

連続波レーダートモグラフィの適用試験

(平成10年度動力炉・核燃料開発事業団契約業務報告書)

1998年9月

川崎地質株式会社

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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu,Naka-gun,Ibaraki 319-1194,
Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

公開資料
JNCTJ 7420 98-005
1998年9月

連続波レーダートモグラフィの適用試験

(平成10年度動力炉・核燃料開発事業団契約業務報告書)

1998年9月

川崎地質株式会社

まえがき

ボーリング孔間の2次元断面を把握する方法として、ジオトモグラフィがある。ジオトモグラフィには、エネルギー源として弾性波、電磁波、電流などを用いる方法があるが、最も分解能が高いのがレーダー（電磁波）トモグラフィである。

しかし、電磁波トモグラフィは分解能が高い反面、岩盤でも20～30m程度の孔間距離の調査例しか報告されていない。連続波レーダートモグラフィは、従来のパルスレーダーの高分解能を維持したまま、孔間距離を延長することを目的として開発された方法である。

高分解能とは時間分解能のことであるが、従来のパルスレーダーではパルス幅を狭くする（周波数帯域を広くする）ことでそれに対応してきた。しかし、パルスの尖頭電圧には限界があり、従って、探査距離を延長するにも限度がある。そのため考案されたのが連続波レーダーである。連続波レーダーは、周波数変調された信号を送受信し、周波数領域で（位相スペクトルから）パルスレーダと同程度の高分解能の伝搬時間を得ることができる探査方法である。

本報告書は、既存の連続波レーダートモグラフィ装置を用いて、ボーリング孔間の岩盤内部の性状を把握することを目的とし、実施した調査の結果をとりまとめたものである。

公開資料
JNCTJ 742098-005
1998年9月

連続波レーダートモグラフィの適用試験

鈴木敬一* 林 泰幸* 西山英一郎*

要旨

既存の連続波レーダー装置を用いてトモグラフィへの適用性を検討するため、正馬様洞のAN-1号孔及びAN-3号孔の深度30~180m間でトモグラフィ測定を実施した。取得データ数は2,951である。現地測定終了後、B P T法及びS I R T法を用いてトモグラフィ解析を実施し、速度分布図及び振幅比分布図を得た。なお、トモグラフィ解析に先立ち、伝搬時間及び振幅のデータ品質管理を実施した。パルスレーダーと同程度の時間分解能を得るため、伝搬時間の読みとりには位相スペクトルから計算する方法を採用した。

解析結果及び既存ボーリングデータを用いて地質解釈を実施し、岩盤の性状を推定した。その結果、割れ目密度の大きい部分や変質帯の分布状況が明らかとなった。

本報告書は、川崎地質株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した調査の成果である。

契約番号：10C0487

事業団担当部課室及び担当者：東濃地科学センター 技術開発課 藤内 聰

* 川崎地質株式会社 本社環境防災事業部

JNCTJ 742098-005
SEPTEMBER, 1998

A feasibility study of applications of the FM-CW radar to Tomography

Keiichi SUZUKI, Hiroyuki HAYASHI and Eiichiro NISHIYAMA*

Abstract

A radar tomographic experiment with the FM-CW radar system was performed, between Hole AN-1 and Hole AN-3 in the Shomasamabora area at the range of 30 to 180 m depth. Totally, the 2,951 traces were recorded. After several quality control procedure, tomographic analyses were performed to obtain maps showing the distribution of velocity and absorption ratio. The sequence of the analyses consists of the Back Projection Technique (BPT) process and the Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT) process. The first arrival time of each record was determined by individual phase spectrum to keep the similar resolution to the pulse radar analyses.

The geological interpretation were conducted through our results and additional borehole data. The results revealed the distribution of the fractures and the zone of alteration.

Work performed by Kawasaki Geological Engineering Co., LTD. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC).
PNC Liaison: Satoshi Yabuuchi, Tono Geoscience Center, Geotechnics Development Section
Research Section: *Kawasaki Geological Engineering Co., LTD.

目 次

1. 業務概要	
1.1 件名	1
1.2 目的	1
1.3 業務期間	1
1.4 調査数量	1
1.5 業務発注者	1
1.6 業務実施者	1
2. 地形・地質概要	2
2.1 地形概要	2
2.2 地質概要	2
3. 電磁波トモグラフィ	5
3.1 ステップ式連続波レーダの測定原理	5
3.1.1 従来型探査装置（パルスレーダ）との相違点	5
3.1.2 パルス圧縮の原理	6
3.1.3 測定原理	7
3.2 測定方法	8
3.3 解析方法	11
3.3.1 伝搬時間及び振幅の読みとり	11
3.3.2 トモグラフィ解析	18
3.4 解析結果の評価	21
3.4.1 速度	21
3.4.2 振幅減衰	21
3.4.3 データの品質管理	22
3.4.4 地質解釈	24
4. 調査結果	25
4.1 速度トモグラフィ	25
4.2 振幅比トモグラフィ	29
5. 考察	32
6. まとめ	37
7. あとがき	38
8. 参考文献	39

付録

一送信点から得られた受信記録（伝搬時間）

一送信点から得られた受信記録（振幅）

現場関連写真

図表目次

図2.1-1 調査地周辺の地形図	3
図2.2-1 調査地周辺の地質図	4
図3.1.1-1 送信信号の比較	5
図3.1.3-1 連続波レーダのブロック図	8
図3.2-1 電磁波トモグラフィの測定概念	8
表3.2-1 電磁波トモグラフィ探査使用機器一覧	9
図3.2-2 トモグラフィデータ取得概要図	10
図3.3.1-1 送信深度GL-150mの生データ及び時間領域波形	12
図3.3.1-2 送信深度GL-100mの生データ及び時間領域波形	13
図3.3.1-3 送信深度GL-50mの生データ及び時間領域波形	14
図3.3.1-4 送信深度GL-150mの振幅スペクトル及び位相スペクトル	15
図3.3.1-5 送信深度GL-100mの振幅スペクトル及び位相スペクトル	16
図3.3.1-6 送信深度GL-50mの振幅スペクトル及び位相スペクトル	17
図3.3.2-1 トモグラフィ解析の流れ	18
図3.3.2-2 波線（パス）とセル	19
図4-1 測定波線図	26
図4.1-1 速度分布図	27
図4.1-2 地質との対比（速度分布図）	28
図4.2-1 振幅比分布図	30
図4.2-2 地質との対比（振幅比分布図）	31
図5-1 コンター図	33
図5-2 割れ目分布推定図	34
図5-3 電磁波速度、減衰と物性の関係	35
図5-4 速度及び振幅比区分図	36

1. 業務概要

1.1 件名

連続波レーダートモグラフィの適用試験

1.2 目的

動燃事業団では、岩盤内部の割れ目を検出する技術開発としてレーダ調査法の技術開発を実施しており、これまでにパルス波を用いたレーダ調査法の技術開発を行った。しかし、パルス波では調査可能な深度に限界があるため、深度を拡大する調査技術として連続波を用いたレーダ調査法の開発に取り組んでいる。

本件の目的は、連続波を用いたレーダ調査法の開発の一環として、複数の試錐孔を用いて、試錐孔間の岩盤内部の割れ目の位置や広がりを推定するレーダトモグラフィ調査法の適用性を把握するために適用試験を実施したものである。

1.3 業務期間

工 期 : 平成10年7月17日から平成10年9月30日まで

1.4 調査数量

全測定パス数：2,951パス

1.5 業務発注者

動力炉・核燃料開発事業団（以下、動燃事業団と略記）

東濃地科学センター 技術開発課

岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

担当官 : 藤内 聰 研究員

Tel. 0572-53-0211

1.6 業務実施者

(受注者)

川崎地質株式会社 関東支社

東京都大田区大森北1丁目11番1号

Tel. 03-3762-2571

(業務実施者)

川崎地質株式会社 本社 環境防災事業部

東京都品川区南大井6丁目24番10号

現場代理人 : 林 泰幸

管理技術者 : 笠井弘幸

照査技術者 : 野口静雄

Tel. 03-5762-1601, Fax. 03-5762-1605

2. 地形・地質概要

2.1 地形概要

図2.1-1に調査地周辺の地形図を示す。

調査地である瑞浪市明世町月吉正馬様洞は土岐市街地から北東部へ約4.5km離れた、標高約220mの丘陵地に位置する。調査地の北部及び北西部には多数のゴルフ場があり、周辺の地形は人工改変されている。北部には可児川の水源である松野湖が存在する。南部には土岐川がほぼ東西方向に流れしており、それと平行して中央自動車道及び中央本線が縦走している。

2.2 地質概要

図2.2-1に調査地周辺の地質図を示す。

岐阜県東濃地域は長野県南部・岐阜県東部から、伊勢湾周辺、京都・大阪付近、瀬戸内海沿岸、中国山地の各地に至る、ほぼ東西にのびる細長い地域に分布する中新統に属し、時代的には前～中期中新世である。

この中新統は東濃地域では東より岩村、瑞浪、可児の3つの盆地に分布している。その他に、瑞浪盆地の南西（愛知県瀬戸市）にも小分布がある。瑞浪盆地は主に瑞浪市～土岐市の土岐川を挟んだ地域に見られる。全体をまとめて瑞浪層群と呼ぶが、岩村層群、瑞浪層群、可児層群に区分することもある。各盆地の長軸の方向はほぼ北東～南西方向で、基盤（中・古生層、濃飛流紋岩類、花崗岩類など）を不整合に覆う。瑞浪層群は泥岩、砂岩、凝灰岩等から成り、下部は淡水成、上部は海成で固結度は低い。

美濃帯に分布する古第三紀花崗岩類に属する土岐花崗岩は土岐市～瑞浪市周辺に直径12～14kmのほぼ円形の岩体として分布する。主に細～粗粒の黒雲母花崗岩からなり、角閃石を含んで花崗閃緑岩質になることもある。また黒～暗灰色になった石英を多く含み、晶洞性のペグマタイトも多い。ウランやトリウムの含有量が多く、それらが被覆層の新第三系に濃集してウラン鉱床を形成している。

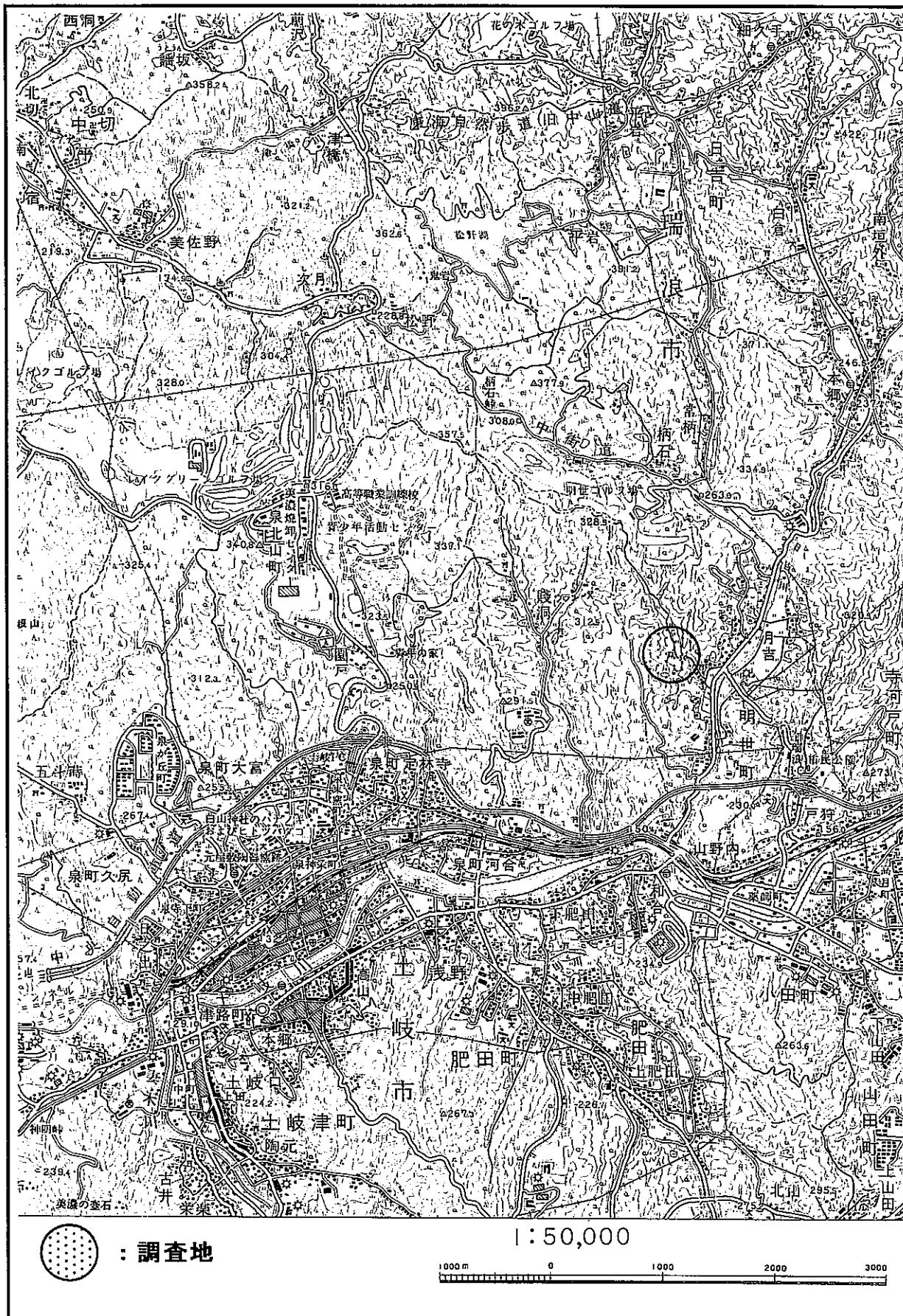


図2.1-1 調査地周辺の地形図

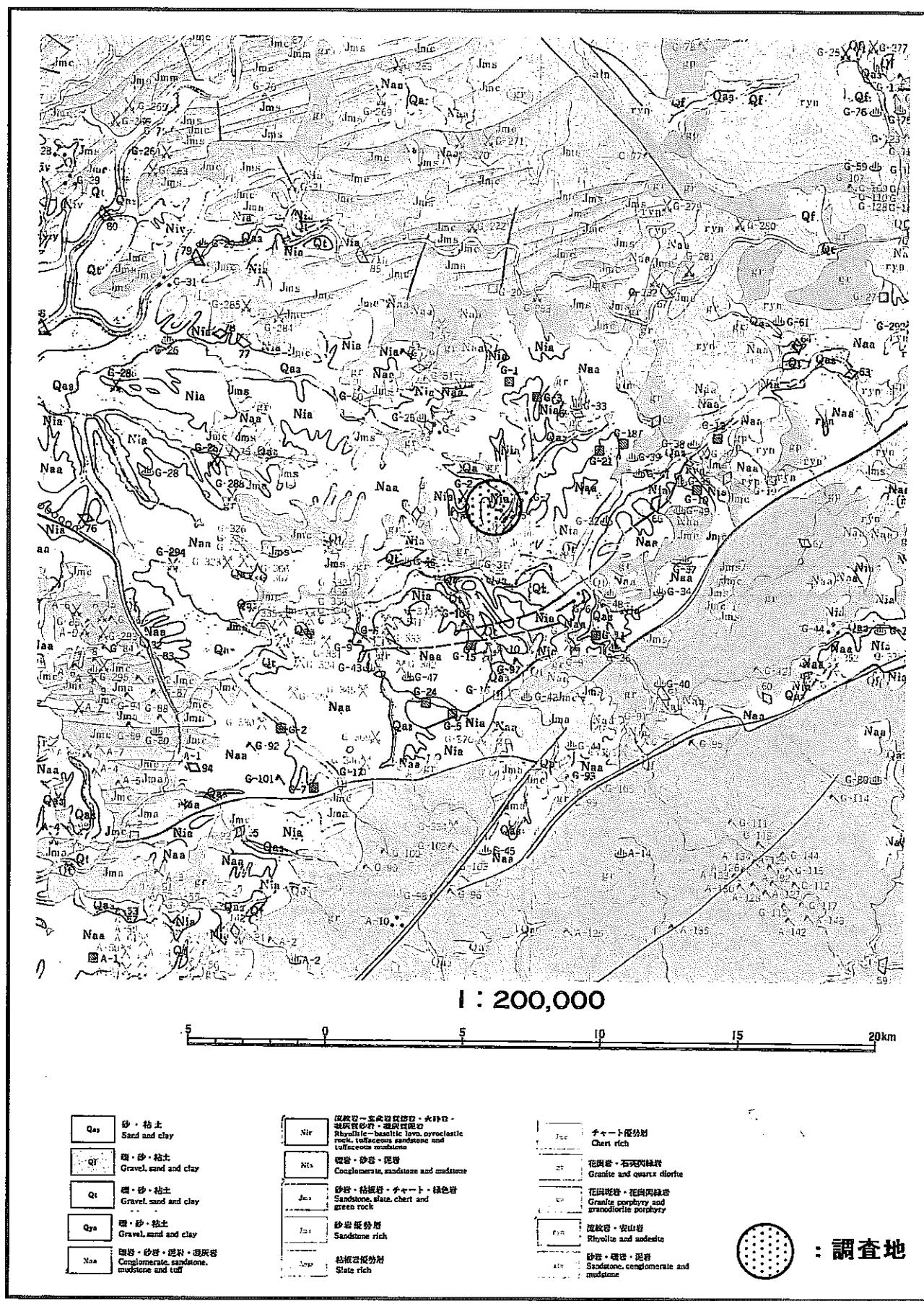


図2.2-1 調査地周辺の地質図

3. 電磁波トモグラフィ

3.1 ステップ式連続波レーダの測定原理

3.1.1 従来型探査装置（パルス・レーダ）との相違点

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照射される電磁波のもつパワーを上げなければならない。送信信号の瞬間的なエネルギーは振幅の2乗に比例する。また総エネルギー量は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探査に用いられている送信波形は図3.1.1-1(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が、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。また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。したがって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。

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)に示す波形（チャーブ信号波形）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、正弦波を低周波数の信号から高周波数の信号へと波形のもつ周波数を変更しながら送信していることである。したがって、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。また送信信号の周波数の範囲を大きくと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還元することができる。

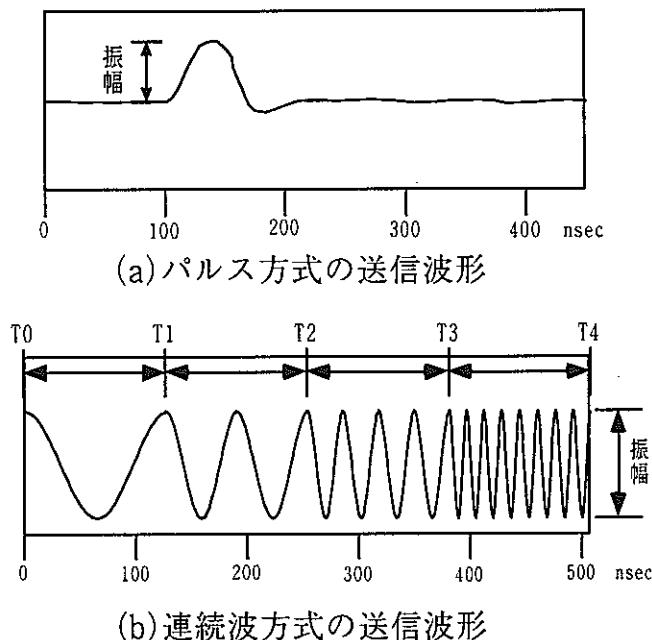


図3.1.1-1 送信信号の比較

3.1.2 パルス圧縮の原理

送信能力に優れたチャーブ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チャーブ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

$$S_p(\omega) = |S_t(\omega)|^2 H(\omega) \exp(-\alpha r) \cdot \exp\{-j\omega\tau(\omega)\} \quad (1)$$

と表すことができる。したがって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、

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

となる。(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

図3.1.3-1に連続波レーダのブロック図を示す。

連続波レーダの送信方式は、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。

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、0.1~8.0MHz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。

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、0.1~8.0MHzの受信信号は10.8~18.7MHz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、

$$\tau = \frac{d\theta}{d\omega} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{df} \quad (3)$$

である。よって、(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。

振幅Aは次式で表される。

$$A = (e_R^2 + e_I^2)^{1/2}$$

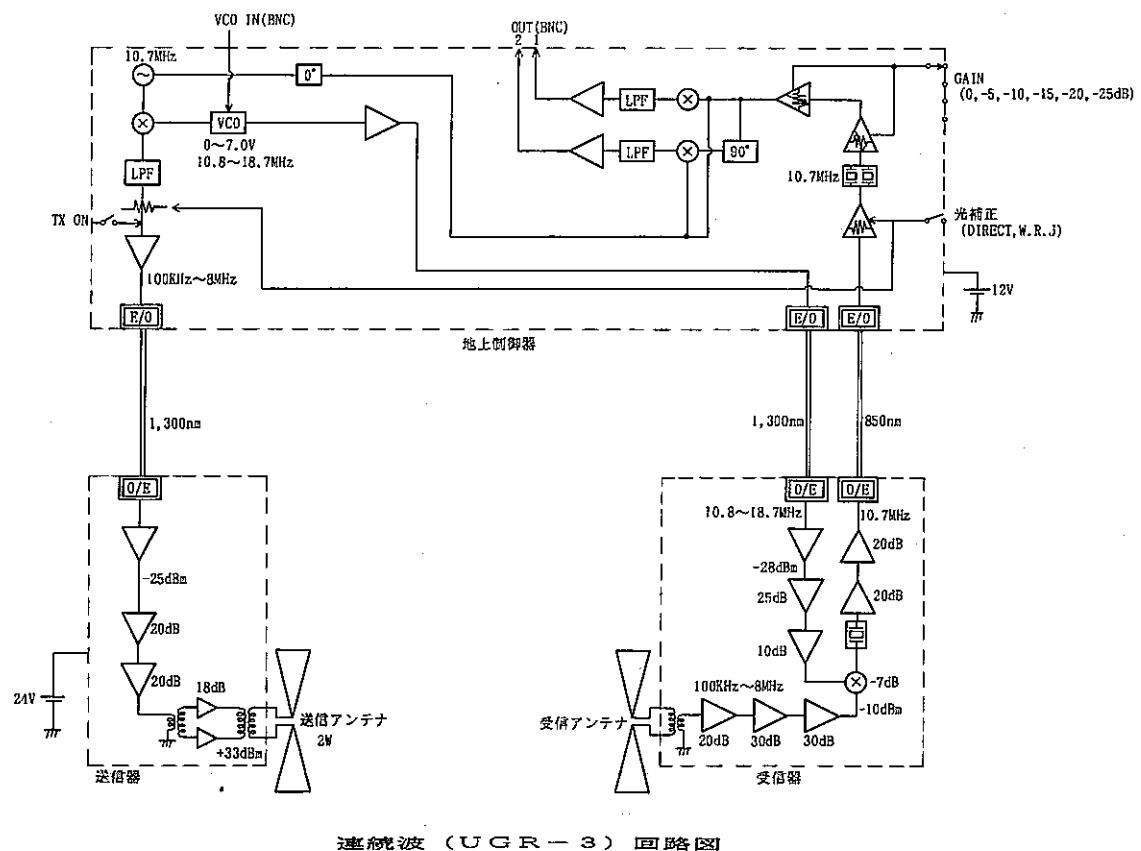


図3.1.3-1 連続波レーダのブロック図

3.2 測定方法

図3.2-1に測定の概念を示し、表3.2-1に使用測定機器の主な仕様を示す。

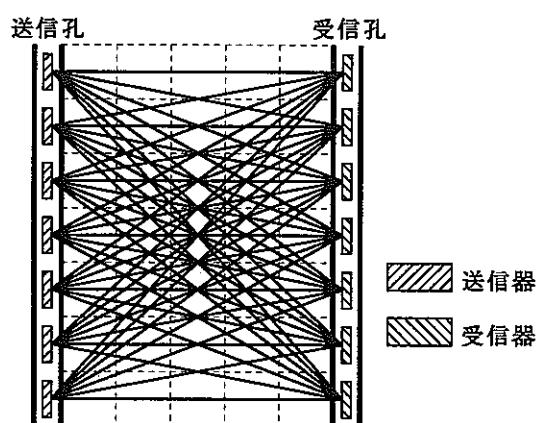


図3.2-1 電磁波トモグラフィの測定概念

**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)**

項目	仕 様
送信部	送信周波数 ; 0.1~7.4MHz 電力増幅方式 ; B級プッシュプル
受信部	受信周波数 ; 0.1~7.4MHz 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3,500mm, 外径φ45mm
ケーブル	種類 ; 光ファイバー 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

AN-1孔及びAN-3孔の2つの試錐孔を使用し, AN-3孔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)を所定の位置に設置し, AN-1孔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)を設置して電磁波の透過波形を記録する。1つの送信点に対して受信ゾンデを受信深度区間全域で等間隔に移動しながら測定を繰り返す。1つの送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。

現地では以下のような仕様で1送信点に対し, 同一深度の点と上方10点および下方10点の最大21カ所の受信点でトモグラフィデータを取得した(図3.2-2 参照)。

- ・データ取得深度 送信側(AN-3号孔) 深度30m~180m
受信側(AN-1号孔) 深度30m~180m
- ・送信点間隔 1m
- ・受信点間隔 2m
- ・連続波周波数帯域 0.1MHz~7.4MHz
- ・周波数ステップ幅 61.34kHz
- ・データ記録長(時間) 16.3 μ sec
- ・送信電力 2W
- ・取得データ 各周波数ステップごとの送信波形と受信波形の積算値 e_R と位相を $\pi/2$ ずらした送信波形と受信波形の積算値 e_I
- ・スタッツ回数 20回

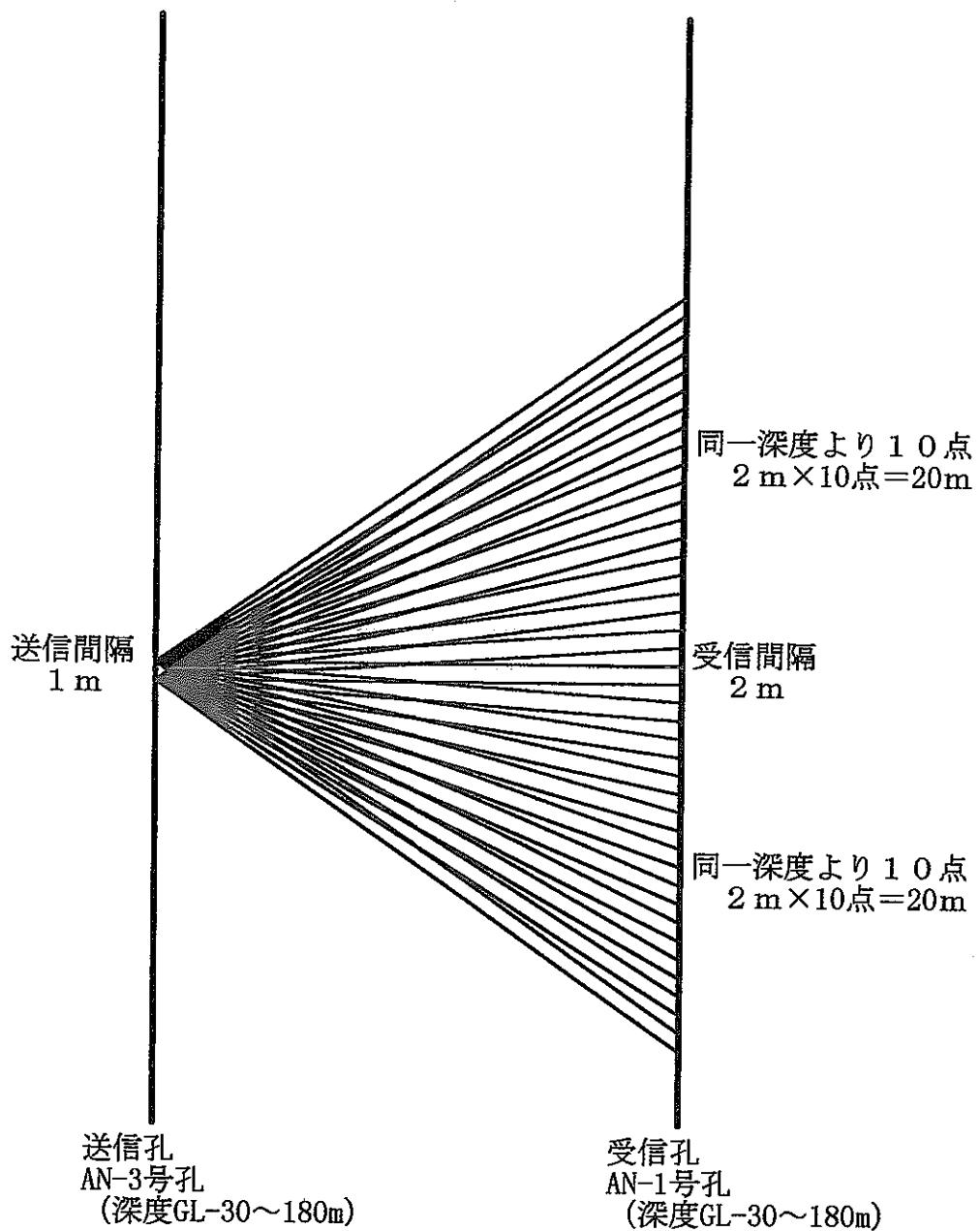


図3.2-2 トモグラフィデータ取得概要図

3.3 解析方法

3.3.1 伝搬時間及び振幅の読みとり

以下に代表的な生データとパルス圧縮（逆フーリエ変換）による時間領域波形の例を示す。

(1) 送信深度GL-150m

送信深度をGL-150mに固定したときの、受信深度GL-130m, GL-150mの生データ及び時間領域波形を図3.3.1-1に示す。時間領域波形の全長は16300nsecであるが、同図中には4000nsecだけ表示している。両者を比較すると受信深度GL-130mの方が山と山（あるいは谷と谷）の間隔が狭まり伝搬時間が大きく、振幅も小さくなっていることがわかる。時間領域波形でも、生データ同様、受信深度GL-130mの方が伝搬時間が大きく、振幅が小さくなっている。

