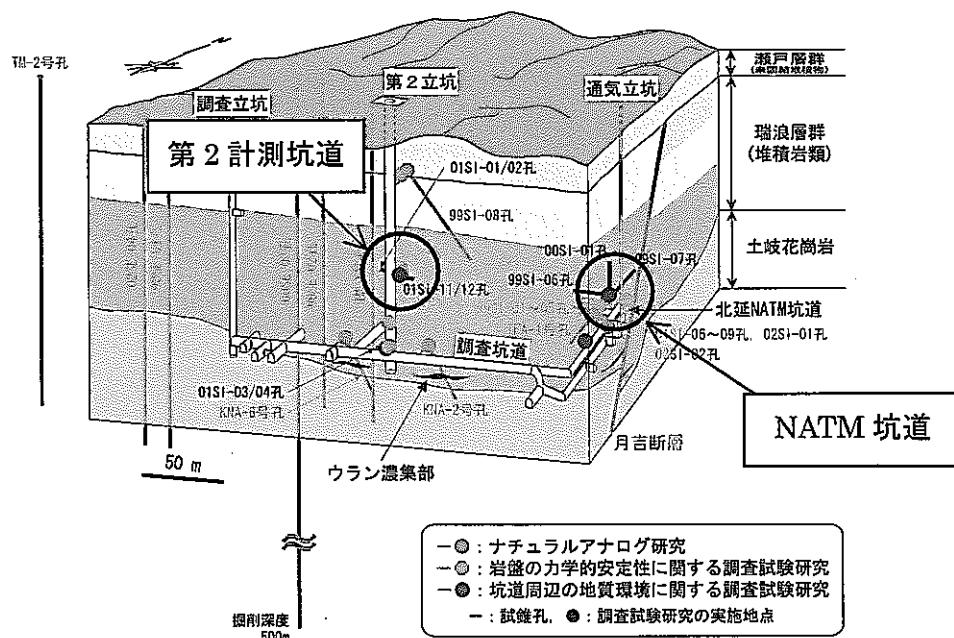


図 1-1 計測場所

#### **1.4 実施数量**

第2計測坑道における孔間連続波レーダー計測

測定数：120 トレス

トモグラフィ解析：1断面

NATM 坑道における地表連続波レーダー計測

プロファイル測定：2測線（R；10.7m、L；10.2m、各0.1m間隔）

ワイドアングル測定：10箇所（R；5箇所、L；5箇所）

#### **1.5 実施期間**

契約期間 平成14年11月25日～平成15年3月14日

現場計測期間 平成15年1月6日～平成15年1月10日

#### **1.6 実施機関**

鹿島建設株式会社 技術研究所 土木技術研究部

〒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、調査立坑および第2立坑ケージを使用し、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。ケージ操作は、教育を受けた指定鉱山労働者により行った。

調査立坑ケージ：最大積載重量：2.0トン、最大搭乗員数：10名

第2立坑ケージ：最大積載重量：1.8トン

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 第2計測坑道における孔間連続波レーダー計測

第2計測坑道側壁に掘削した2本のHQサイズ( $\phi 98\text{mm}$ )のボーリング孔01SI-10と01SI-11を利用し、両孔間で連続波レーダー計測を実施した。計測方法の概要を図2-1に示す。発信/受信ゾンデを計測区間ににおいて孔壁より3.5mまでは25cm間隔、それ以上は平行パスでの計測ができず、予備的な斜めパスでの計測となるため、50cm間隔で移動させ、各々における計測位置、受信波形、電磁波速度、電磁波振幅を記録した。

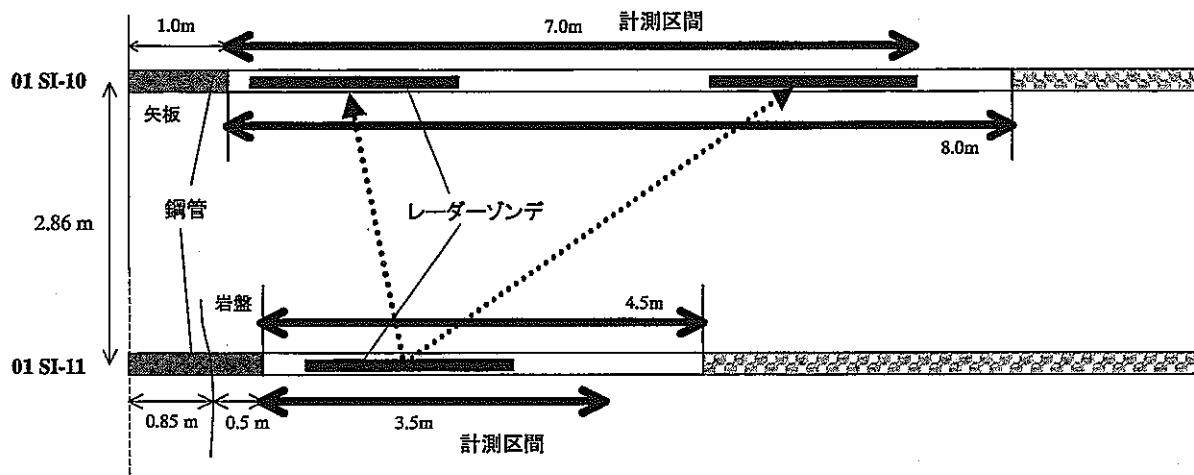


図 2-1 孔間レーダー計測方法

計測対象となるボーリング孔は土岐夾炭層上部層の泥質凝灰岩中に掘削されており、01SI-10孔はコンクリート矢板の上から、01SI-11孔は坑道壁面の露岩部から直接掘削されている。具体的な計測区間は、表2-1に示す試錐孔の概要（昨年度実施されたボアホール観察の試験結果等）と原位置での閉塞状況確認結果から、01SI-10孔ではケーシングパイプの端から断層による破碎物堆積が見られる手前までの1.00m～7.00m、01SI-11孔では

ケーシングパイプの先端からスライムの堆積箇所の手前までの 1.00m~3.50m とし、発信周波数帯域は 1 ~ 80MHz とした。計測には試錐孔内のガイドとして塩ビ管を用いた。

表 2-1 試験孔の概要

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

\* ポアホールカメラによる孔壁観察結果から判断された計測区間

### 2.3 NATM 坑道における地表連続波レーダー計測

NATM 坑道側壁において地表連続波レーダー計測を実施した。計測方法は図 2-2 に示すプロファイル法とワイドアンダル法の 2 種類で、各計測における計測位置、計測波形を記録した。プロファイル法による計測は坑道の左右側壁に沿って 1 測線（10cm ピッチ）ずつ実施した。ワイドアンダル法はプロファイル法により不飽和が生じていると判断された位置と飽和していると判断された位置の各々 1 箇所において実施した。発信周波数帯域は 50 ~ 500MHz とした。

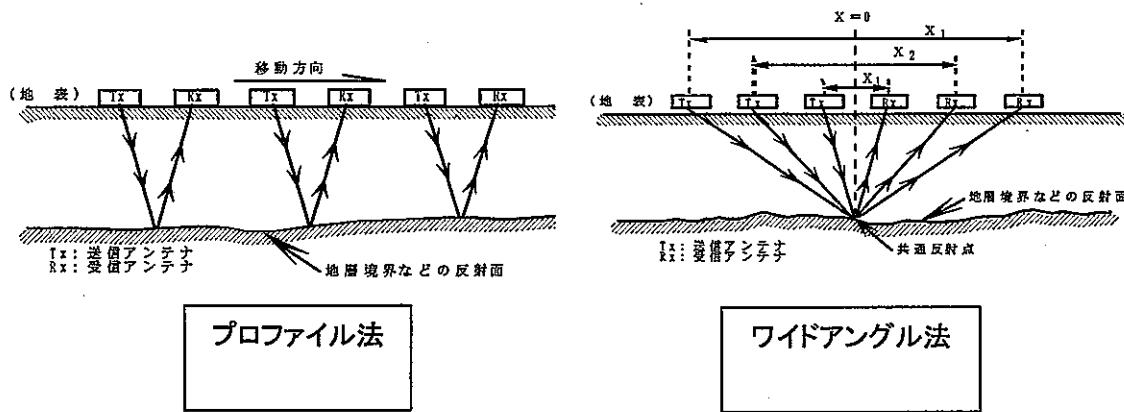


図 2-2 地表レーダー計測方法

### 2.4 連続波レーダー計測結果の解析

第 2 計測坑道で実施した孔間連続波レーダー計測結果に基づき、電磁波速度、比誘電率をまとめた。

NATM 坑道側壁で実施した地表連続波レーダーのプロファイル法計測結果に対して波形処理を行った。ワイドアングル法計測結果に対しては深度方向の速度解析を行い、速度解析結果を基に比誘電率分布を計算した。

### 3. 第2計測坑道における孔間連続波レーダー計測（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

##### 3.1.1 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(a)に示すパルス波であり、パワーを上げるためにパルス波の振幅を大きくすれば良い。このことは瞬間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。

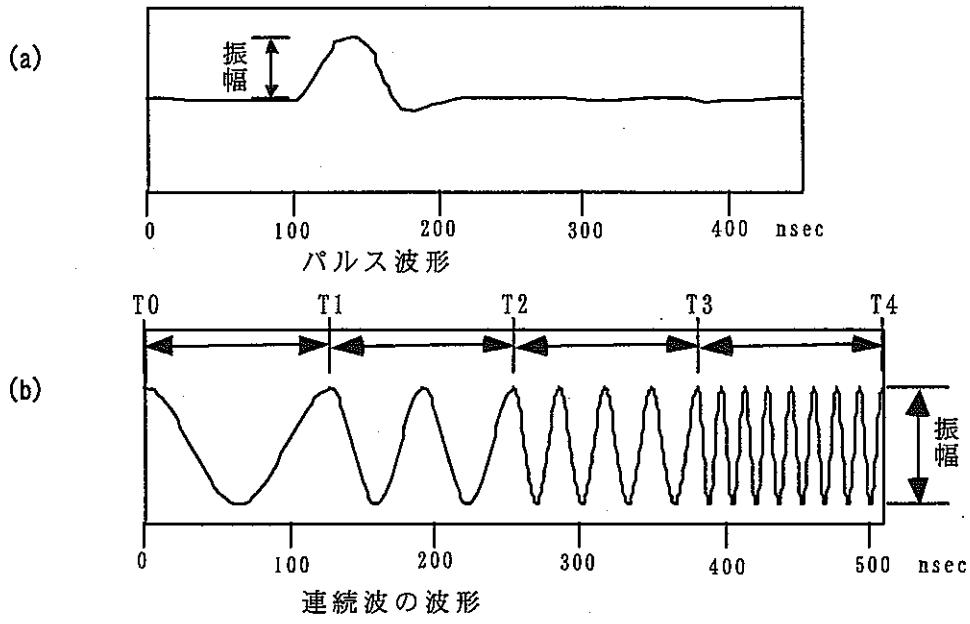


図 3-1 送信信号の比較

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図3-1(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うと都合が良いので、送信周波数は図 3-2 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）。

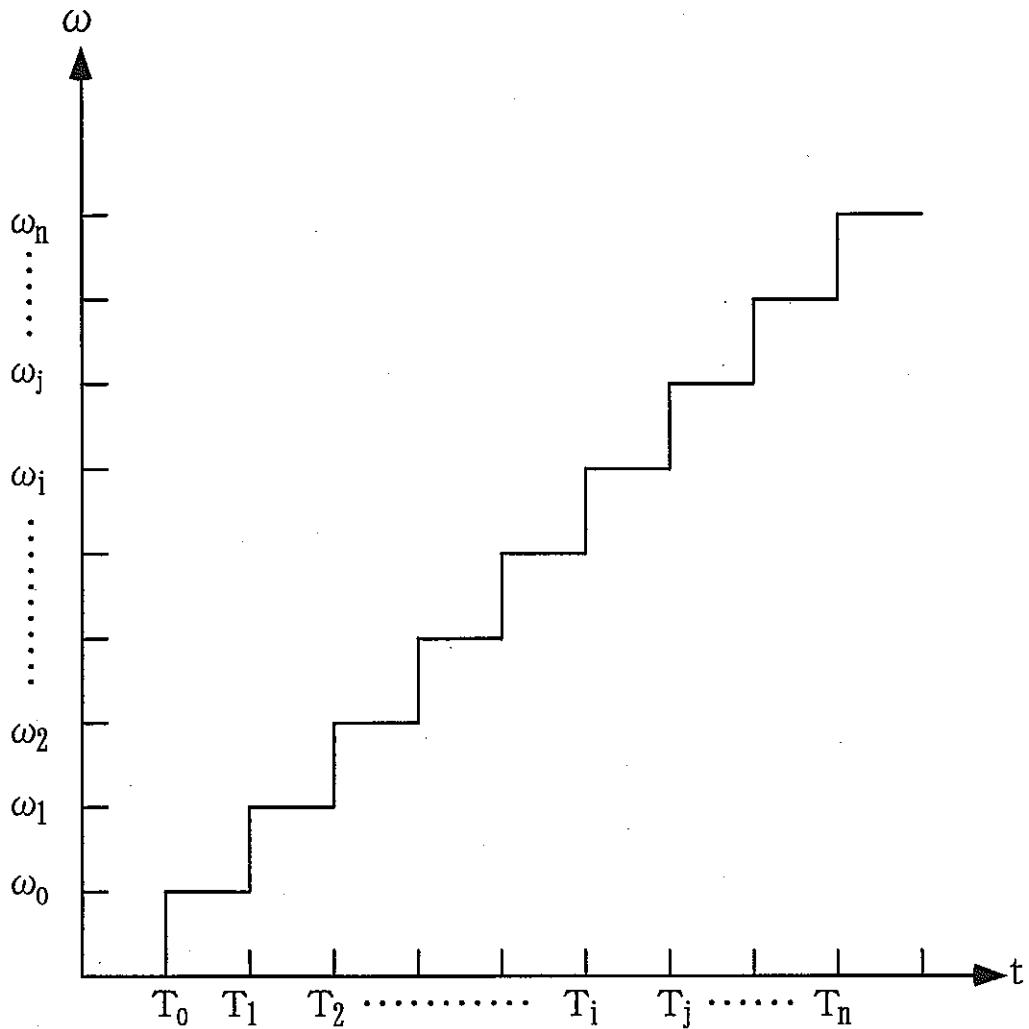


図 3-2 ステップ式周波数掃引方法

### 3.1.2 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み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  $\tau$  及び  $r$ 、電磁波の減衰定数を  $\alpha$  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、

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

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。

### 3.1.3 測定原理

連続波レーダーの送信方式は、VCO (Voltage Controlled Oscillator, 電圧制御発振器) 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 3-3)。

VCOは、11.7~90.7MHz 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級プッシュプルという増幅の方式で、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。

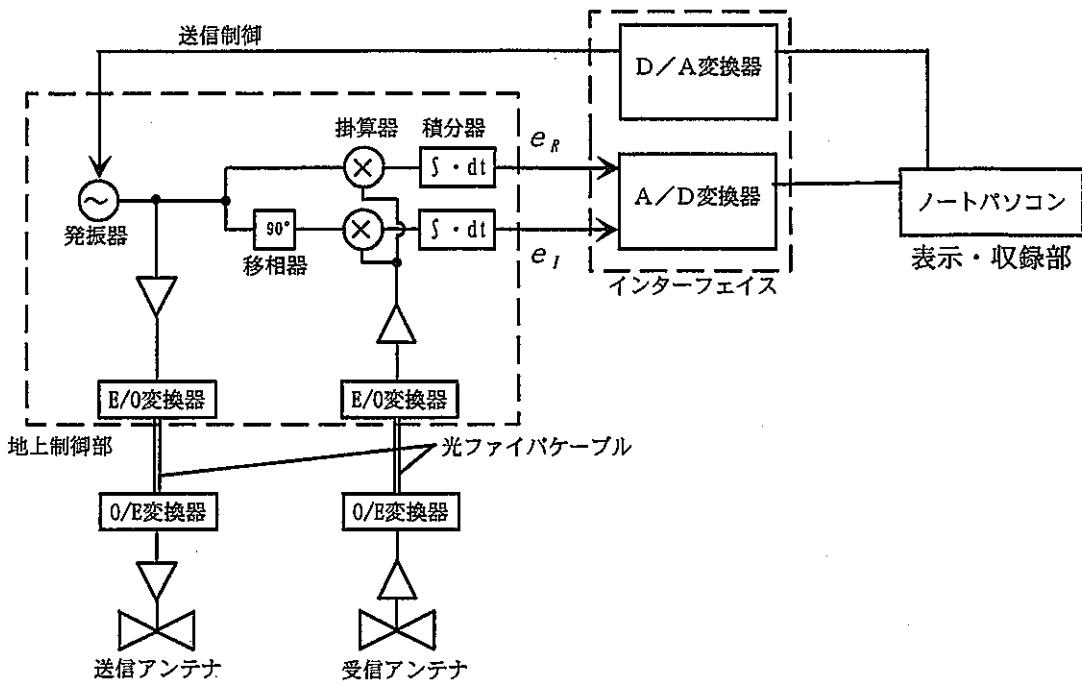


図 3-3 電磁波トモグラフィ測定装置の動作原理

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 11.7~90.7MHz 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、

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

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

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  $\theta$  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  $\tau$  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、 $\theta$  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 3-1 に使用測定機器の主な仕様を示す。

表 3-1 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 (201 ステップ) 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 $\phi$ 60mm
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

01SI-11 孔及び 01SI-10 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する。1つの受信点に対して送信ゾンデを受信点の深度3.5~7m区間は0.5m間隔、受信点の深度1~3.5m区間は0.25m間隔で移動させ、測定を繰り返す（図3-4）。1つの受信点による一連の測定が終了した後、受信深度区間内で受信点の深度3.5~7m区間は0.5m間隔、受信点の深度1~3.5m区間は0.25m間隔に受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。孔内において孔壁の崩壊が生じているため、送信孔と受信孔を入れ換えた測定は、実施していない。測定した全ての波線を図3-5に示す。なお、水平距離1mまでは鋼製のケーシングがあるため、電磁波による測定を実施することができない。

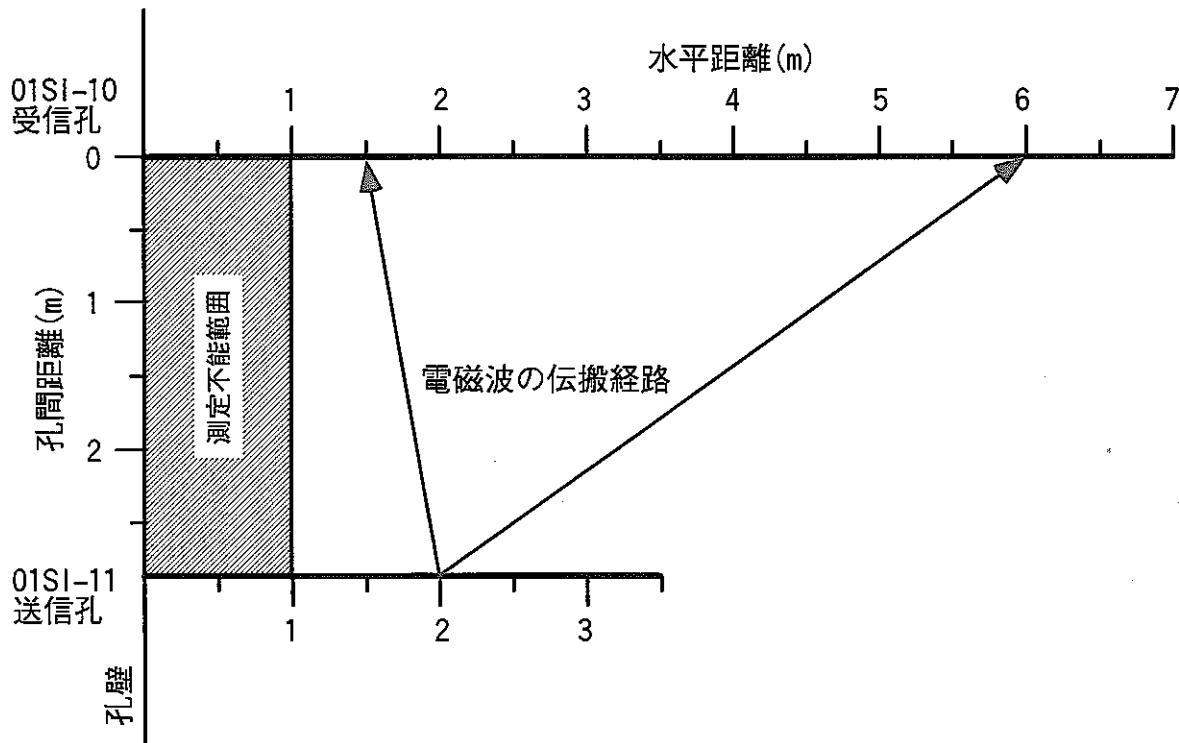


図3-4 電磁波の伝搬経路

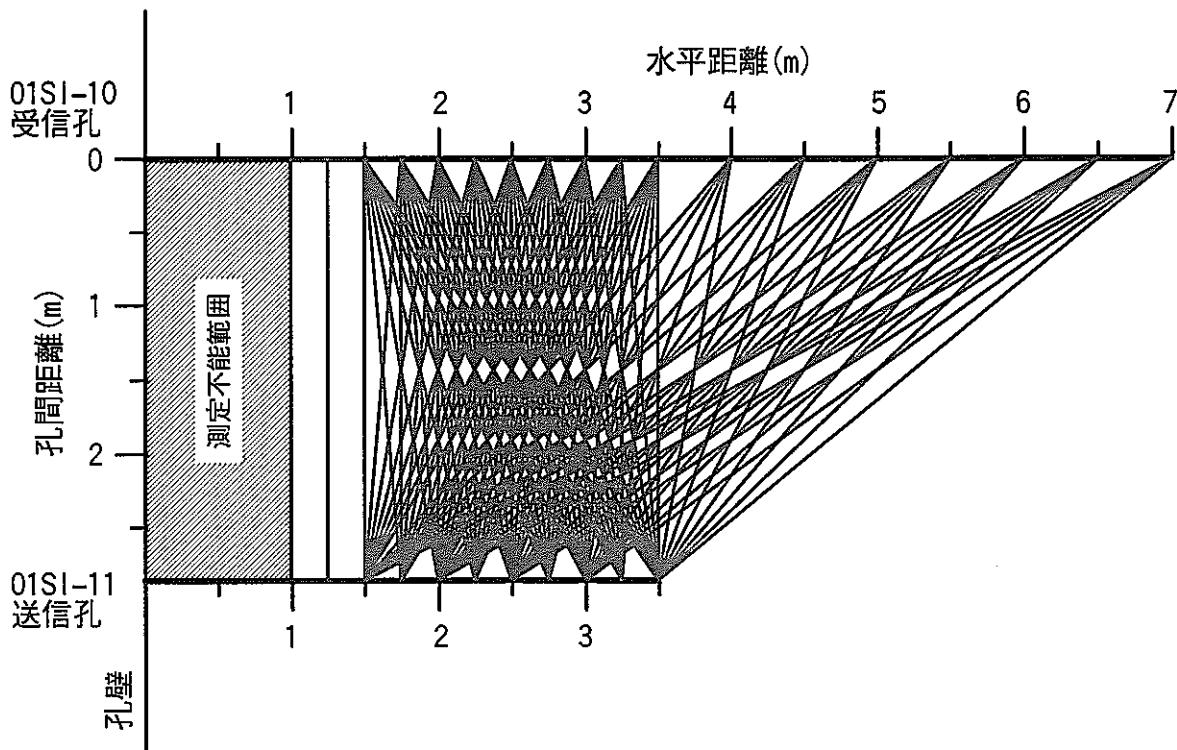


図 3-5 トモグラフィ波線図

### 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 3-6 に示す。表 3-2～表 3-4 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 15～55MHz 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 3-2～表 3-4 参照）。10MHz ないし 15MHz 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）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  $E_{\text{env}}(t)$  は、Hilbert 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、Fourier 変換を用いて周波数領域で計算を行った後、逆 Fourier 変換により時間領域の波形に戻し実際の計算を行った。Hilbert 変換を用いて計算した包絡線波形の例を図 3-7 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。

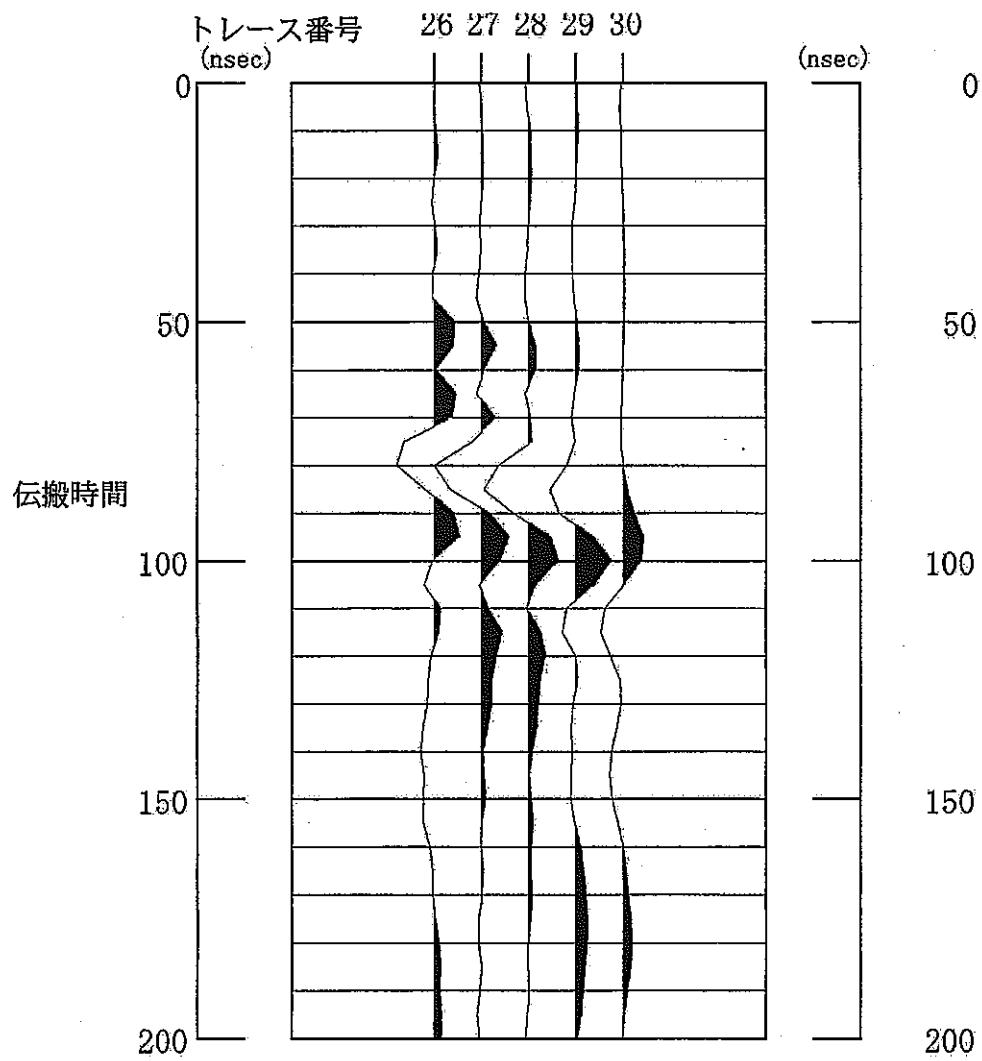


図 3-6 逆フーリエ変換後の波形

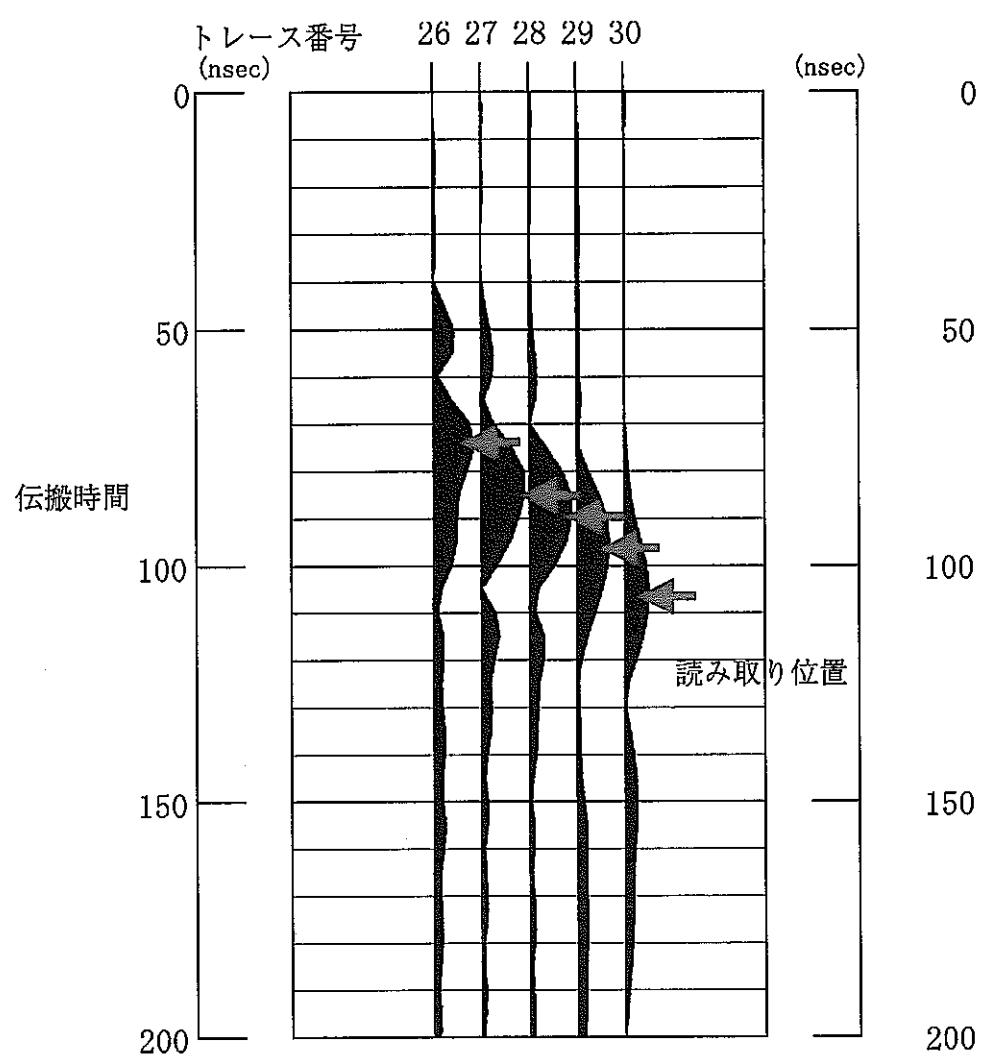


図 3-7 包絡線波形

表 3-2 走時読み取り結果（その1）

トレース番号	送信水平距離(m) 01SI-11(孔)	受信水平距離(m) 01SI-10(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
1	3.50	7.00	93.922	15	55
2	3.00	7.00	99.187	15	55
3	2.50	7.00	100.153	20	40
4	2.00	7.00	120.454	15	25
5	1.50	7.00	121.893	15	25
6	3.50	6.50	114.178	15	30
7	3.00	6.50	95.875	15	55
8	2.50	6.50	95.635	15	55
9	2.00	6.50	105.546	15	20
10	1.50	6.50	126.149	15	40
11	3.50	6.00	90.981	15	45
12	3.00	6.00	112.226	15	55
13	2.50	6.00	89.903	15	20
14	2.00	6.00	116.688	15	20
15	1.50	6.00	116.196	15	20
16	3.50	5.50	87.549	15	55
17	3.00	5.50	92.005	15	55
18	2.50	5.50	103.558	30	55
19	2.00	5.50	120.892	15	55
20	1.50	5.50	123.677	15	20
21	3.50	5.00	83.926	15	55
22	3.00	5.00	87.907	15	55
23	2.50	5.00	92.105	15	55
24	2.00	5.00	104.798	25	55
25	1.50	5.00	96.077	10	25
26	3.50	4.50	74.982	15	40
27	3.00	4.50	83.692	15	55
28	2.50	4.50	87.149	15	55
29	2.00	4.50	94.376	15	55
30	1.50	4.50	104.417	15	55
31	3.50	4.00	77.876	15	55
32	3.00	4.00	80.969	15	55
33	2.50	4.00	83.524	15	55
34	2.00	4.00	89.207	15	55
35	1.50	4.00	103.504	15	55
36	3.50	3.50	75.027	15	55
37	3.25	3.50	76.757	15	55
38	3.00	3.50	78.489	15	55
39	2.75	3.50	79.752	15	55
40	2.50	3.50	81.235	15	55

表 3-3 走時読み取り結果（その2）

トレース番号	送信水平距離(m) 01SI-11(孔)	受信水平距離(m) 01SI-10(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
41	2.25	3.50	83.218	15	55
42	2.00	3.50	83.840	15	55
43	1.75	3.50	84.575	15	55
44	3.50	3.25	73.772	15	55
45	3.25	3.25	75.673	15	55
46	3.00	3.25	76.421	15	55
47	2.75	3.25	77.669	15	55
48	2.50	3.25	79.726	15	55
49	2.25	3.25	81.644	15	55
50	2.00	3.25	82.894	15	55
51	1.75	3.25	82.758	15	55
52	1.50	3.25	82.505	15	55
53	3.50	3.00	71.641	15	55
54	3.25	3.00	74.545	15	55
55	3.00	3.00	76.201	15	55
56	2.75	3.00	76.754	15	55
57	2.50	3.00	78.145	15	55
58	2.25	3.00	79.824	15	55
59	2.00	3.00	81.175	15	55
60	1.75	3.00	81.688	15	55
61	1.50	3.00	81.351	15	55
62	3.50	2.75	64.115	15	30
63	3.25	2.75	73.172	15	55
64	3.00	2.75	75.538	15	55
65	2.75	2.75	76.419	15	55
66	2.50	2.75	77.400	15	55
67	2.25	2.75	78.620	15	55
68	2.00	2.75	79.604	15	55
69	1.75	2.75	80.118	15	55
70	1.50	2.75	79.718	15	55
71	3.50	2.50	73.028	65	75
72	3.25	2.50	70.283	15	55
73	3.00	2.50	73.725	15	55
74	2.75	2.50	74.994	15	55
75	2.50	2.50	75.682	15	55
76	2.25	2.50	76.332	15	55
77	2.00	2.50	76.648	15	55
78	1.75	2.50	76.935	15	55
79	1.50	2.50	77.532	15	55
80	3.50	2.25	80.789	15	55

表 3-4 走時読み取り結果（その3）

トレース番号	送信水平距離(m) 01SI-11(孔)	受信水平距離(m) 01SI-10(孔)	走時 (nsec)	読み取り周波数(MHz)	
				開始	終了
81	3.25	2.25	73.760	15	20
82	3.00	2.25	76.167	15	20
83	2.75	2.25	76.082	15	30
84	2.50	2.25	75.714	15	30
85	2.25	2.25	78.372	15	55
86	2.00	2.25	78.412	15	55
87	1.75	2.25	78.332	15	55
88	1.50	2.25	67.560	25	55
89	3.50	2.00	84.860	25	55
90	3.25	2.00	79.682	25	55
91	3.00	2.00	77.692	25	55
92	2.75	2.00	76.409	25	55
93	2.50	2.00	75.121	15	55
94	2.25	2.00	76.445	15	50
95	2.00	2.00	79.201	15	55
96	1.75	2.00	80.030	15	55
97	1.50	2.00	75.089	15	40
98	3.50	1.75	95.696	15	45
99	3.25	1.75	108.425	15	40
100	3.00	1.75	79.352	25	75
101	2.75	1.75	74.987	25	75
102	2.50	1.75	73.420	15	55
103	2.25	1.75	76.773	15	50
104	2.00	1.75	80.967	15	55
105	1.75	1.75	74.661	15	40
106	1.50	1.75	90.727	25	55
107	3.50	1.50	112.137	15	30
108	3.25	1.50	115.150	15	30
109	3.00	1.50	106.484	20	40
110	2.75	1.50	77.919	65	75
111	2.50	1.50	76.187	65	75
112	2.25	1.50	77.490	15	55
113	2.00	1.50	58.639	15	20
114	1.75	1.50	52.596	15	20
115	1.50	1.50	51.368	15	20
116	1.25	1.25	51.417	15	55
117	1.00	1.00	45.485	20	40
118	2.00	2.00	76.328	15	20
119	1.75	1.75	91.127	10	25
120	1.50	1.50	87.600	10	25

伝搬距離に対する伝搬時間をプロットしたものを図 3-8 に示す。概ね伝搬距離に伴って伝搬時間が増大している。しかし、伝搬距離の近いところに伝搬時間が異常に短いデータがある（図 3-8 赤丸参照）。これらは、鋼製ケーシングの影響による（電磁波が、送信アンテナ→鋼製ケーシング→空気中→鋼製ケーシング→受信アンテナを伝搬したと考えられる）もので後述の 3.4 (4) に示す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。

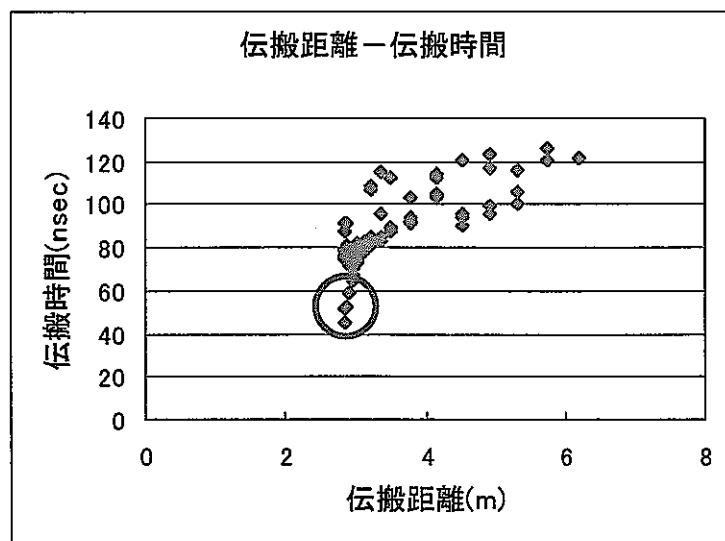


図 3-8 伝搬距離-伝搬時間プロット

### 3.4 トモグラフィ解析方法

ポーリング孔間が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、B P T 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量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 3-9 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最も実績があり、変動が少なく収束しやすい S I R T 法 (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) を用いた。以下に初期値計算で用いた B P T 法と S I R T 法について述べる。

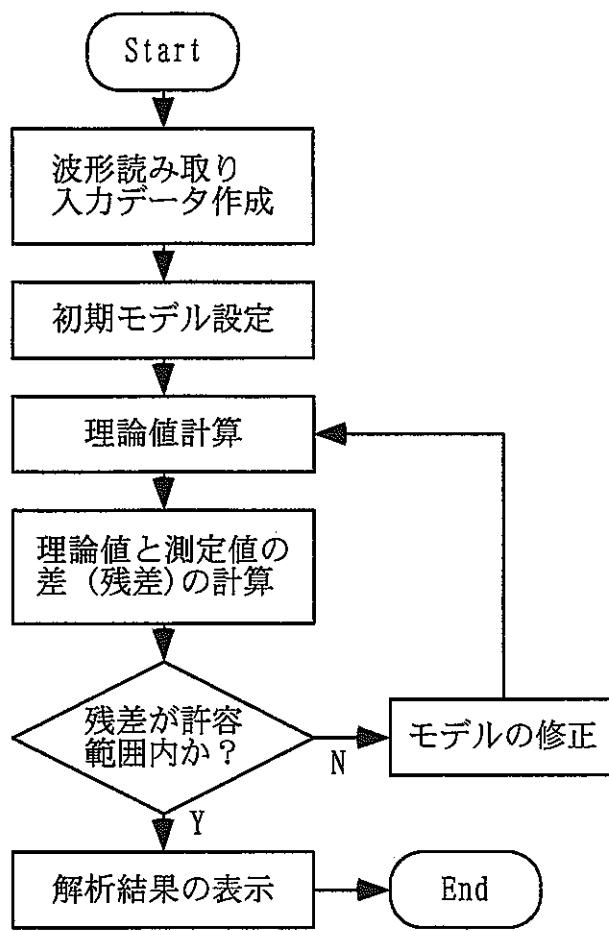


図 3-9 トモグラフィ解析の流れ

### 3.4.1 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  $\ell_{ij}$  で表すこととする。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 3-10）。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。

$$q_i = \frac{\sum_i f_i \cdot \frac{\ell_{ij}}{L_i}}{\sum_i \ell_{ij}} \quad (3.4)$$

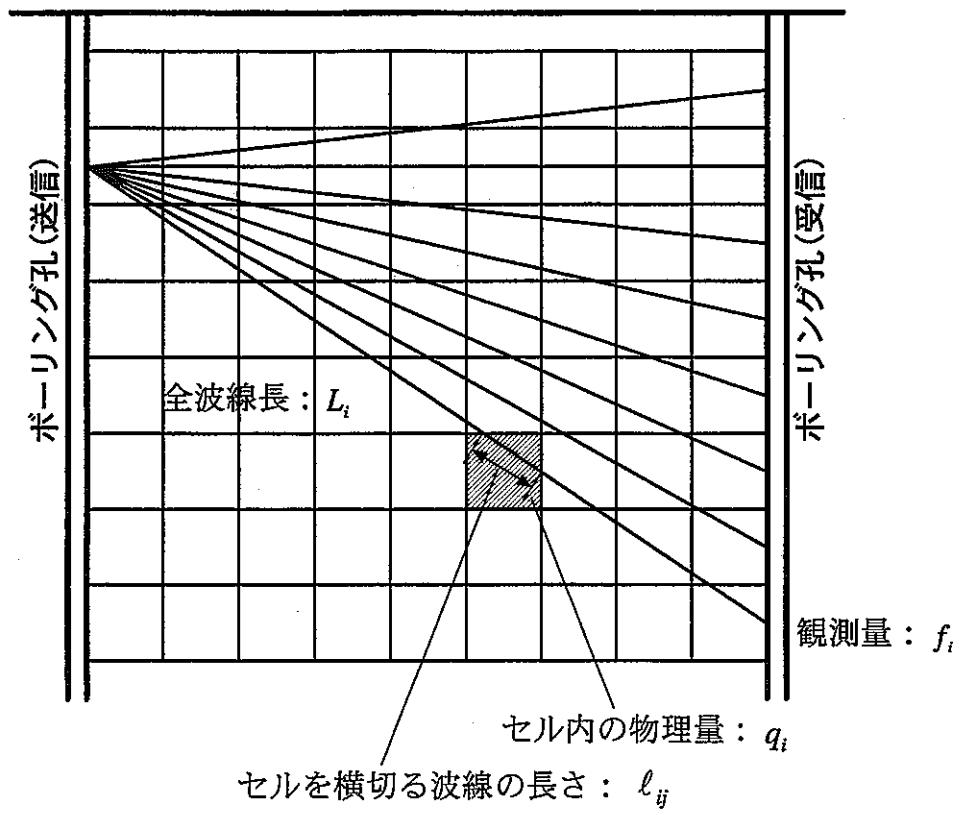


図 3-10 解析方法概念図

ここで、 $f_i \cdot \ell_{ij} / L_i$  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  $f_i$  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の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。

### 3.4.2 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。

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

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

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。

### 3.4.3 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がある。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。

### 3.4.4 データの品質管理

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、解析で求まった走時 ( $T_0$ ) 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伝搬速度 ( $V_c$ ) 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  $T_c$  が求まられる。 $T_0$  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。

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

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。 $S_i$  每 (= 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。

以上のデータ品質管理を行った後、前述のトモグラフィ解析を実施した。トモグラフィ解析のパラメータを以下に示す。

- ・物理量：スローネス
- ・孔間方向：0.0～2.86m、2.86m区間
- ・水平方向：1.0～7.0m、6.0m区間

- ・解析セル数：孔間方向 12×水平方向 24 セル=288 セル
- ・セルサイズ：孔間方向 0.238m、水平方向 0.250m
- ・使用データ数：120 データ中 102 データ（品質管理により 18 データ削除）
- ・逐次近似回数：5 回

### 3.4.5 電磁波速度

ここで結果を示す前に伝搬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  $\epsilon$ 、 $\sigma$  及び  $\mu$  とし、用いる電磁波の角周波数を  $\omega$  ( $\omega=2\pi f$ 、 $f$  は電磁波の周波数) とすると、伝搬速度  $v$  は次式で与えられる。

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

上式から明らかなとおり、伝搬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、伝搬速度も変化し、速度式に示したとおり周波数の増加に伴い伝搬速度は対数的に速くなる。また、導電率が大きくなると伝搬速度は遅くなる。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、伝搬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  $\epsilon_r$  は光速度 (=2.998×10<sup>8</sup>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はほぼ等しい。

また幾つかの電気的性質の異なる媒質から成る混合体における伝搬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、岩盤がもつ伝搬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伝搬速度は相対的に遅くなる。

### 3.5 解析結果

トレース番号ごとの電磁波速度及び比誘電率を図 3-11、図 3-12 にそれぞれ示す。トレース番号は、「3.2 測定方法」で示した計測位置関係の順番を示している（表 3-2～表 3-4 参照）。比誘電率は、(3.8)式を次式のように変形して算出した。

$$\varepsilon_r = \left( \frac{C}{\nu} \right)^2 \quad (3.9)$$

電磁波速度は、伝搬距離を伝搬時間で除して求め、比誘電率は(3.9)式を用いて計算した。電磁波速度の平均値は、0.040(m/nsec)、比誘電率の平均値は 59.1 である。トレース番号 110 以降は鋼製ケーシングの影響により、異常な値（電磁波速度または比誘電率）が検出されている。

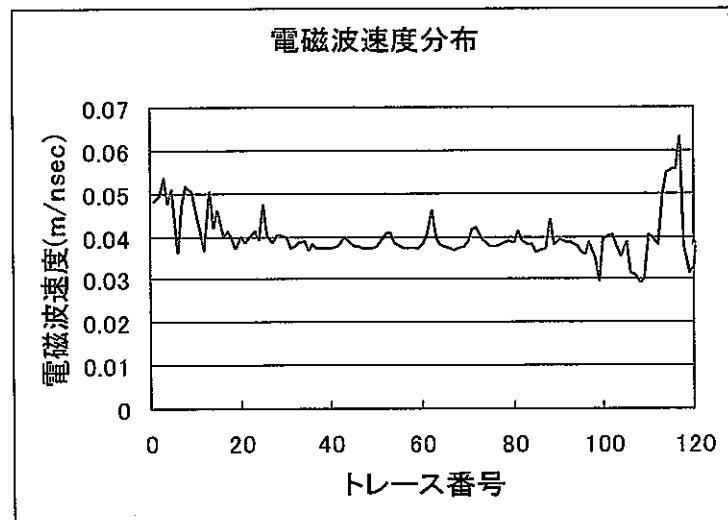


図 3-11 トレース番号ごとの電磁波速度分布

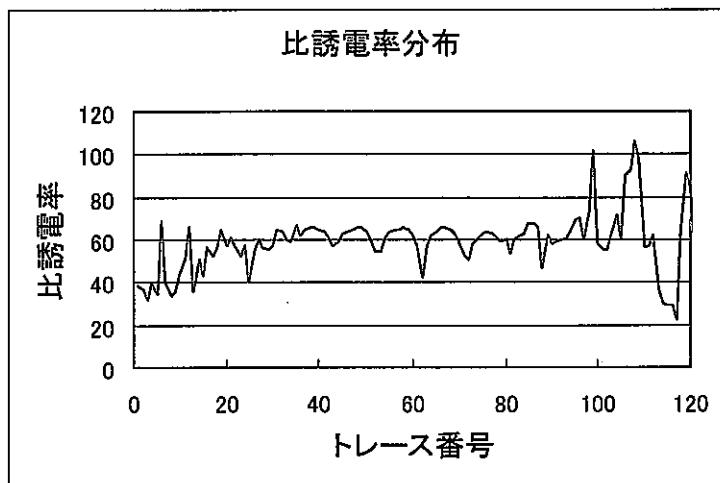


図 3-12 トレース番号ごとの比誘電率分布

表 3-5 に坑壁からの距離の同じ波線の伝搬時間、伝搬速度、比誘電率を示す。坑壁からの距離に対する伝搬速度及び比誘電率をプロットしたものを図 3-13 と図 3-14 にそれぞれ示す。

表 3-5 同じ坑壁からの距離の伝搬時間、伝搬速度、比誘電率

トレース番号	「送信」坑壁からの距離(m) O1SI-11(孔)	「受信」坑壁からの距離(m) O1SI-10(孔)	伝搬時間 (nsec)	伝搬速度 (m/nsec)	比誘電率
36	3.50	3.50	75.027	0.038120	61.854
45	3.25	3.25	75.672	0.037794	62.923
55	3.00	3.00	76.201	0.037532	63.805
65	2.75	2.75	76.419	0.037425	64.170
75	2.50	2.50	75.681	0.037790	62.938
85	2.25	2.25	78.372	0.036493	67.492
95	2.00	2.00	79.201	0.036111	68.928
105	1.75	1.75	74.661	0.038307	61.251
115	1.50	1.50	51.368	0.055676	28.995
116	1.25	1.25	51.417	0.055624	29.050
117	1.00	1.00	45.485	0.062878	22.734

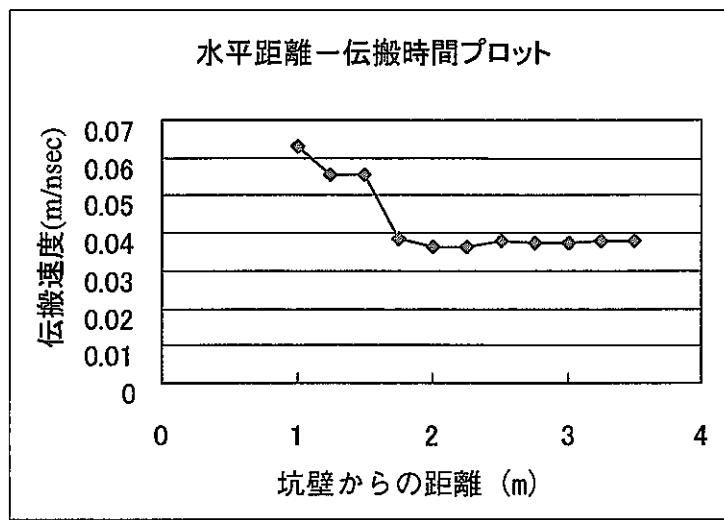


図 3-13 同じ坑壁からの距離の伝搬速度分布

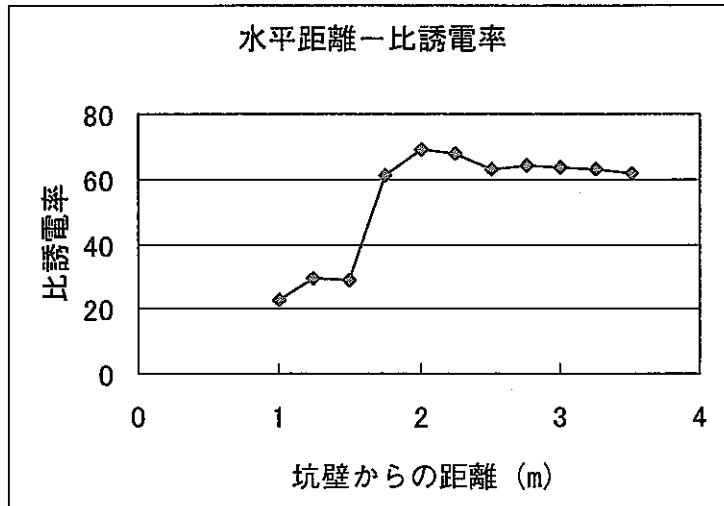


図 3-14 同じ坑壁からの距離の比誘電率分布

坑壁からの距離 1~2.0m は鋼製ケーシング及び孔間レーダーのアンテナ長の影響により、実際の岩盤の状況を表していないと考えられる。坑壁からの距離 2m と 2.25m では、最も伝搬時間が小さく（従って、比誘電率が大きく）なっており、同一岩種であると仮定した場合、最も湿潤している領域と推定される。一つの可能性として、この領域は、力学的ゆるみにより間隙が大きくなり水分量が増加し比誘電率が大きくなったと推定することができる。