(2) 送信深度GL-100m

送信深度をGL-100mに固定したときの、受信深度GL-80m, GL-100mの生データ及び時間領域波形を図3.3.1-2に示す。表示方法は(1)と同じである。両者を比較すると(1)と同様の傾向が見られる。送信深度GL-150mの場合と比較すると伝搬時間が大きく、振幅も小さい。

(3) 送信深度GL-50m

送信深度をGL-50mに固定したときの、受信深度GL-30m, GL-50mの生データ及び時間領域波形を図3.3.1-3に示す。表示方法は(1)と同じである。両者を比較すると(1), (2)と同様の傾向が見られる。送信深度GL-100mの場合と同様の（送信深度GL-150mより伝搬時間が大きく、振幅が小さい）傾向である。

本調査の測定データにはS/N比の低いデータも含まれていたため、透過信号からスペクトルを求め、位相スペクトルから電磁波の各送受信点間における伝搬時間を最小自乗法を用いて算出し、振幅スペクトルから最大振幅を読みとった。これらの伝搬時間及び振幅値を観測量として逆解析によって孔間断面における速度分布及び振幅比分布を求めた。

上記データの振幅スペクトル及び位相スペクトルを図3.1.3-4～6に示す。

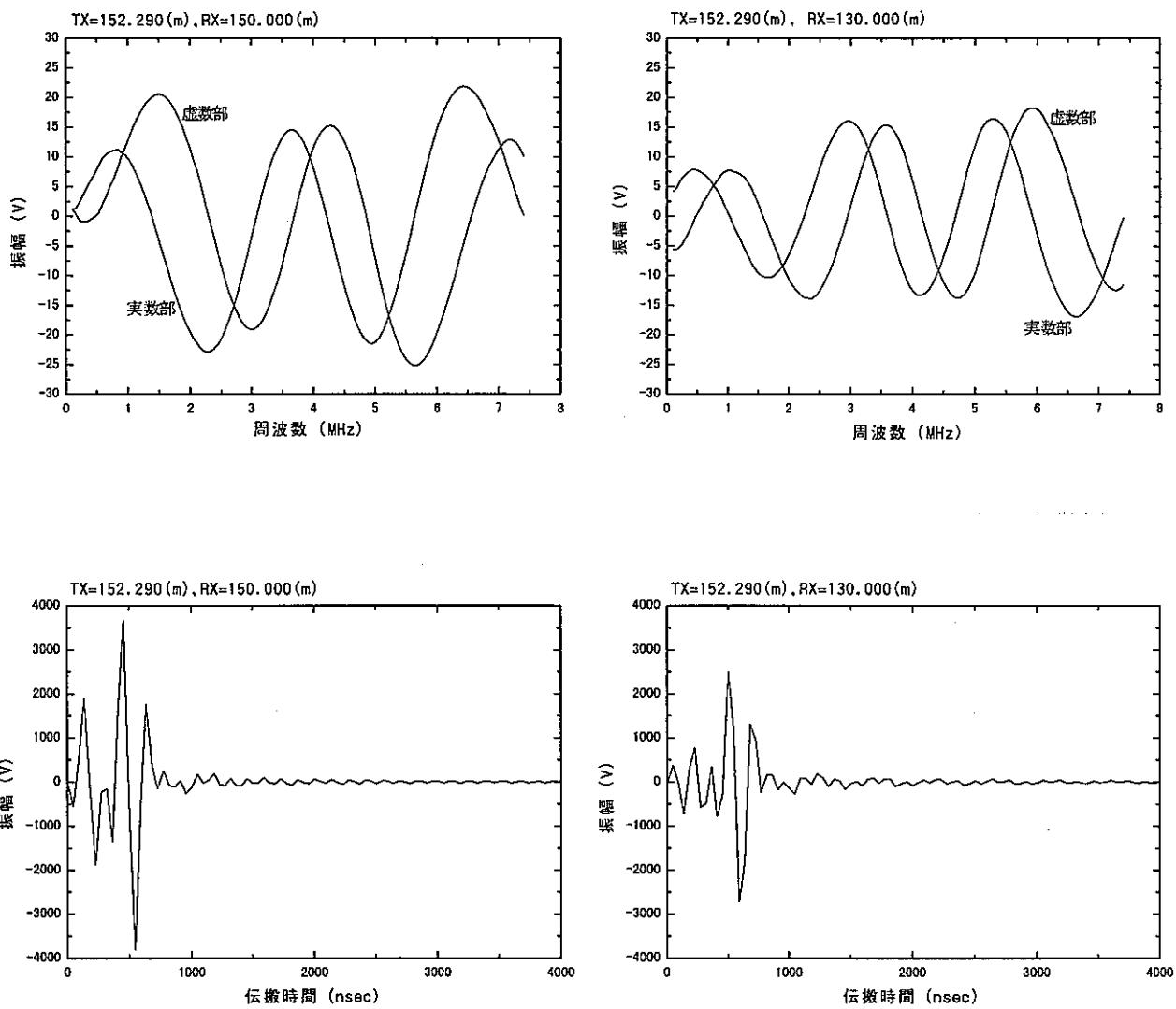


図3.3.1-1 送信深度GL-150mの生データ及び時間領域波形

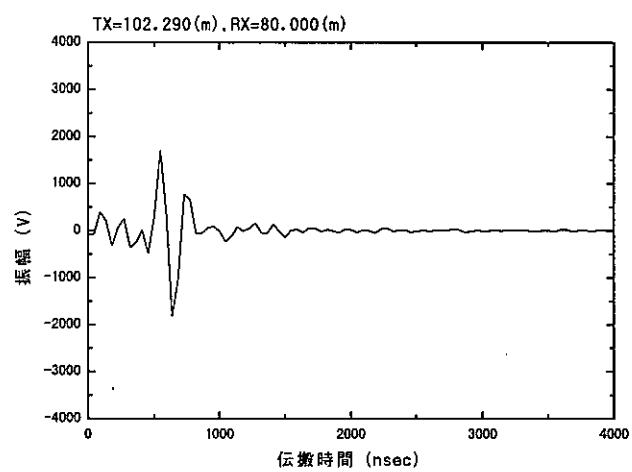
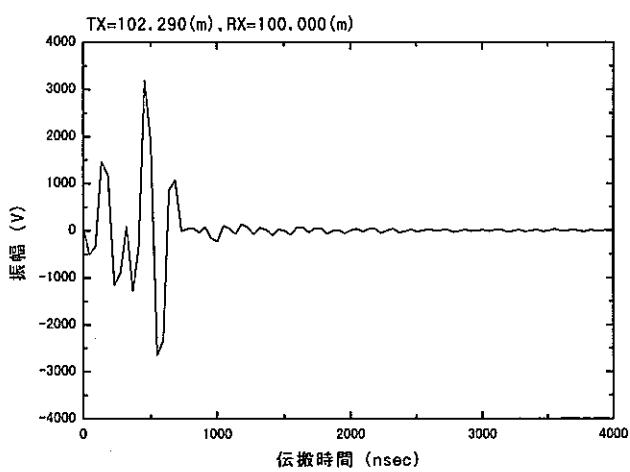
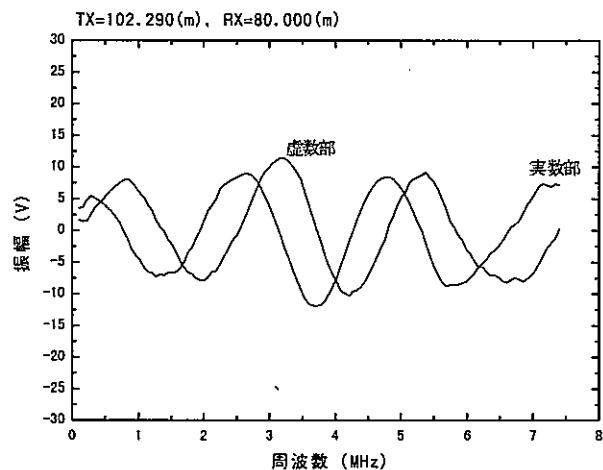
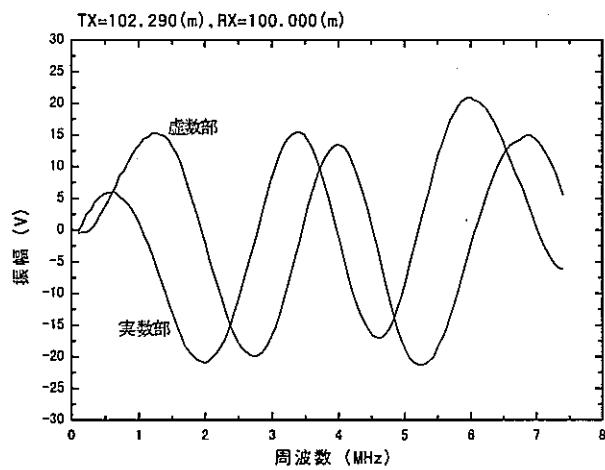


図3.3.1-2 送信深度GL-100mの生データ及び時間領域波形

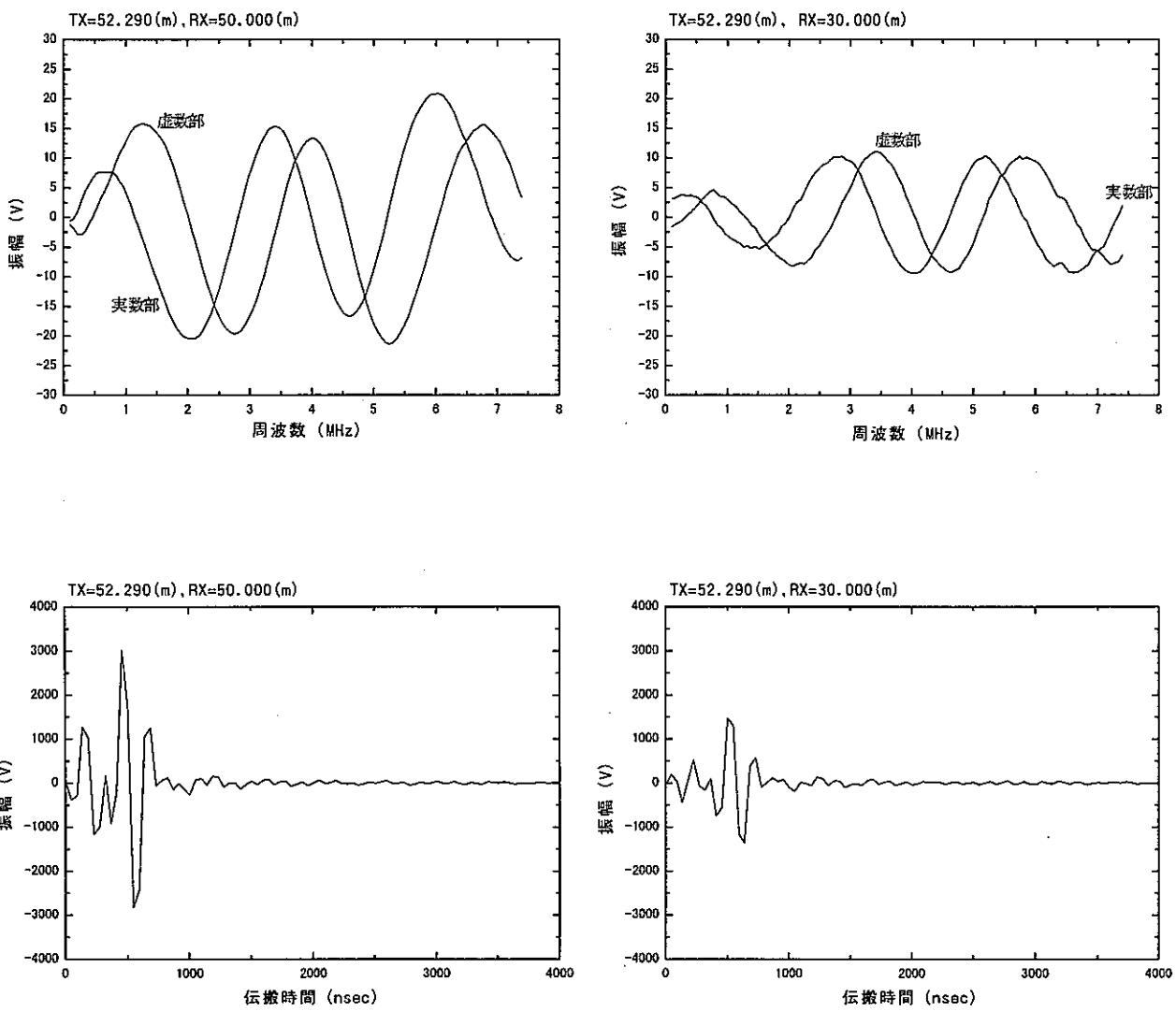


図3.3.1-3 送信深度GL=50mの生データ及び時間領域波形

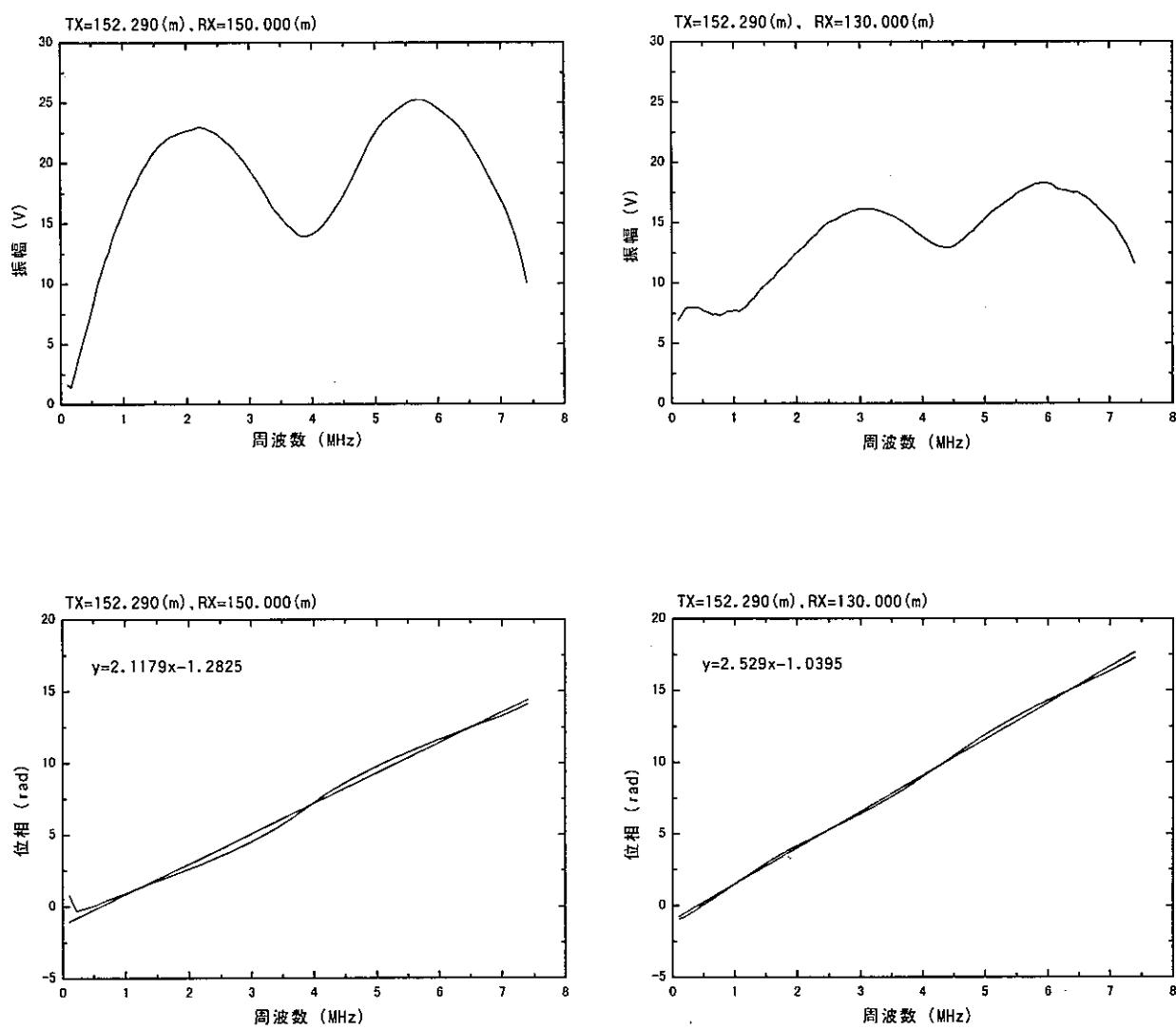


図3.3.1-4 送信深度GL-150mの振幅スペクトル及び位相スペクトル

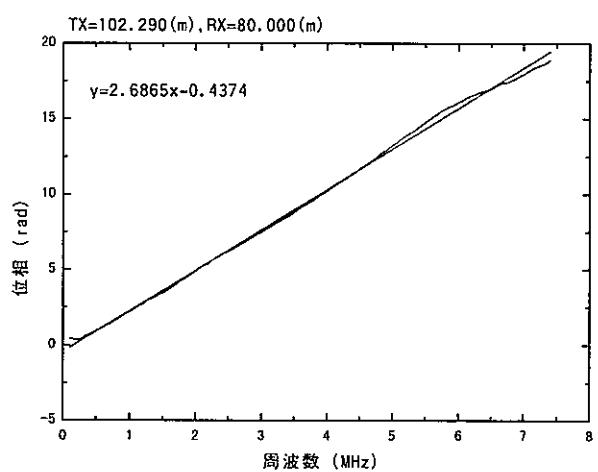
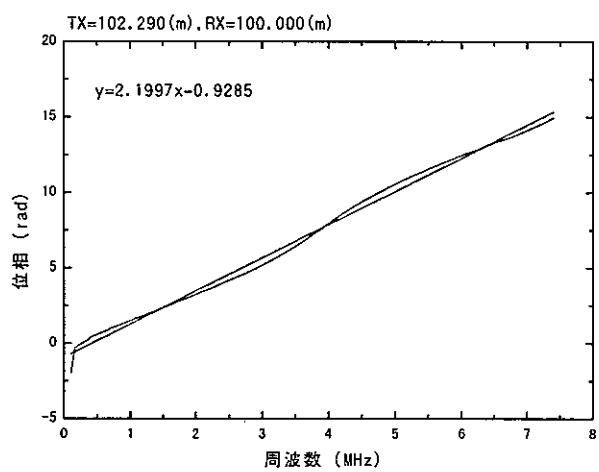
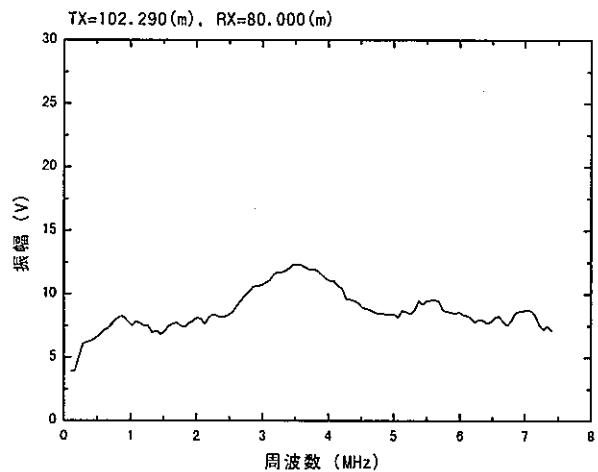
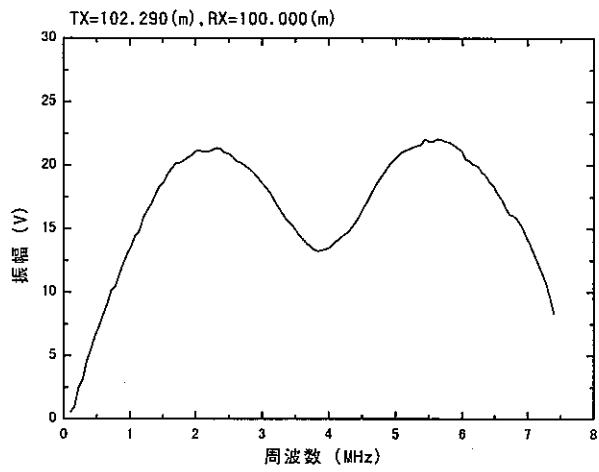


図3.3.1-5 送信深度GL-100mの振幅スペクトル及び位相スペクトル

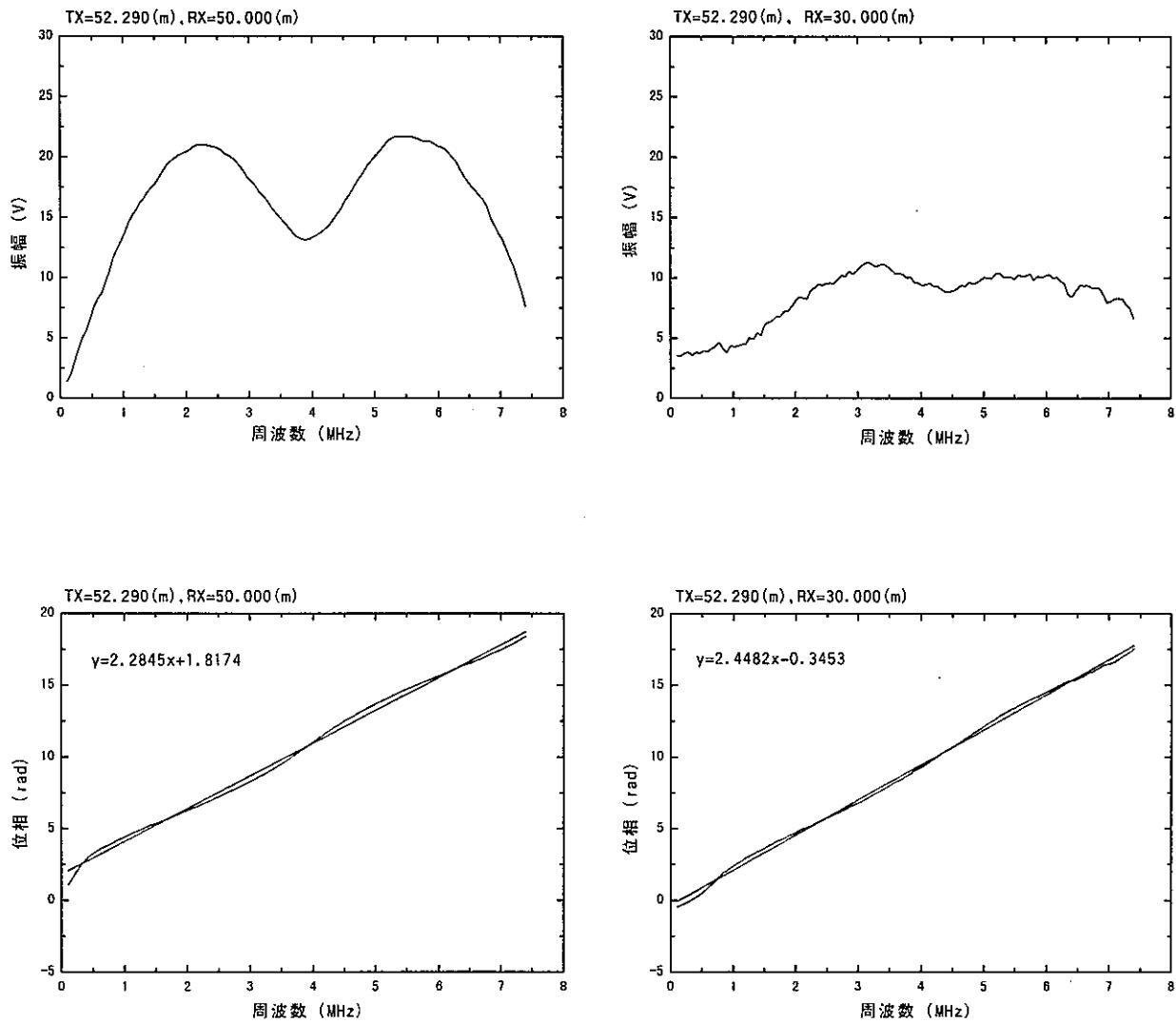


図3.3.1-6 送信深度GL-50mの振幅スペクトル及び位相スペクトル

3.3.2 トモグラフィ解析

試錐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、図3.3.2-1に示すように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つ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。

逆解析の方法には種々の方法があるがここでは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。

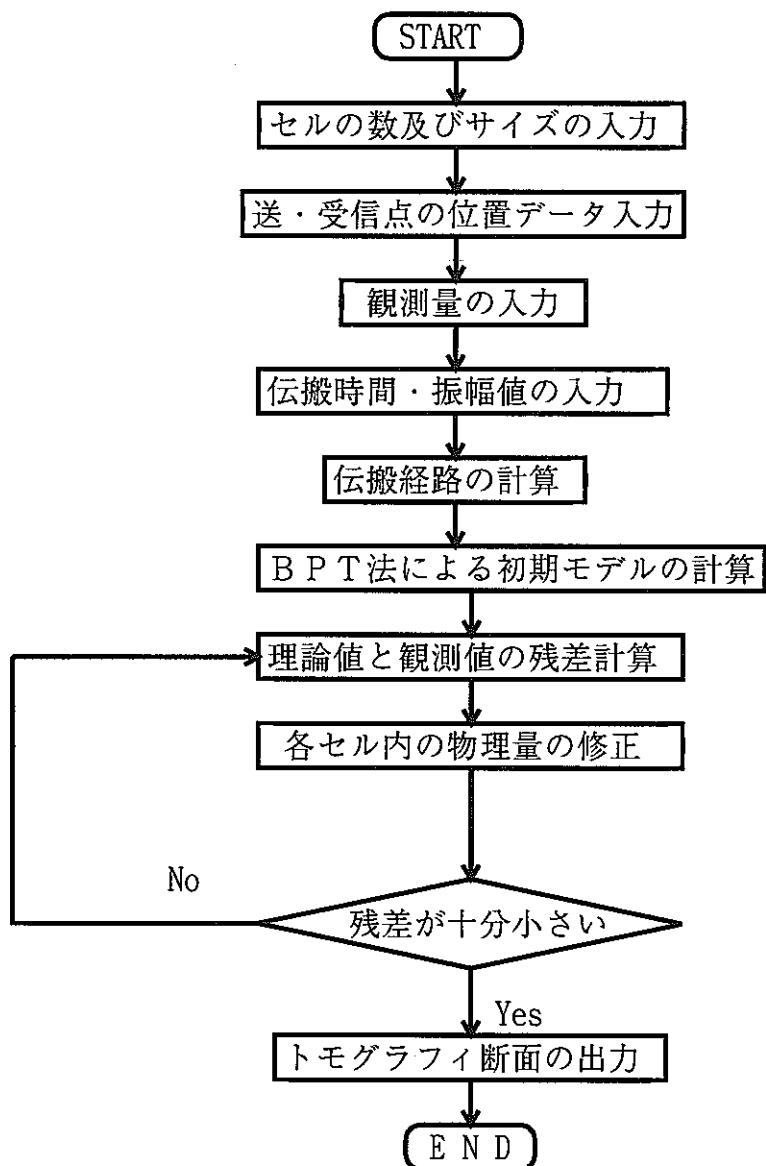


図3.3.2-1 トモグラフィ解析の流れ

(1) 逆投影法 (BPT法)

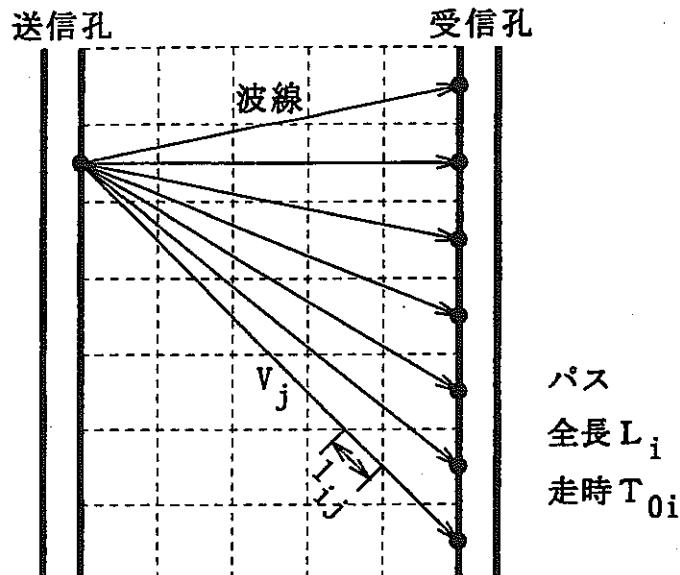


図3.3.2-2 波線（バス）とセル

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（図3.3.2-2参照）。また、各セルに与えられる物理量を q_i で表すものとする。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。

$$q_i = \frac{\sum_i (f_i \cdot l_{ij} / L_i)}{\sum_i l_{ij}}$$

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法ではまず各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^{n+1}_j はn回目

の物理量 q^n_j を用いて S I R T 法では次のように求める。

$$q^{n+1}_j = q^n_j + \Delta u_j / \sum_i l_{ij}$$

$$\Delta u_j = \sum_i \delta p^n_i \frac{l_{ij}}{\sum_j l_{ij}^2}$$

また、S I R T 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) B P T 法と S I R T 法の相違点

B P T 法と S I R T 法の相違は、B P T 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、S I R T 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。したがって B P T 法では反復演算は実施しない。