図 3-15 及び図 3-16 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。01SI-10 孔の水平距離 6~6.5m は波線密度が小さいため、計算ができなかった領域である。水平距離 1.75m までは、鋼製ケーシングの影響が見られる。

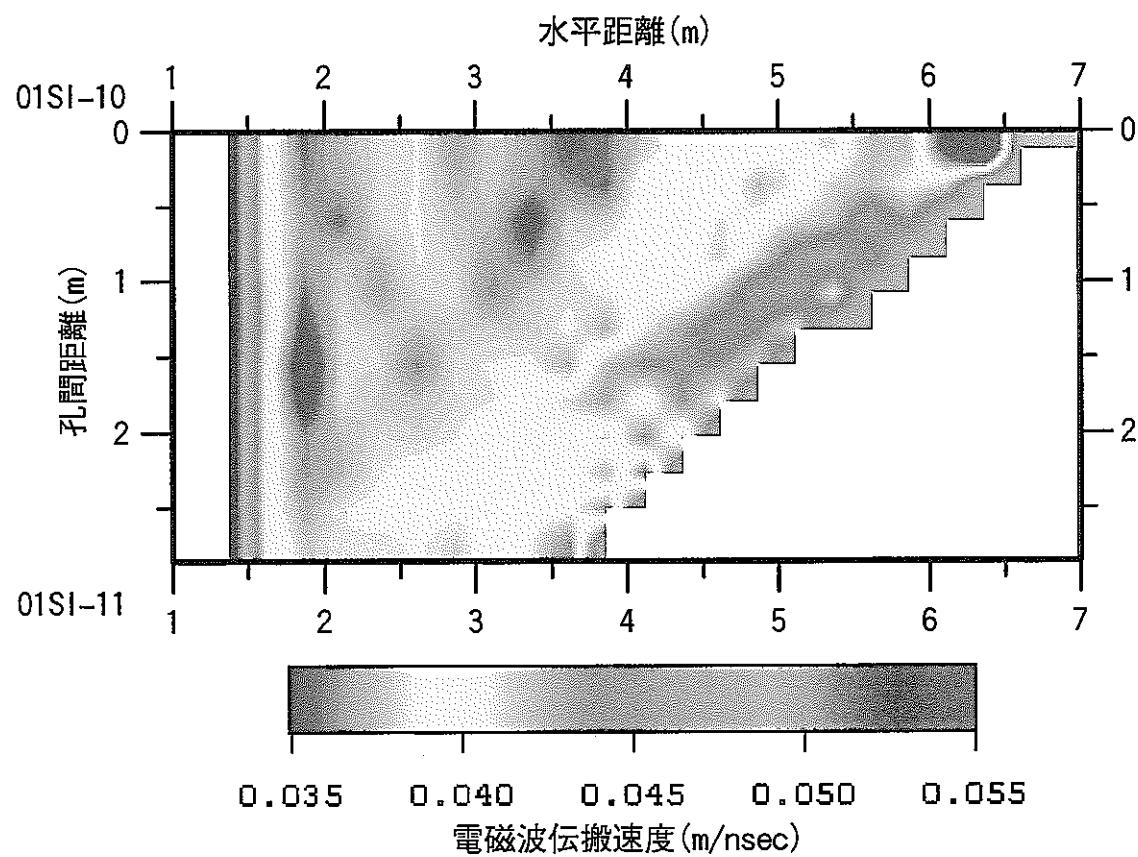


図 3-15 電磁波速度分布図

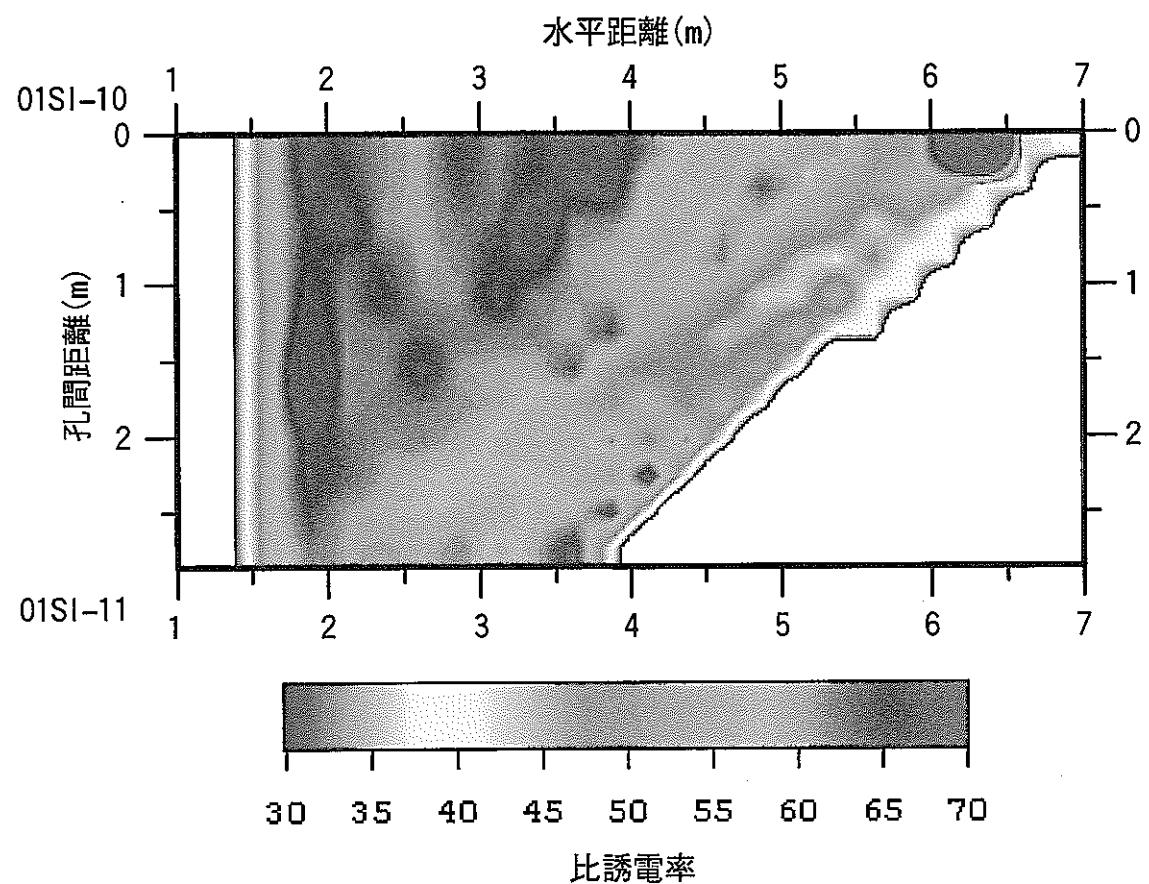


図 3-16 比誘電率分布図

### 3.6 考察

今回計測された孔間レーダーのトモグラフィ解析結果と既存情報（孔内観察結果とTDR法による比誘電率測定結果）とを比較することにより、解析結果の妥当性の確認及びTDR法の測定結果の孔間での補間の可能性に関して検討を行った。

#### 3.6.1 既存情報<sup>3)</sup>

2001年度に実施されたボアホールカメラによる試験孔の孔壁観察結果として、報告書<sup>3)</sup>には以下の記載がある。

- ・01SI-10 孔は、深度約 9.5m 以深に断層による破碎物と考えられるものが堆積しており、孔口からこの深度に至るまでは单一の地質となっている。明瞭な開口亀裂は孔壁からの深度 1.6m、1.8m、6.5m、8.3m 付近にあり、その他の深度には認められない。孔内には下端に少量の水とスライムがあるものの、それ以外の周面には付着物はほとんどないことがわかった。
- ・01SI-11 孔は、深度約 3.5m 以深にスライムが多く堆積しており、孔口からこの深度に至るまでは单一の地質となっている。明瞭な開口亀裂は認められない。孔内には下端に 01SI-10 孔より多くの水とスライムがあるが、孔壁の上半分には付着物はほとんどないことがわかった。

上記の結果より、01SI-10 孔の明瞭な開口亀裂位置と比誘電率の大きな位置（開口により水分を保有していると仮定した場合）とを比較することが一つの検討材料であることが分かる。

次に、TDR法の2種類のプローブを用いて実施された測定結果を図 3-17 に示す。同図より、比誘電率の絶対値としての比較と、相対値（変動の傾向）としての比較が可能であることが分かる。変動の傾向としての比誘電率は、2m 付近から 4m 付近まで増加し、その後減少し、再び 6m 付近で増加している。

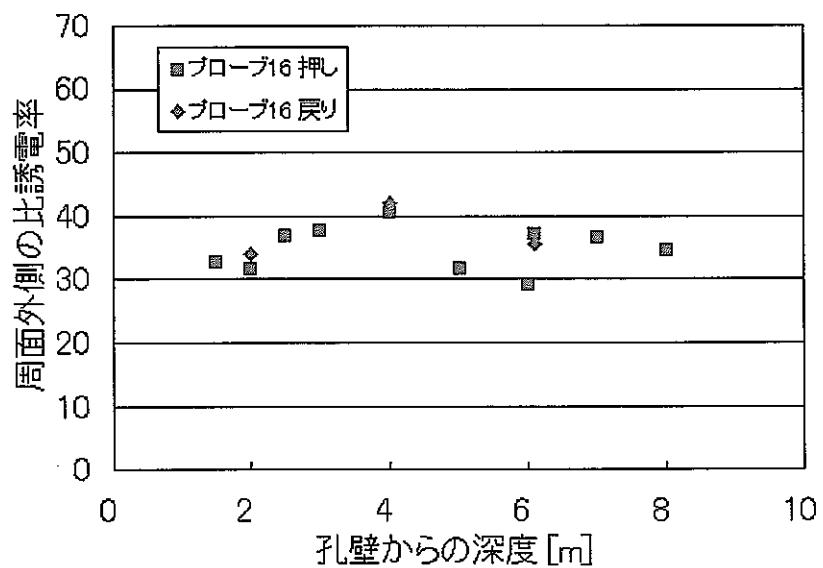
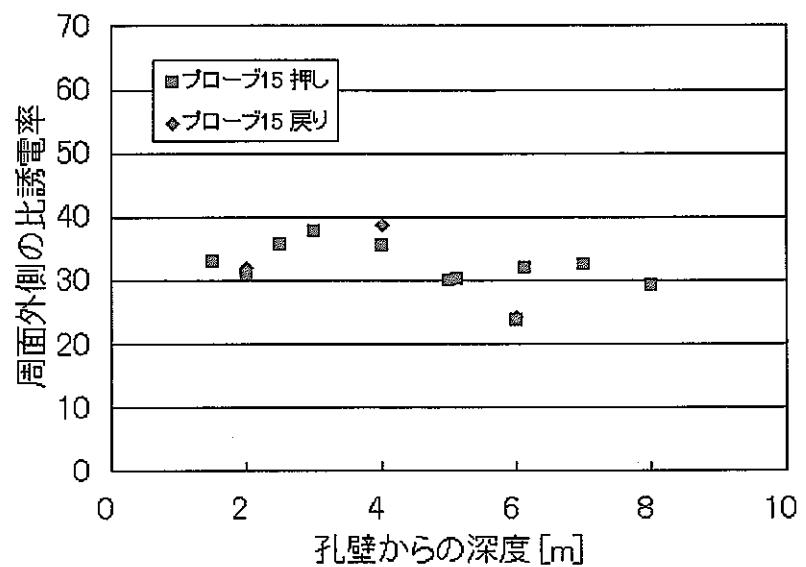


図 3-17 01SI-10 孔における TDR 法測定結果<sup>3)</sup> (上段：プローブ 15、下段：プローブ 16)

### 3.6.2 既存情報との比較

孔間レーダーのトモグラフィ解析結果と既存情報とを比較した結果を図 3-18 と図 3-19 に示す。両図とも、孔壁からの距離を合わせており、また開口亀裂の位置を矢印で示している。

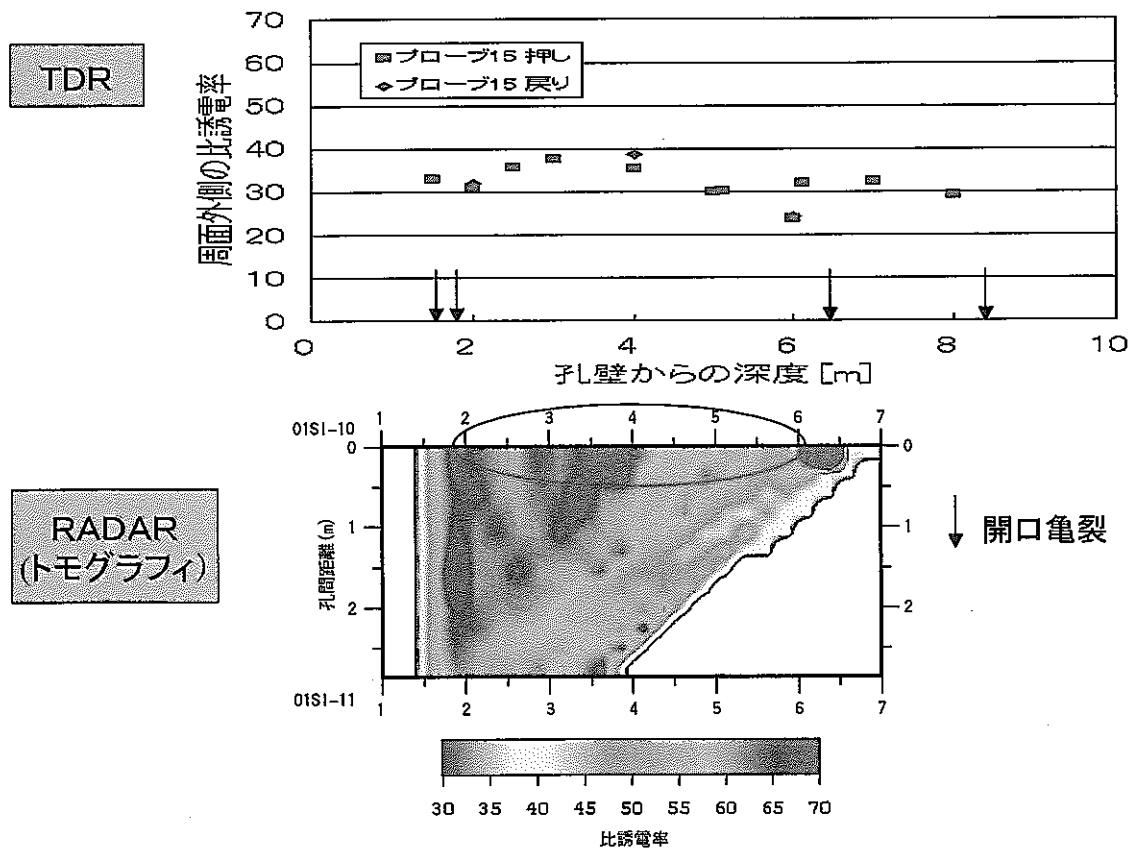


図 3-18 孔間レーダーのトモグラフィ解析結果と既存情報との比較結果（プローブ 15）

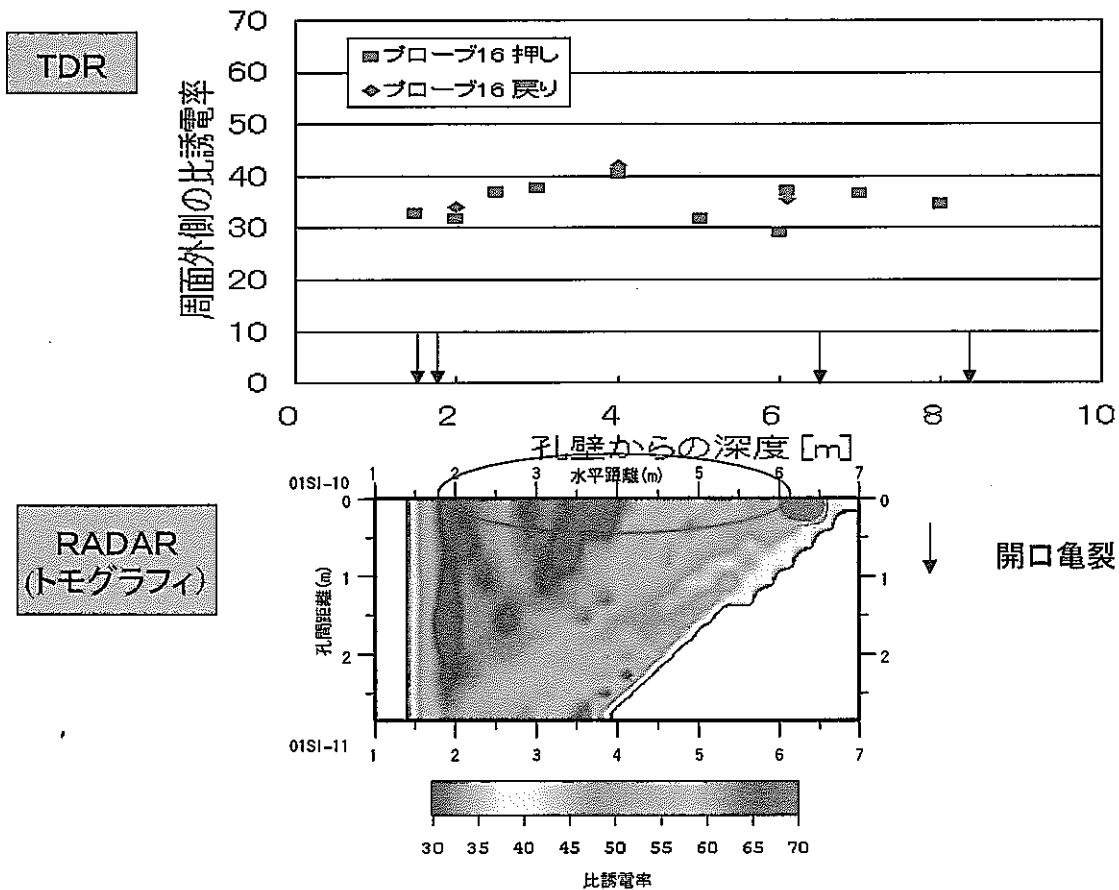


図 3-19 孔間レーダーのトモグラフィ解析結果と既存情報との比較結果（プローブ 16）

既存情報との比較結果から、以下のことが分かる。

- ①TDR 法で観察された変動の傾向（2m 付近から 4m 付近まで増加し、その後減少し、再び 6m 付近で増加）は、孔間レーダーのトモグラフィ解析結果においても十分に計測できている。
- ②開口亀裂が確認されている 4ヶ所のうち、今回の測定対象領域に含まれる 1.8m と 6.5m の位置において、孔間レーダーのトモグラフィ解析結果は、比誘電率が大きくなっている。しかし、1.8m と 6.5m 付近は、鋼製ケーシングや斜部における計測数不足による測定誤差が生じていることが想定されるため、確信度としては低い。

③TDR 法の比誘電率の絶対値と孔間レーダーのトモグラフィ解析結果の比誘電率の絶対値は一致していない。原因としては、それぞれが用いている電磁波の周波数帯の違いによる影響が考えられる(TDR 法:最高周波数 1.75GHz、孔間レーダー:1~80MHz)。この点に関しては、今後の課題の一つである。

上記の比較結果から、絶対値は異なるものの変動の傾向として、TDR 法と孔間レーダーの計測値は整合的であると言える。よって、絶対値の補正を行うことにより、孔間レーダーにて、TDR 法の測定結果を孔間で補間することは、十分に可能であると考えられる。

注) 第 1 計測坑道では過去に孔間レーダーによる計測が行われている。しかし、場所の違いにより飽和度が異なることが想定されるため、今回の測定結果との比較は実施しなかった。

#### 4. NATM 坑道における地表連続波レーダー計測

##### 4.1 測定方法

連続波レーダーの特徴などについては既に 3.1 節に示した。表 4-1 に使用測定機器の主要な仕様を示す。

表 4-1 地表連続波レーダー使用機器一覧（ステップ式連続波レーダー）

項目	仕 様
送信部	送信周波数 ; 50~500MHz (201 ステップ) 電力増幅方式 ; B 級プッシュプル
受信部	受信周波数 ; 50~500MHz 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 ; 三角形ボウタイ (ダイポール) アンテナ 寸法 ; 500 (W) × 400(D) × 160 (H) mm (突起部を含まない) 電磁遮蔽 ; フェライトタイル 重量 ; 16kg/台
ケーブル	種類 ; 光ファイバー (GI 50/125、8 芯) 長さ ; 50m
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

図 4-1 に NATM 坑道での計測位置を示す。連絡坑道からみて右側の測線を R、左側を L とした。測線の位置は、坑道に支障物が無く、かつボーリングなど既存資料のある箇所約 10m を測線として選定した（底盤からの高さ約 1.0m）。測定間隔はいずれも地表連続波レーダーの分解能（0.1m 程度）を考慮し 0.1m とした。ワイドアングル測定は、プロファイ

ル測線上でほぼ均等になるように配置したが、WR3とWR4はそれぞれボーリング孔KH-1及びKH-2の延長上、WR5は既存の弾性波トモグラフィ測線に対応する位置である。WL1とWL2は坑壁に漏水が観察された箇所を選択した(他は全て坑壁表面が乾燥している)。坑道壁面には、コンクリートによる吹付けが行われているが、吹付け厚が薄いため計測上影響ないとした。

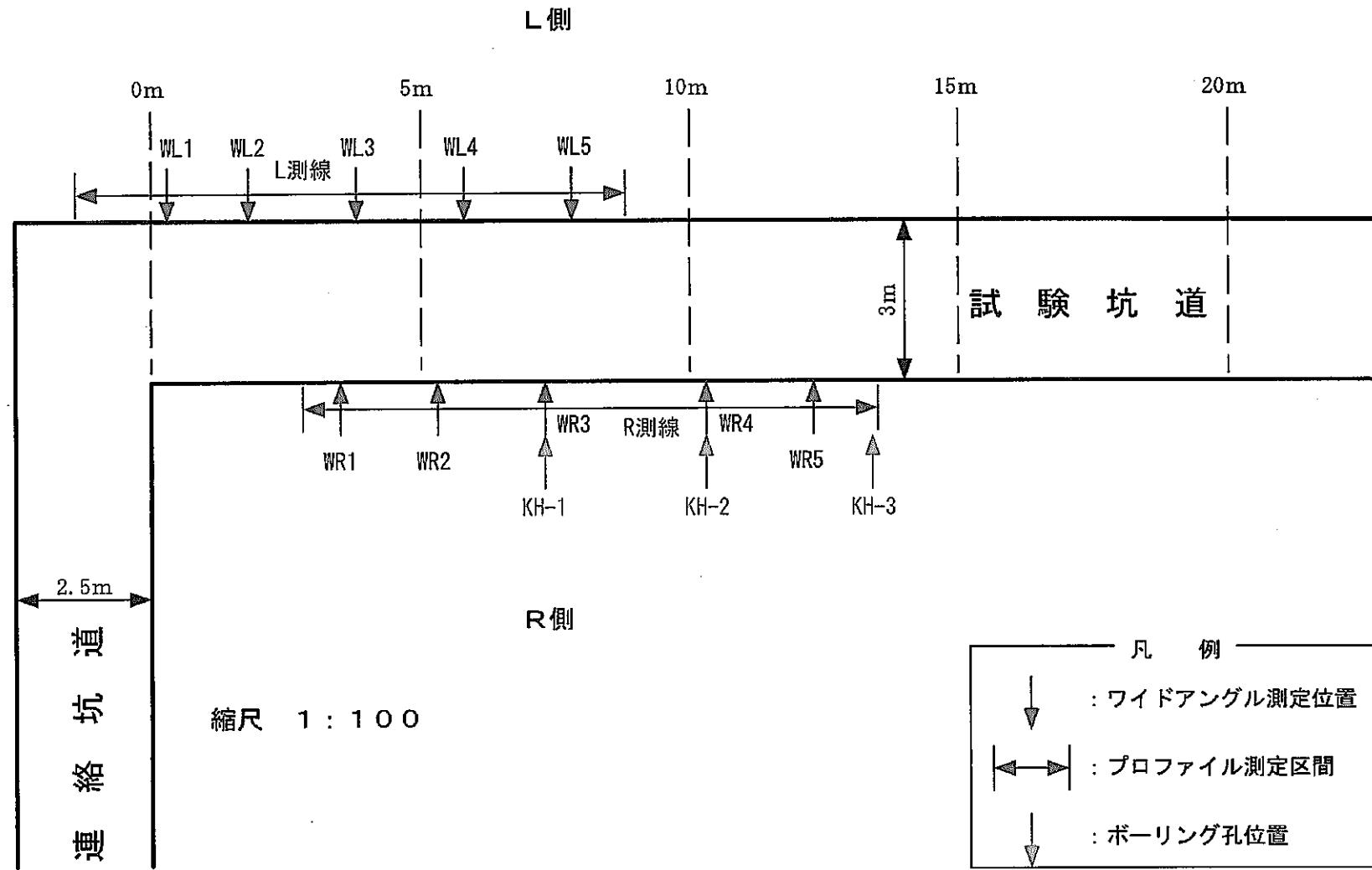


図 4-1 NATM 坑道測定位置図

プロファイル測定及びワイドアングル測定の位置を表 4-2 に示す。

表 4-2 測定位置一覧

測定方法	測線名	測線位置
プロファイル	R 測線	2.8~13.4m
ワイドアングル	WR1	3.5m
	WR2	5.3m
	WR3	7.3m
	WR4	10.3m
	WR5	12.3m
プロファイル	L 測線	-1.4~8.8m
ワイドアングル	WL1	0.3m
	WL2	1.8m
	WL3	3.8m
	WL4	5.8m
	WL5	7.8m