3.4 解析結果の評価

3.4.1 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 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、伝搬速度 v は次式で与えられる。

$$v = (\epsilon \mu / 2)^{-1/2} \cdot [\{1 + (\sigma / \epsilon \omega)^2\}^{-1/2} + 1]^{-1/2}$$

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できる。

$$v = c / (\epsilon')^{1/2}$$

ここで c 及び ϵ' は光速度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。空气中では比誘電率はほぼ1と考えることができるから光速度で電磁波は伝搬する。

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や風化作用によって粘土鉱物など導電性の媒質が充填されている場合では岩盤中の伝搬速度は相対的に遅くなる。

3.4.2 振幅減衰

振幅減衰に与える誘電率と導電率の関係は、前述のパラメーターを用いて減衰常数 α を示すと

$$\alpha = (\mu / \epsilon)^{1/2} \cdot \sigma / 2 \quad (\text{S I 単位 ; } 1/\text{メートル})$$

となる。

一般に水の導電率は大きく、また岩盤の断層・破碎帯に沿って粘土化が進行しているれば、良導体粒子の量が増えるため導電率が周辺部分よりも大きくなる。上式で示すとおり減衰率は誘電率の平方根に逆比例し、かつ導電率の一次関数となっている。媒質の違いによる導電率（比抵抗の逆数）の変化は元々、誘電率の変動幅よりも遙かに大きく、減衰率を決める要素のうち、導電率の関与が最も大きいと考えができる。したがって岩盤中にある断層、破碎帯、変質部等は周囲の岩盤に比べ一般に含水率が高く、粘土化も進行していると考えられるので減衰率は大きくなる。

波動の伝搬様式として平面波を仮定すると、振幅 A は次式で示すことができる。

$$A = A_0 \exp(-\alpha r)$$

ここで A_0 は送信時における振幅（すなわち、伝搬距離が零であるときの振幅）、 r は伝搬距離、 α は減衰率を表す。トモグラフィ測定において、 i 番目に測定した測定振幅を A_i で表し、このとき波動が通過したセルを添え字 j で表せば、測定振幅 A_i は次式で示すことができる。

$$A_i = A_0 \exp\left(-\sum_j \alpha_j r_{ij}\right)$$

ただし、 α_j 及び r_{ij} は j 番目のセルにおける減衰率及び波線長（ i 番目の測定において波線が j 番目のセルを切るとき、そのセル内における波線の長さを表す。）上式を自然対数で表すと

$$\ln(A_i) = \ln(A_0) - \sum_j \alpha_j r_{ij}$$

となる。トモグラフィ計算では $\ln(A_i)$ を観測量として用いている。本来は $\ln(A_i/A_0)$ を観測量とすべきであり、この意味において「振幅比トモグラフィ」と呼ばれるが、 A_0 は測定ないし観測できない量であり、便宜的に $\ln(A_i)$ を観測量として用いる。 $\ln(A_i/A_0)$ を観測量として用いるとセル内の減衰率を求めることができるが、ここで明らかになるのはセル内の減衰率ではなく、送信時における対数振幅（各測定時においては一定の値と考える。）を各セルにおける波線長に応じて振り分けた値から減衰率を差し引いた値となる。したがってセル内の値は減衰が無いときに本来、各セルがもつべき平均対数振幅値からセル内の減衰率を差し引いた値を表し、数値が小さいほど減衰が大きいことを示す。強いてセル内の物理量を定式化するとすれば、以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{(セル内の物理量)} &\doteq \frac{\ln(A_0) + \sum_i \left(r_{ij} / \sum_j r_{ij} \right) - \alpha_j}{\sum_i r_{ij}} \\ &= (\text{減衰を伴わない時の平均対数振幅}) - (\text{減衰率}) \end{aligned}$$

上式から右辺第1項のディメンション（次元）は [(電力) / (距離)] であり、第2項の次元は [1 / (距離)] であるからセル内の物理量の単位を決定することはできない。そこで減衰量を表す尺度としてセル内の物理量を便宜上、「振幅比」と呼ぶことにし、これを成果断面とした。

3.4.3 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。なお、巻末の付録に品質管理状況をまとめた。

(1) 電磁波速度分布の解析の場合

①全測定パス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水平対向同士のパスであるはずである。この理論を利用するため、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) と各展開における試錐孔の座標から算出した伝搬距離を用いて伝搬速度 (V_c) を算出した。

②①の段階で水平対向における V_c が各展開毎に求まる（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) を再計算した。

③②の段階で全測定パス数と同数の T_c が求まる。 T_0 から T_c を差し引き、その絶対値をとる。各展開毎に着目し、以下の式を用い標準偏差 (S_i) を算出した。標準偏差は小さければ小さいほどデータの相関が良い。

$$S_i = \left(\sum^n (T_0 - T_c)^2 / n \right)^{1/2} \quad (n : サンプル数を示し、各展開で数は異なる)$$

④③の段階で全測定パス数と同数の $|T_0 - T_c|$ と、各展開につき 1 個の S_i が求まる。各 S_i 每 (= 各展開毎) の走時曲線を作成する。そして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) = 20.521 を算出した。

⑤ $|T_0 - T_c|$ が $2R$ 以上 ($20.521 \times 2 = 41.043$) になるパスのデータを削除した ($2R$ が偽像除去に最適)。

(2) 振幅比分布の解析の場合

①全測定パスのデータを用いて解析を行い、各展開時における振幅 (a_0) を求める。この a_0 は次式の関係を持つ。

$$A_0 = a_0 \cdot r / (\cos^2 \theta) \cdot \exp(-\alpha r)$$

r は伝搬距離、 θ はある送信点からその水平対向の受信点を軸にした時、その軸から同じ展開における他の受信点までの角度、 α は減衰率を表す。

また、 A_0 は送信時における振幅（すなわち、伝搬距離が零であるときの振幅）であるが、測定ないし観測できない量である。しかし、理論上では各展開で A_0 は同じ数値を示すはずである。この理論より、 a_0 に「 $1/\cos \theta$ 」を掛けると、最良な放射特性（すなわち、各展開で A_0 が同じ数値に近づく傾向）を示すことが分かった。

②①の段階で求まった a_0 (全測定パス数と同数) に「 $1/\cos \theta$ 」を掛けることで、送信時における振幅 (A_0) に近い新たな振幅 (a_c) を算出した。この a_c を基準値として用いる。

③②の段階で全測定パス数と同数の a_c が求まる。 a_0 から a_c を差し引き、その絶対値をとる。各展開毎に着目し、以下の式を用い標準偏差 (S_i) を算出した。標準偏差は小さければ小さいほどデータの相関が良い。

$$S_i = \left(\sum_{n=1}^N (a_0 - a_c)^2 / n \right)^{1/2} \quad (n : サンプル数を示し、各展開で数は異なる)$$

④③の段階で全測定パス数と同数の $|a_0 - a_c|$ と、各展開につき 1 個の S_i が求まる。各 S_i 每 (= 各展開毎) の振幅曲線を作成する。そして振幅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) = 1.266 を算出した。

⑤ $|a_0 - a_c|$ が $4.5R$ 以上 ($1.266 \times 4.5 = 5.697$) になるパスのデータを削除した ($4.5R$ が偽像除去に最適)。また、送信点 GL-30m から GL-39m 間の受信データの a_0 は非常に小さい値を示したため、インバージョンの計算に適さないと判断し、あらかじめ削除した。

3.4.4 地質解釈

電磁波トモグラフィで求められるのは、断面内の電磁波速度分布及び電磁波振幅比であり、以上のような基準に基づいて次章の地質解釈を実施した。

4. 調査結果

図4-1に速度及び振幅比トモグラフィに共通する電磁波透過測定の全波線図を示す。本調査では水平及び深度方向共に1mの正方形をセルとした。速度及び振幅比トモグラフィ共にSIRT法を用いて、逐次近似(Iteration)の回数はそれぞれ5回で解析を行った。両結果は定性的なものであるため、表現は相対的になる。

4.1 速度トモグラフィ

図4.1-1及び図4.1-2に速度分布図及び地質データとの対比をそれぞれ示す。両結果には試錐孔位置、孔口の標高値及びGL表示の深度軸を示した。また、解釈結果には両試錐孔のボーリング柱状図(各種veinの位置を含む)、RQDの結果及び破碎帶・変質帶・割れ目によるブロック化の位置関係を付図した。

セル内の配色は低速度から高速度に向け暖色系から寒色系で配色した。また、セル内の速度値は0.06~0.07m/nsecの狭い範囲に分布しており、このことから試錐孔間断面内には急激に速度が変化する領域がないことが分かった。

解釈結果より、試錐孔間断面は以下のようないくつかの領域に区分される。

●低速度帯(セル内の配色:赤色~黄色間)

- ① AN-3号孔の深度約30~40m間からAN-1号孔の深度約30~40m間。
- ② AN-3号孔の深度約40m付近からAN-1号孔の深度約50m付近。
- ③ AN-3号孔の深度約50~60m間からAN-1号孔の深度約65~70m間。
- ④ AN-3号孔の深度約85~95m間からAN-1号孔の深度約90~95m間。
- ⑤ AN-3号孔の深度約105~115m間からAN-1号孔の深度約105~115m間。
- ⑥ AN-3号孔の深度約130m付近からAN-1号孔の深度約130m付近。

●高速度帯(セル内の配色:紫色)

- ⑦ AN-3号孔の深度約70~80m間。
- ⑧ AN-3号孔の深度約140m付近からAN-1号孔の深度約140m付近。
- ⑨ AN-3号孔の深度約160m付近からAN-1号孔の深度約160m付近。

上記した低速度帯では周辺部と比べて速度値に変化の見える部分では、破碎帶、変質帶及び割れ目によるブロック化の存在する部分、さらにRQDが低い部分に対応する。

高速度帯では変質帶等の存在は確認されているが、RQDが高い部分に対応する。

深度約140m付近に若干の速度値の変化があり、この部分では両試錐孔で変質帶等の存在が確認されており、RQDの低い部分にも対応する。

深度約160m付近の中粒花崗岩と細粒花崗岩の境界に若干速度値の変化があり、この部分でも変質帶等の存在が確認され、RQDの低い部分に対応する。

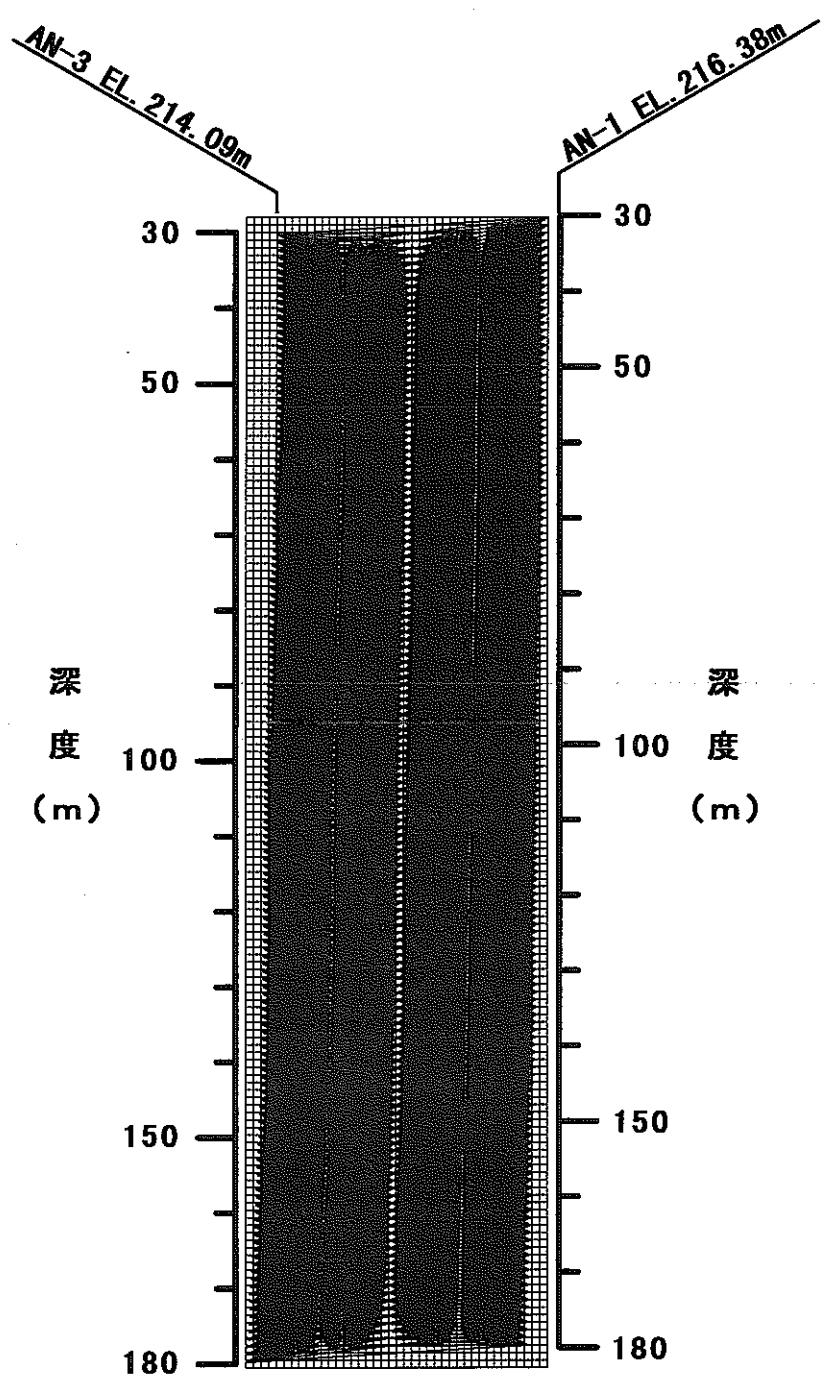


図4-1 測定波線図

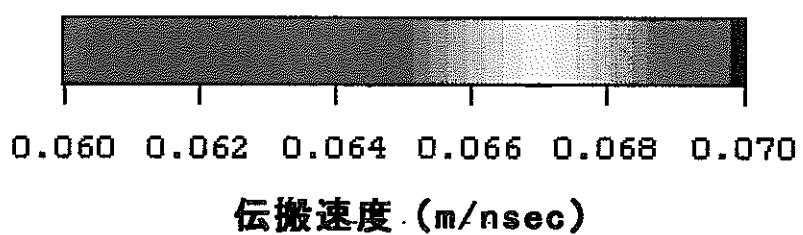
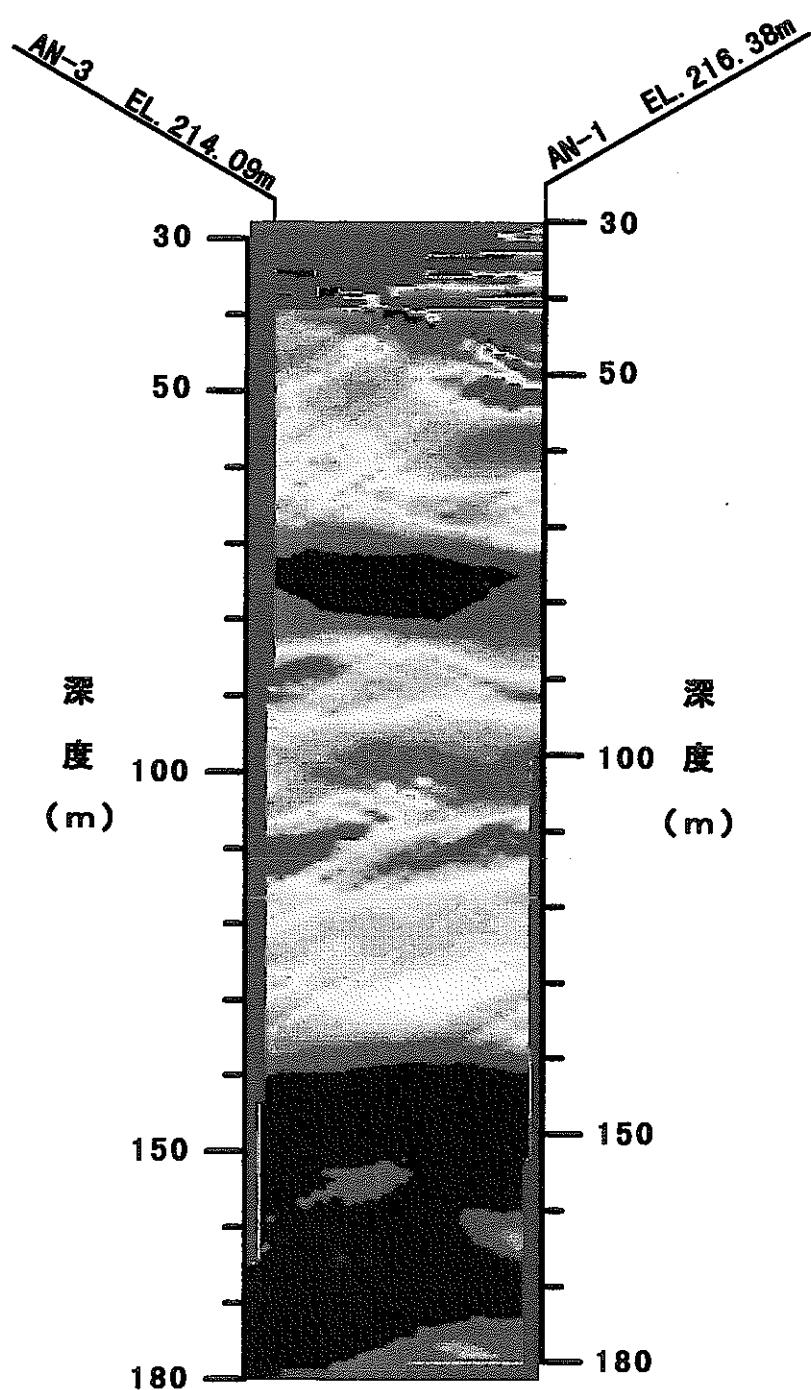


図4.1-1 速度分布図

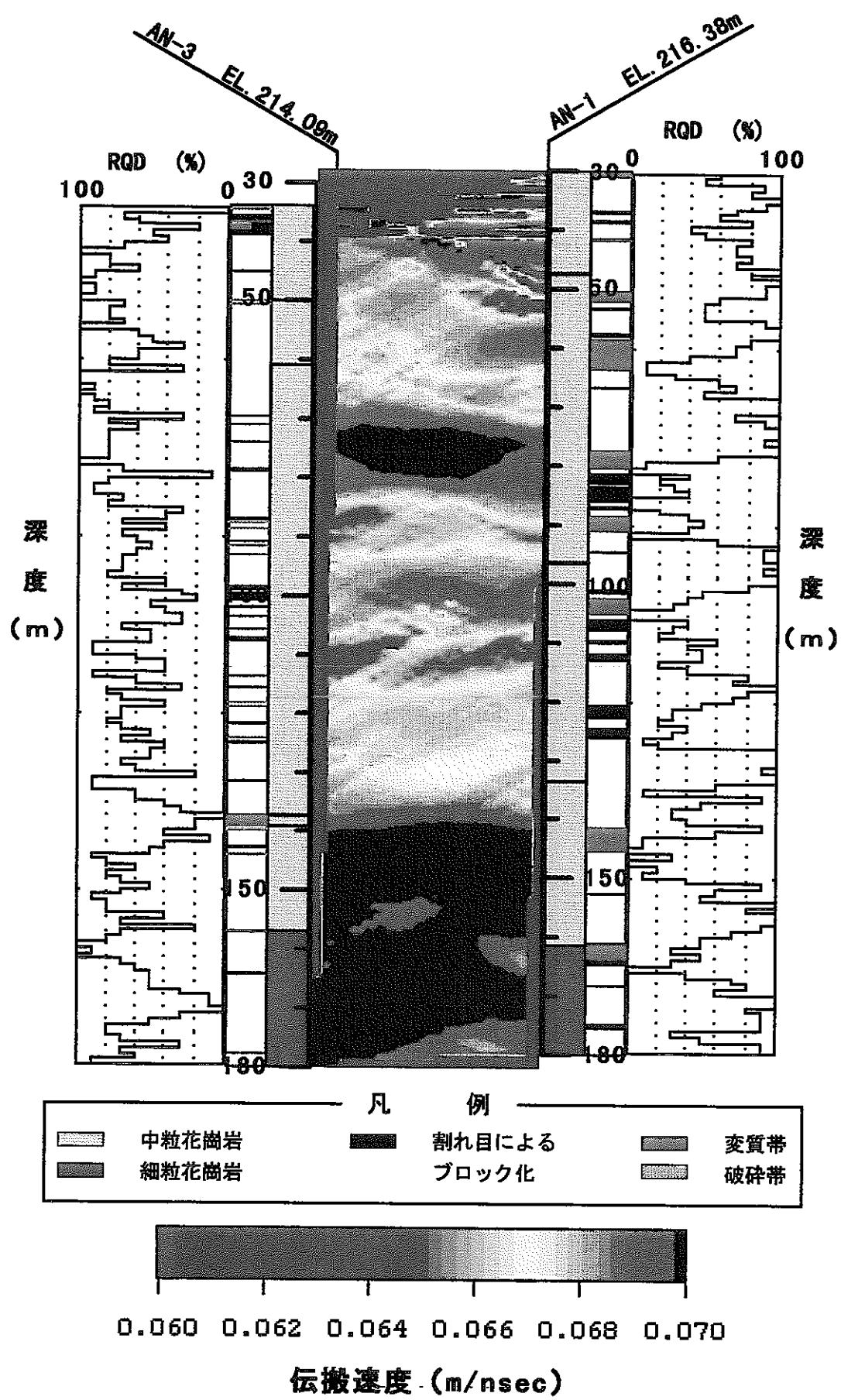


図4.1-2 地質との対比（速度分布図）

4.2 振幅比トモグラフィ

図4.2-1及び図4.2-2に振幅比分布図及び地質との対比をそれぞれ示す。両結果には速度トモグラフィ同様、試錐孔位置、孔口の標高値及びGL表示の深度軸を示した。また、解釈結果には両試錐孔のボーリング柱状図（各種veinの位置を含む）、R Q Dの結果及び破碎帯・変質帯・割れ目によるブロック化の位置関係を付図した。

セル内の配色は減衰の大きい部分（＝低振幅比）から減衰の小さい部分（＝高振幅比）に向け暖色系から寒色系で配色した。また、セル内の振幅比の値は本来の振幅比の値があまりにも小さくコントラストが出ないため、1000倍した後の数値であり、70～100の狭い範囲に分布している。このことから試錐孔間断面内には急激に振幅比が変化する領域がないことが分かった。

解釈結果より、試錐孔間断面は以下のような⑩～⑯の領域に区分される。

●減衰の大きい部分（セル内の配色：赤色～黄色間）

- ⑩ AN-3号孔の深度約30～40m間からAN-1号孔の深度約30～35m間。
- ⑪ AN-3号孔の深度約60m付近。
- ⑫ AN-3号孔の深度約90～110m付近。

●減衰の小さい部分（セル内の配色：濃い青色～紫色間）

- ⑬ AN-3号孔の深度約40～50m間からAN-1号孔の深度約45～55m間。
- ⑭ AN-3号孔の深度約70～90m付近。
- ⑮ AN-1号孔の深度約65m付近。
- ⑯ AN-1号孔の深度約90m付近。
- ⑰ AN-1号孔の深度約105m付近。
- ⑱ AN-3号孔の深度約120～150m間からAN-1号孔の深度約130～180m間。

上記した領域のうち、減衰の大きい部分では破碎帯、変質帯及び割れ目によるブロック化の存在する部分、さらにR Q Dが低い部分に対応する。この傾向は特に、AN-3号孔の深度約90～110m付近に顕著に見られる。

一方、減衰の小さい部分の一部では変質帯等が存在し且つR Q Dが低い部分にも拘わらず減衰が小さくなる。

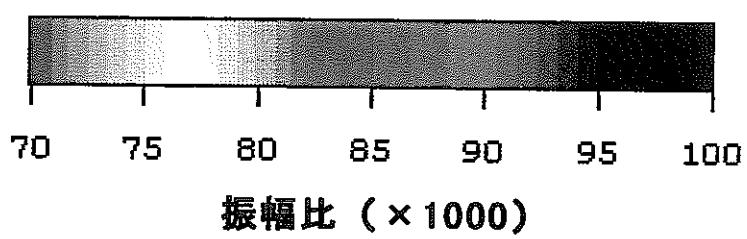
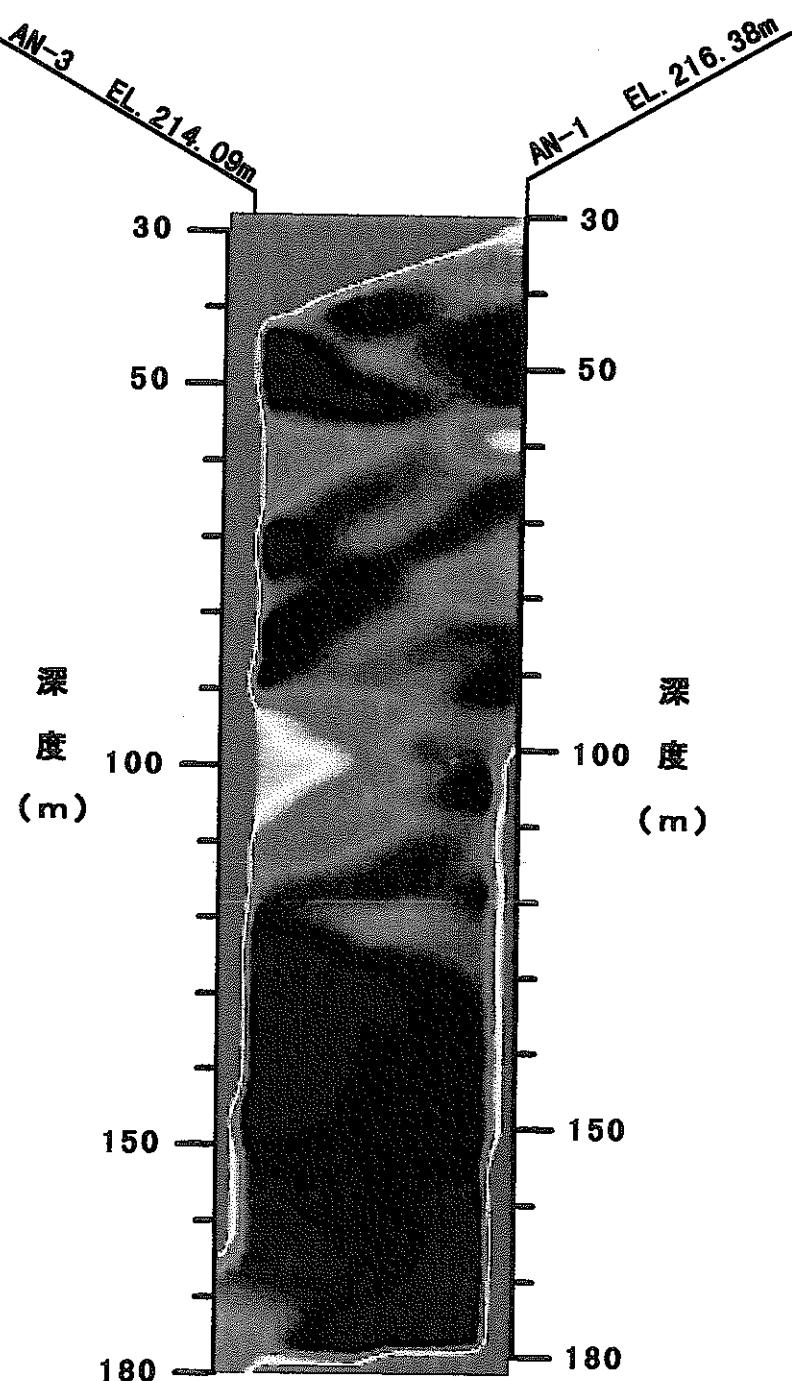


図4.2-1 振幅比分布図

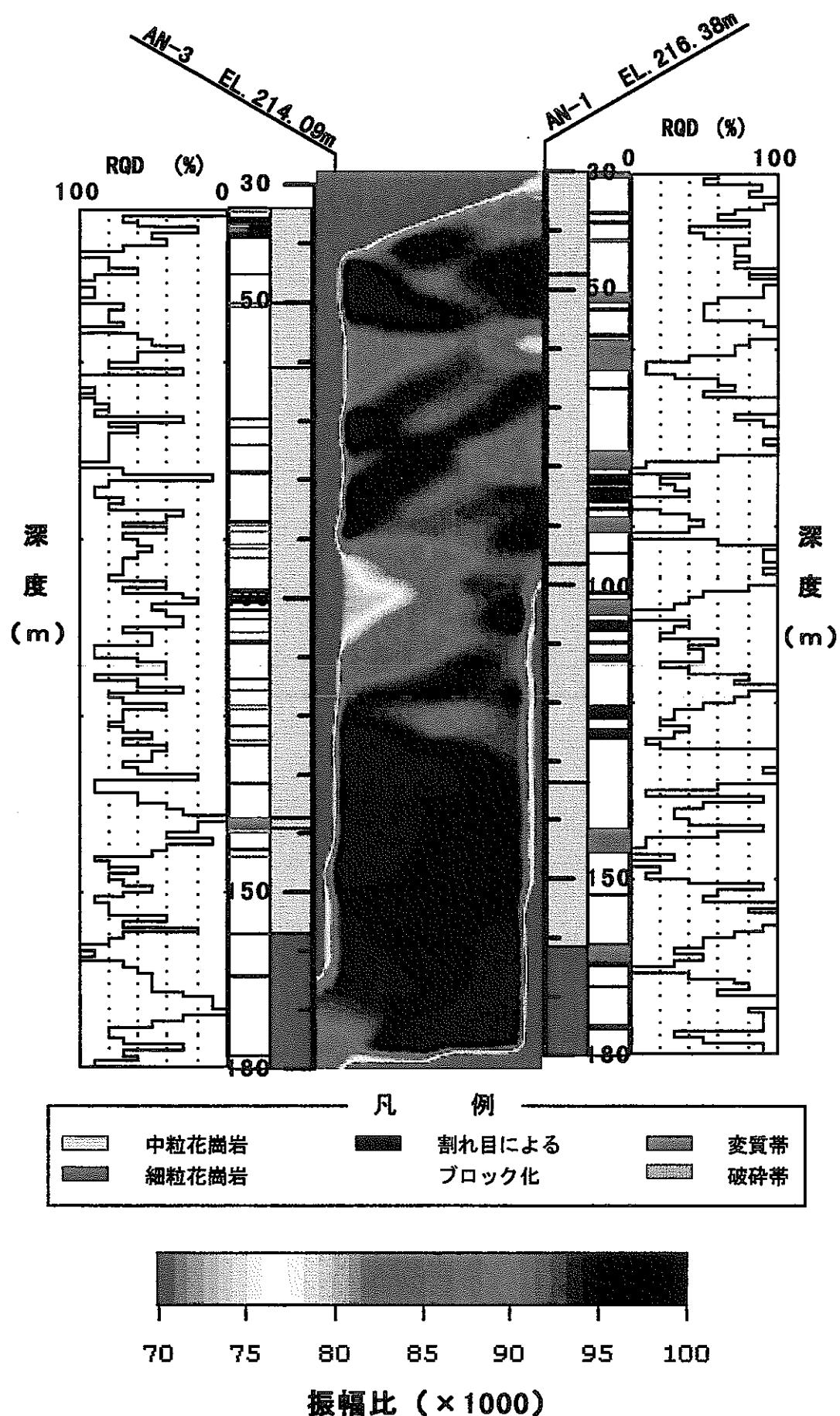


図4.2-2 地質との対比（振幅比分布図）

5. 考察

図5-1に速度分布図によるコンター図を示す。なお、同図には速度及び振幅比トモグラフィ結果で検出した①～⑨の領域を示した。

図5-1のコンター図は速度値に変化があった境界の位置関係を表しており、この位置は4.1項で示した①～⑨の領域にそれぞれ対応する。コンター線をみると線の密度に違いがあることが分かる。密度の高い部分（濃い線）と低い部分（薄い線）が確認できるが、これは速度値の変化の度合いが異なり、密度の高い部分は低い部分に比べて周辺との速度差が激しいことを意味している。同図より、密度の高い部分はいずれも5箇所の低速度帯（領域②、③、④、⑤、⑥に対応する）が分布する領域にある。低速度帯はその周辺に比べて岩盤の破碎が進行しており、地下水が介在し破碎面が粘土化していると考えられる。このことから、低速度帯に試錐孔間にまたがる割れ目が存在すると考えられる。図5-2に予想される割れ目位置を斜線で示す。

なお、深度約140mと160m付近は細線であるが、周辺部と比べて若干の速度値の変化があり両試錐孔で変質帯が確認されており、R Q Dの低い部分に対応する。このことから、同深度付近では岩盤の変質が進行しているが、現況ではまだ試錐孔間にまたがる割れ目までには至っていないため速度値の変化が小さく検出されたと考えられる。

図5-3に電磁波速度、減衰及び電気的特性を表す上で指標となるものの関係を示す。図5-4に低・高速度帯及び減衰の大小を区分した図を示す。なお、同図には速度及び振幅比トモグラフィ結果で検出した①～⑯の領域を示した。

同図より、赤色で示した低速度帯と薄緑色で示した減衰の大きい部分、さらに青色で示した高速度帯と水色で示した減衰の小さい部分が重複している領域は前述の傾向を良く反映している。両試錐孔の深度約30～40m付近の低速度帯で且つ減衰の大きい部分では変質帯等の存在が確認されおり、それに伴う岩盤の風化による影響が考えられる。

しかし、本調査結果では前述した傾向を示さない部分がある。すなわち、低速度帯と減衰の小さい部分が重複している部分であり、分布図の領域②と⑯、③と⑮、④と⑭・⑯、⑥と⑯の一部にみられる。これは対象となる部分が低導電率帯で、その周辺と比べて比誘電率が大きい場合が考えられる。

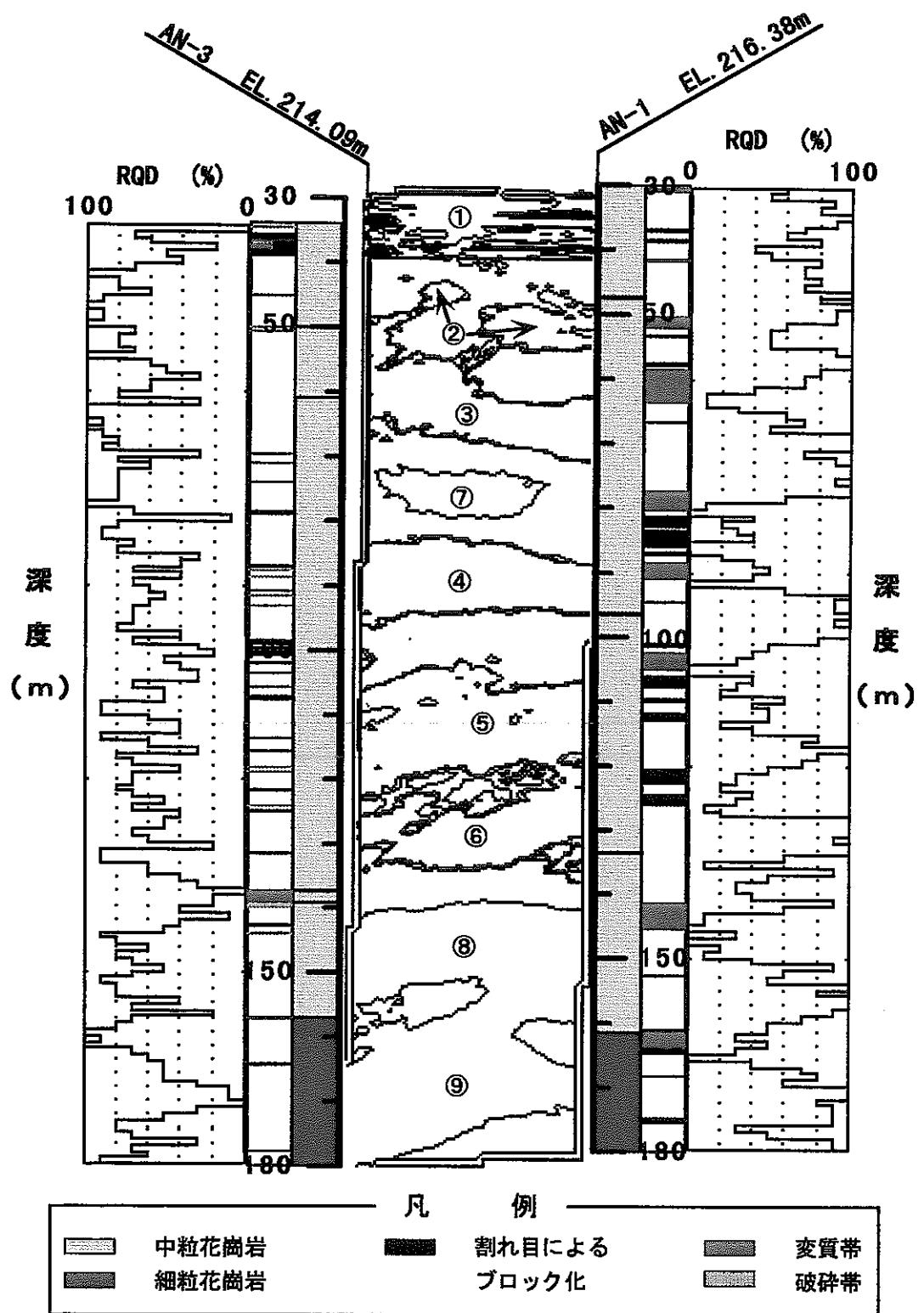


図5-1 コンター図

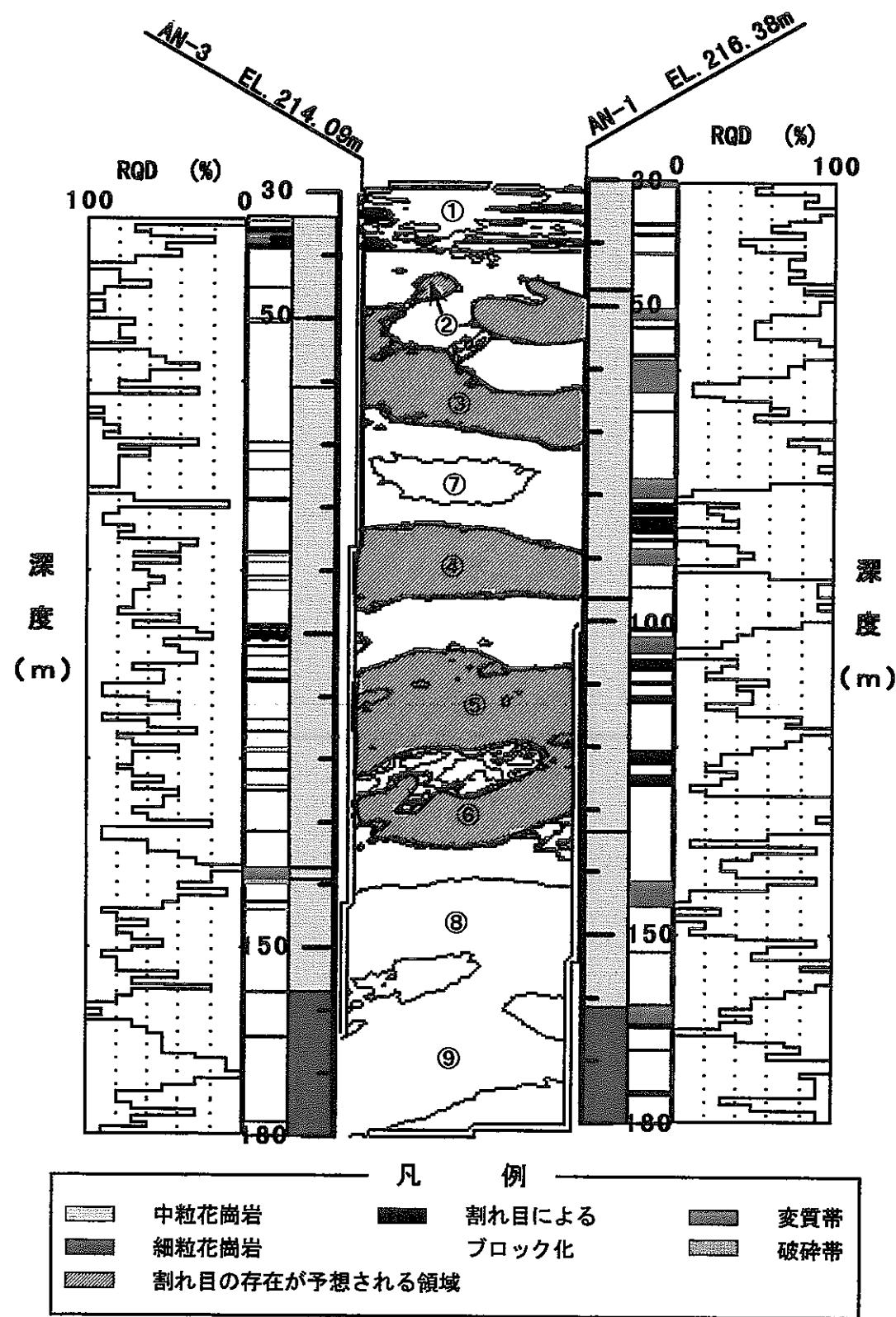


図5-2 割れ目分布推定図

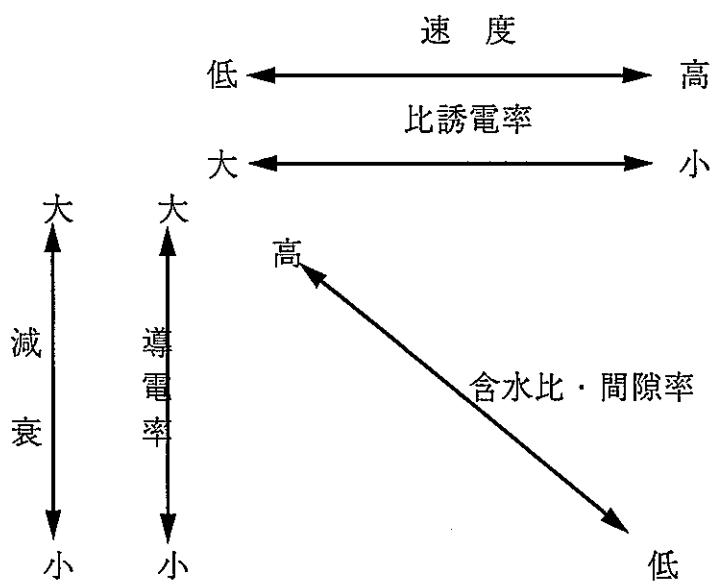
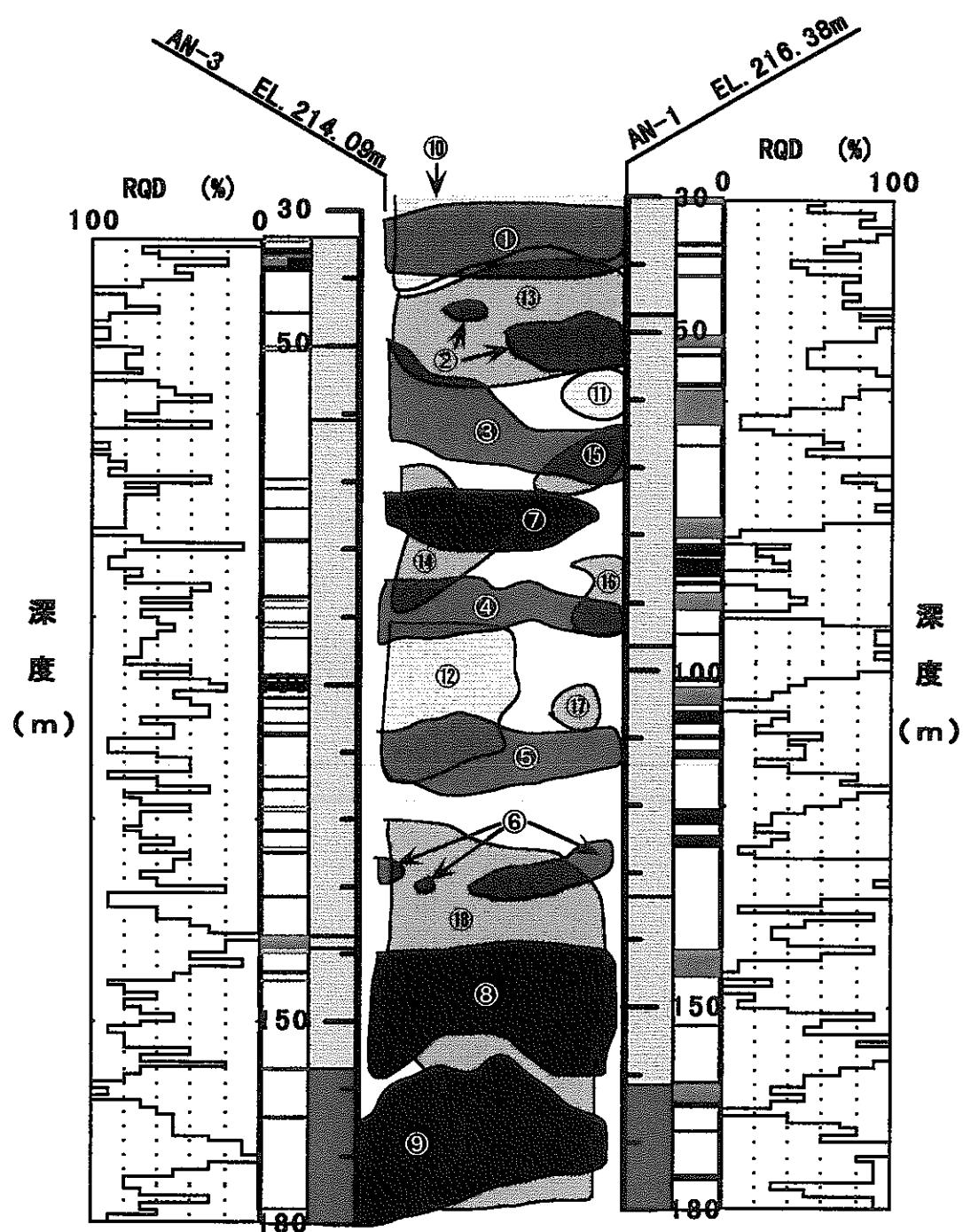


図5-3 電磁波速度、減衰と物性の関係



凡 例	
中粒花崗岩	低速度帶
細粒花崗岩	高速度帶
割れ目によるブロック化	減衰の大きい部分
変質帶	減衰の小さい部分
破碎帶	

図5-4 速度及び振幅比区分図

6.まとめ

既存の連続波レーダ探査装置によりAN-3号孔～AN-1号孔間において、トモグラフィ解析に適用できるデータを取得し、速度断面図及び振幅比分布断面が得られた。

速度トモグラフィの結果をまとめると以下のとおりである。

- ・速度値は0.06～0.07m/nsecの狭い範囲に分布しており、急激に速度が変化する領域がない。
- ・高速度帶では変質帶等の存在は確認されているが、R Q Dが高い部分に対応する。
- ・低速度帶では破碎帶、変質帶及び割れ目によるブロック化の存在する部分、さらにR Q Dが低い部分に対応する。
- ・5つの低速度帶付近に割れ目が存在する可能性が高い。
- ・両試錐孔の深度約30～40m付近の低速度帶は変質帶等の存在だけでなく、岩盤の風化に伴う影響が考えられる。
- ・深度約140mと160m付近では岩盤の変質が進行しているが、試錐孔間にまたがるような割れ目までには至っていないと考えられる。

振幅比トモグラフィの結果をまとめると以下のとおりである。

- ・全体的に振幅比の値は小さくコントラストがない。
- ・減衰の大きい部分では破碎帶、変質帶及び割れ目によるブロック化の存在する部分、さらにR Q Dが低い部分に対応する。特に、AN-3号孔の深度約90～110m付近に顕著に見られた。
- ・両試錐孔の深度約30～40m付近の減衰の大きい部分は変質帶等の存在だけでなく、岩盤の風化に伴う影響が考えられる。
- ・減衰の小さい部分と低速度帶が重複する領域が検出された。この原因としては、対象となる部分が低導電率帶で、その周辺と比べて比誘電率が大きい場合が考えられる。

以上より、本調査で実施したトモグラフィ調査により試錐孔間に割れ目の存在を推定できた。しかし、この結果は試錐孔の柱状図、R Q D値及び破碎帶・変質帶等の地質データと併用することで試錐孔間を二次元的に評価できたものである。このことから、各々の物理探査手法で取得したデータに対する評価は地質データが不可欠であると考える。

7. あとがき

連続波レーダーは、パルスレーダに比べて探査距離が格段に大きく、時間分解能に遜色がないのが特徴である。

連続波によるレーダートモグラフィは、ボーリング孔間の地質状況を把握するには有効な手法である。しかし、トモグラフィのインバージョンは2次元を仮定して計算するため、地質構造が3次元的に変化する場合には解析が困難なことがある。

連続波レーダーの特長を生かしながら、ボーリング孔間の情報をさらに精度良く把握するには、初動走時及び初動振幅を用いたトモグラフィ解析ではなく、フルウェーブのインバージョン（具体的には回折トモグラフィ）などを適用することが考えられる。さらに、ボーリング孔を3次元的に配置し、3次元のホログラフィ解析を実施することにより、3次元地質構造の把握ができる。

本業務で使用した連続波レーダー探査装置は、今後ハードウェア及びソフトウェアの改良により動力炉・核燃料開発事業団で研究開発が進められているACROSSにも応用可能である。それを実現するには、ハードウェアについてはより高精度の位相管理、ソフトウェアについては存否セプストラム法の適用などが必要である。

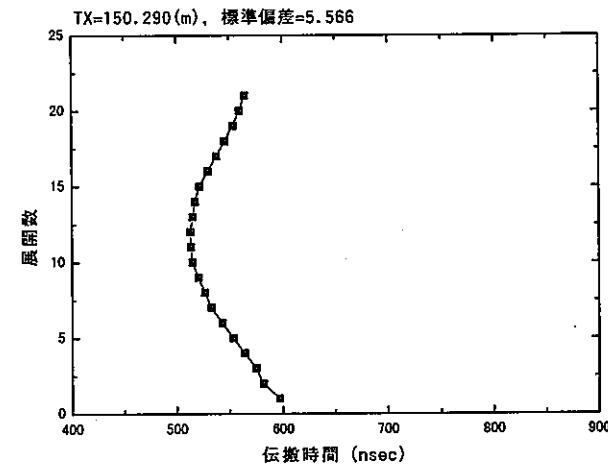
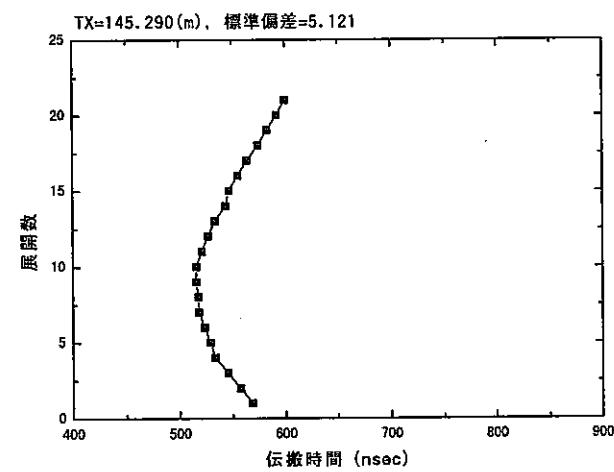
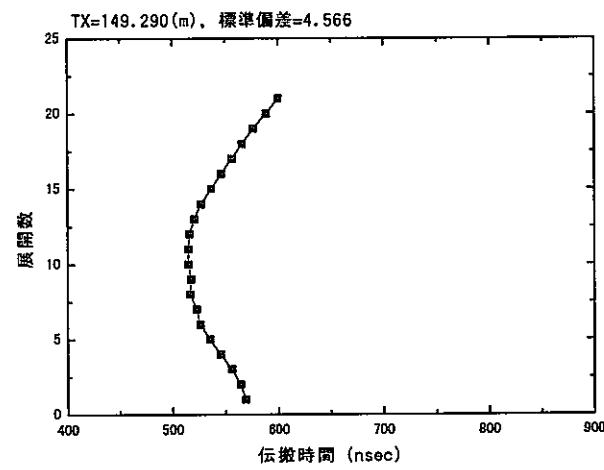
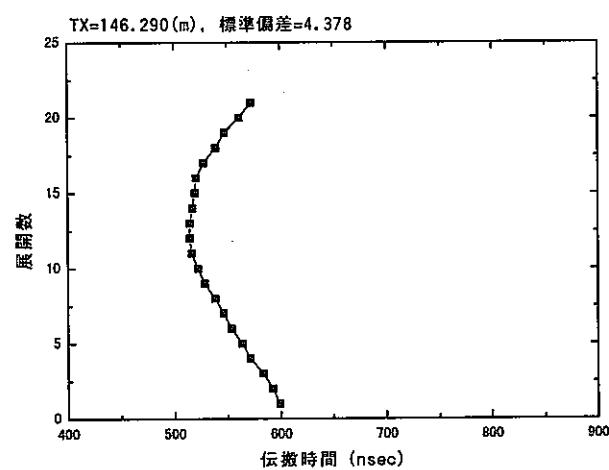
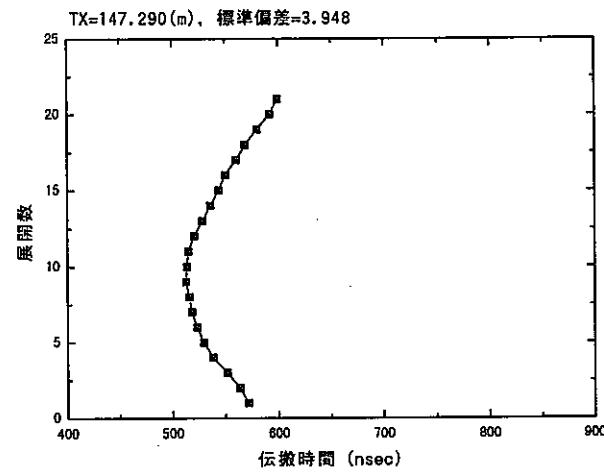
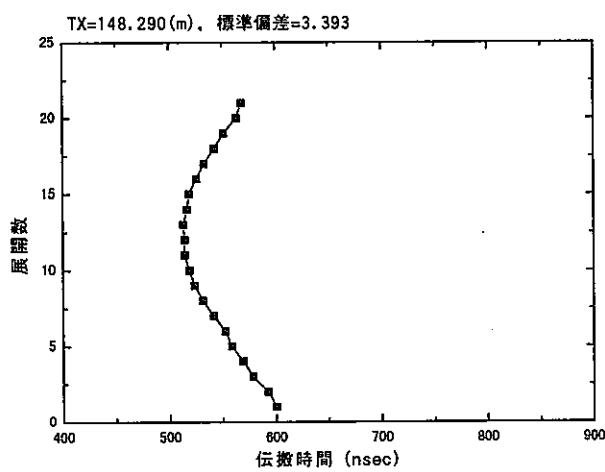
8. 参考文献

- (1) 中部地方土木地質図編纂委員会；中部地方土木地質図，（財）国土開発技術センター，1992
- (2) 日本の地質『中部地方Ⅱ』日本の地質5中部地方Ⅱ，共立出版，1988
- (3) (財) エンジニアリング振興協会；トモグラフィ技術に関するQ&A，1988
- (4) 動力炉・核燃料開発事業団；地層処分研究開発の現状（平成5年度），1994
- (5) 吉田英一，大澤英昭，柳澤孝一，山川稔；深部花崗岩中の割れ目解析－岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして－，応用地質，第30巻，第3号，pp. 131-142，1989
- (6) 坪田浩二，則竹和光，登内正治，大沼 寛；岩石に対する電磁波特性基礎実験（その1），物理探査学会第78回学術講演会論文集，pp.303-304，1988
- (7) 佐久間秀樹，坪田浩二；土岐花こう岩におけるRAMACシステムの適用試験，物理探査学会第78回学術講演会論文集，pp.305-309，1988
- (8) 坪田浩二，則竹和光，登内正治，広瀬雅信；岩石に対する電磁波特性基礎実験（その2），物理探査学会第80回学術講演会論文集，pp.292-297，1989
- (9) 仙波 育，尾方伸久，坪田浩二，大沢英昭；ボアホールレーダの応用例，地下電磁計測ワークショップ論文集，pp.66-70，1989

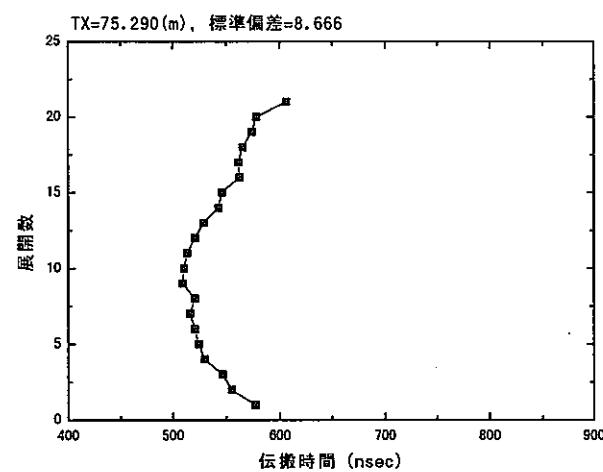
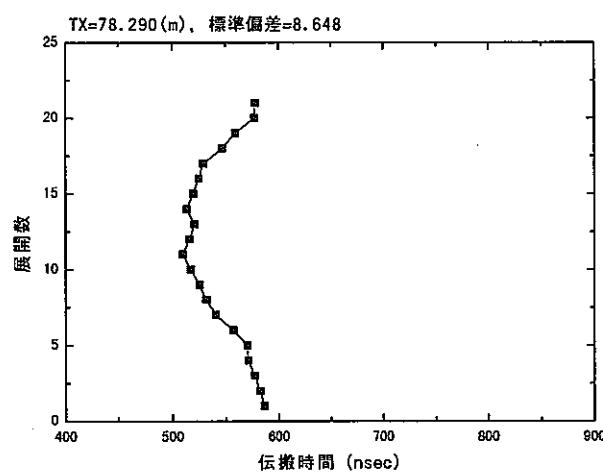
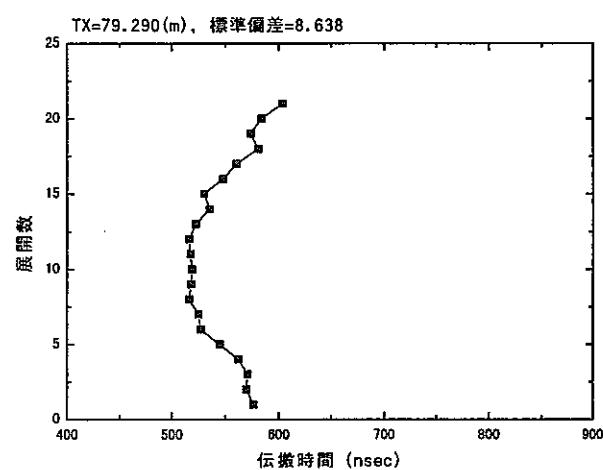
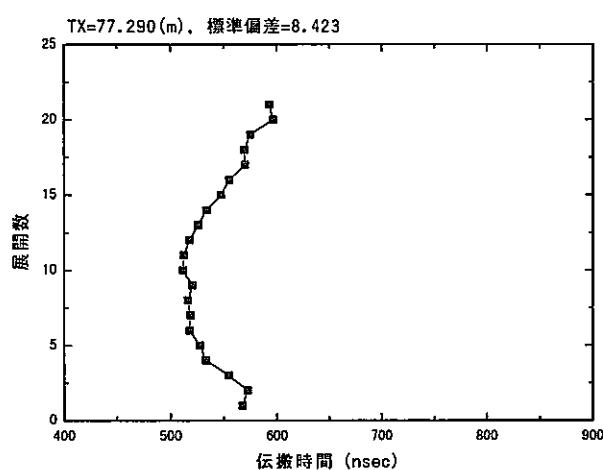
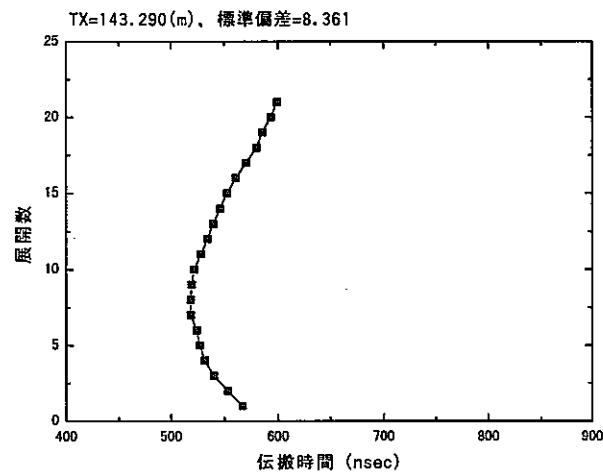
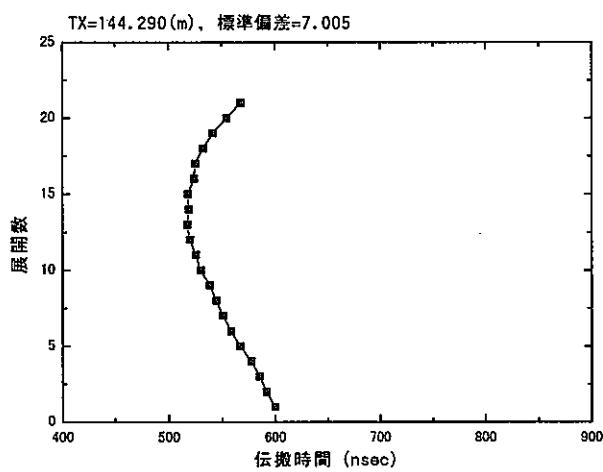
付 錄