#### 4.2 解析方法

図 4-2 に、連続波レーダーの解析フローを示す。データ処理方法は、参考文献<sup>1)</sup>に従つた。図 4-3 に連続波レーダーの解析時に反射面の同定のため実施したプロファイルとワイドアングル波形の対比の一例を示す。

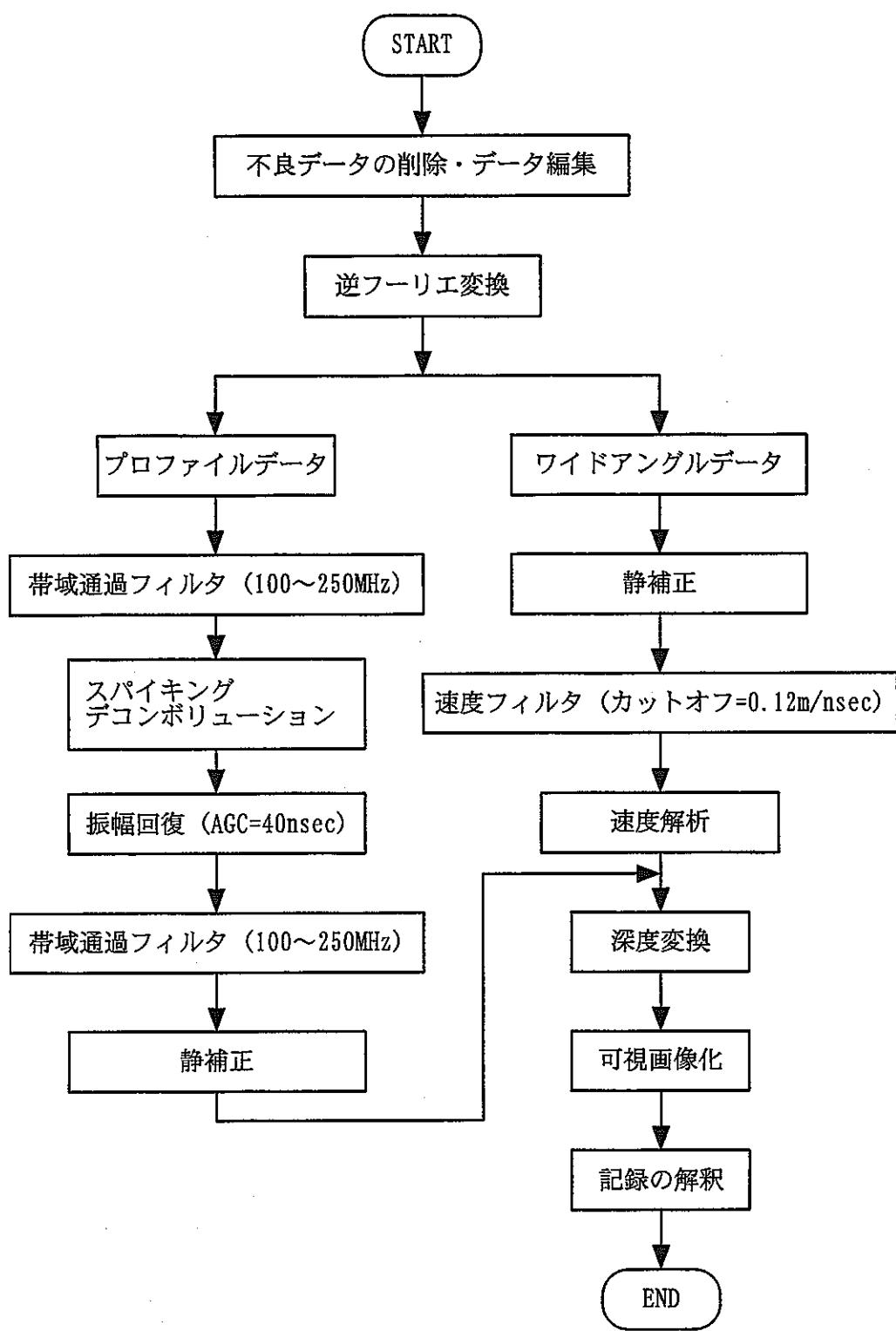


図 4-2 連続波レーダーの解析フロー

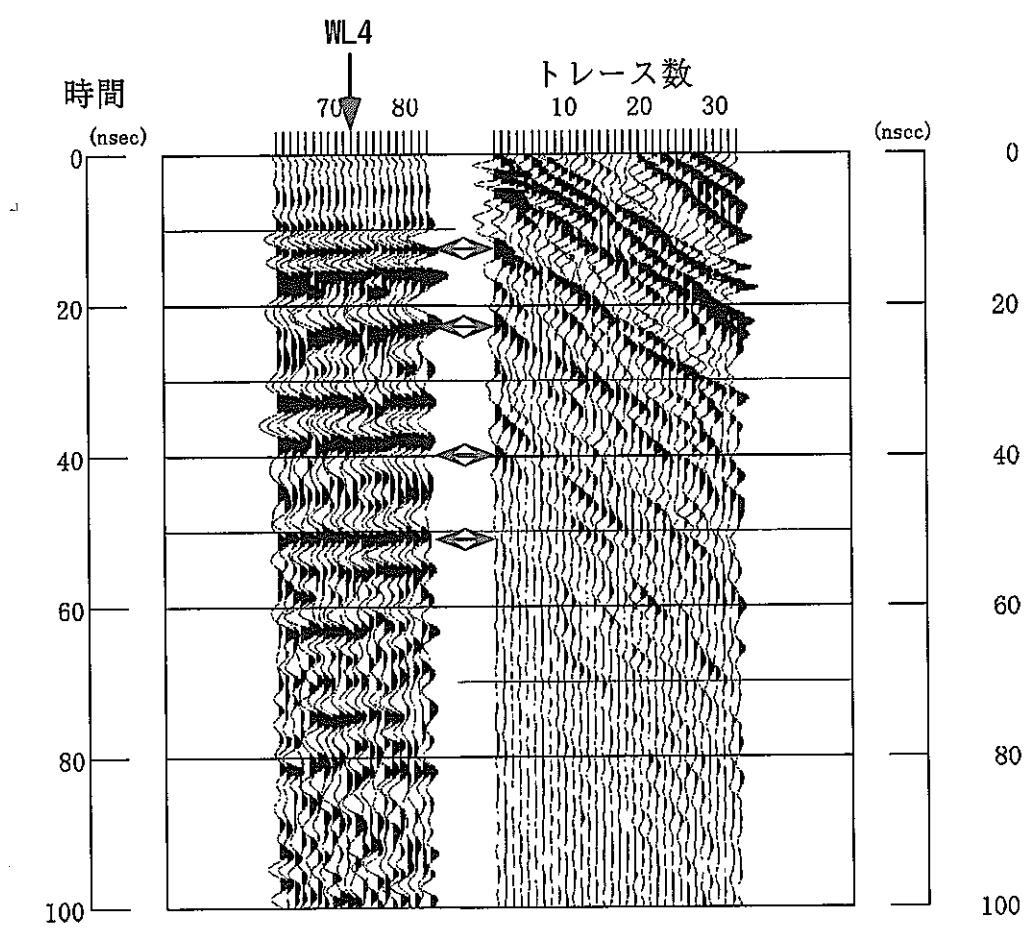


図 4-3 WL4 位置でのプロファイルとワイドアングル波形の対比

#### 4.3 解析結果

図 4-4～図 4-13 に速度解析結果をそれぞれ示す。

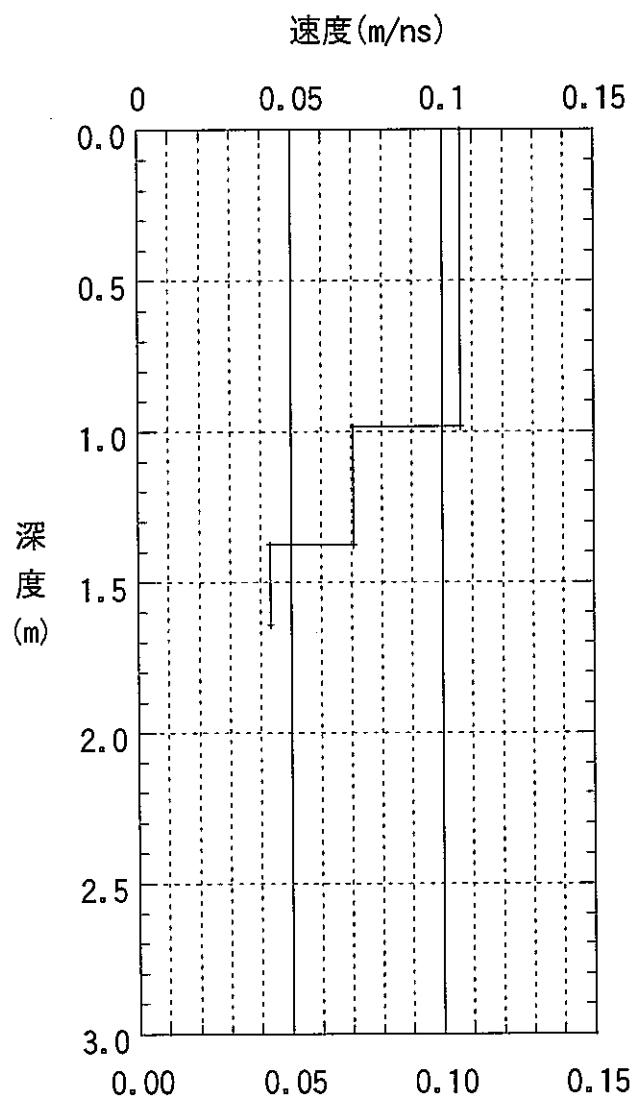


図 4-4 WR 1 速度解析結果

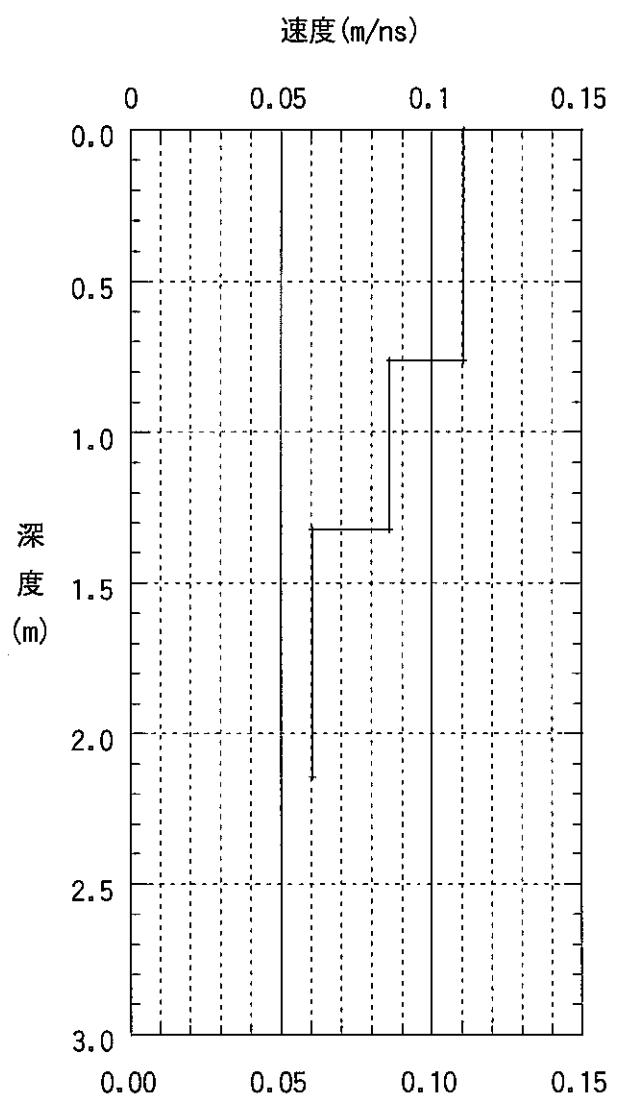


図 4-5 WR 2 速度解析結果

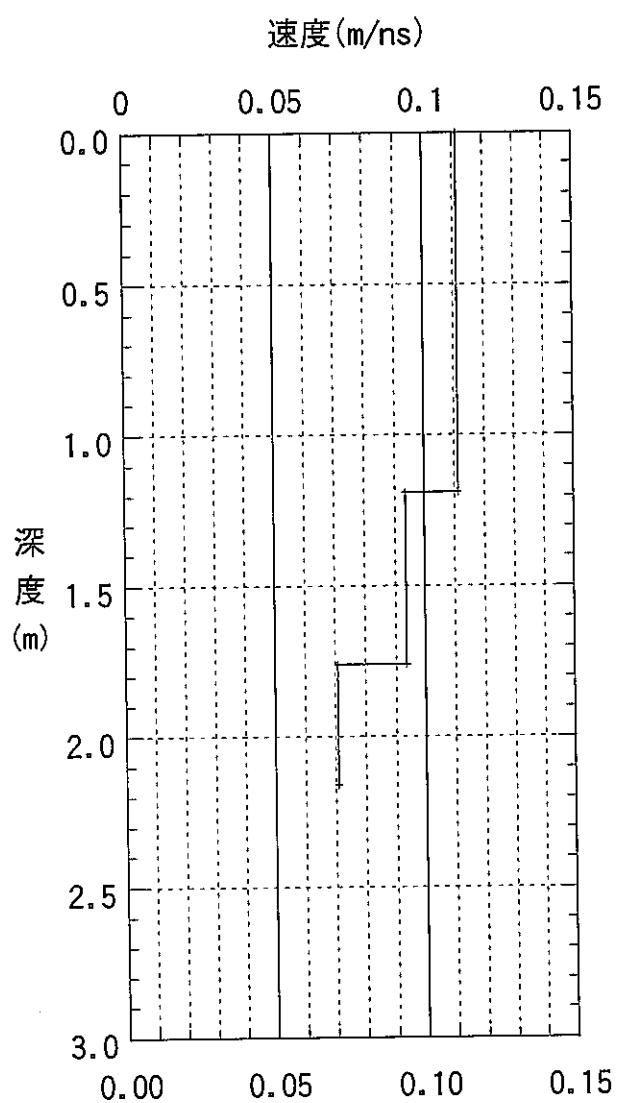


図 4-6 WR 3 速度解析結果

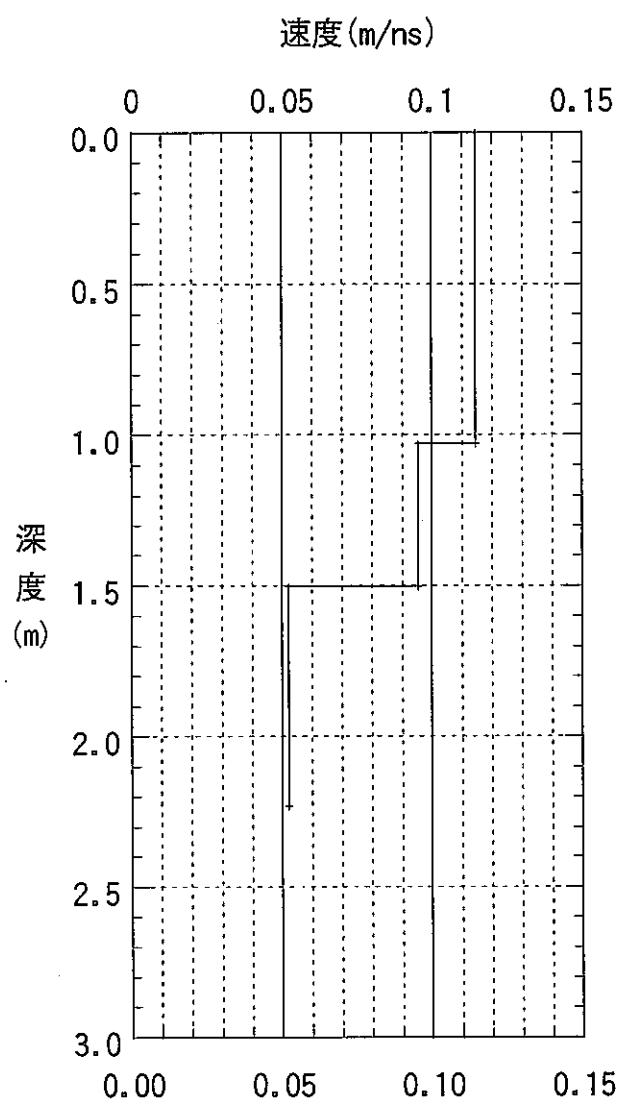


図 4-7 WR 4 速度解析結果

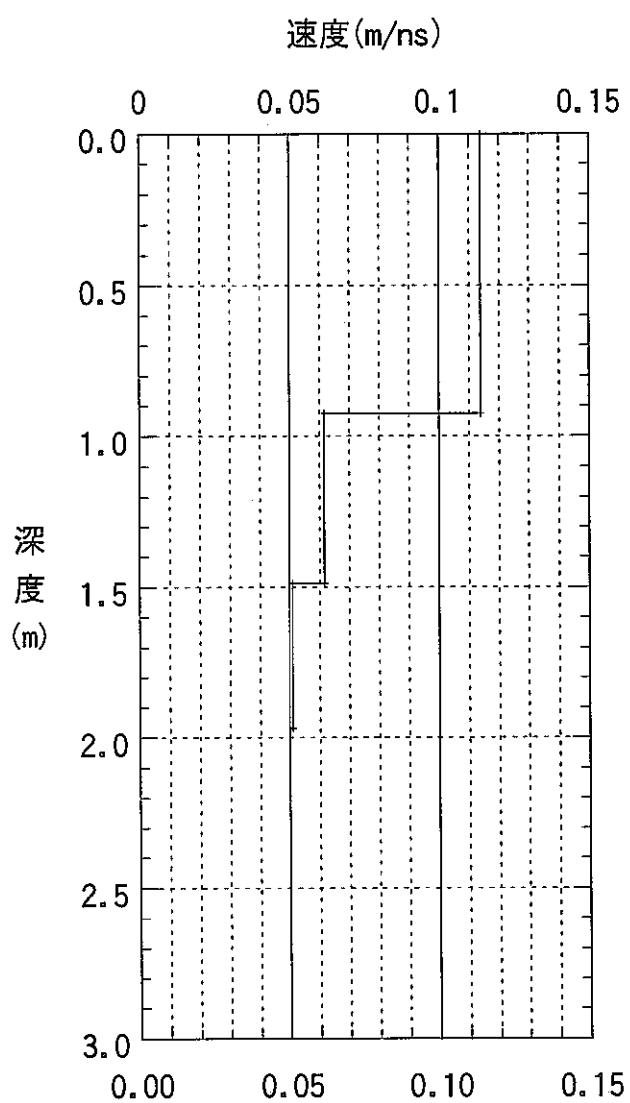


図 4-8 WR 5 速度解析結果

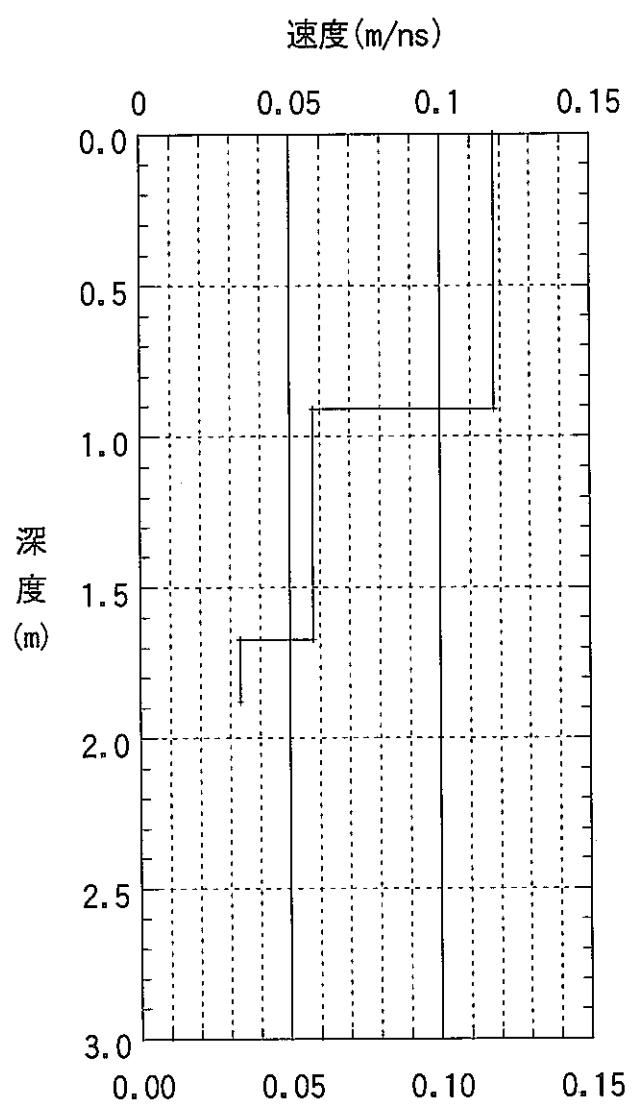


図 4-9 WL 1 速度解析結果

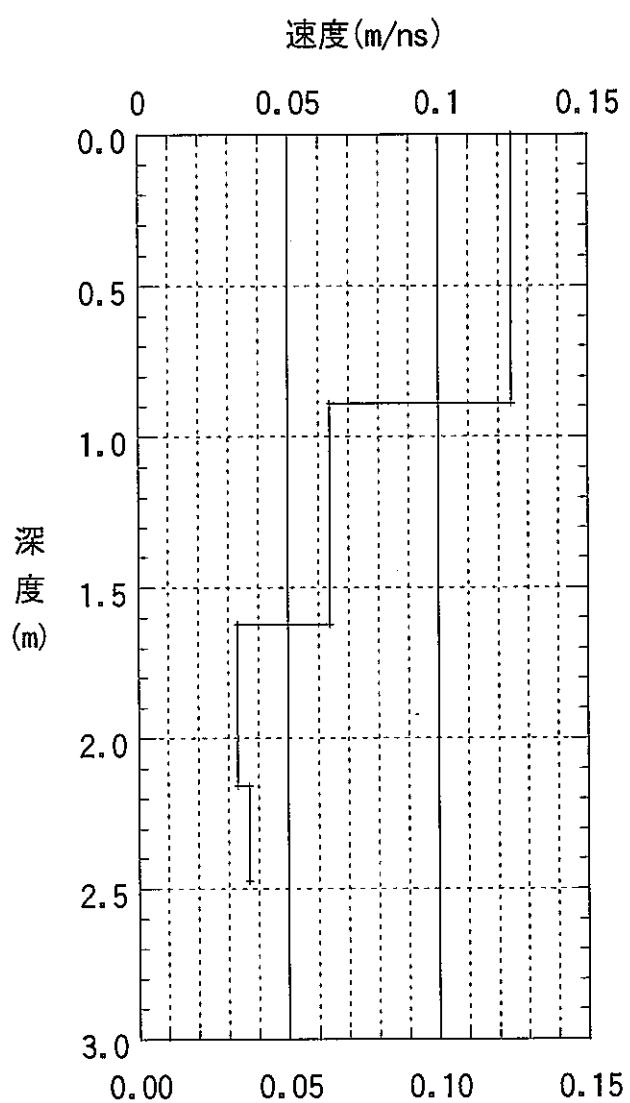


図 4-10 WL 2 速度解析結果

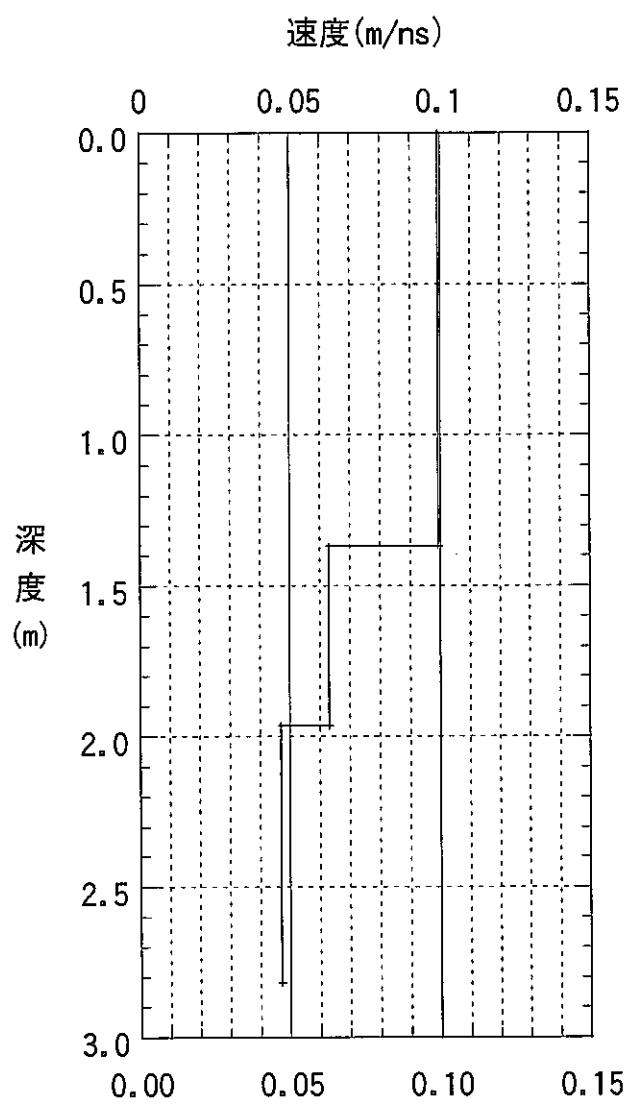


図 4-11 WL 3 速度解析結果

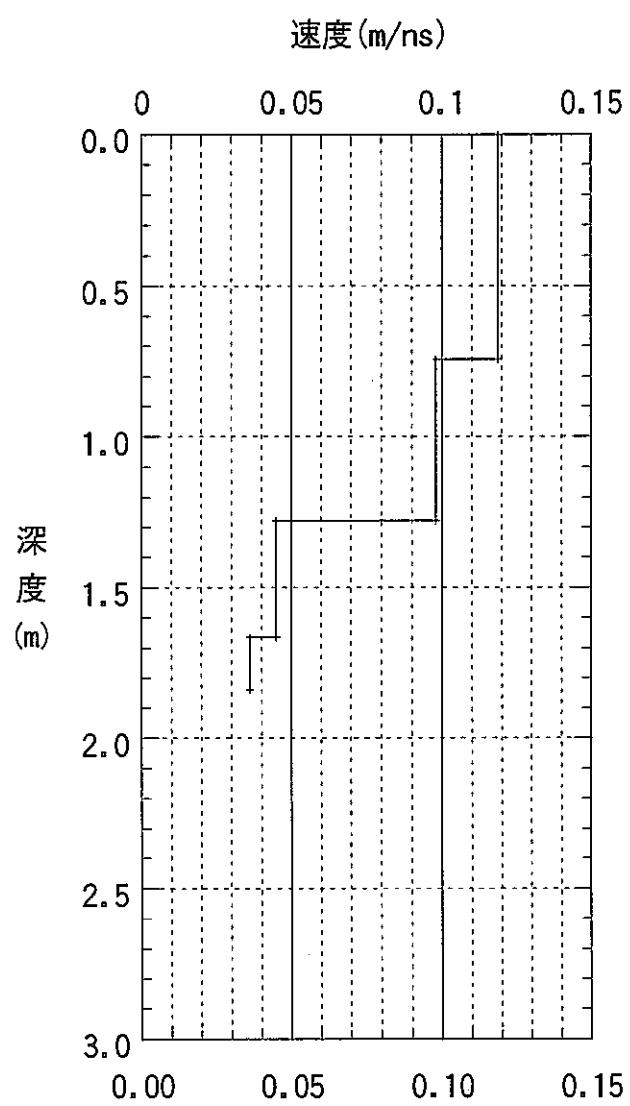


図 4-12 WL 4 速度解析結果

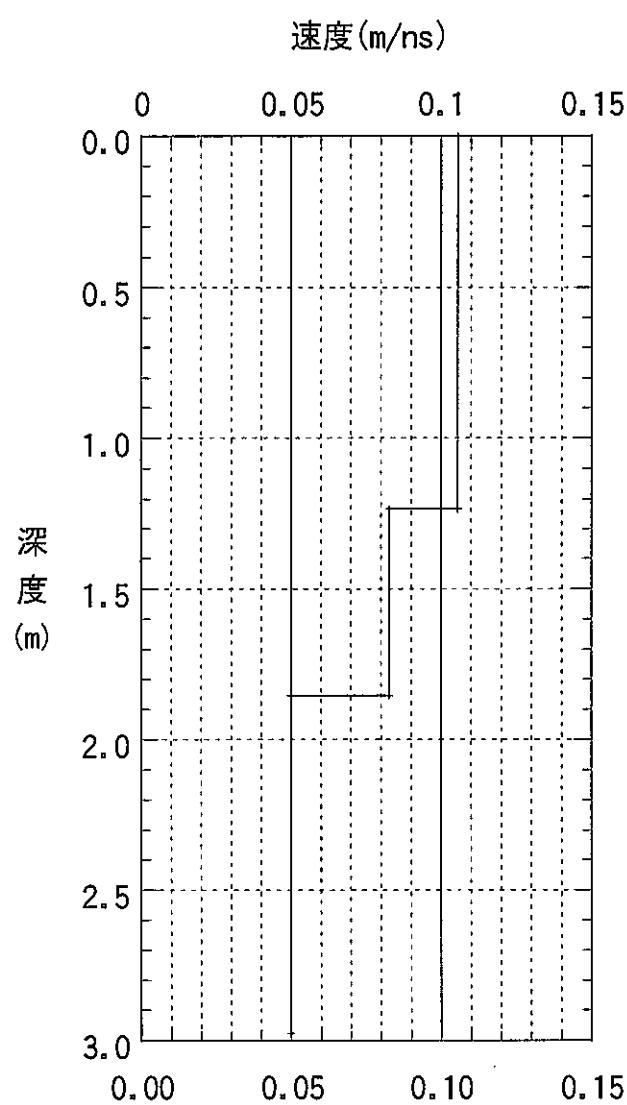


図 4-13 WL 5 速度解析結果

#### 4.4 考察

参考文献<sup>2)</sup>によると NATM 坑道のボーリングコアの比誘電率（40MHz における）は、炉乾燥による乾燥状態で 10 以下、自然状態（強制湿潤状態から乾燥状態への移行過程）で 10~40 程度、脱気による強制湿潤状態で 40 以上を示すことがわかっているため、速度構造を概ね 0.1m/nsec (比誘電率=9) 以上、0.05~0.1m/nsec (比誘電率 9~36)、0.05m/nsec (比誘電率=36) 以下に区分し、それぞれを不飽和帯（乾燥部）、不飽和帯（遷移部）、及び飽和帯とした。

プロファイル断面に速度構造を重ね、不飽和帯（乾燥部）、不飽和帯（遷移部）、飽和帯を区分したものを図 4-14 に示す。

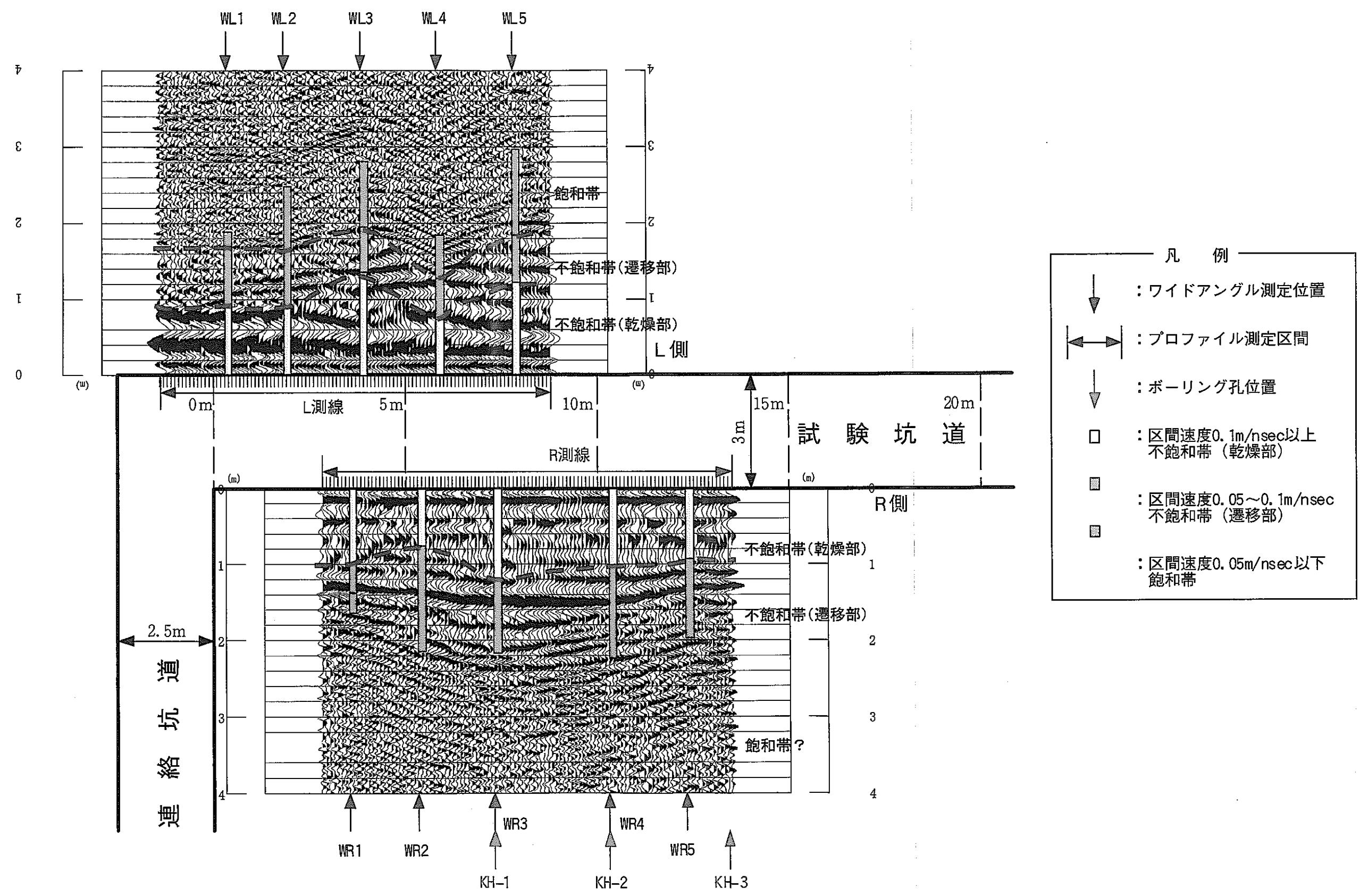


図 4-14 NATM 坑道計測の解析結果

同図より、以下のことことが分かる。

### ①R測線（ピラー側）

- ・ワイドアングル法による区間速度の測定結果において、区間速度  $0.05\text{m/nsec}$  以下（比誘電率が 36 程度以上）が壁面からの深度が 2 m 以浅で測定された位置は WR1 の 1 箇所のみである。他の箇所では、深度が 2 m 以深程度でも速度が  $0.05 \sim 0.1\text{m/nsec}$ （比誘電率が 9 ~ 36）で飽和度が小さくなっている。
- ・R 側線は、L 側線と比較し、壁面が全体として乾燥しており、その状況とワイドアングル法による区間速度の測定結果（全体的に速い → 比誘電率小 → 飽和度小）は、整合的な結果である。