- ・一送信点から得られた受信記録（伝搬時間）
- ・一送信点から得られた受信記録（振幅）
- ・現場関連写真

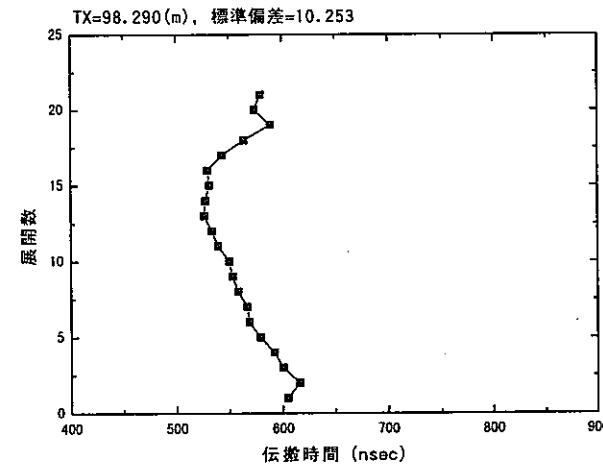
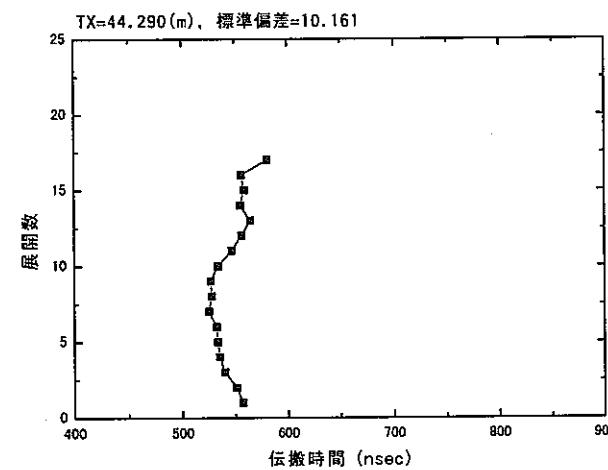
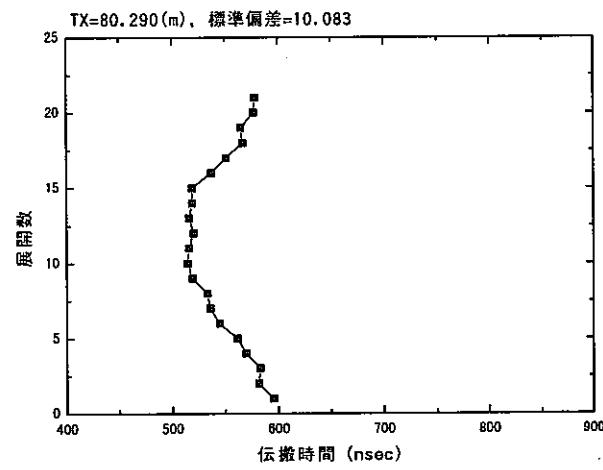
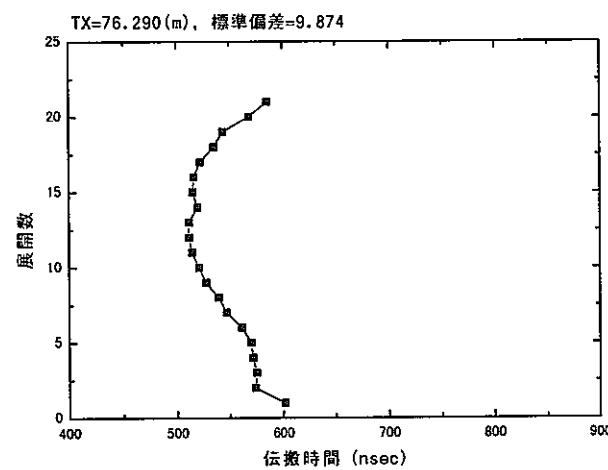
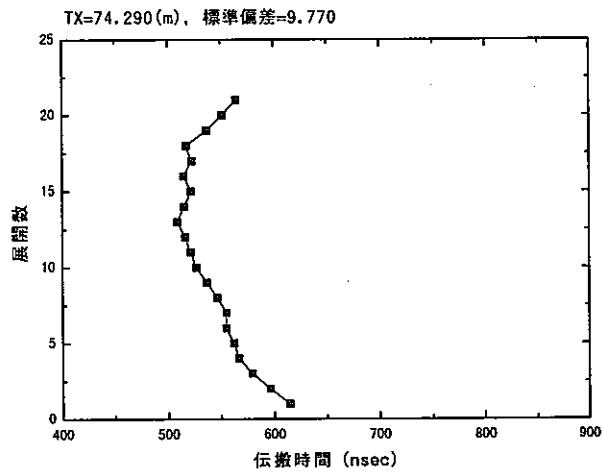
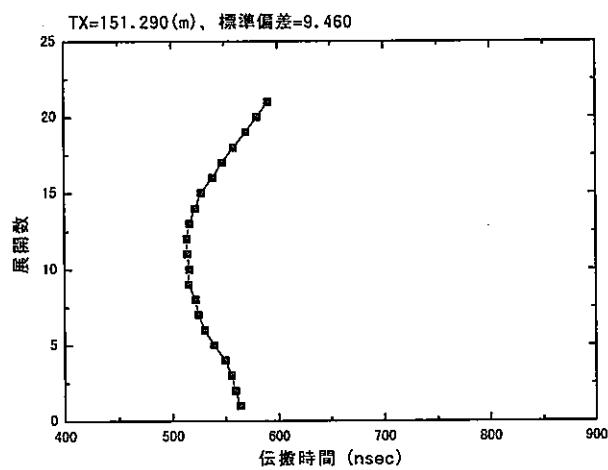
一送信点から得られた受信記録（伝搬時間）



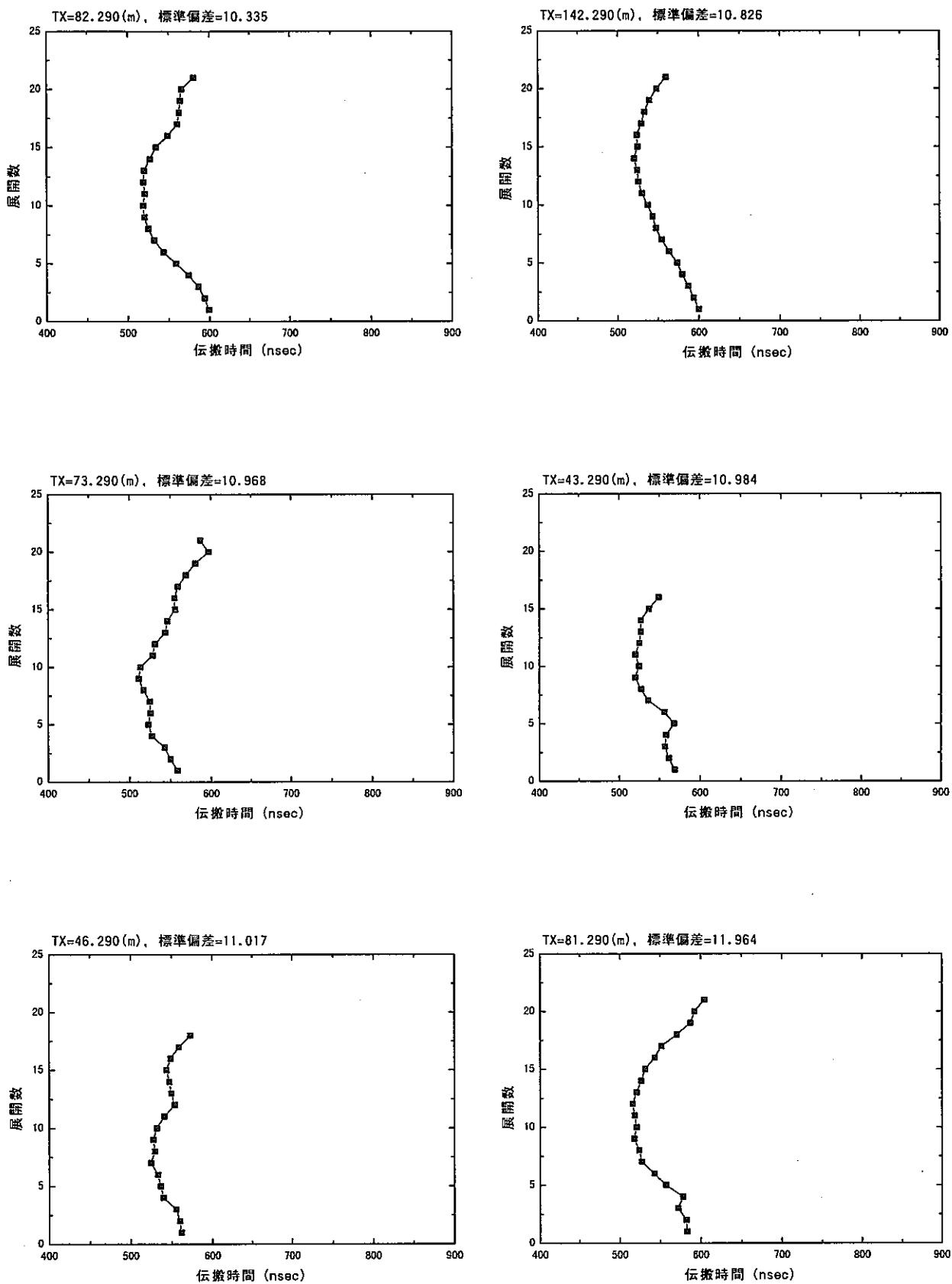
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



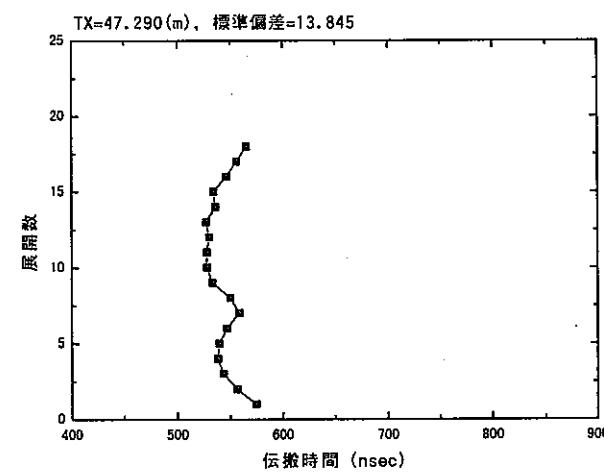
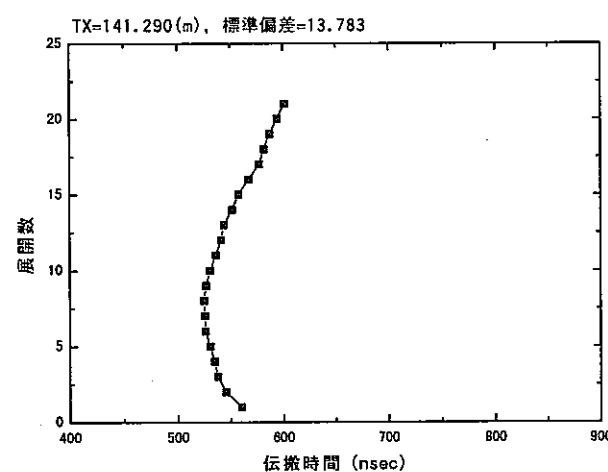
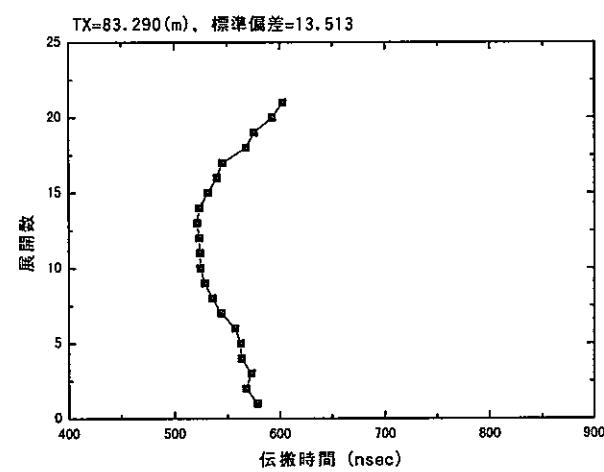
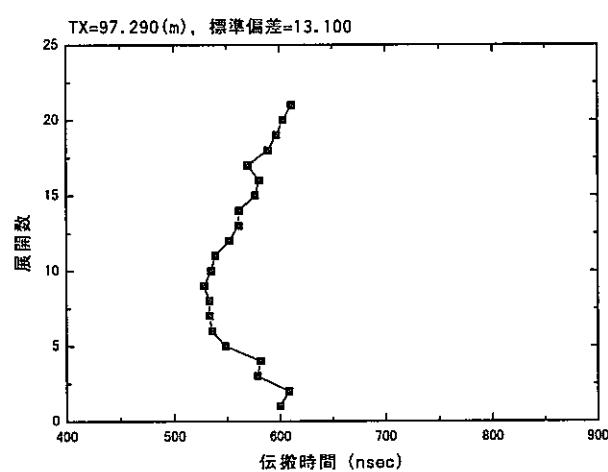
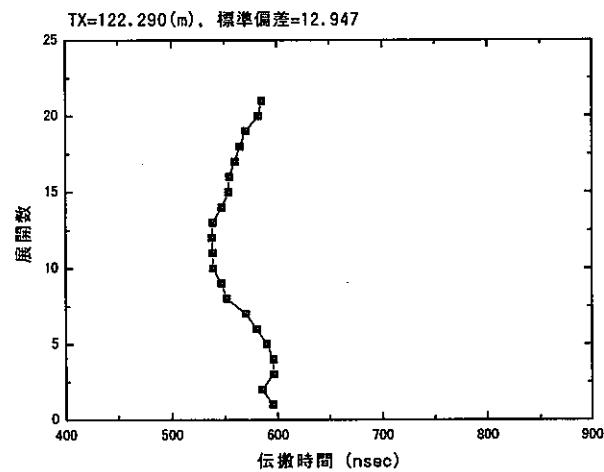
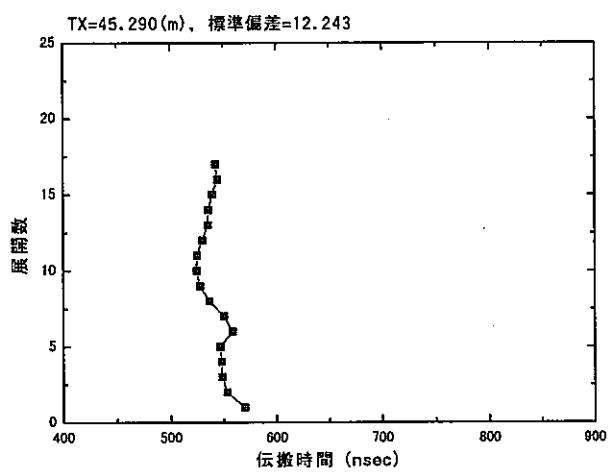
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



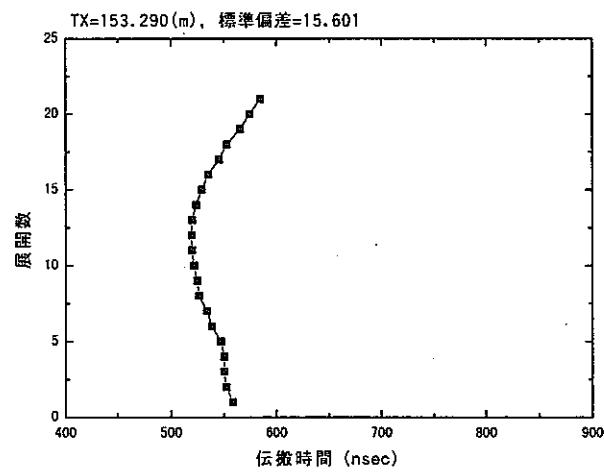
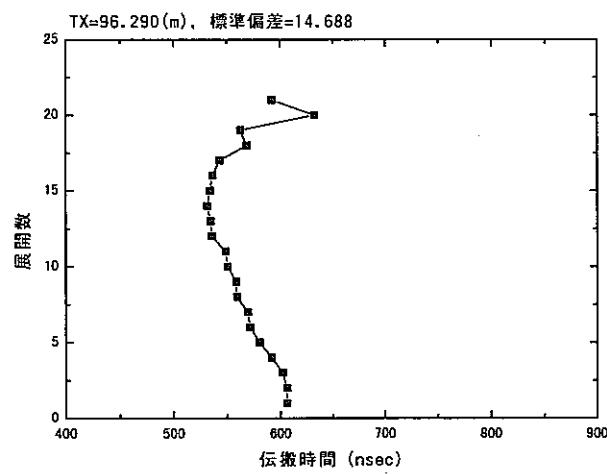
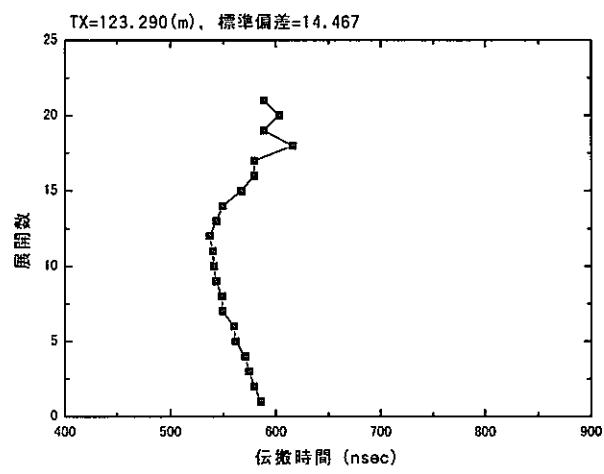
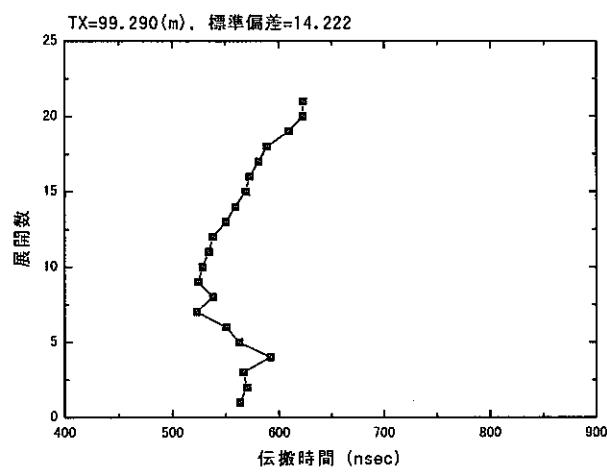
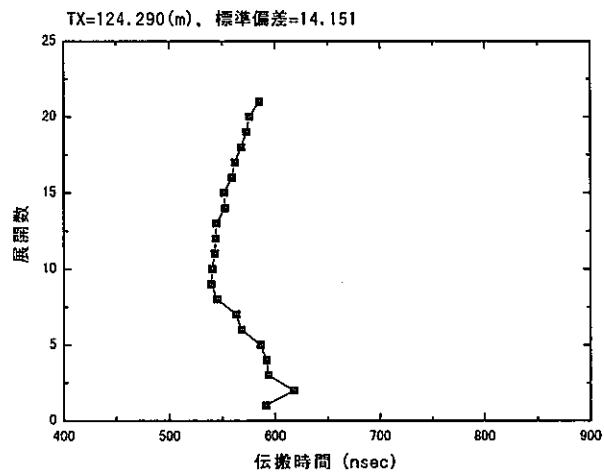
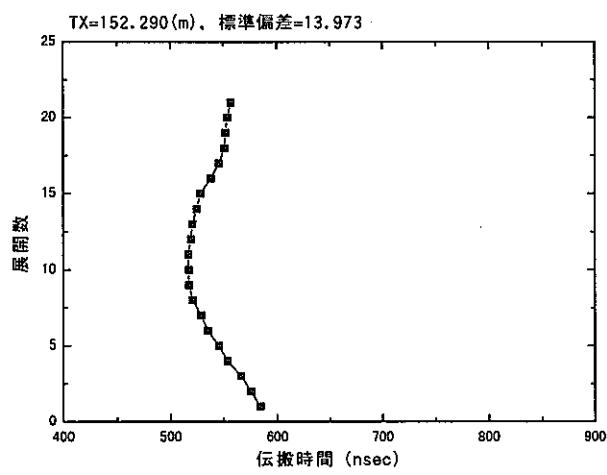
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



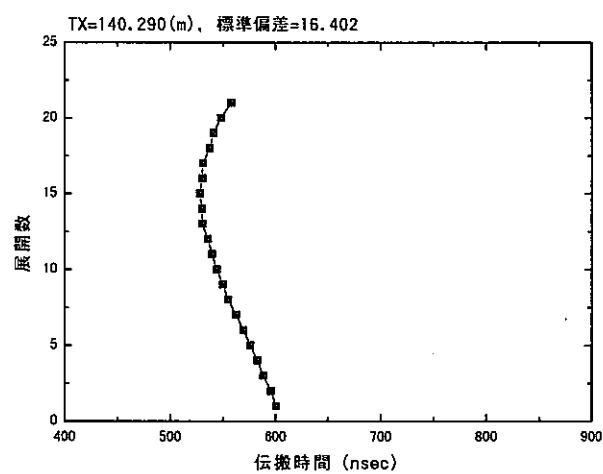
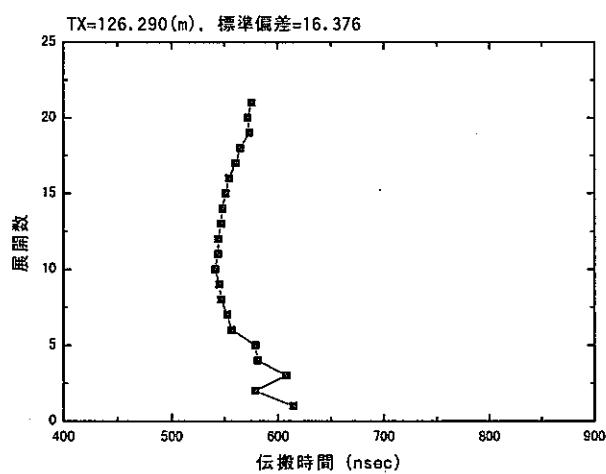
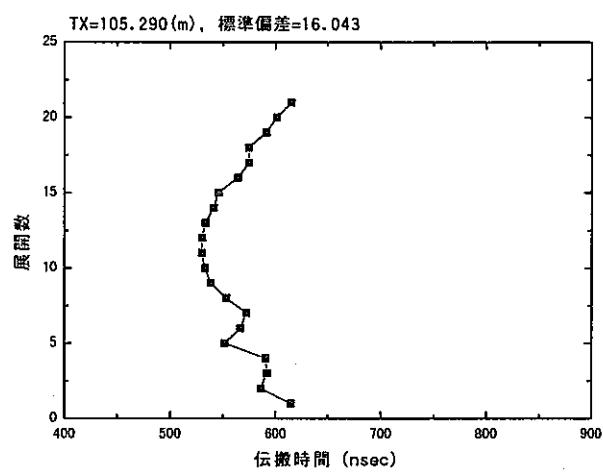
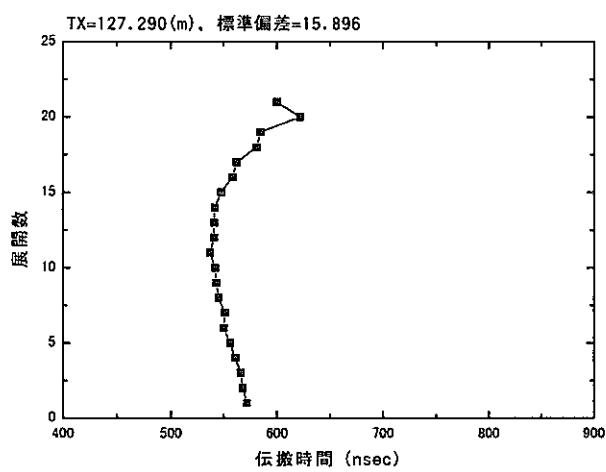
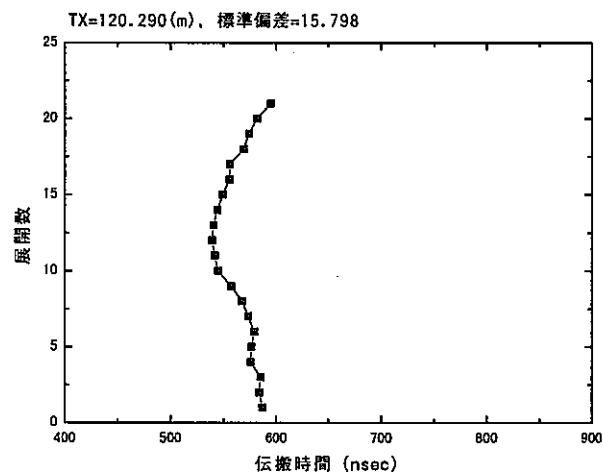
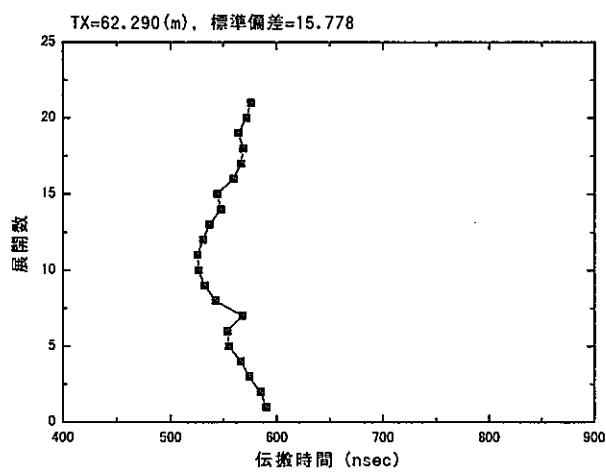
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



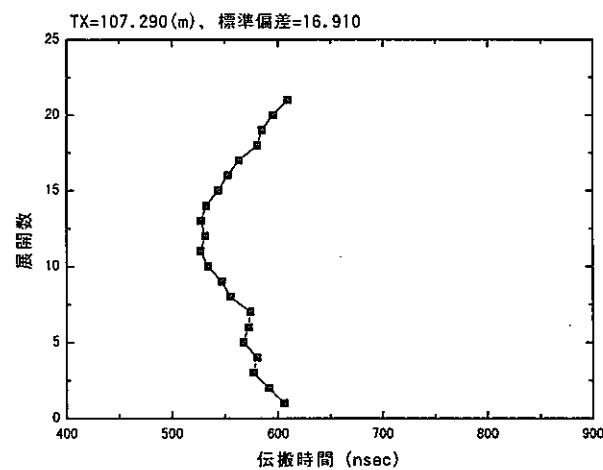
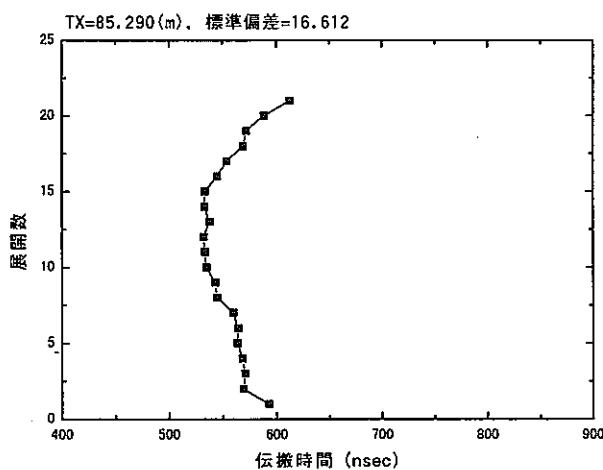
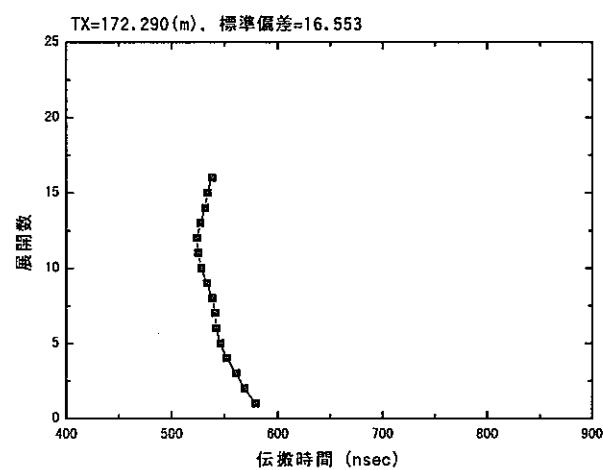
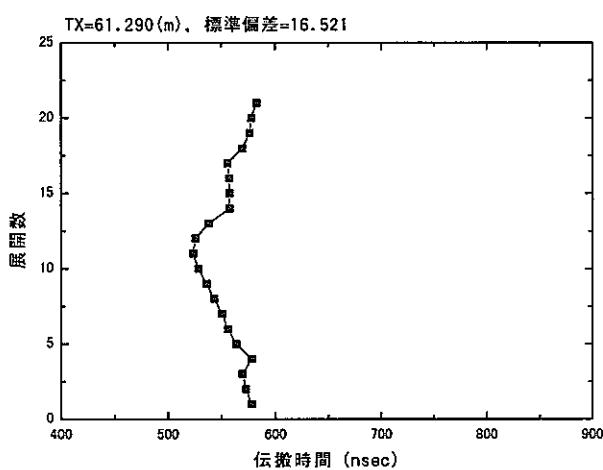
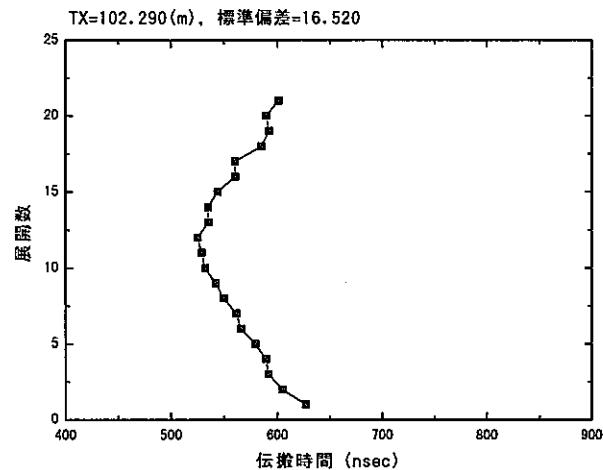
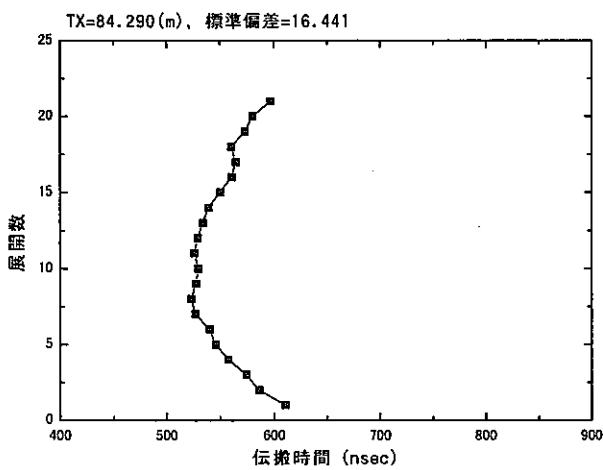
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



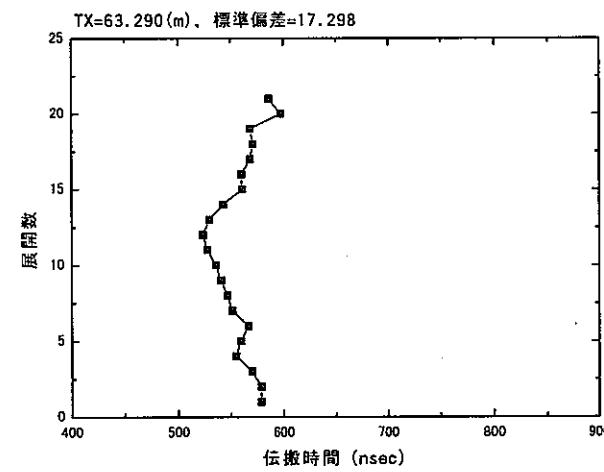
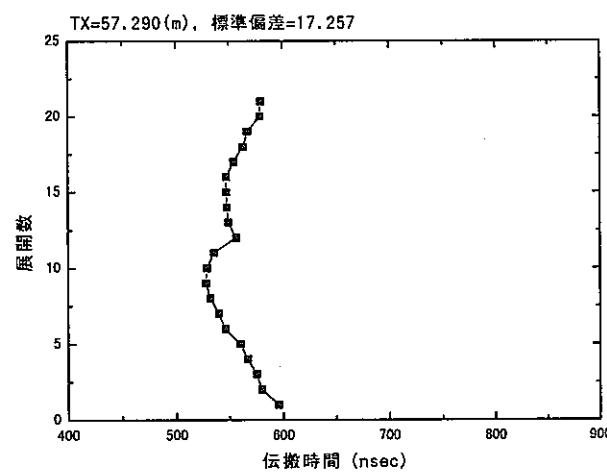
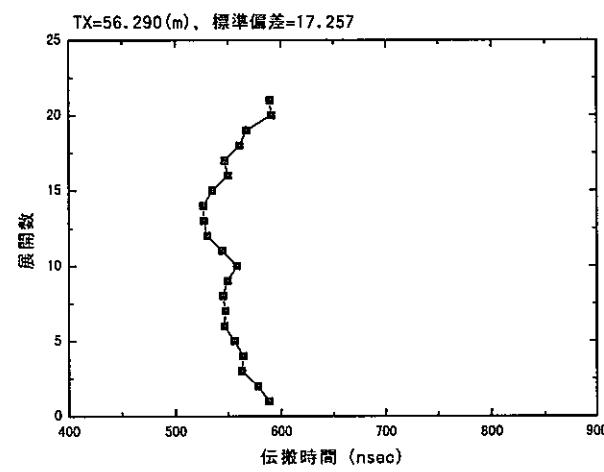
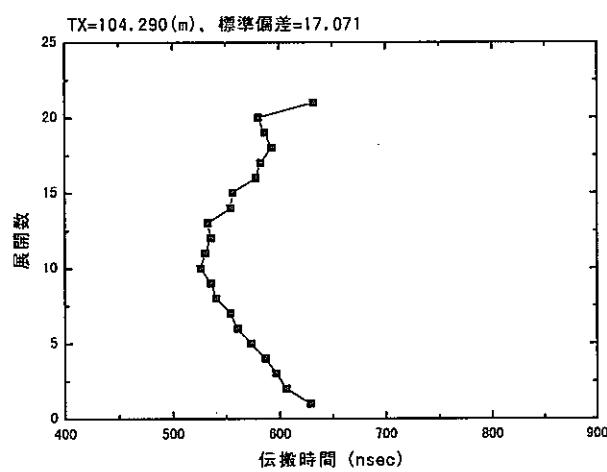
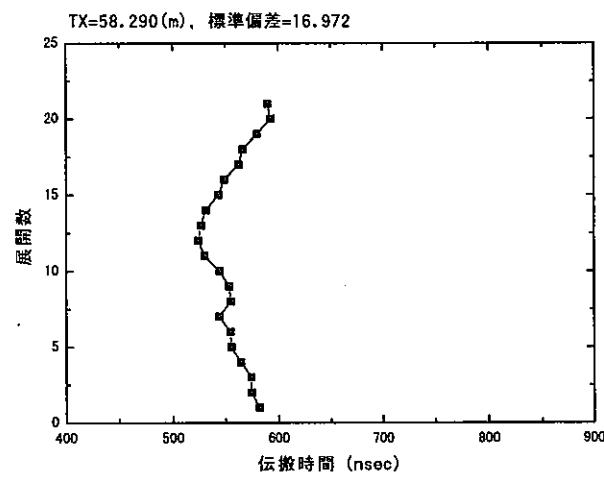
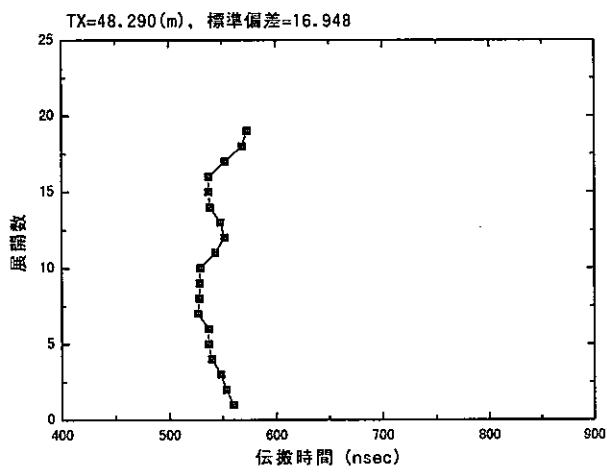
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



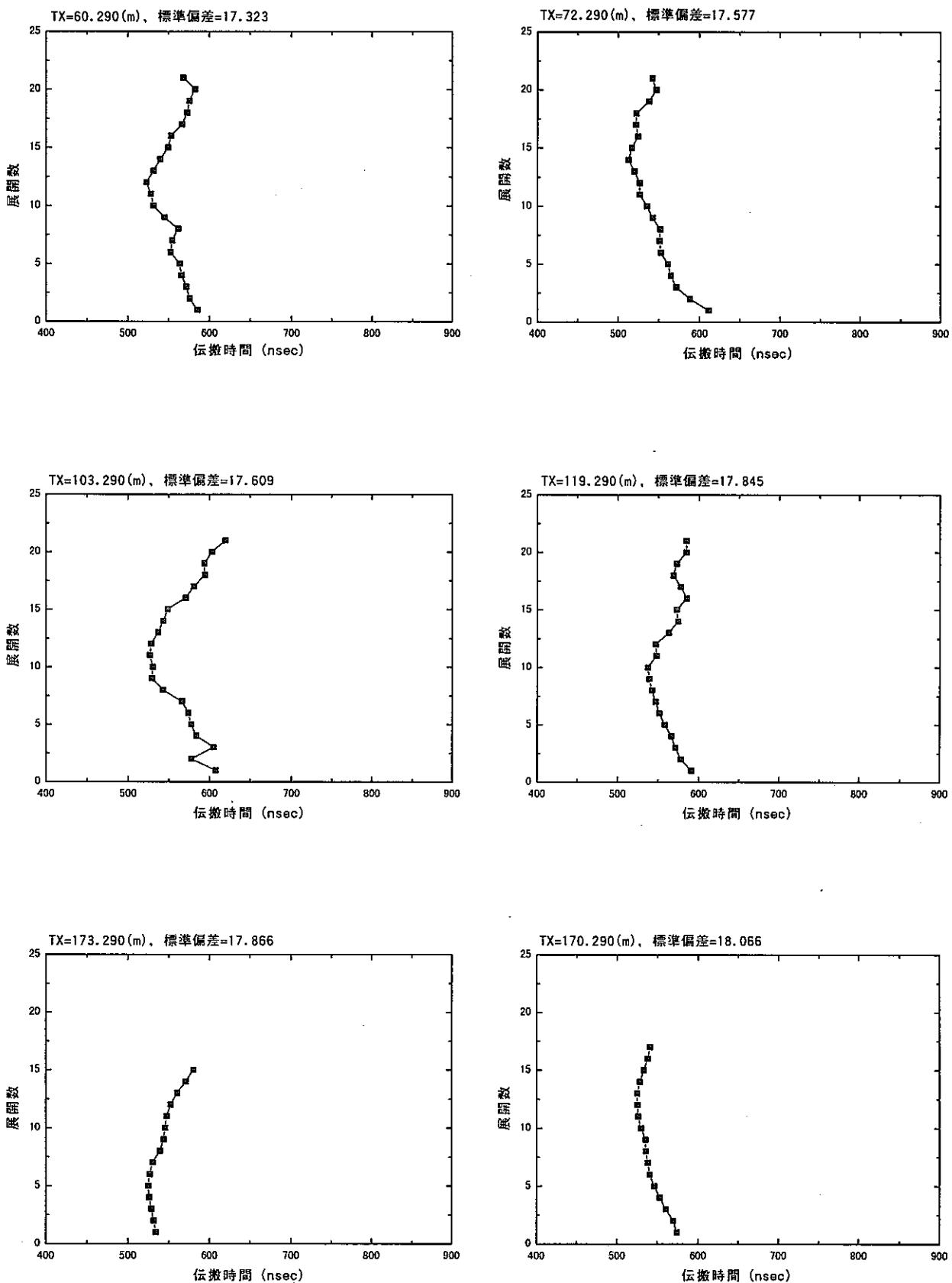
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



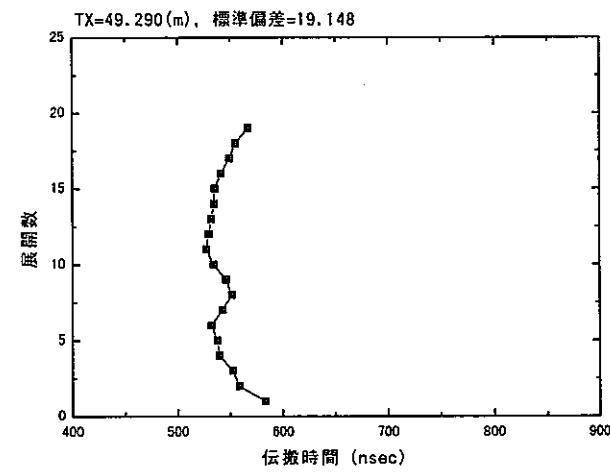
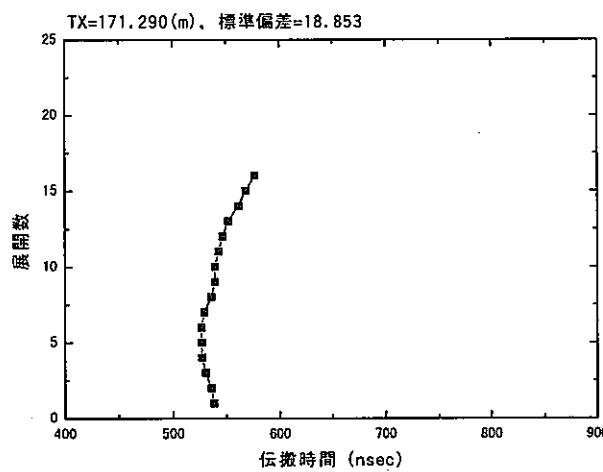
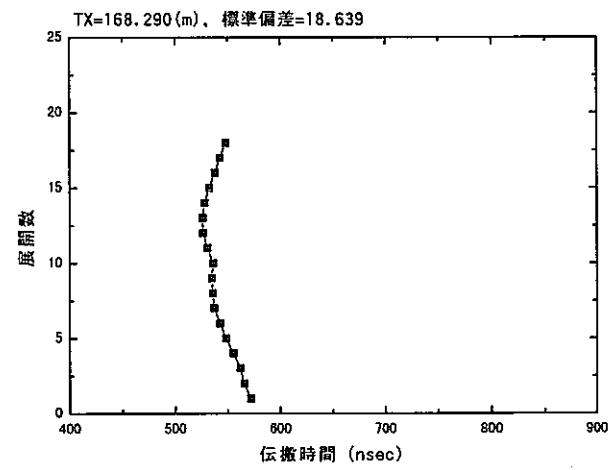
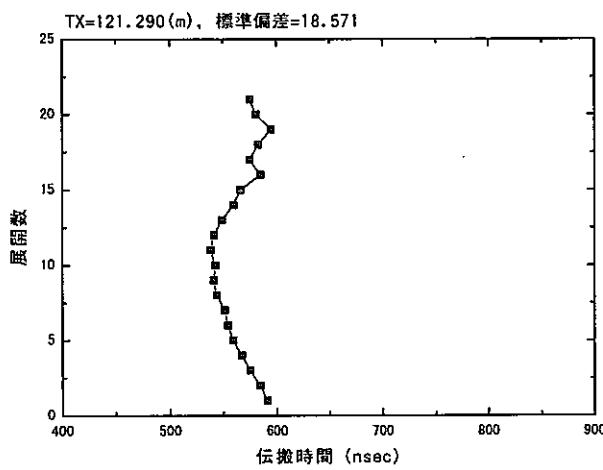
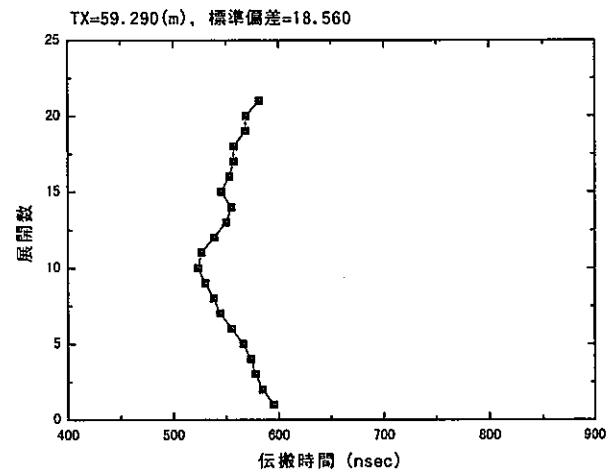
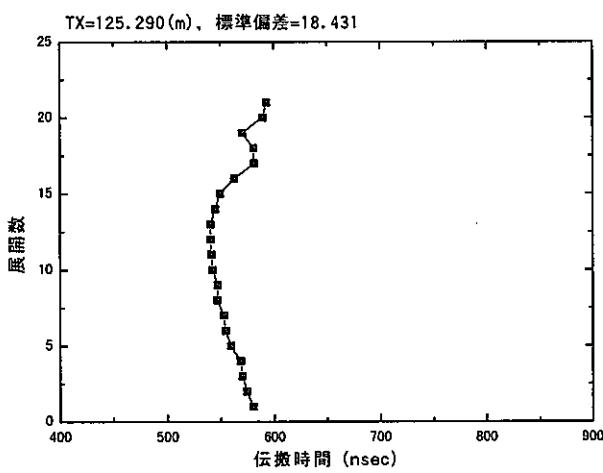
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



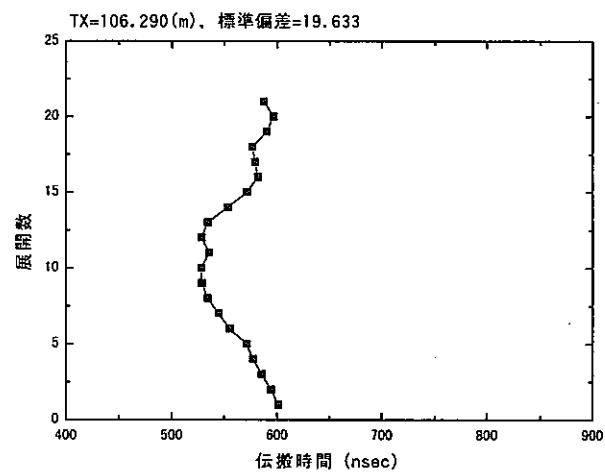
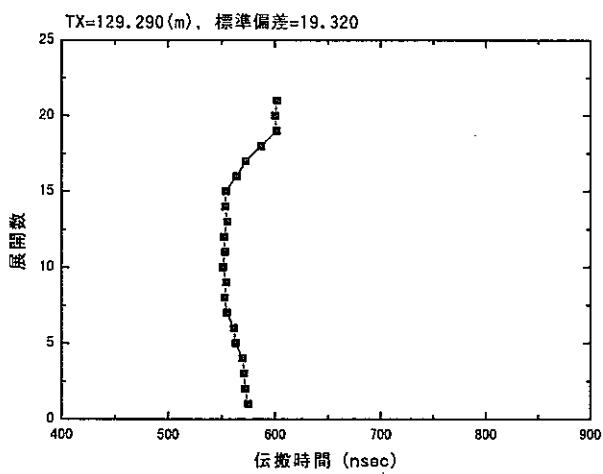
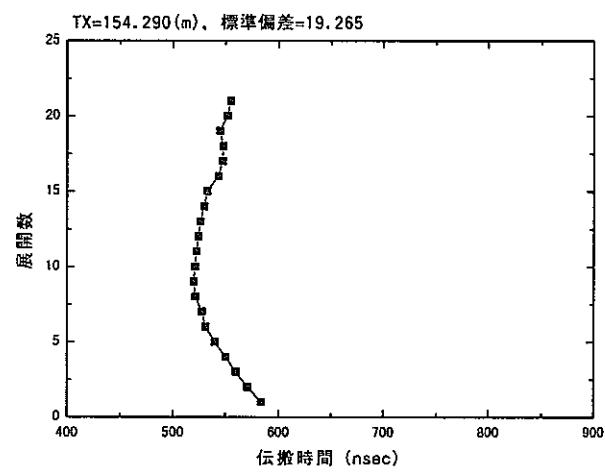
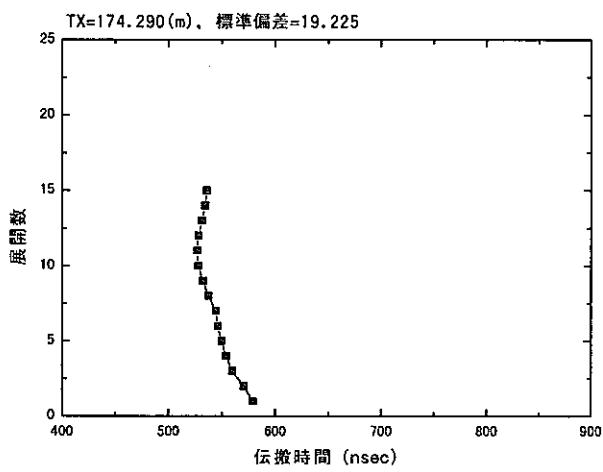
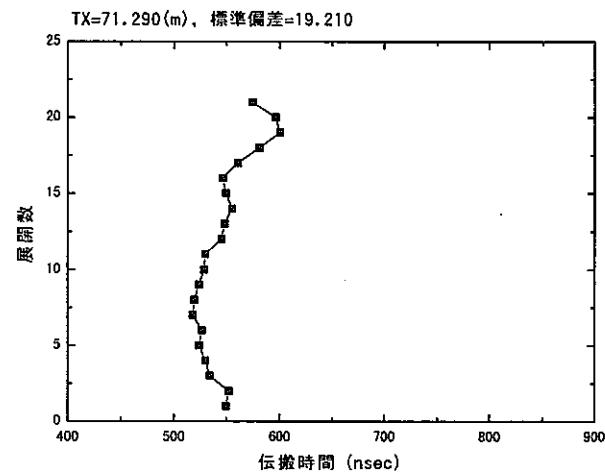
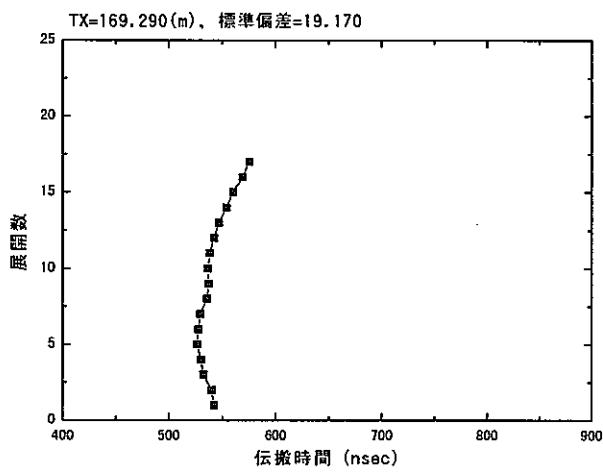
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



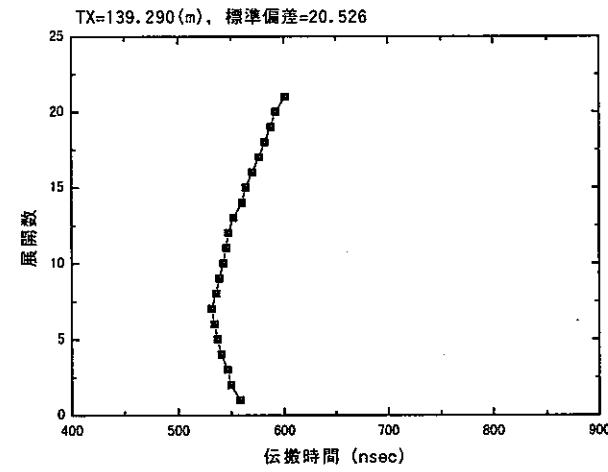
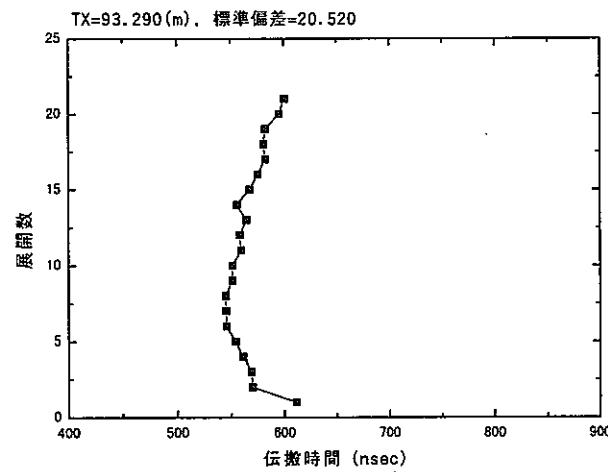
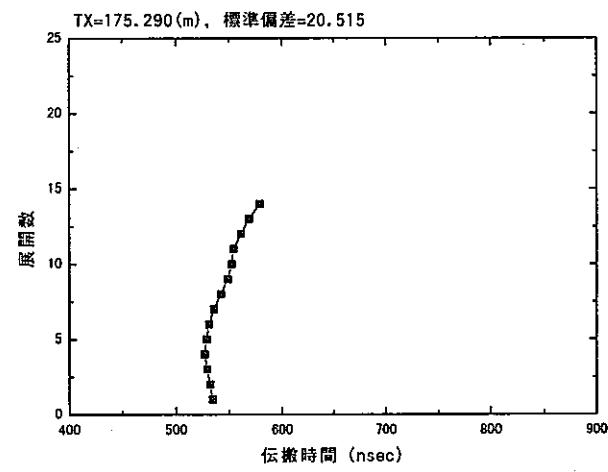
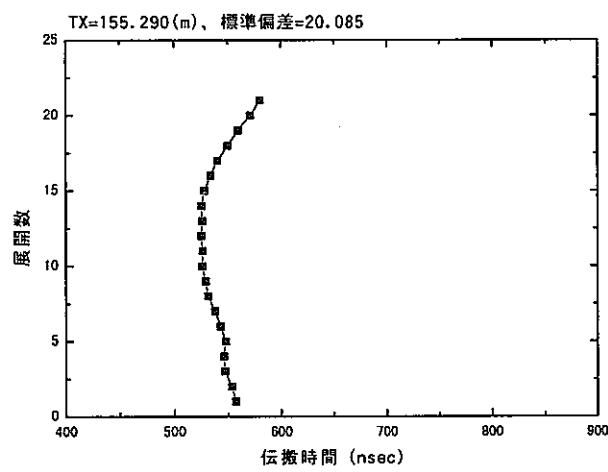
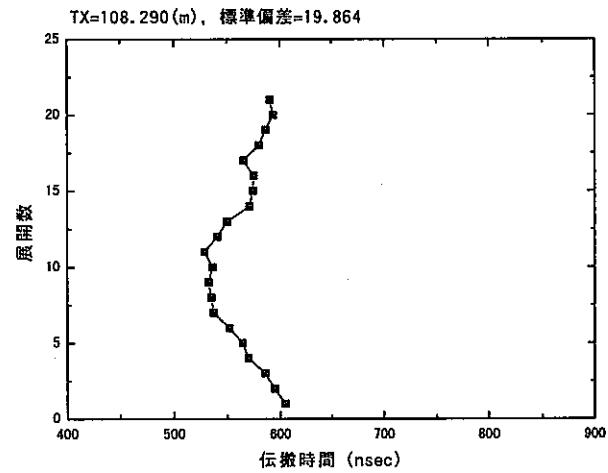
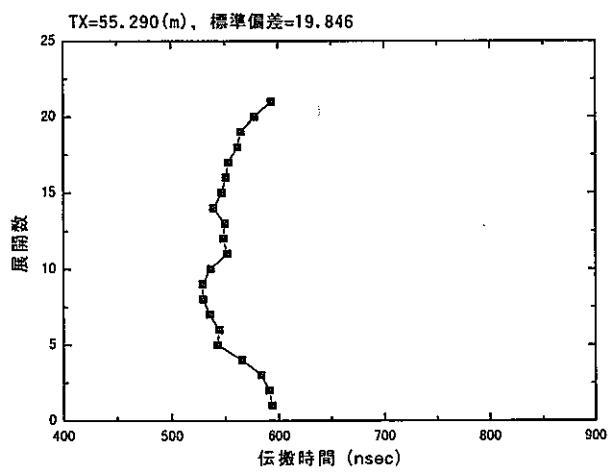
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