- ・ボーリング調査結果で KH-1 (WR3) で孔壁付近に未固結砂部が確認されている。その箇所でのワイドアングル法による区間速度の測定結果は、もっとも速い領域（比誘電率小、すなわち飽和度が小さい）が奥まで広がっており、未固結砂部が最も透水性が大きく飽和度が低下しやすいと仮定した場合、整合的な結果である。

### ②L測線（地山側）

- ・ワイドアングル法による区間速度の測定結果において、どの箇所においても壁面からの深度が 2 m 以深では区間速度が  $0.05\text{m/nsec}$  以下（比誘電率が 36 程度以上）と飽和度が大きくなっている。
- ・坑壁において漏水が観測された WL1 及び WL2 では、比較的区間速度が遅く（飽和度が大きい）なっているが、両者に明確な関係は得られなかった。一つの可能性としては、坑壁の漏水は亀裂により生じていると想定されるため、場を平均的に見るワイドアングル法では、計測結果が平均化されたためと想定される。

### ③共通

- ・ワイドアングル法による不飽和帯（乾燥部）、不飽和帯（遷移部）、及び飽和帯区分結果の各境界位置と、プロファイル法による反射面の連続性とが一対一で対応しなかった。一つの可能性としては、場所ごとに飽和度分布の変化状況が異なるため、同一な物性値境界値において反射が生じなかつたためと想定される。しかし、連続性を確認するという観点においては、プロファイル法は有効な手法であると考えら

れる。

上記の結果より、地表レーダーを用いることにより、より詳細に不飽和領域に資する情報を取り得することが可能であることを確認できた。

## 5. まとめ

本件は、TDR 法の原位置計測結果を評価するための基礎資料を得るために、第 2 計測坑道において、孔間連続波レーダー計測と NATM 坑道において地表連続波レーダー計測を実施したものである。

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、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整合的であった。よって、絶対値の補正を行うことにより、孔間連続波レーダーを TDR 法の孔間におけるデータ補間に適用することは、十分に可能であると考えられる。

②地表連続波レーダーを適用することにより、坑壁から岩盤内部の比誘電率に関する情報を取得することができた。このことから、地表連続波レーダーを用いて不飽和領域に資する情報を取得することは、可能であると考えられる。

今後、連続波レーダーによる TDR 法原位置計測結果の面的補間技術を構築していくためにも、以下に示す研究を継続していくべきである。

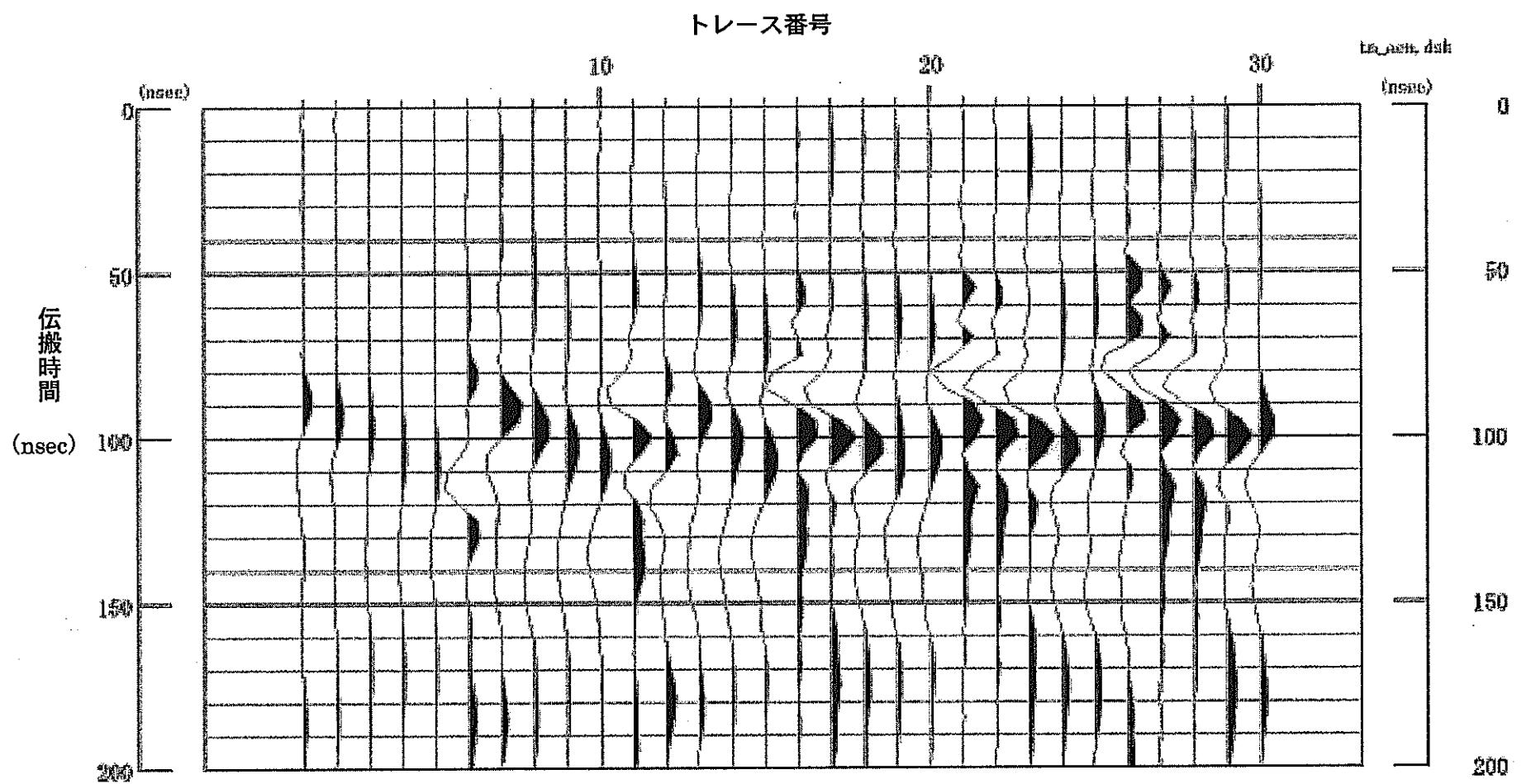
- (1)連続波レーダーの様々な条件下における適用性把握及び解釈技術の向上
- (2)現位置における連続波レーダーと TDR 法測定結果の相関関係の把握

## 参考文献

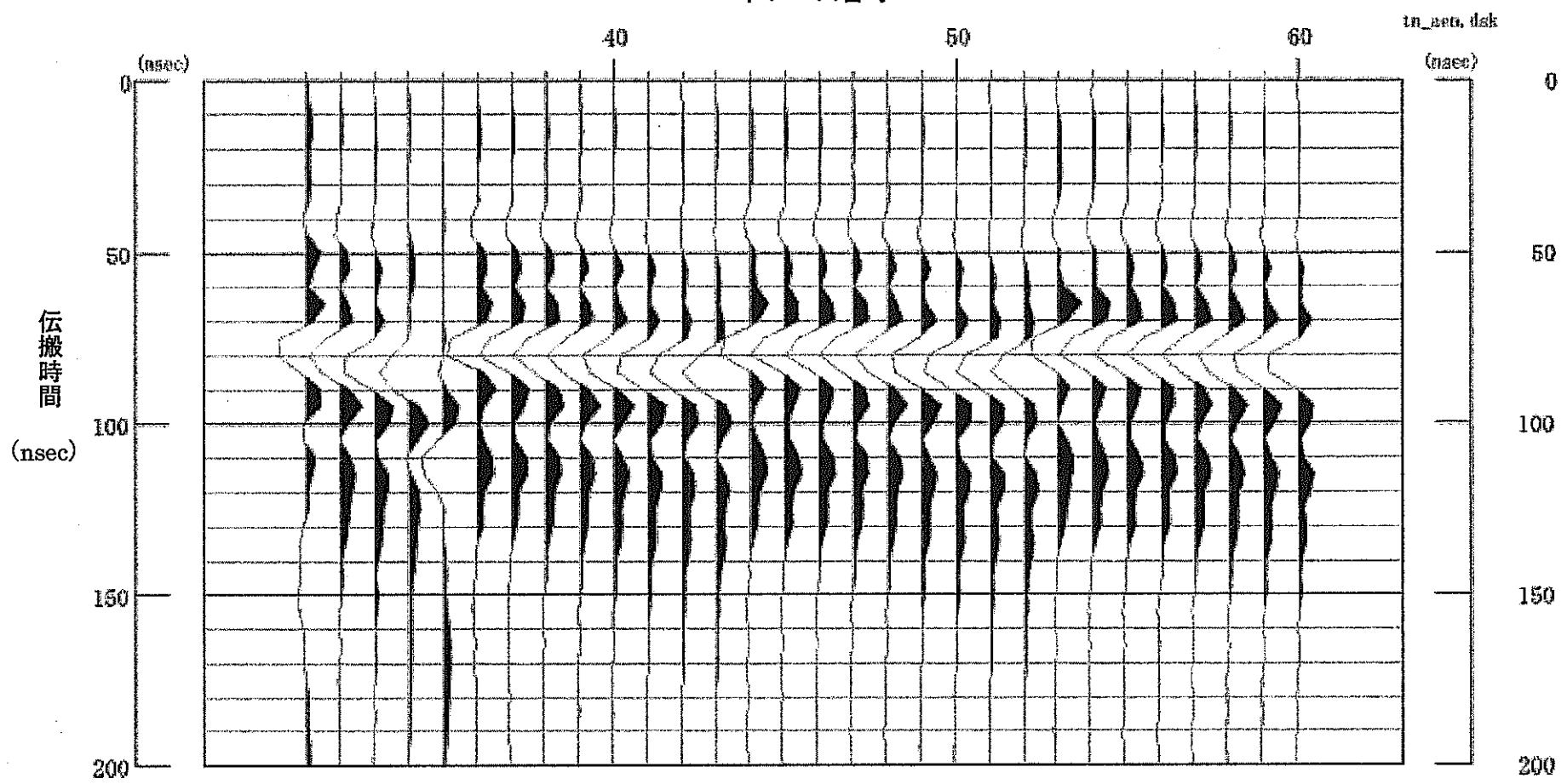
- 1) O. Yilmaz : Seismic data processing (Investigations in geophysics, Vol.2), Society of Exploration Geophysicists (1987)
- 2) 鈴木敬一：連続波を用いた電磁波調査機器の実験機の製作、核燃料サイクル開発機構契約業務報告書、JNC TJ7410 99-001(1999)
- 3) 前村庸之、細野高康：不飽和領域の原位置計測手法の研究、核燃料サイクル開発機構契約業務報告書、JNC TJ7400 2001-014 (2002)

# 孔間レーダーオリジナル波形

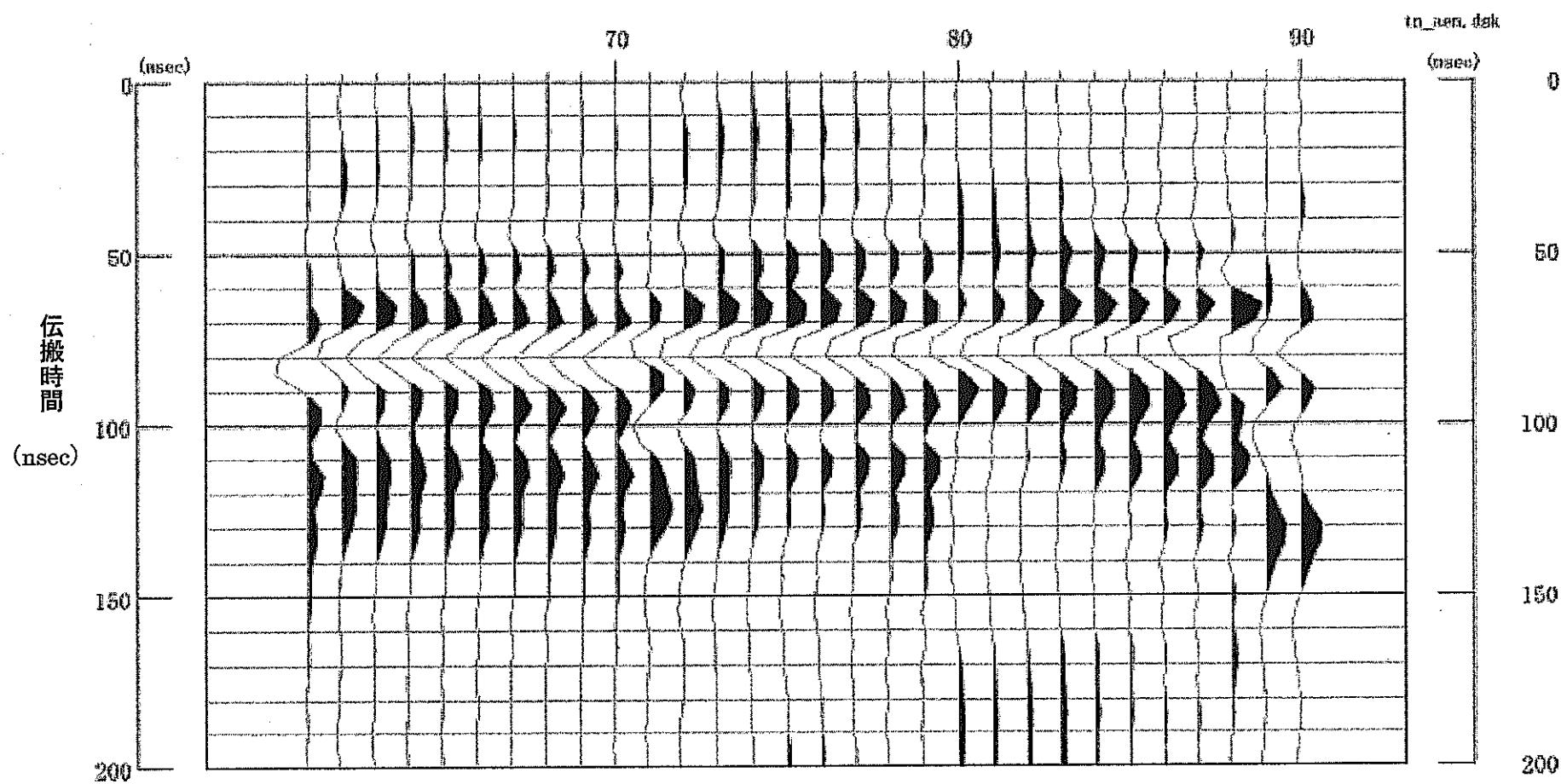
(詳細は、図 3-6 参照)