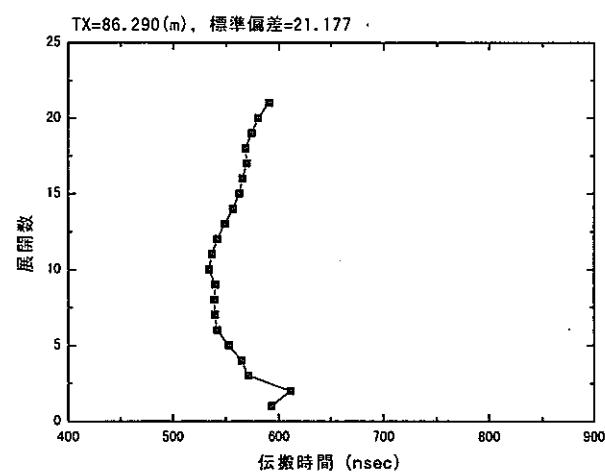
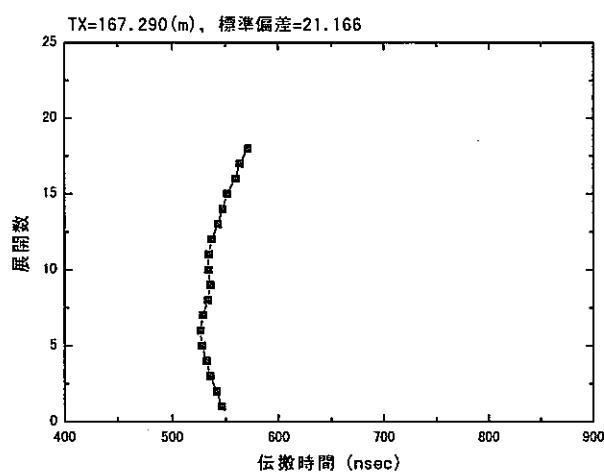
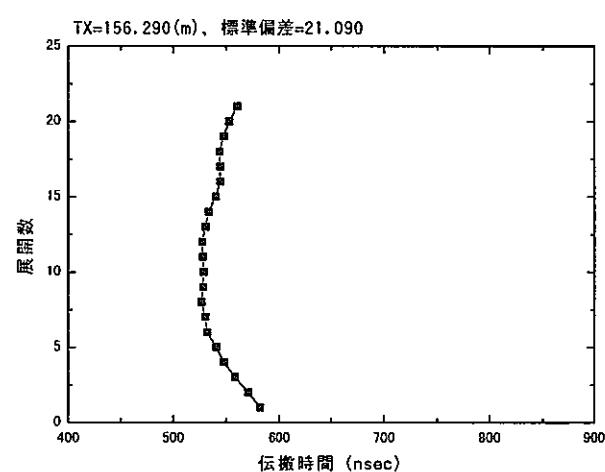
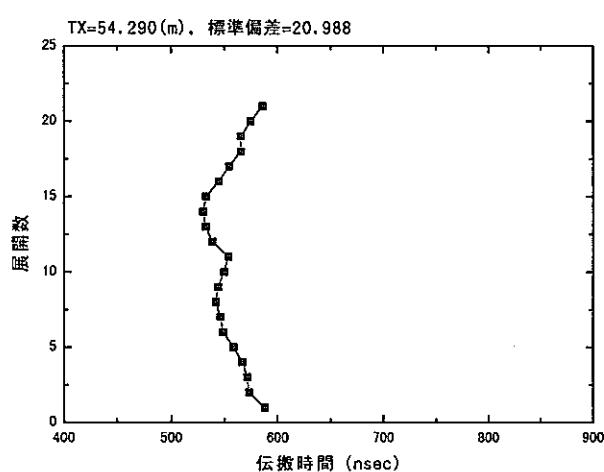
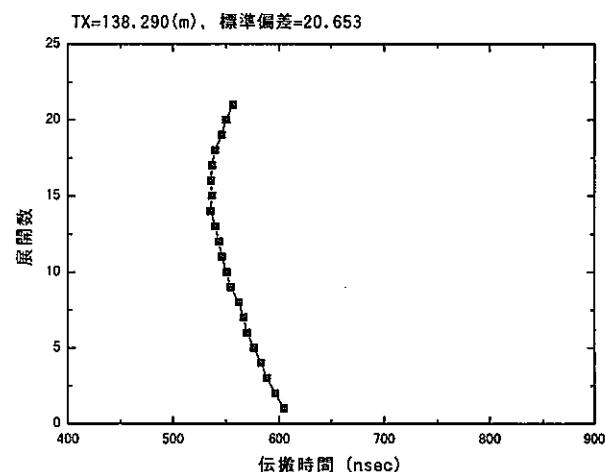
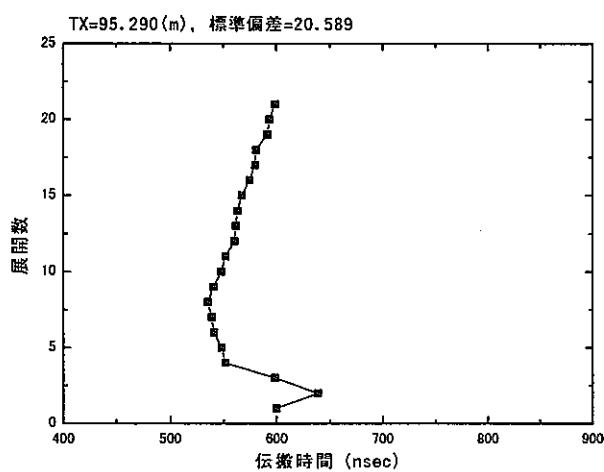
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



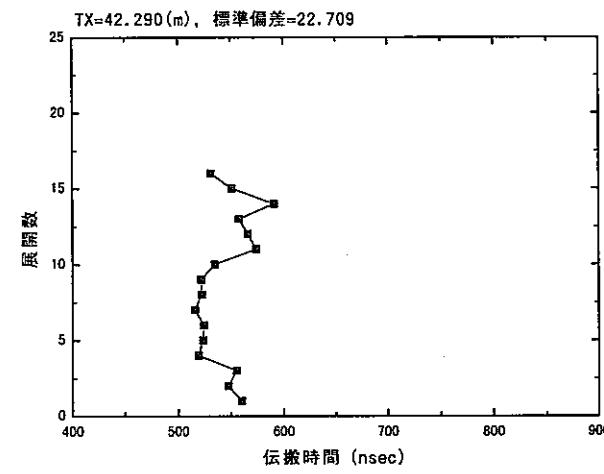
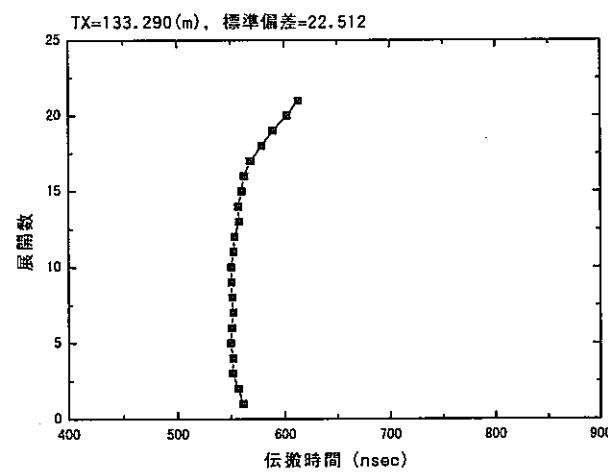
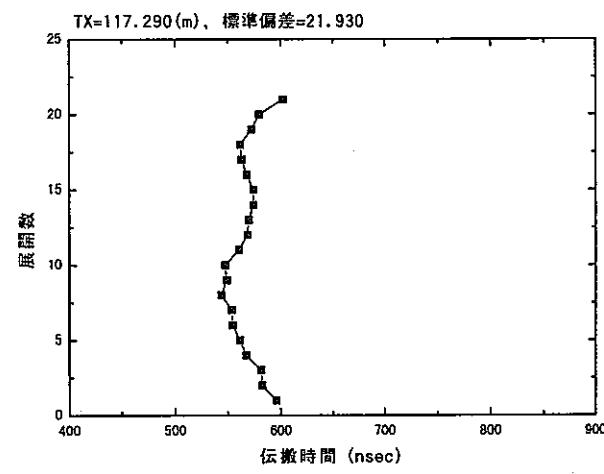
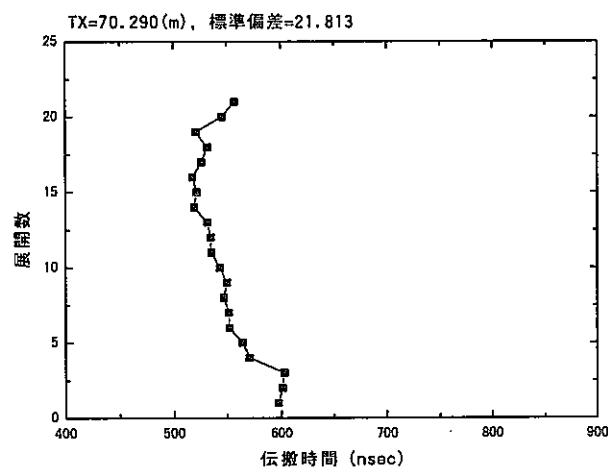
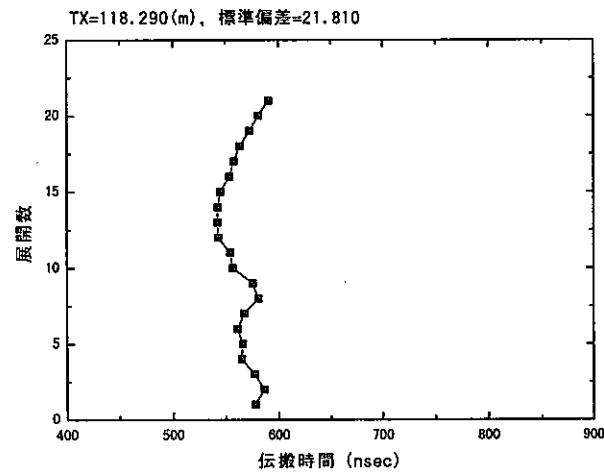
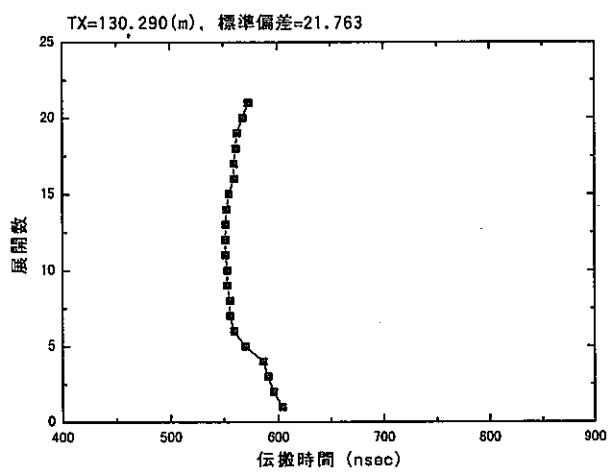
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



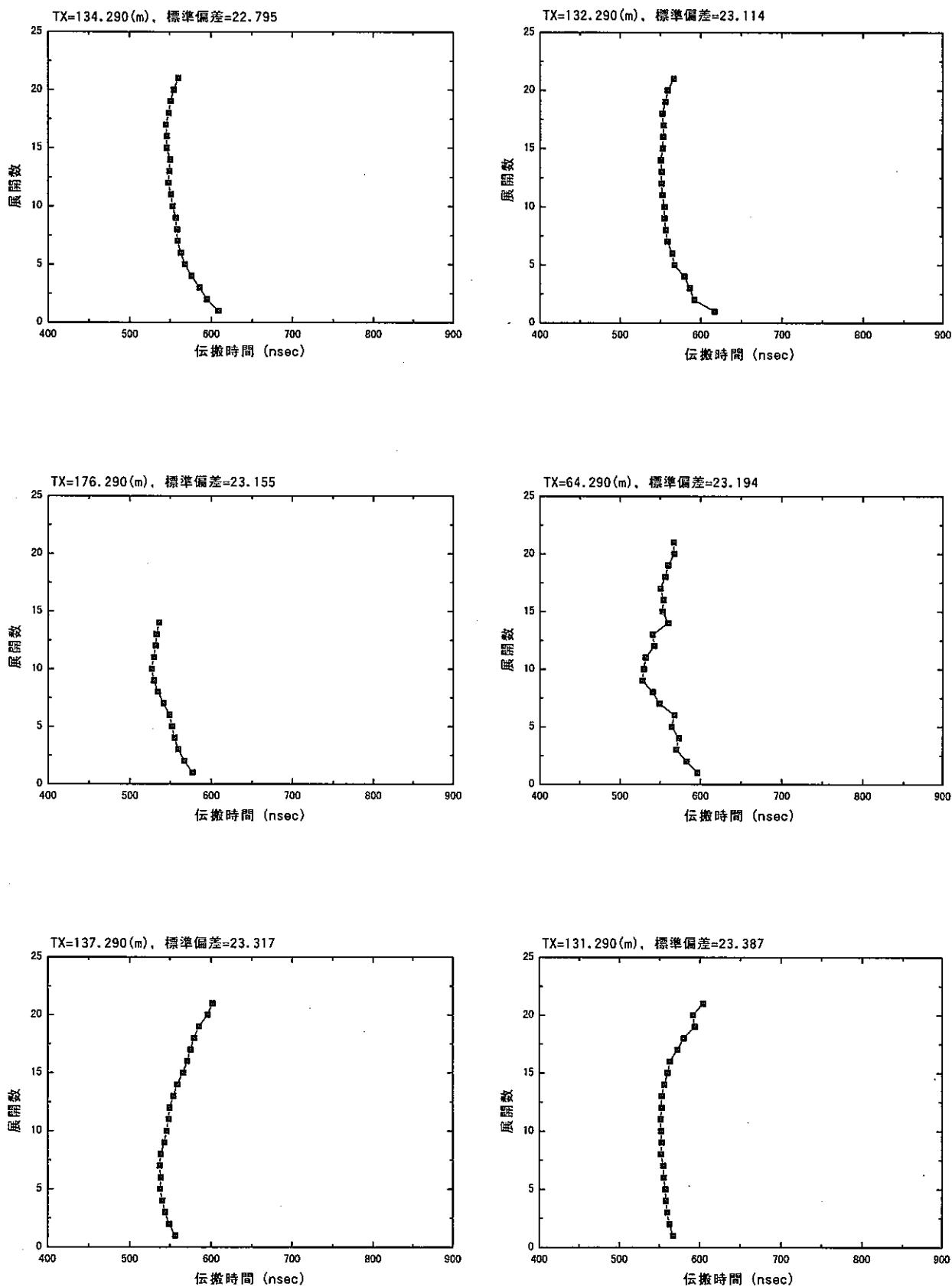
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



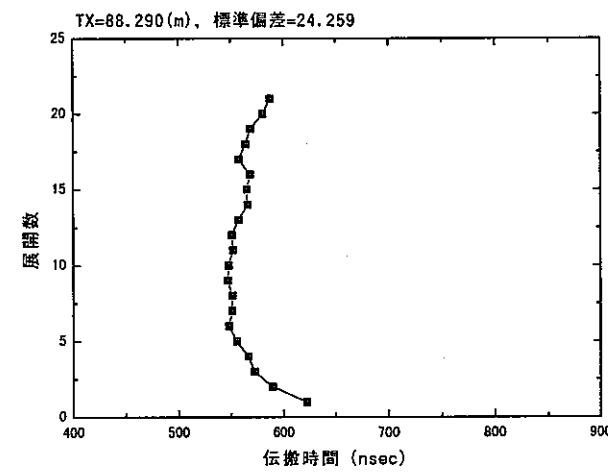
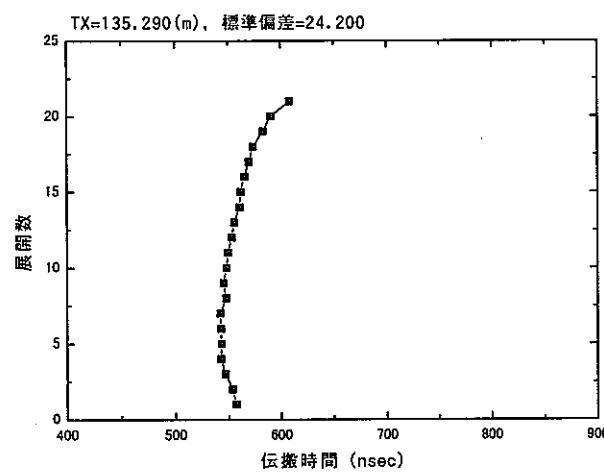
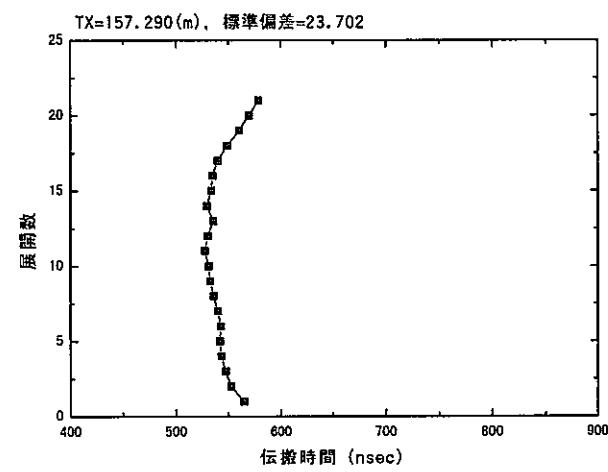
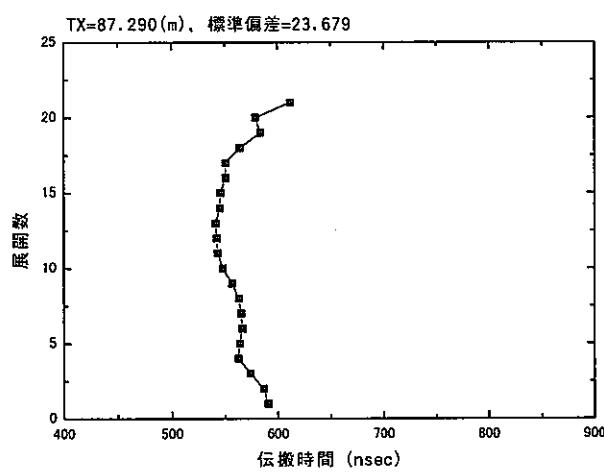
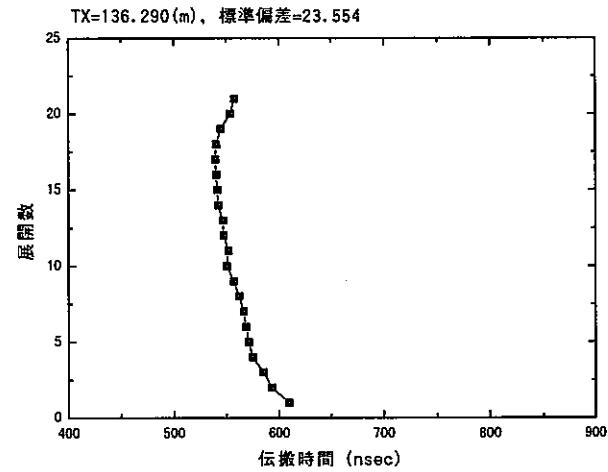
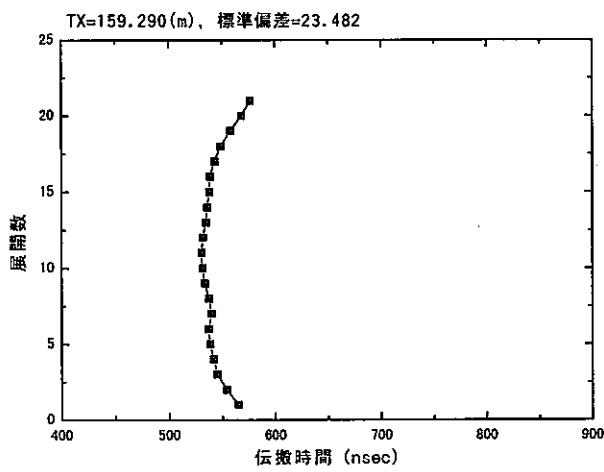
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



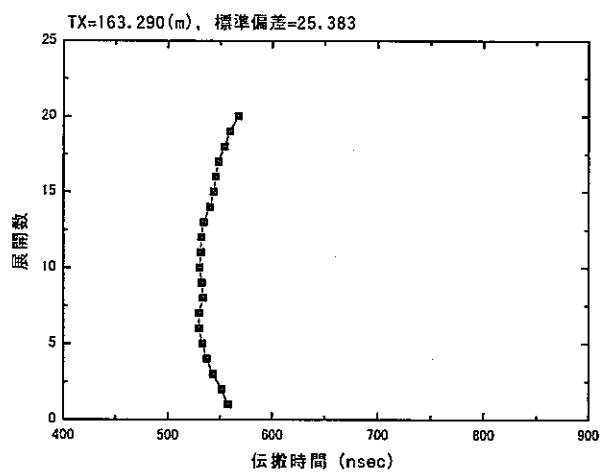
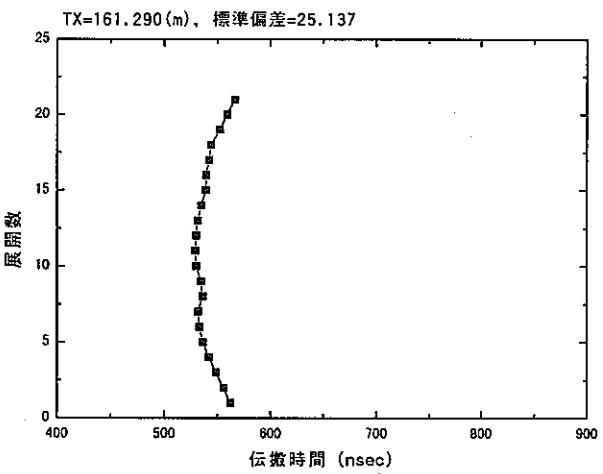
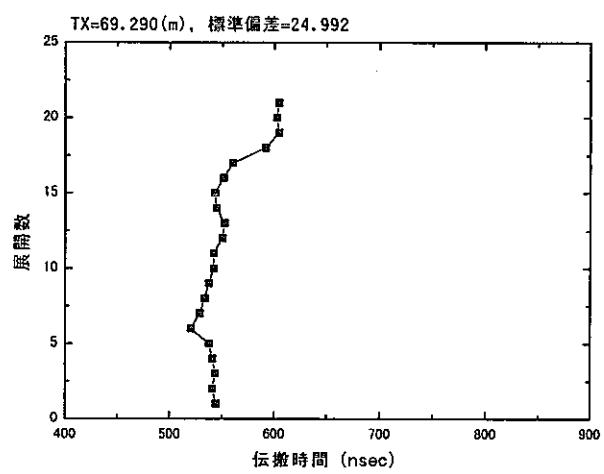
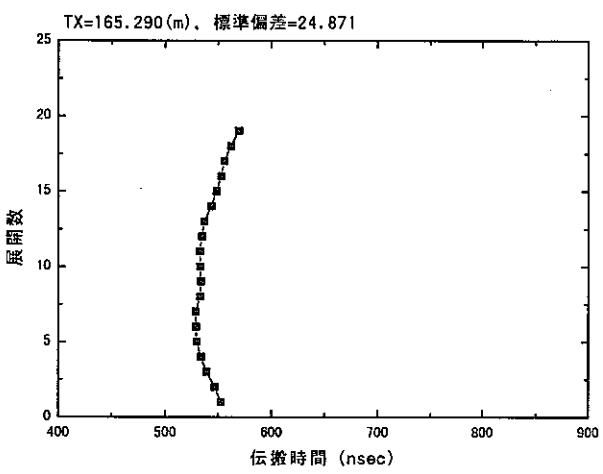
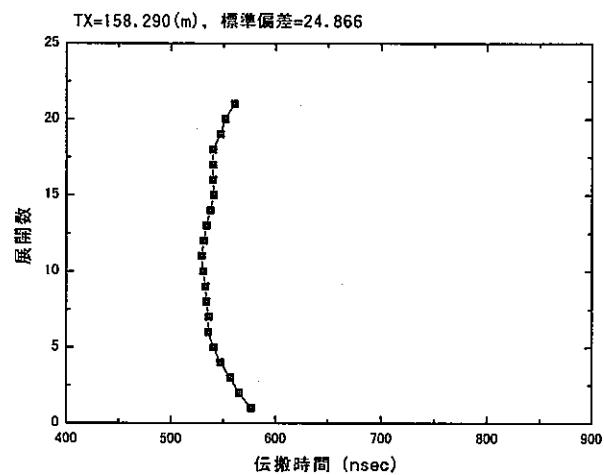
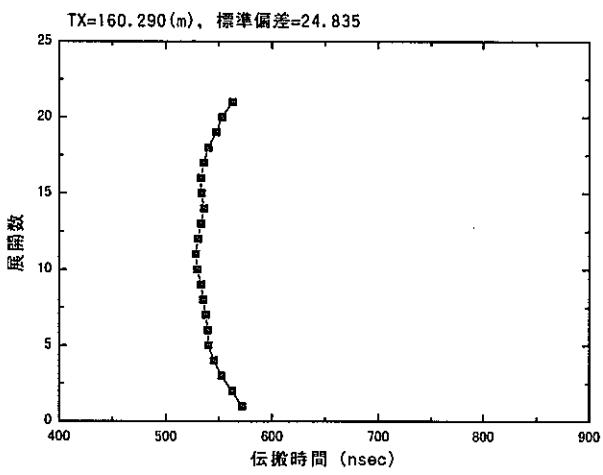
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



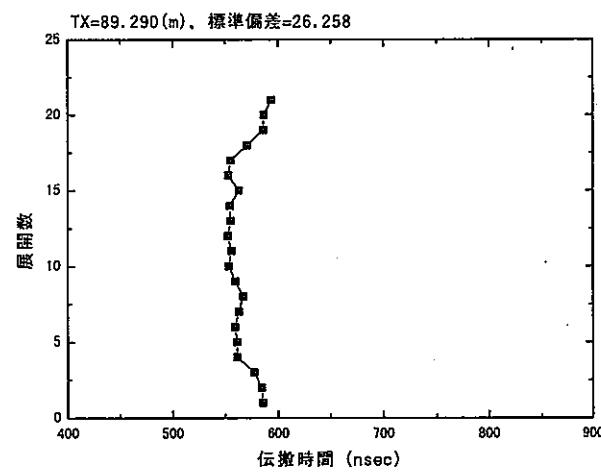
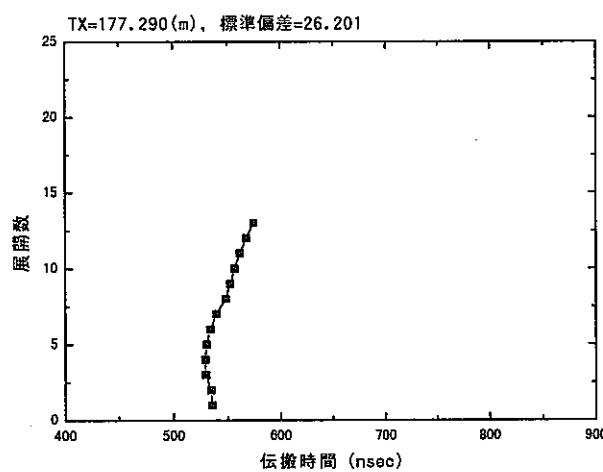
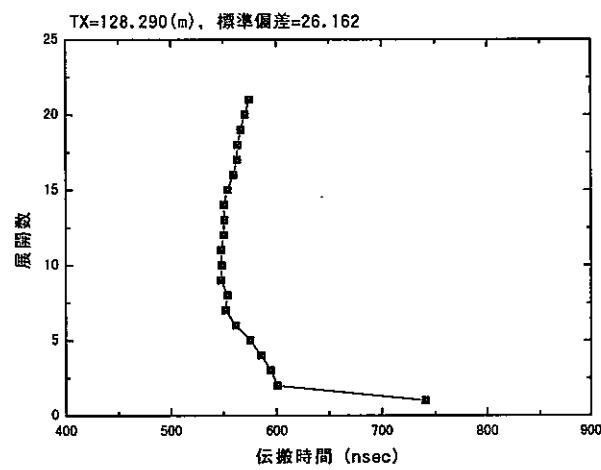
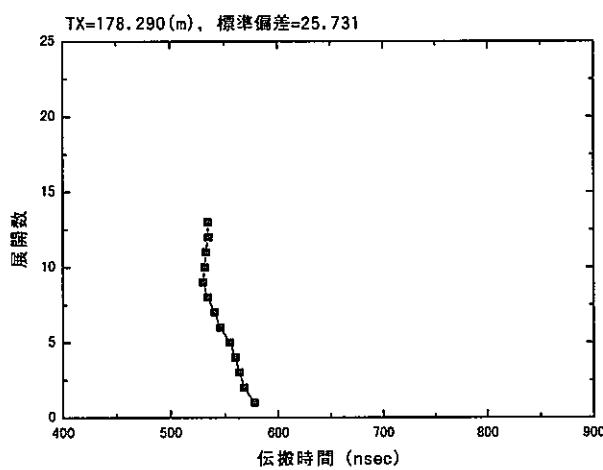
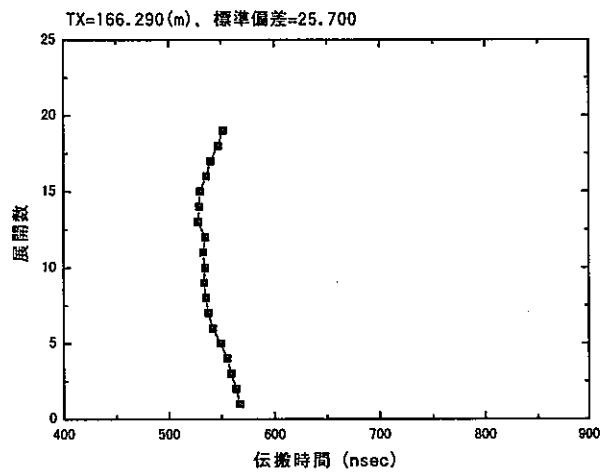
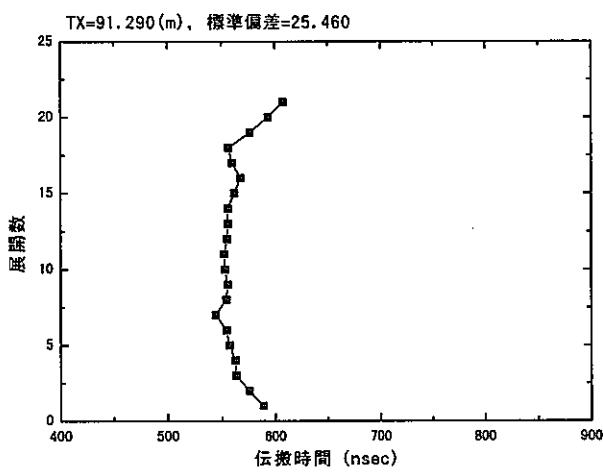
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