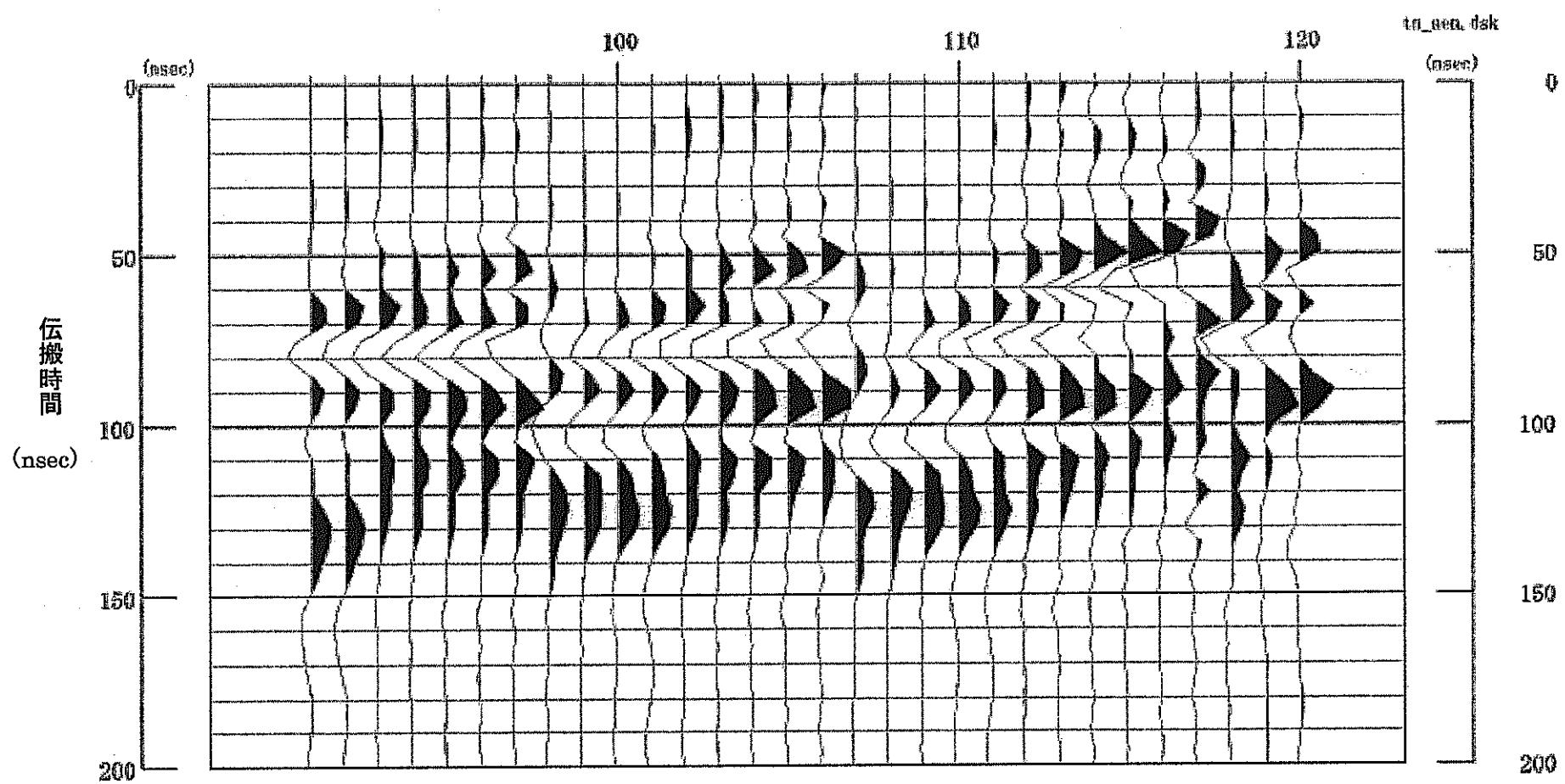
トレース番号



トレース番号



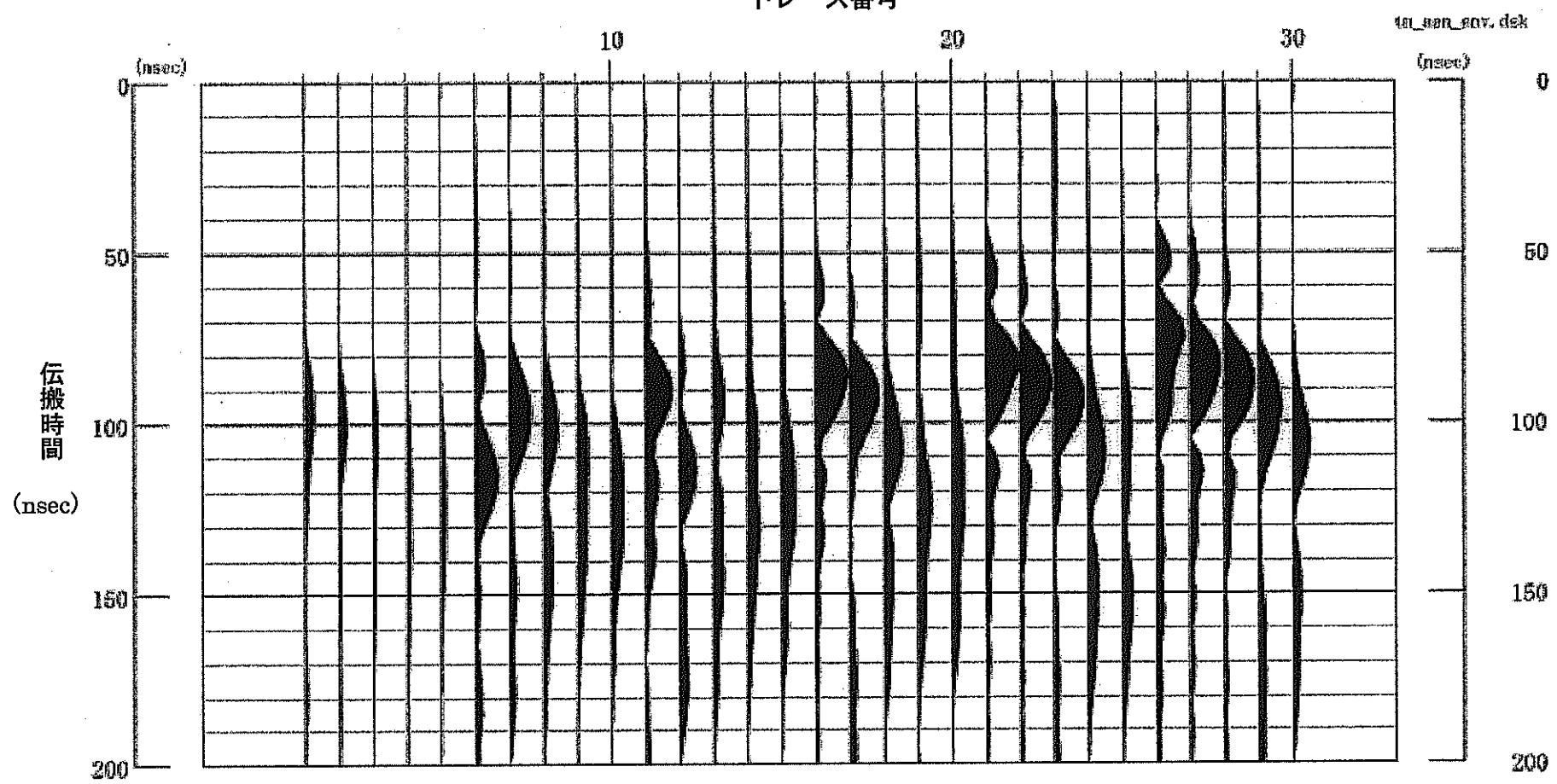
トレース番号



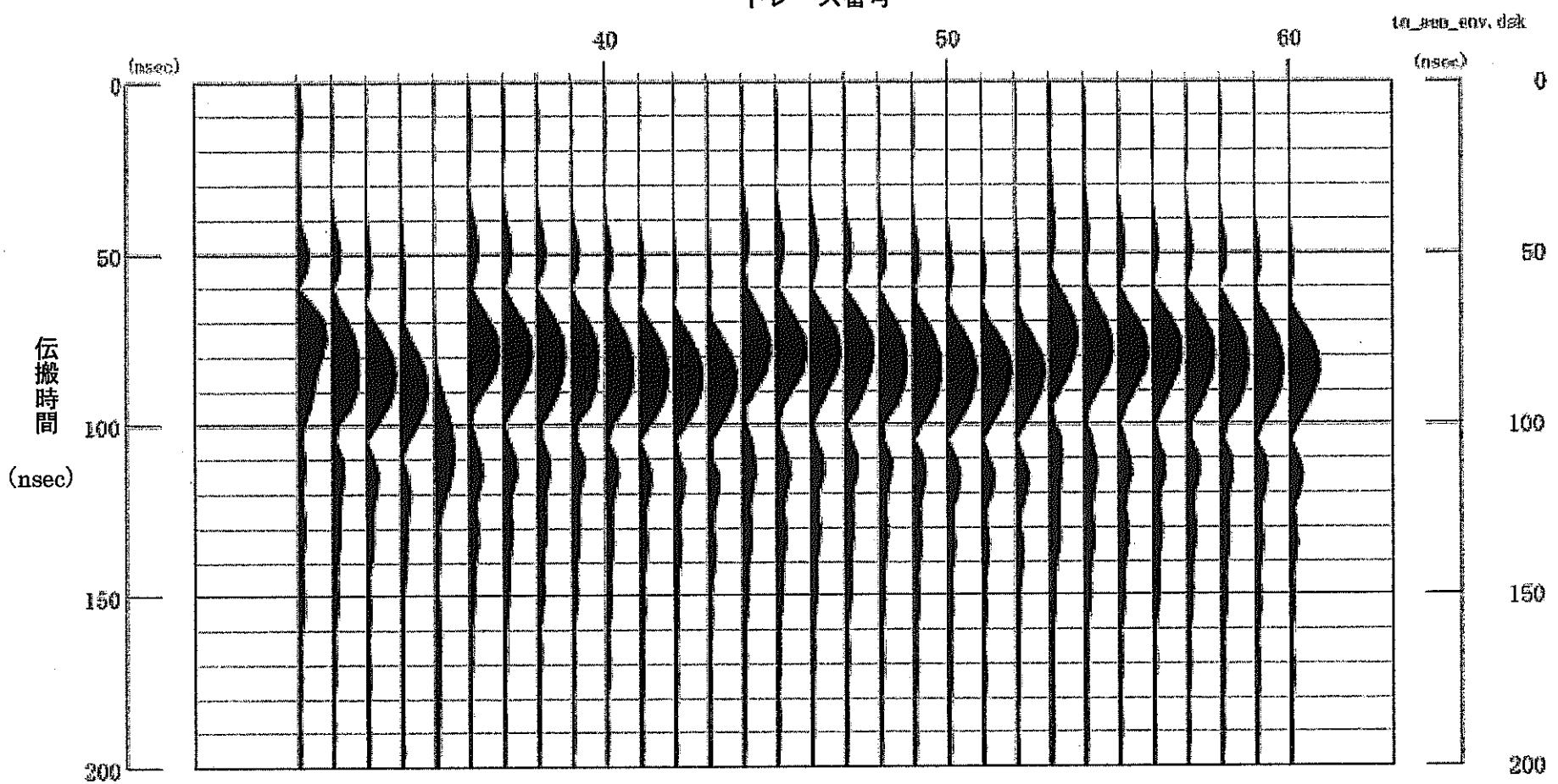
## **孔間レーダー包絡線波形**

(詳細は、図 3-7 参照)

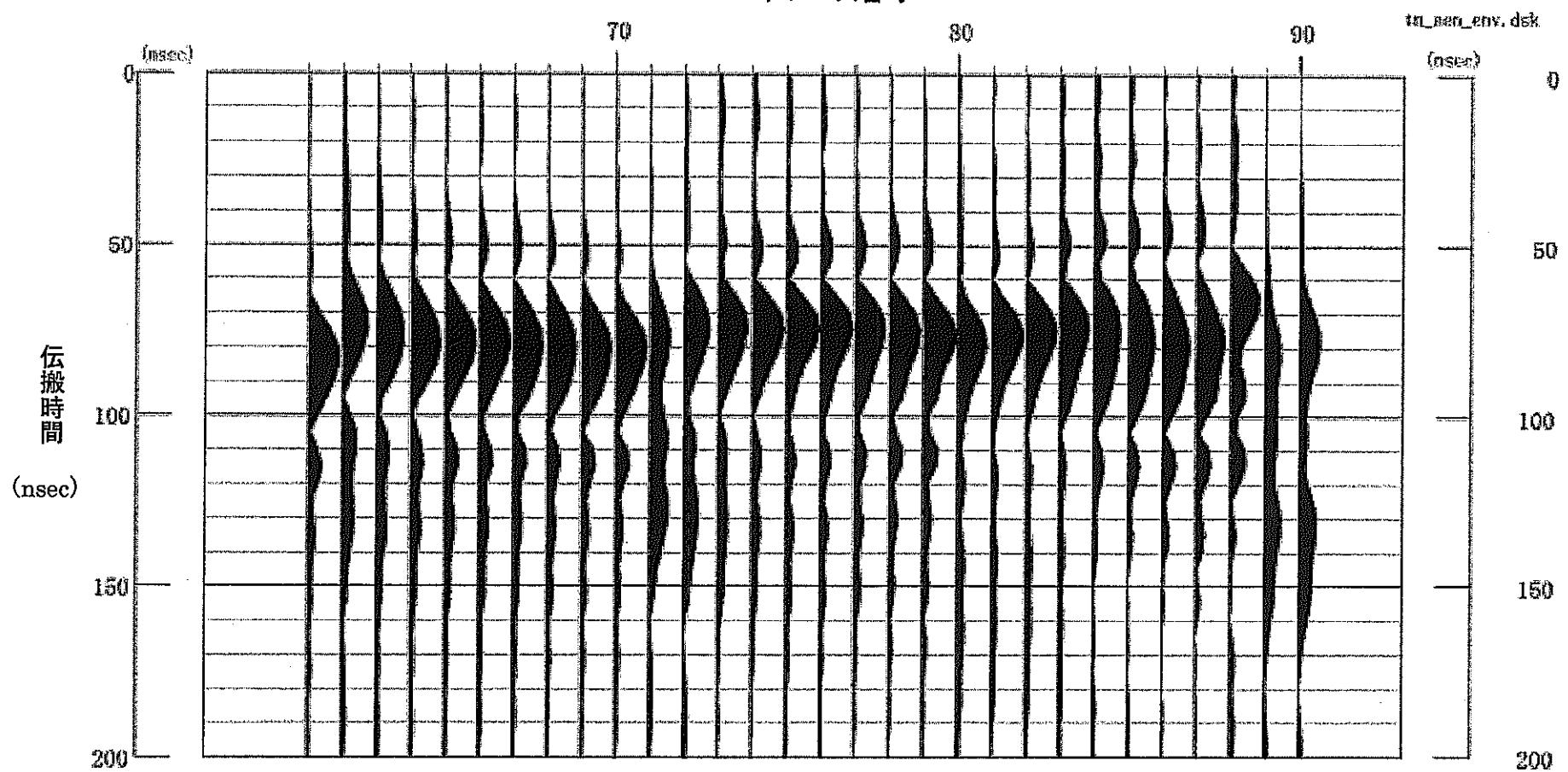
トレース番号



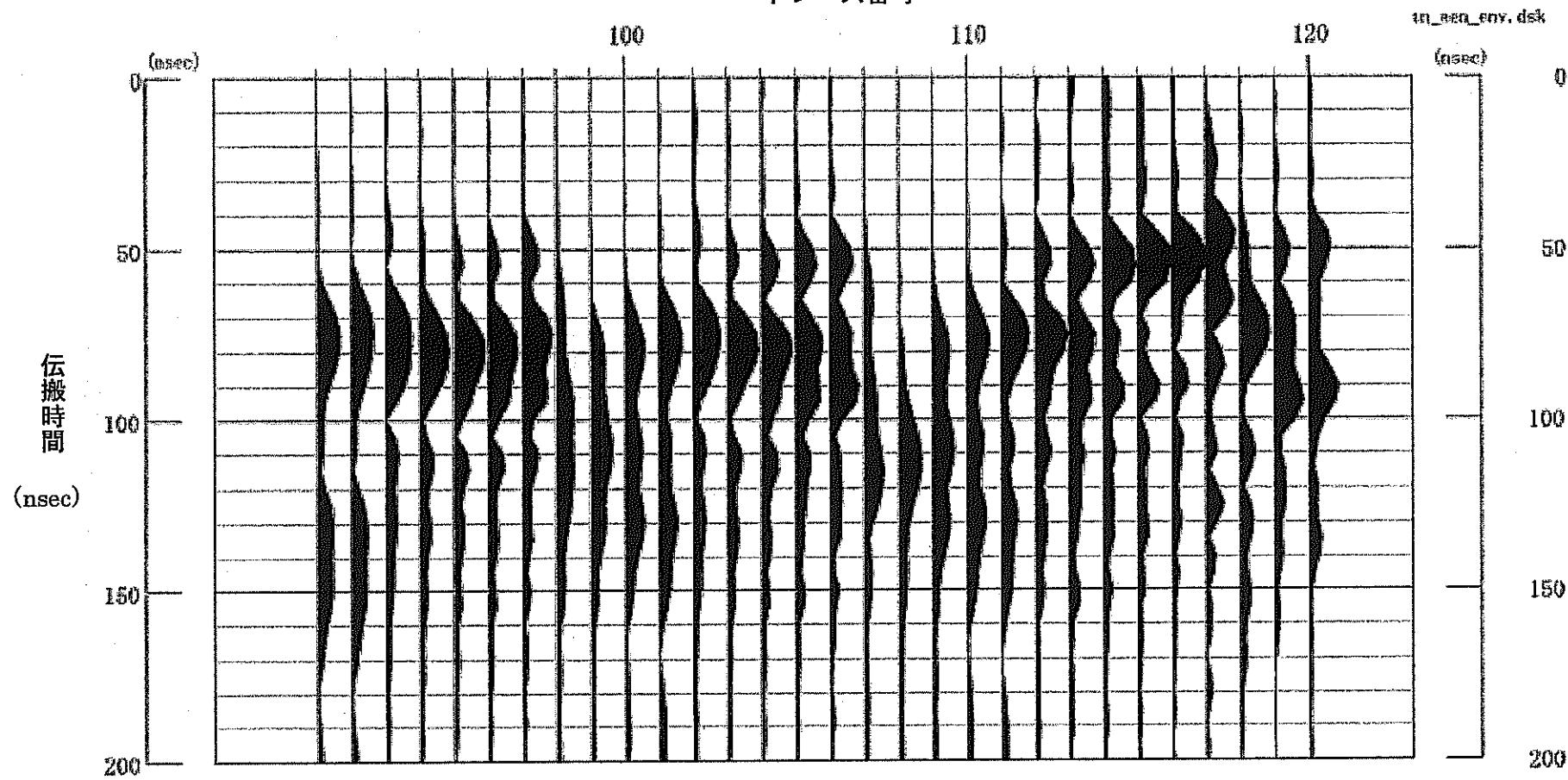
トレース番号



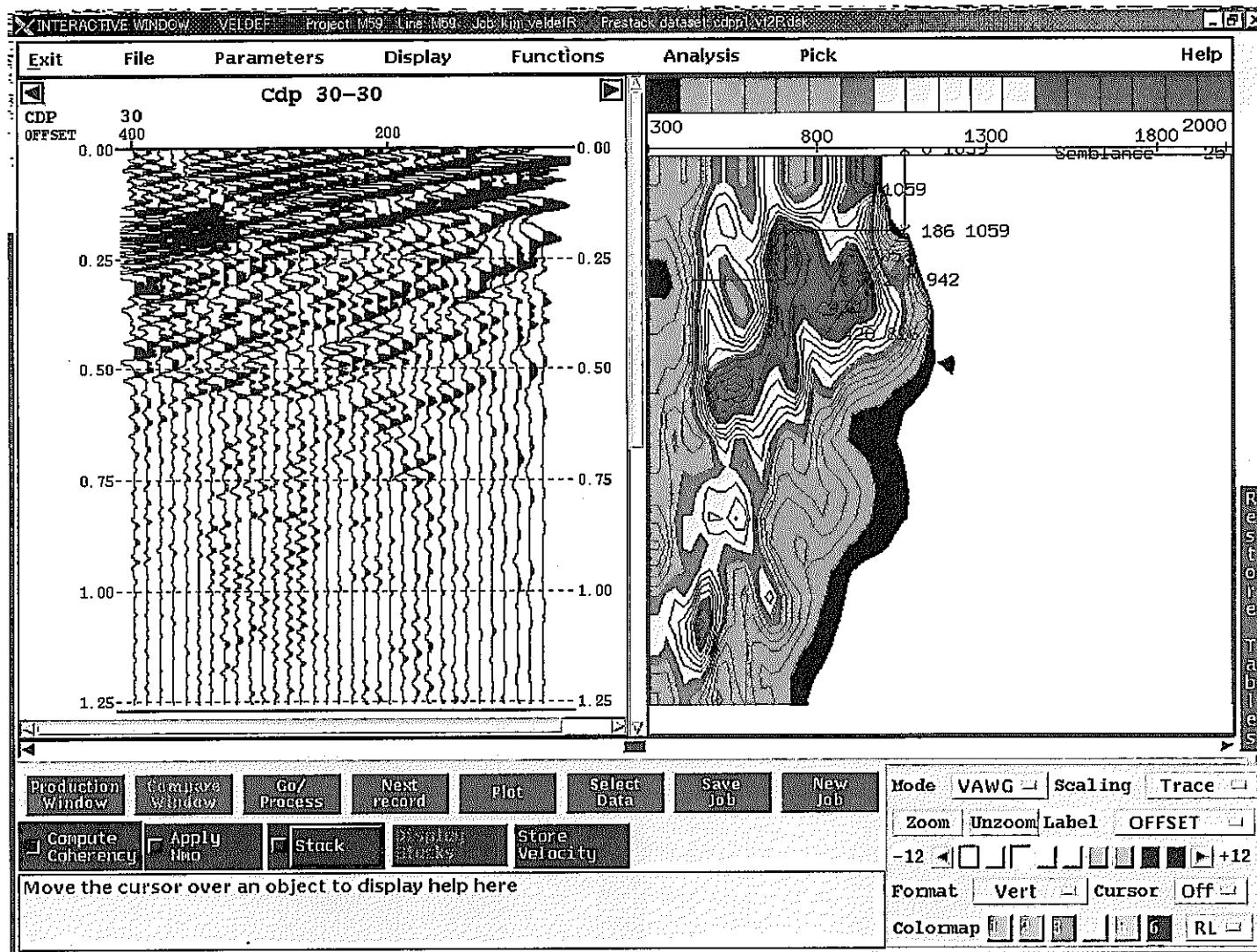
トレース番号



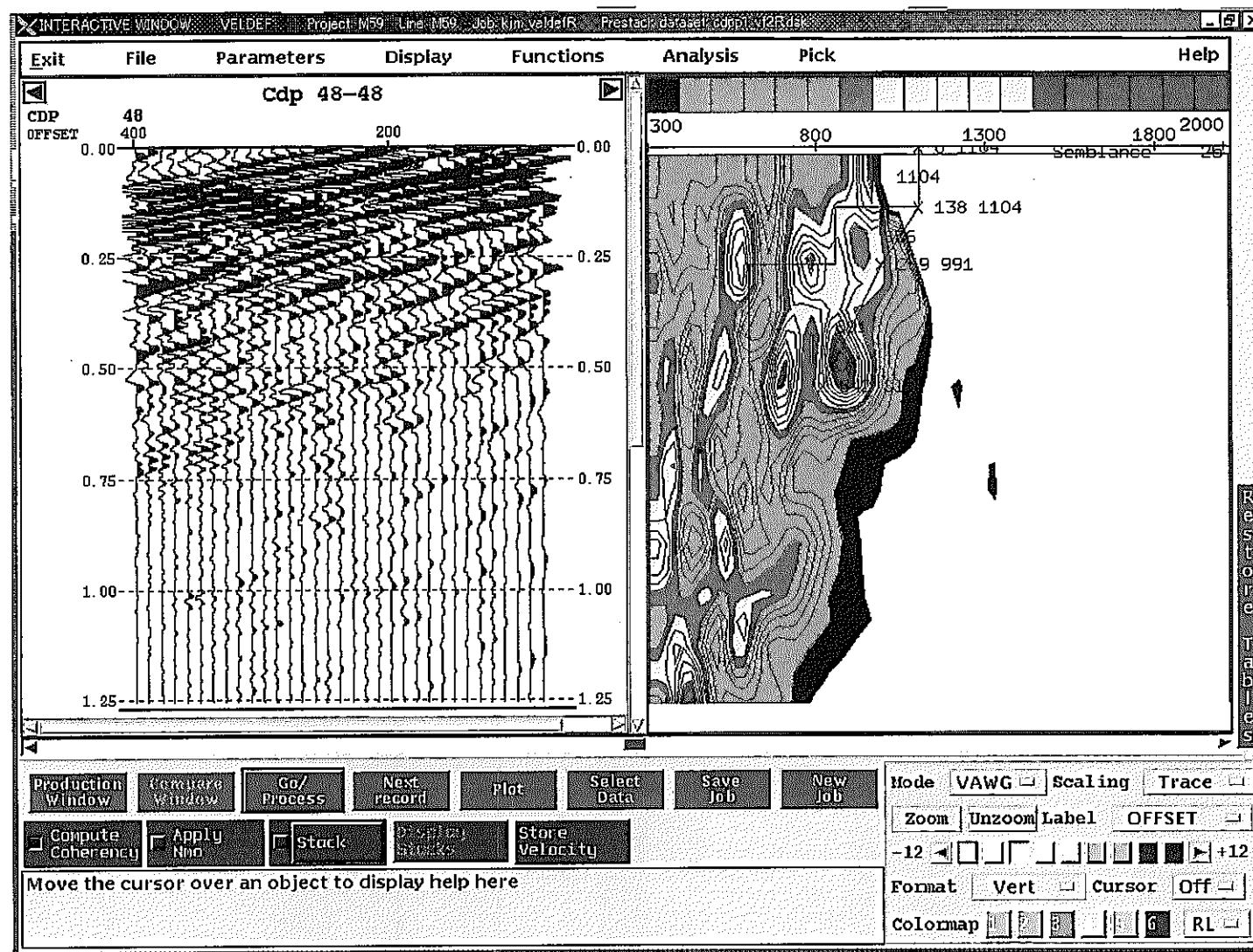
トレース番号



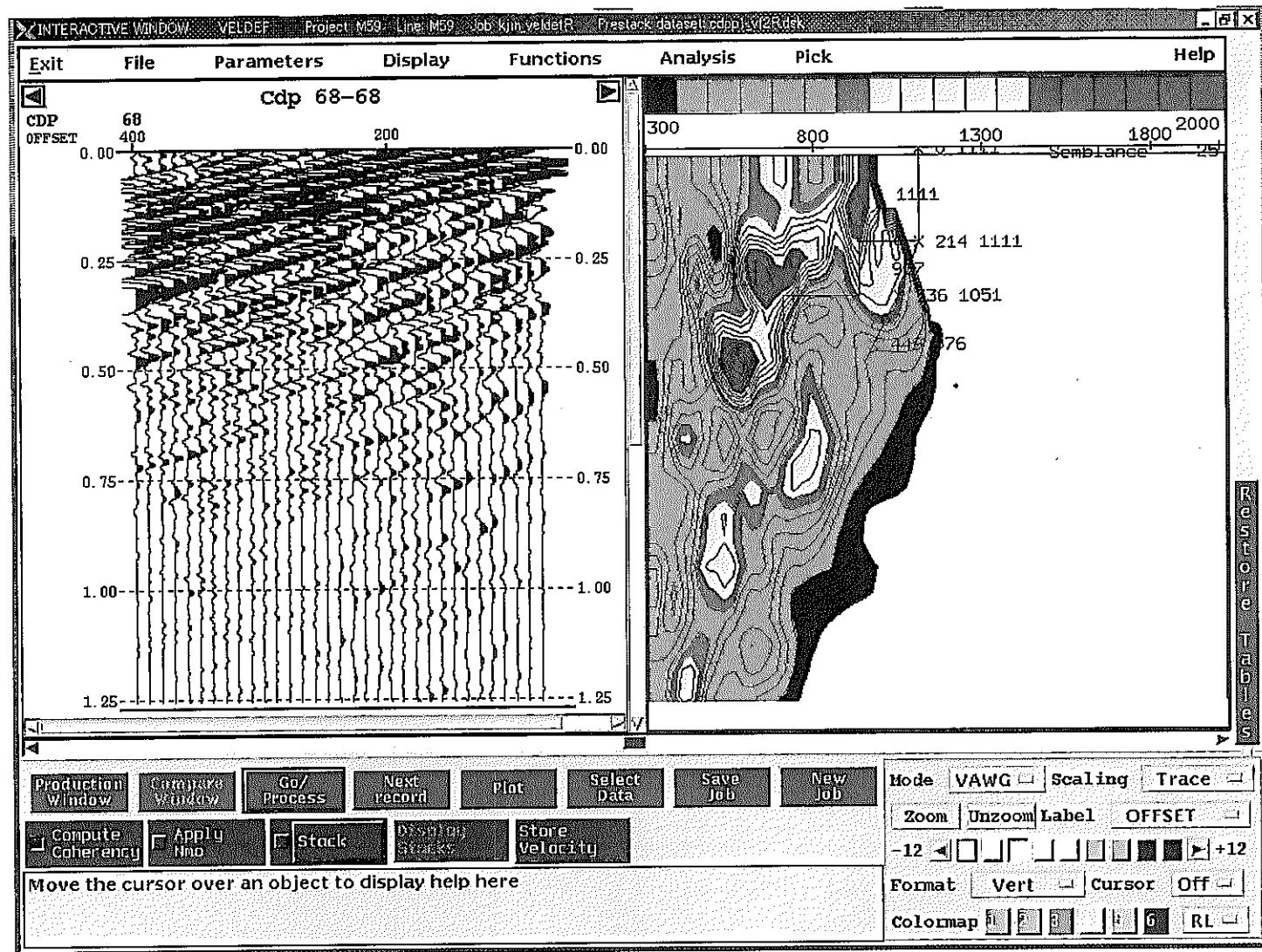
## 対話型速度解析画面



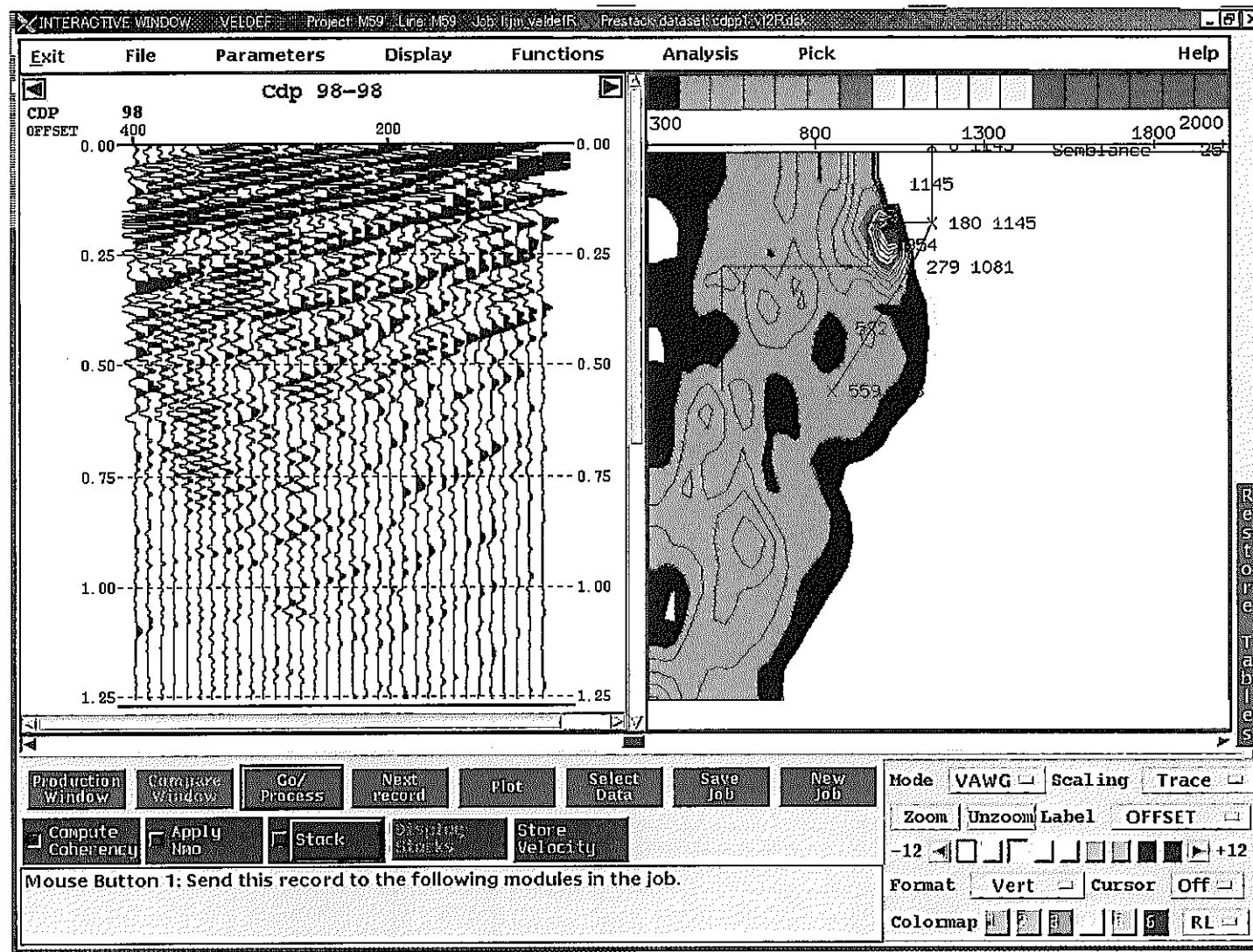
WR 1 対話型速度解析画面



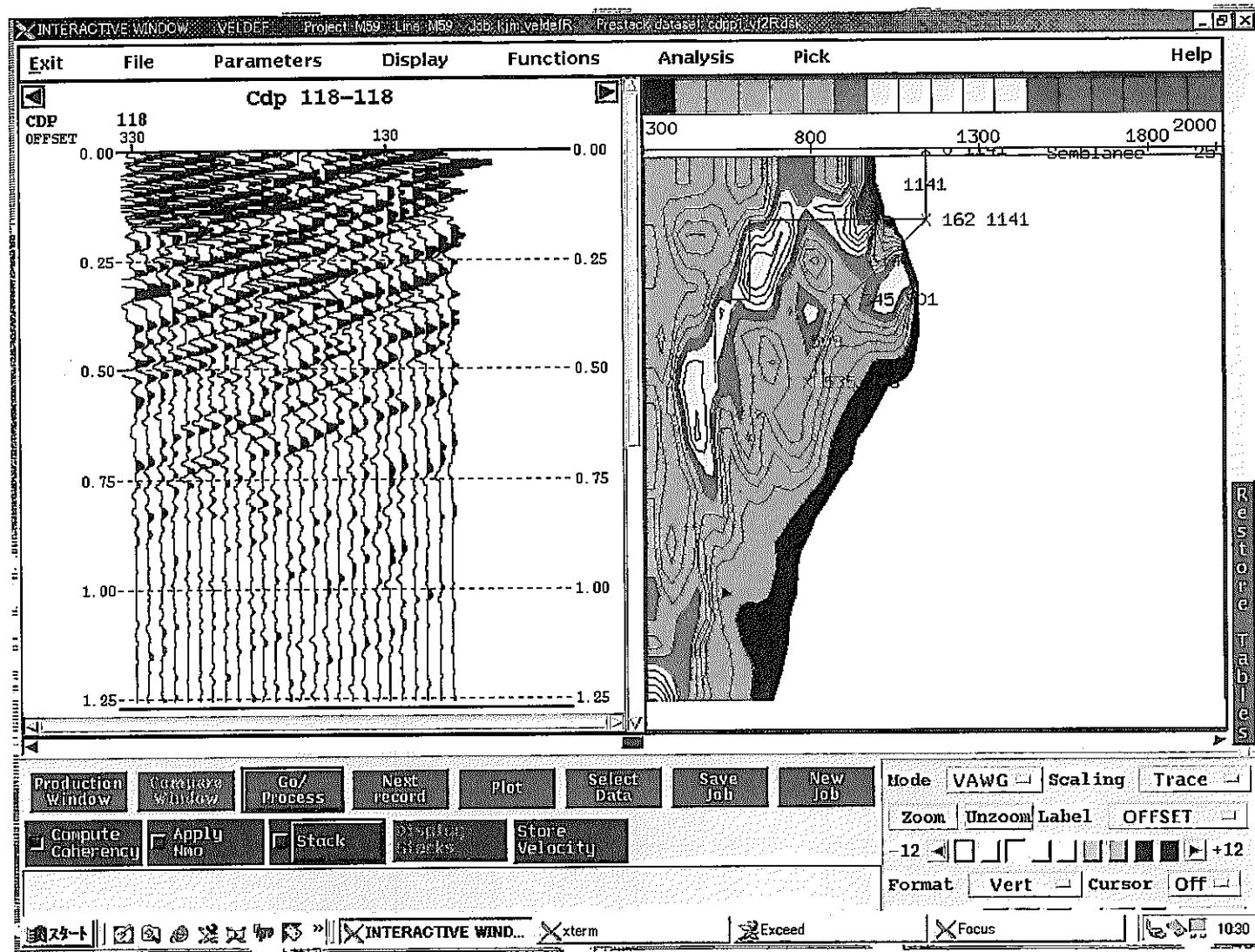
WR 2 対話型速度解析画面



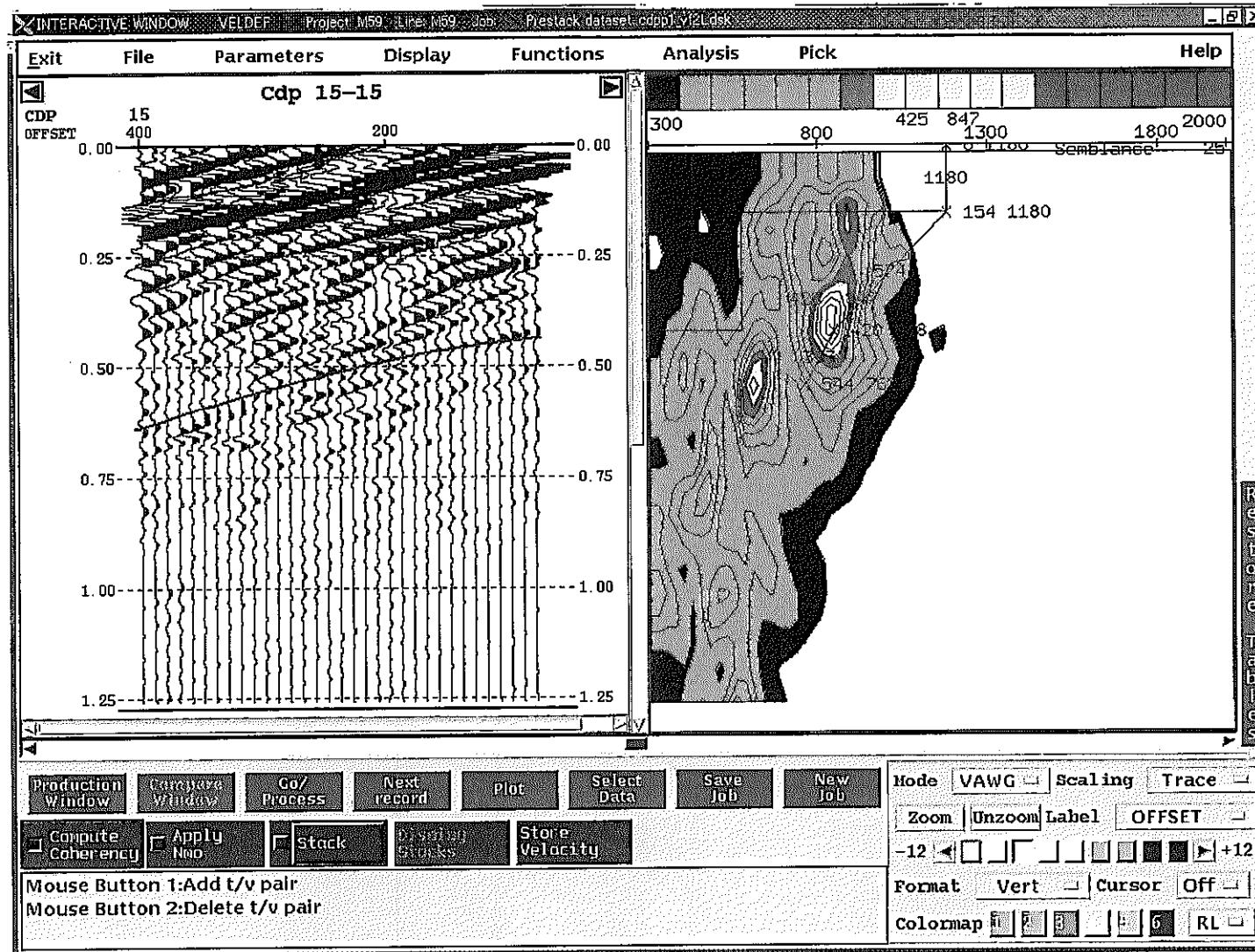
WR 3 対話型速度解析画面



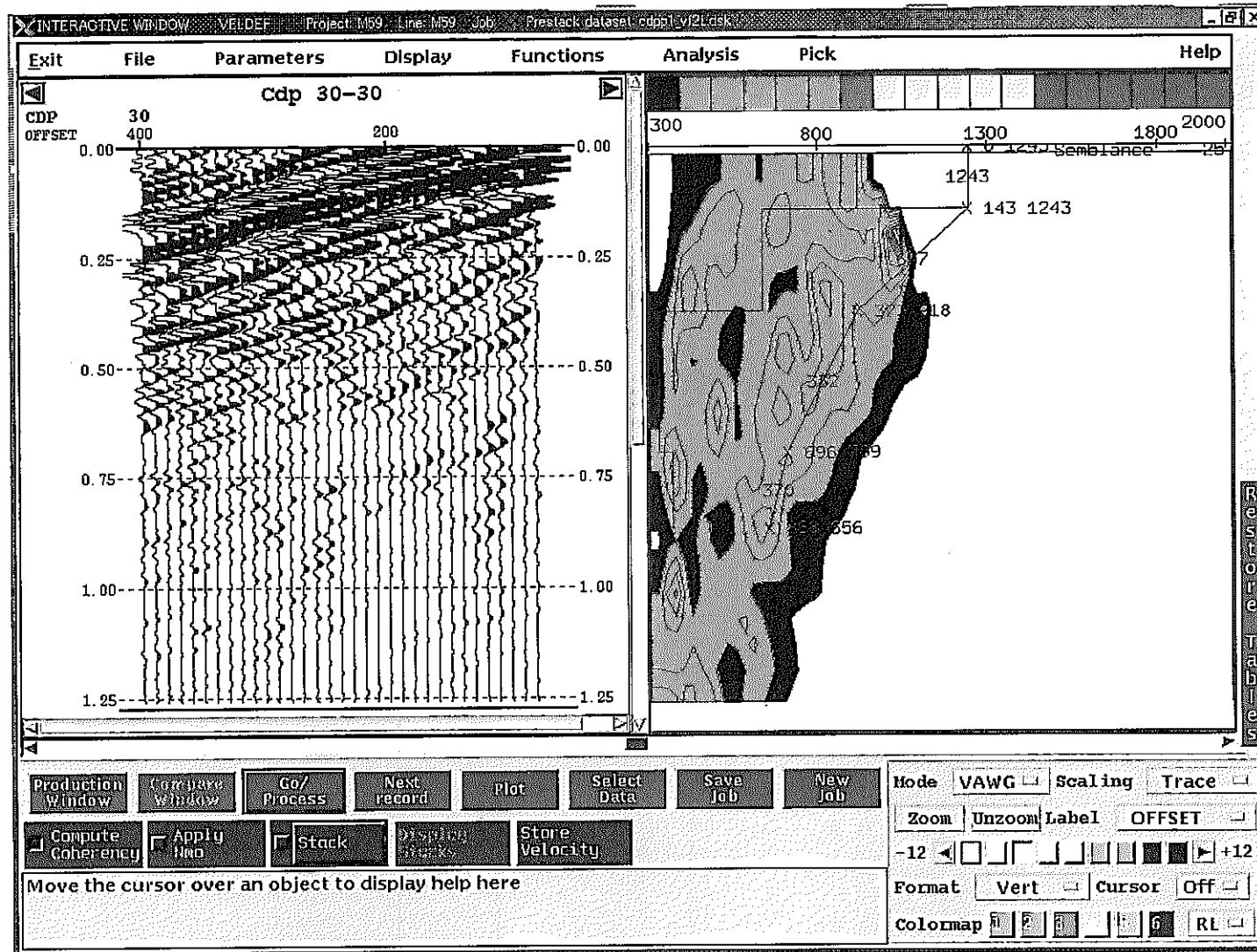
WR 4 対話型速度解析画面



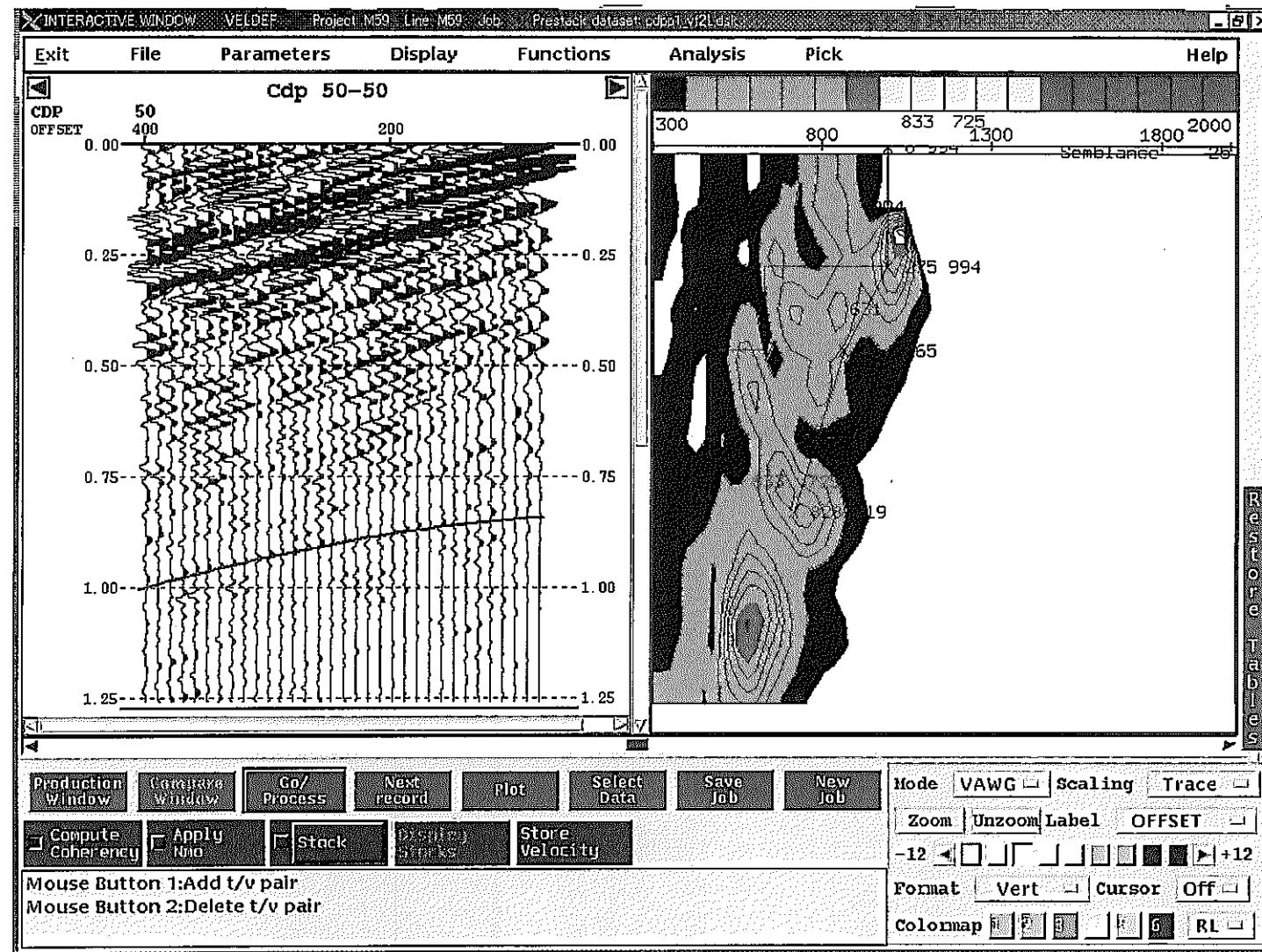
WR 5 対話型速度解析画面



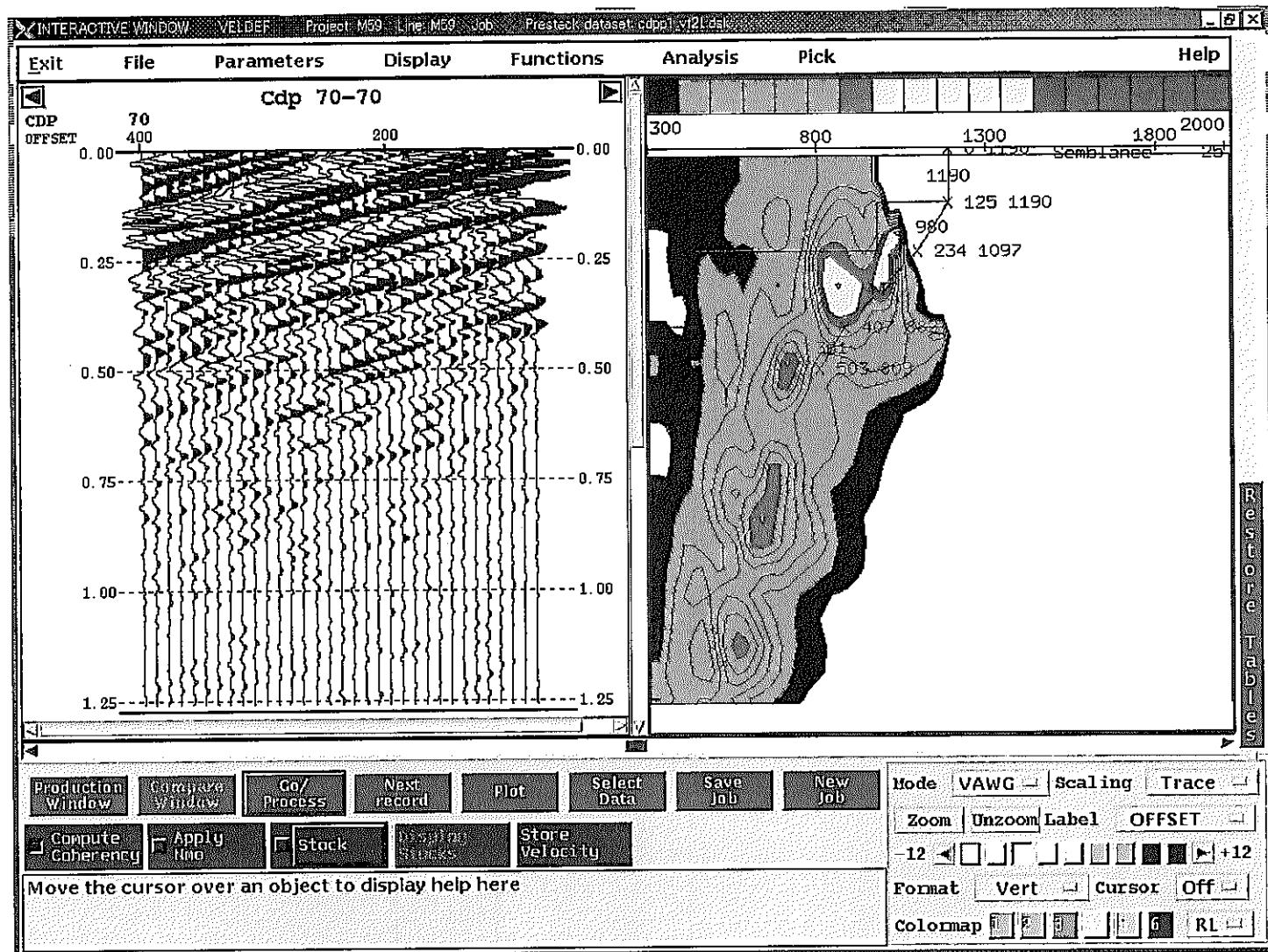
WL 1 対話型速度解析画面



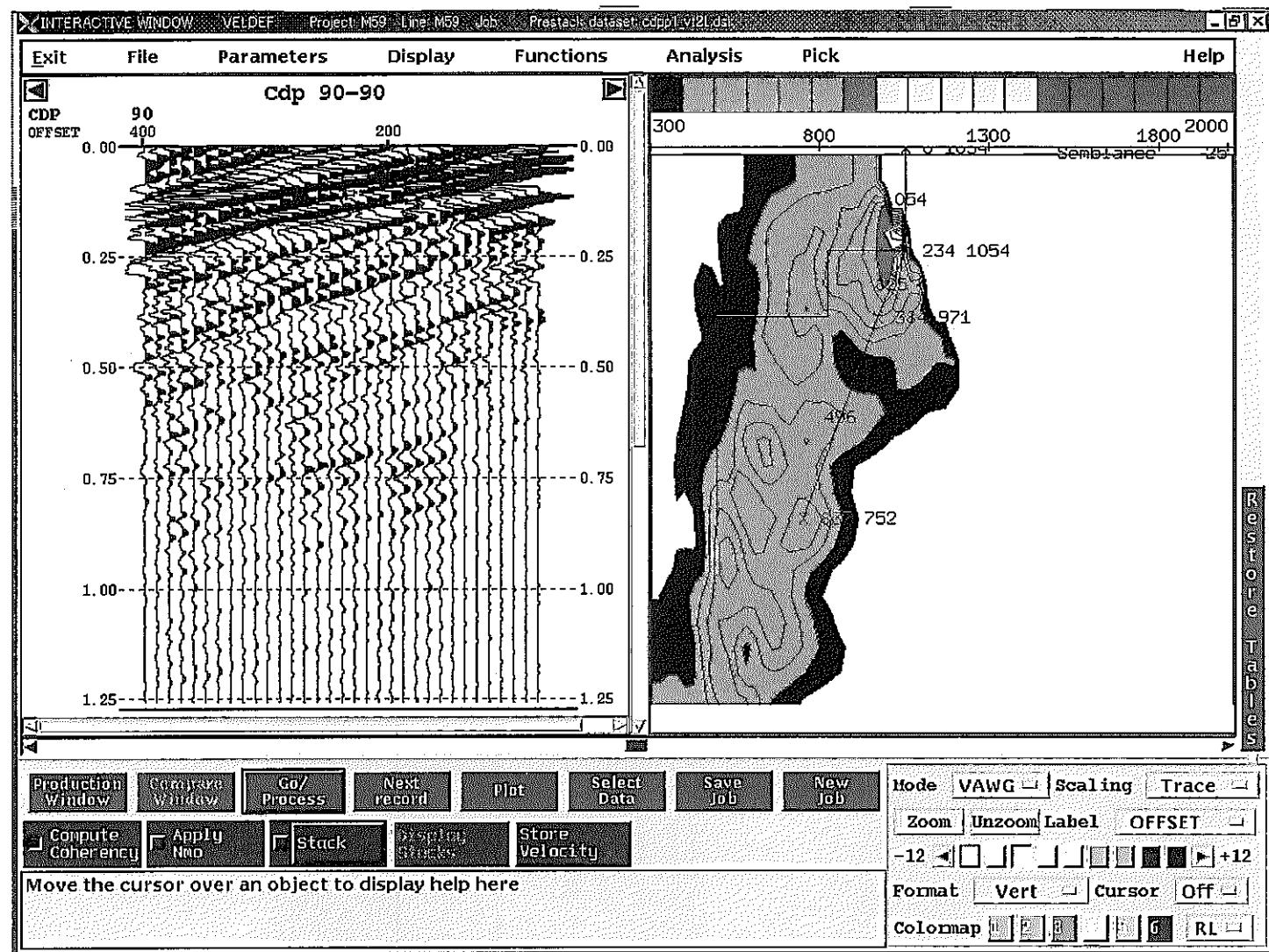
WL 2 対話型速度解析画面



WL 3 対話型速度解析画面

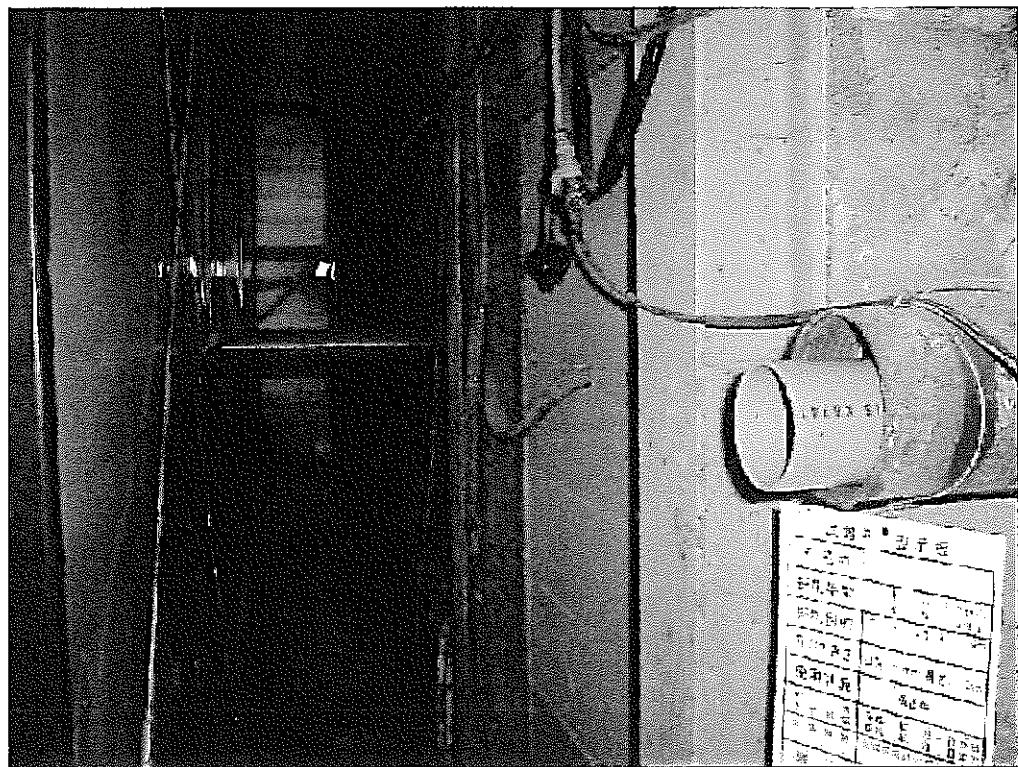


WL 4 対話型速度解析画面

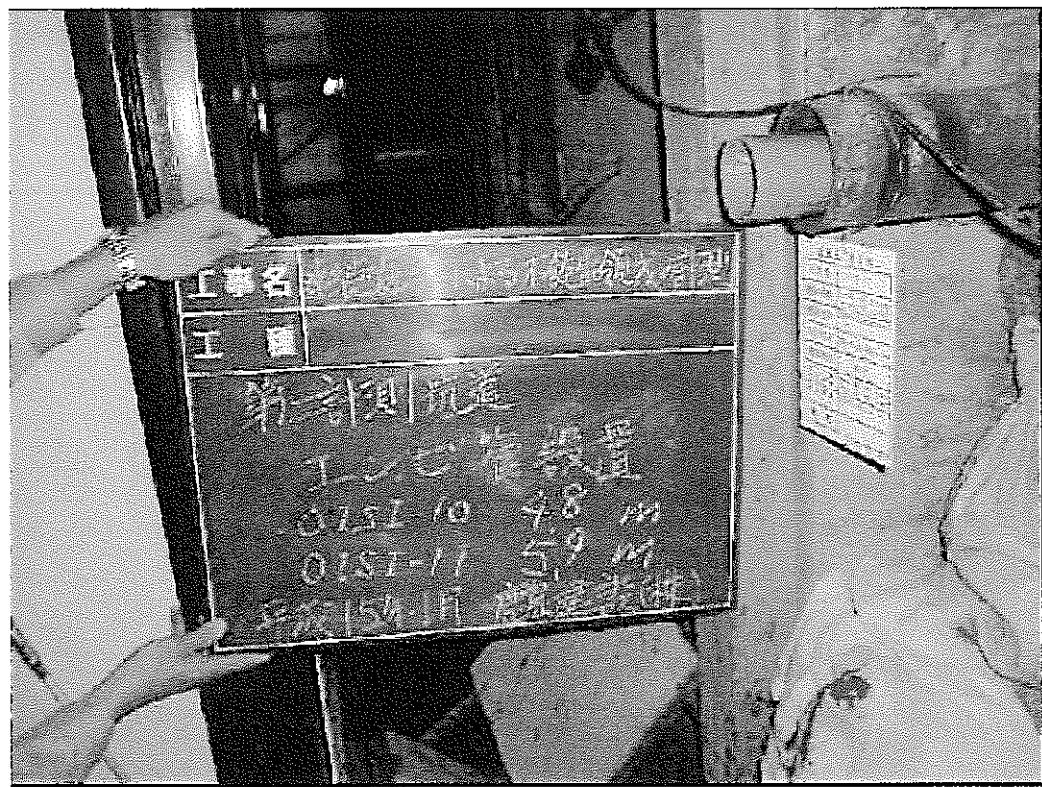


WL 5 対話型速度解析画面

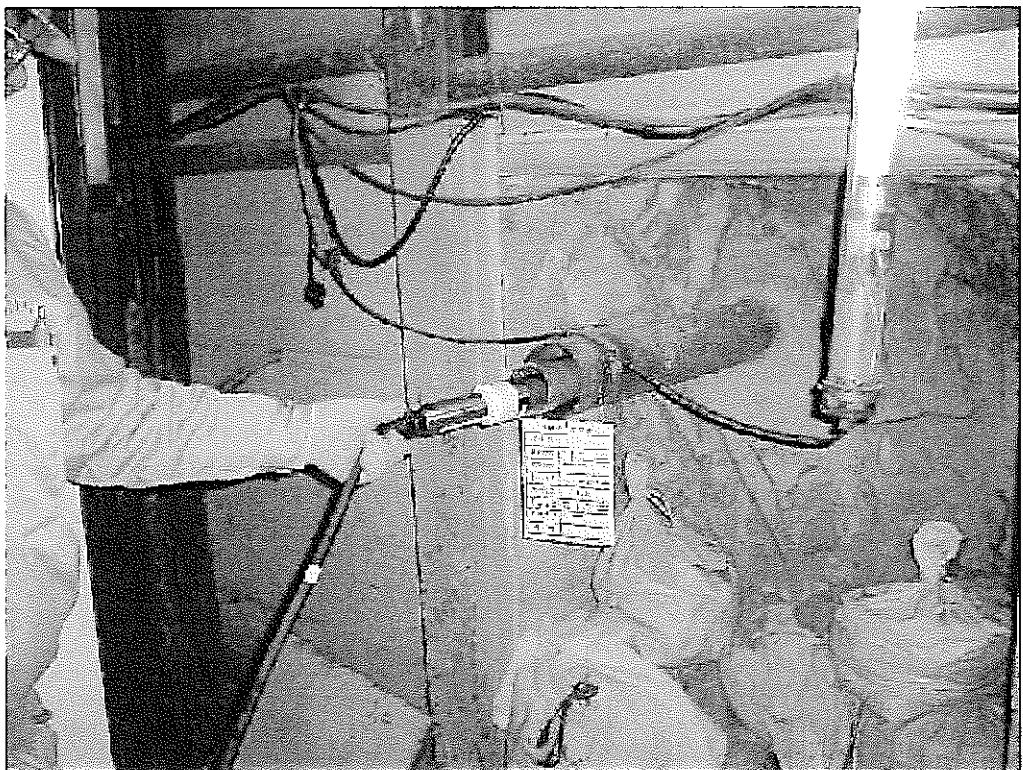
# 現場状況写真



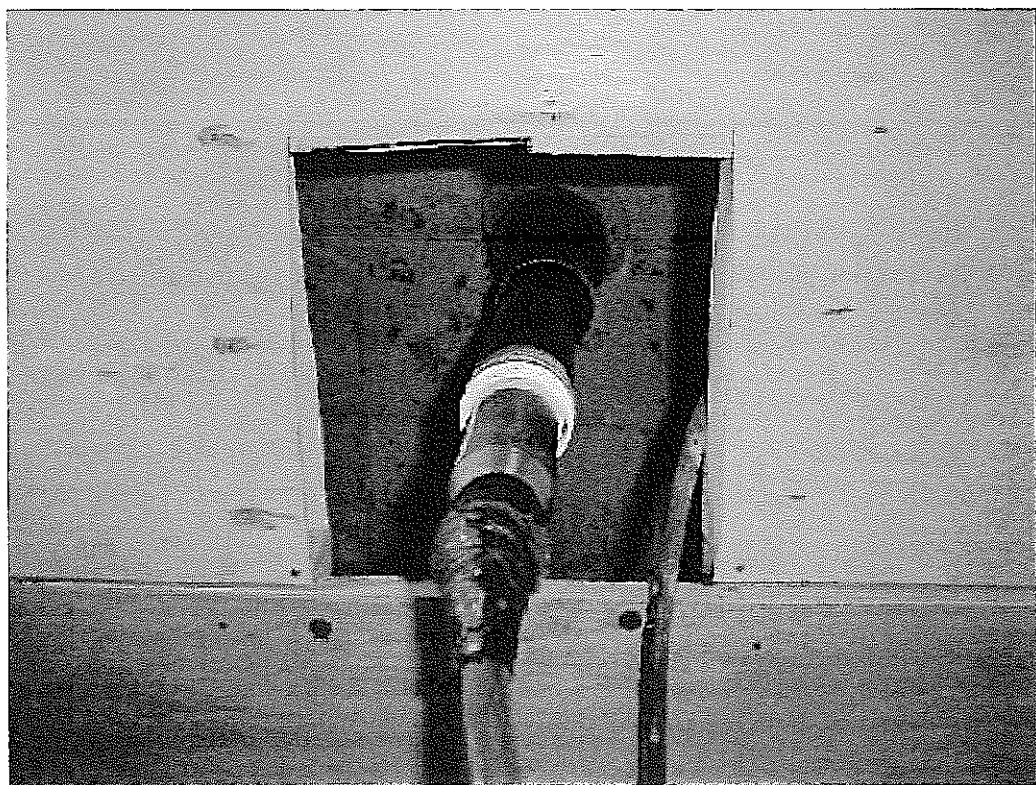
計測坑道：手前No.11孔、奥No.10孔



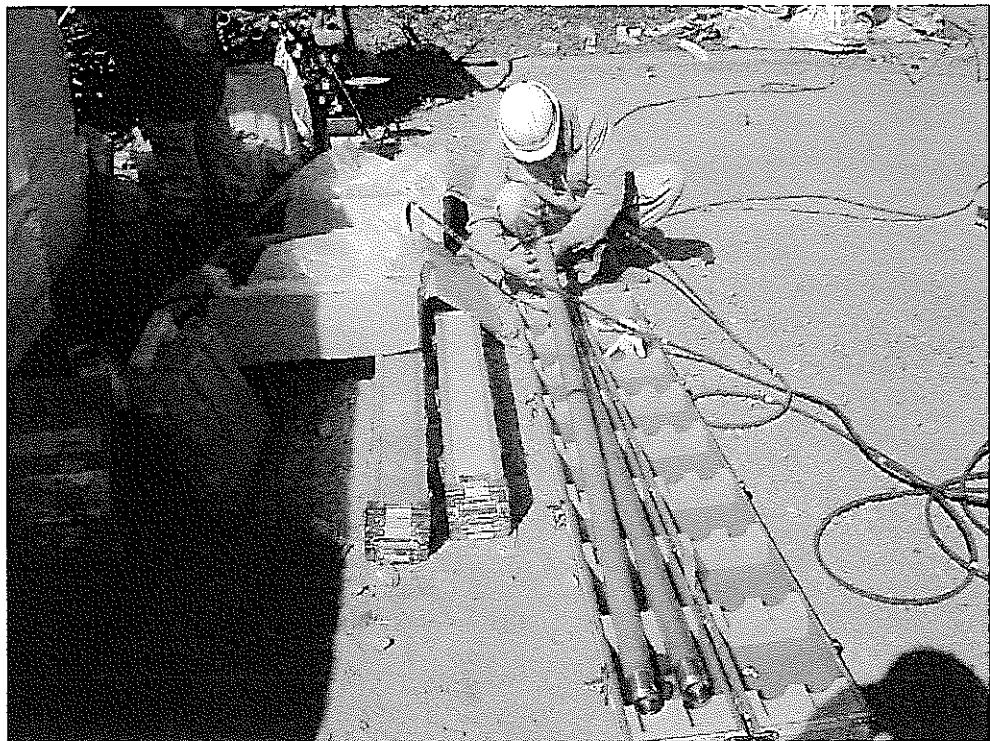
ボーリング孔へのエンビ管設置状況



計測用ゾンデ挿入状況（No.11孔）



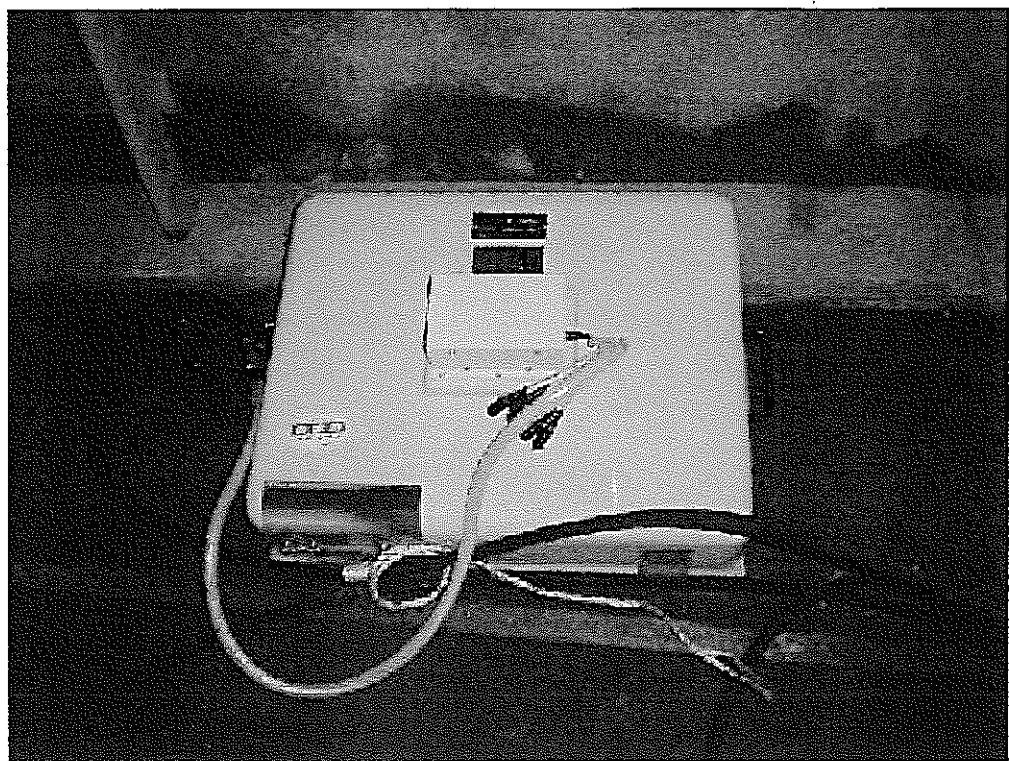
計測用ゾンデ挿入状況（No.10孔）



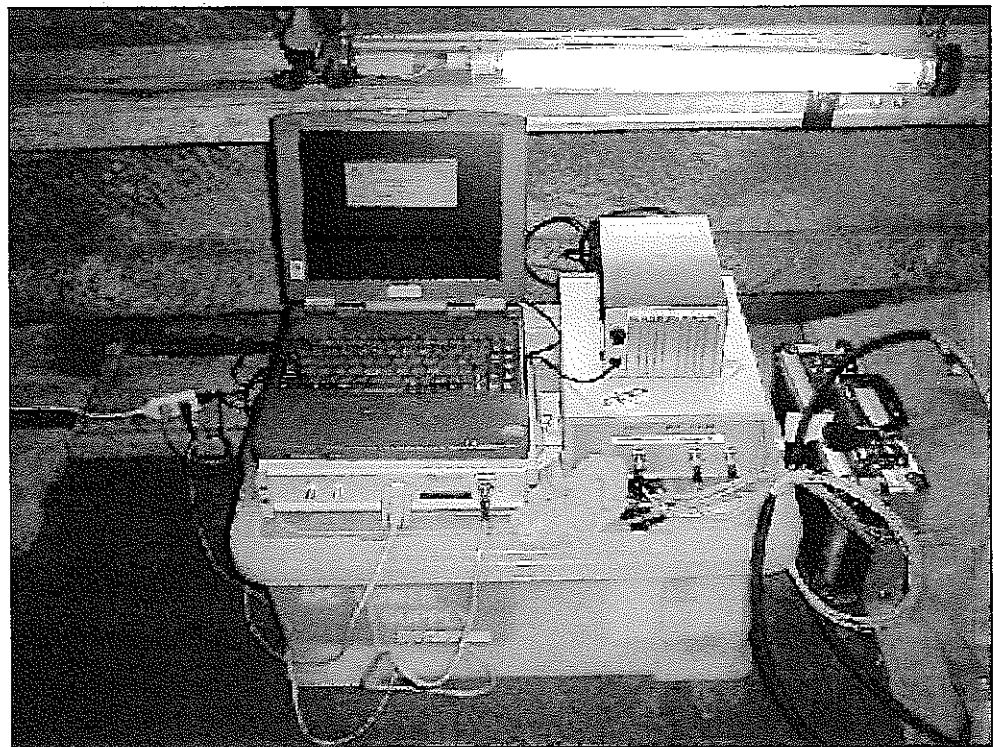
計測用ゾンデ



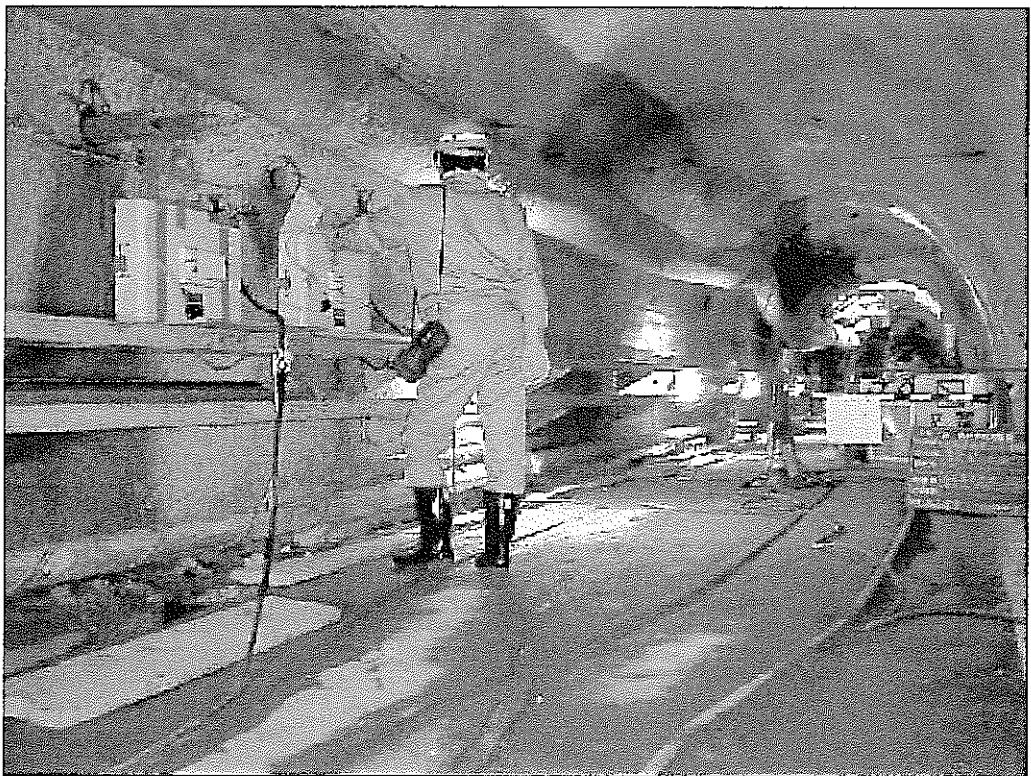
データ収録装置



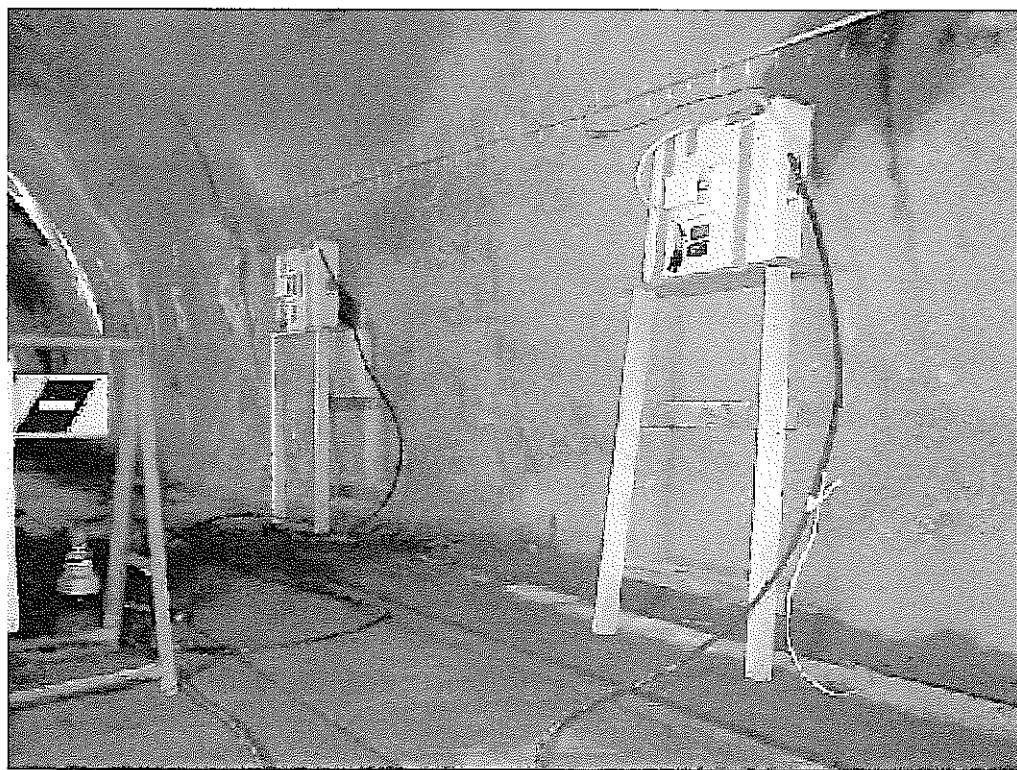
連続波レーダー



データ収録装置



プロファイル測定



ワイドアングル測定