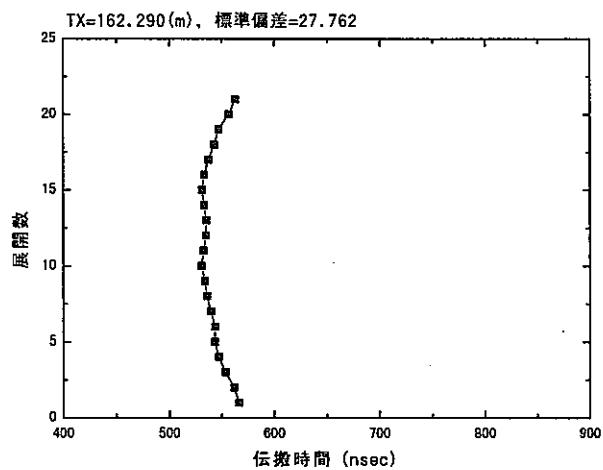
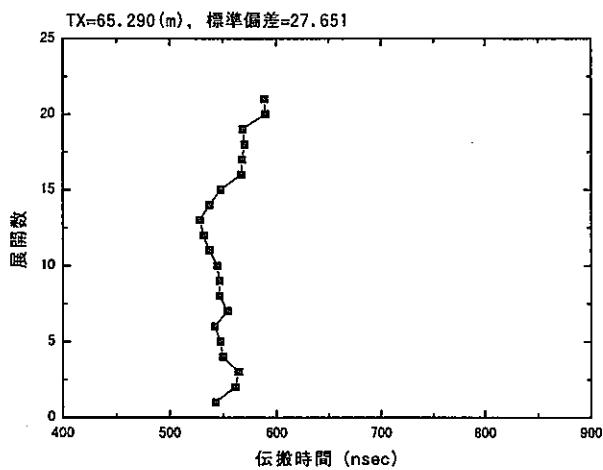
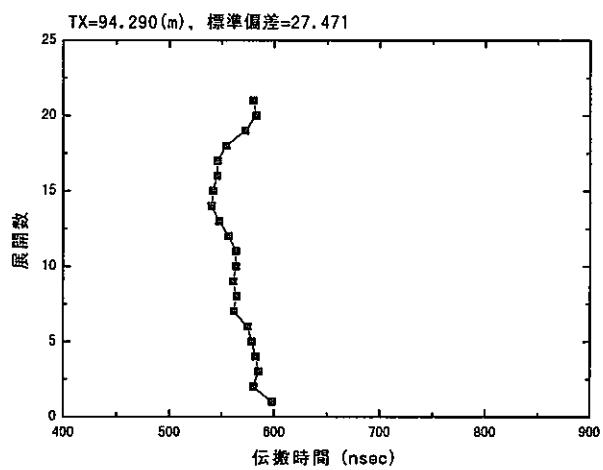
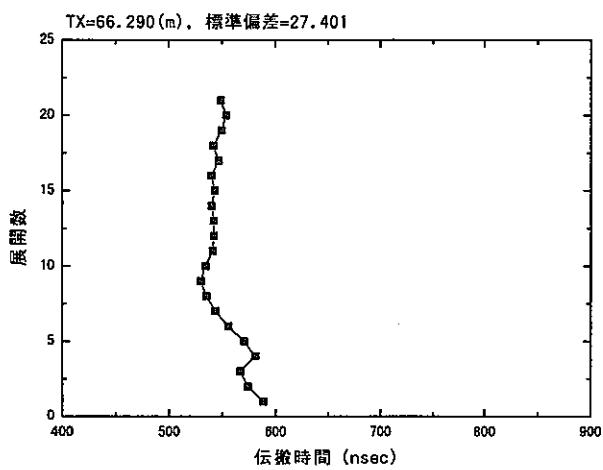
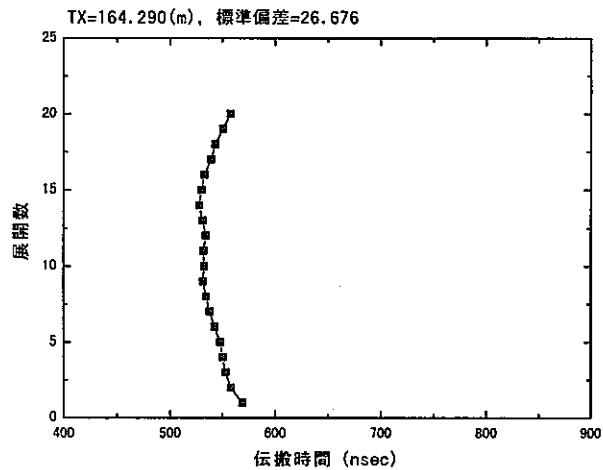
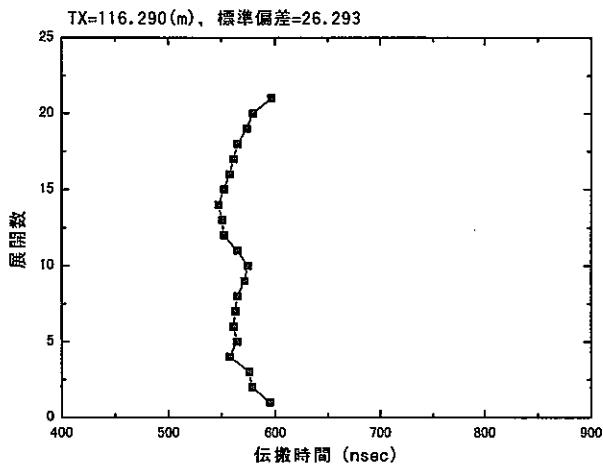
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



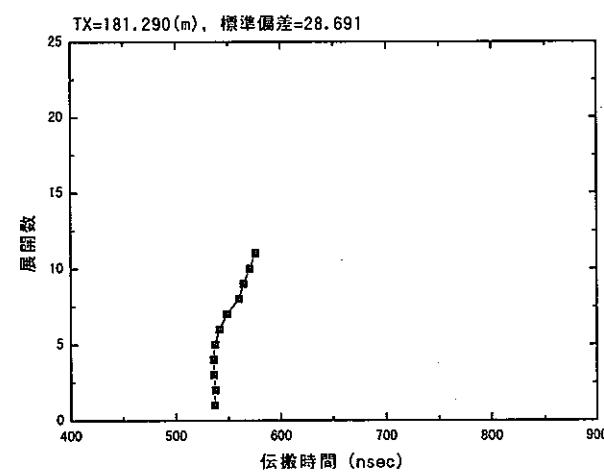
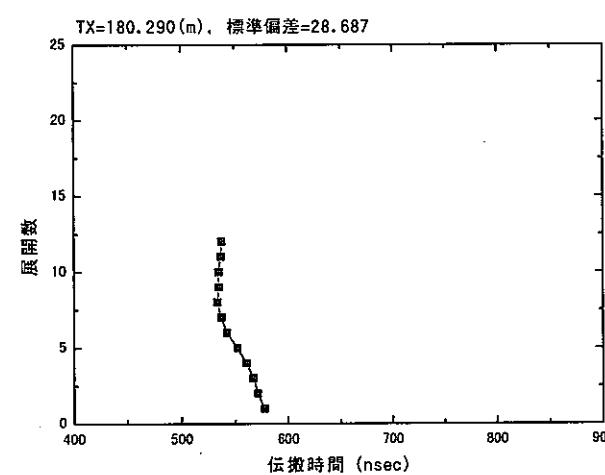
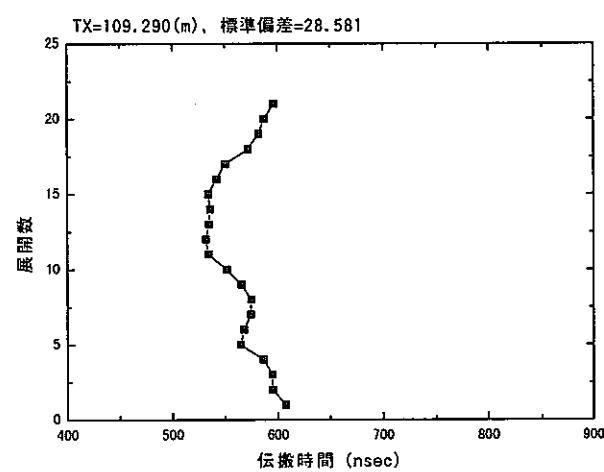
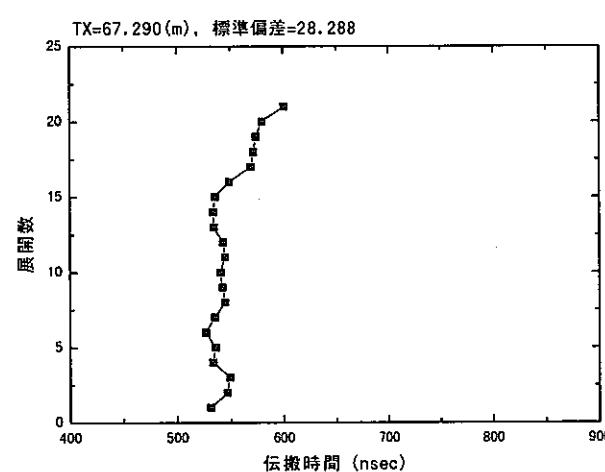
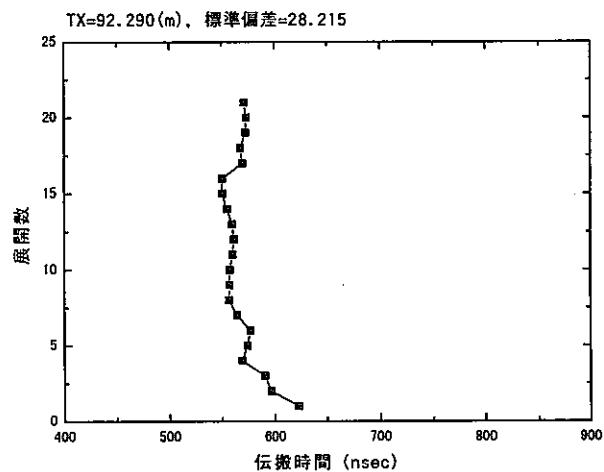
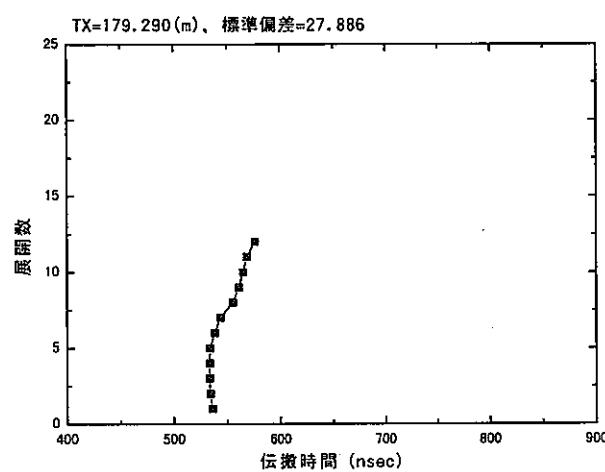
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



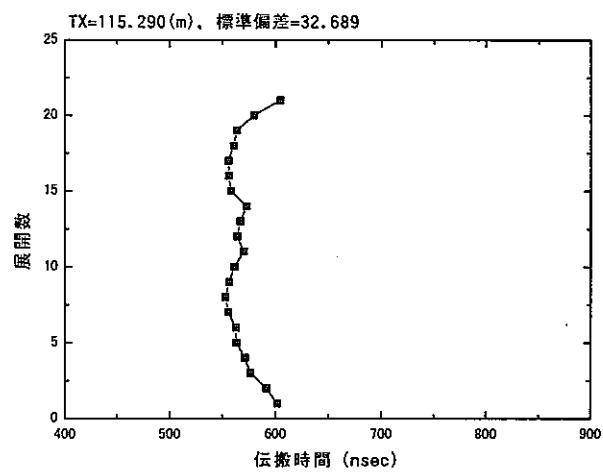
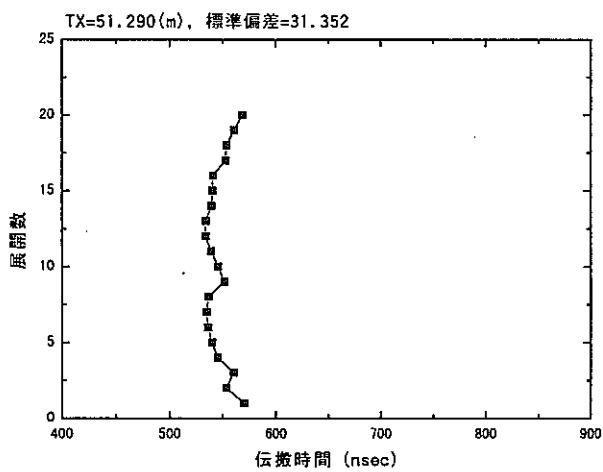
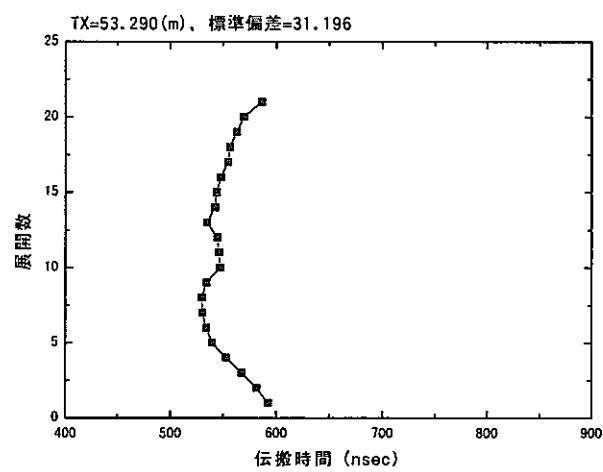
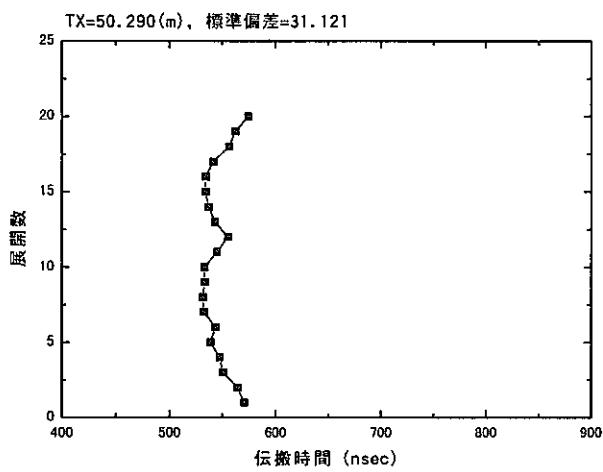
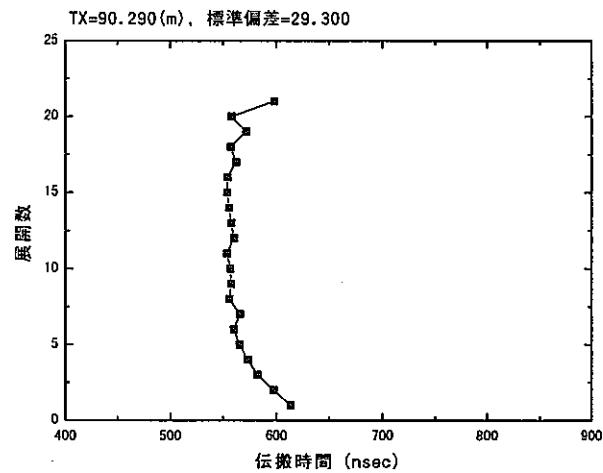
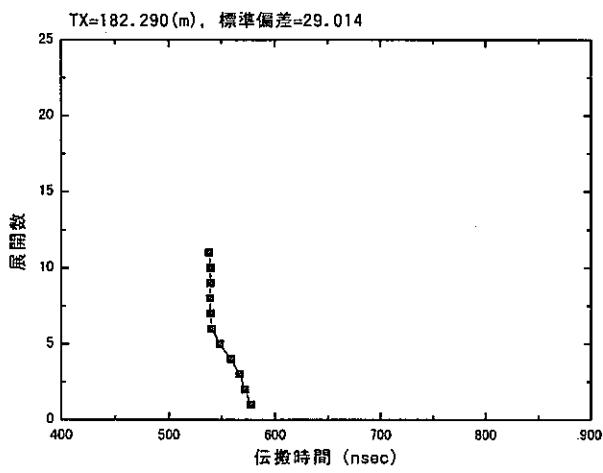
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



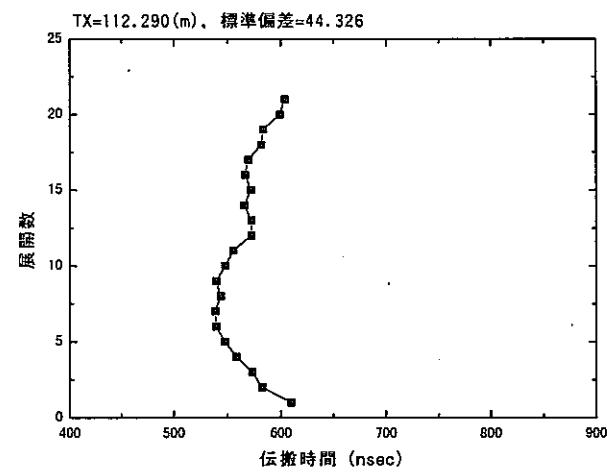
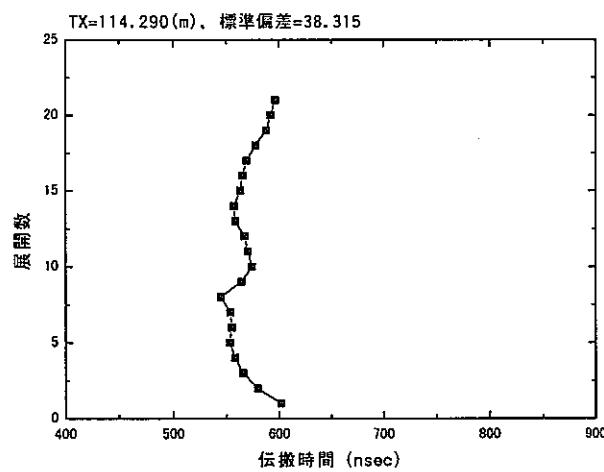
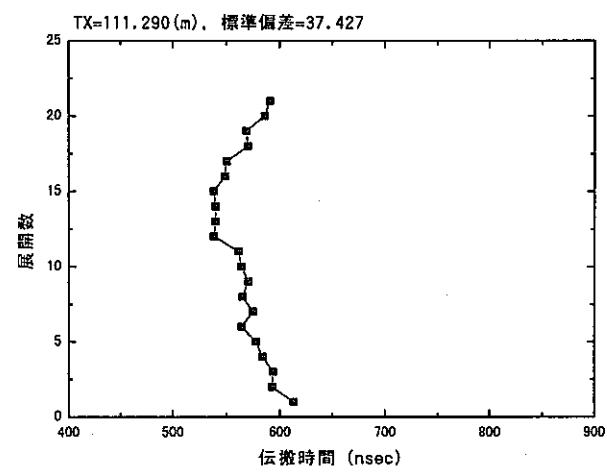
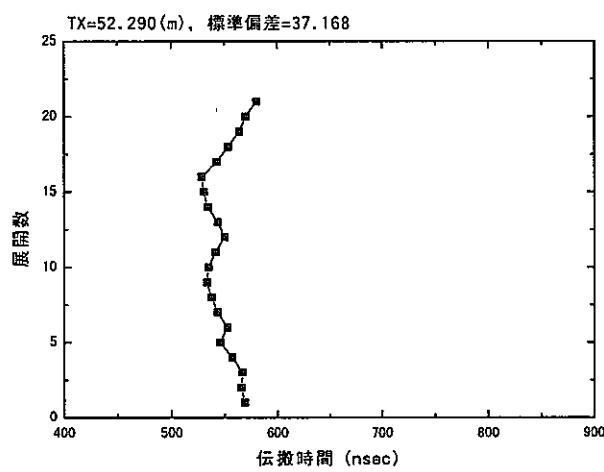
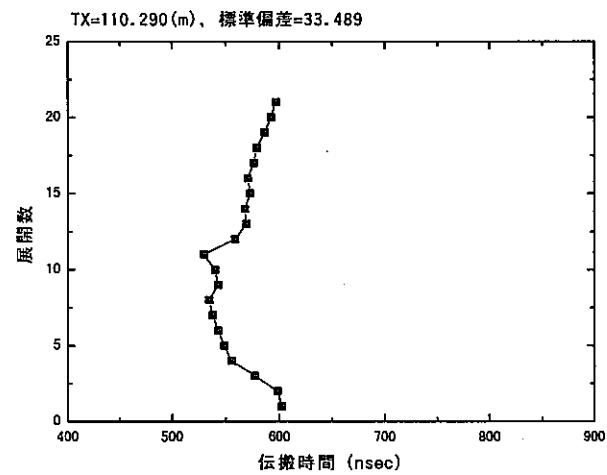
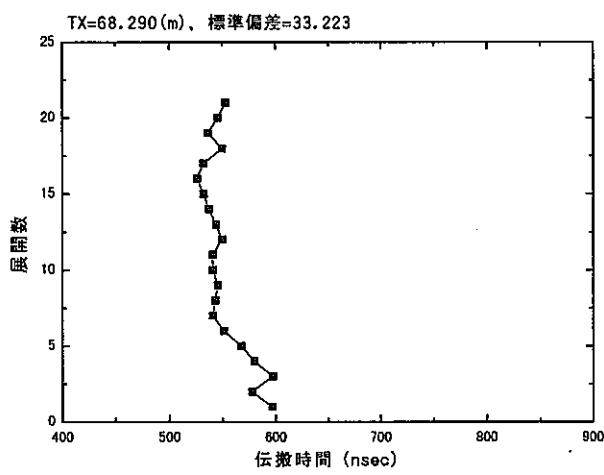
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



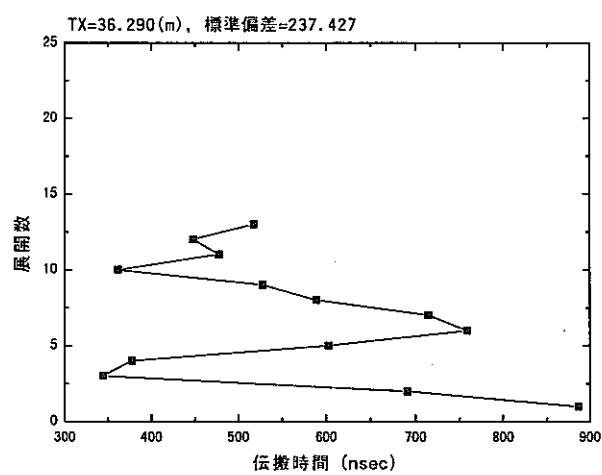
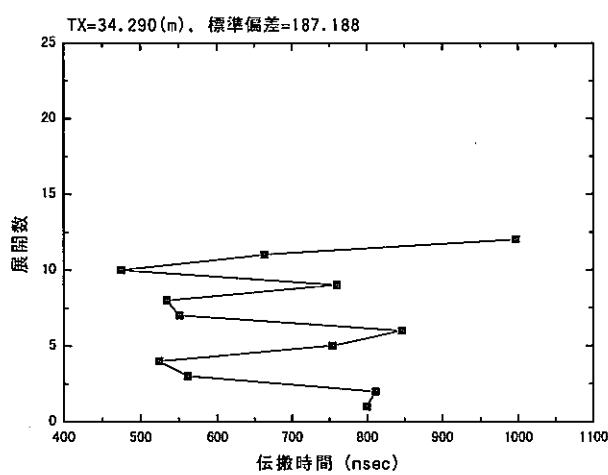
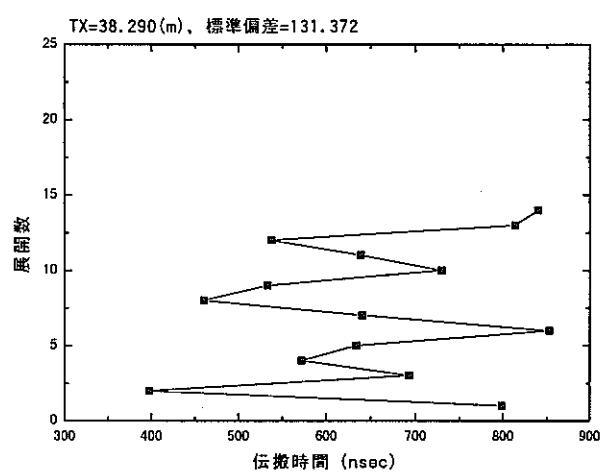
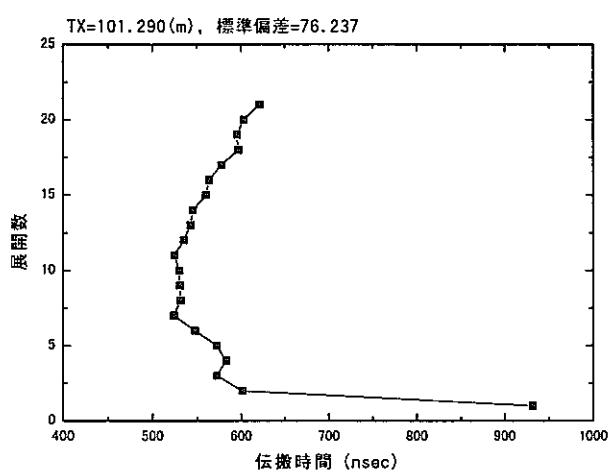
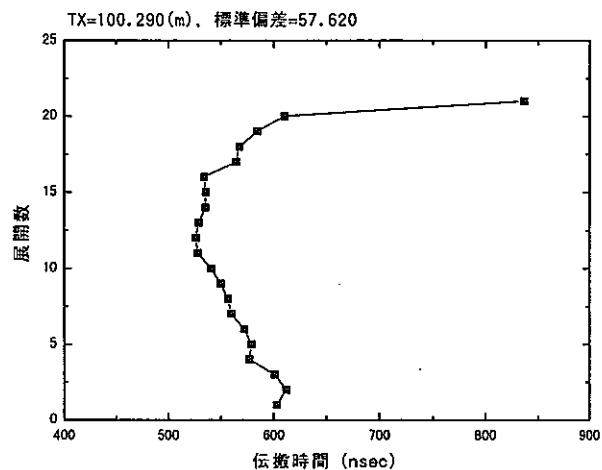
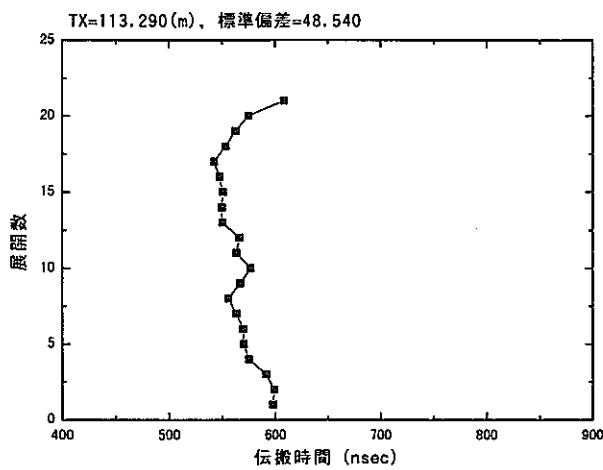
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



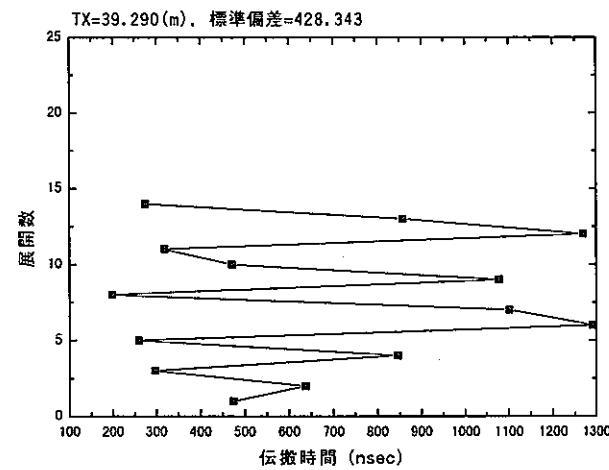
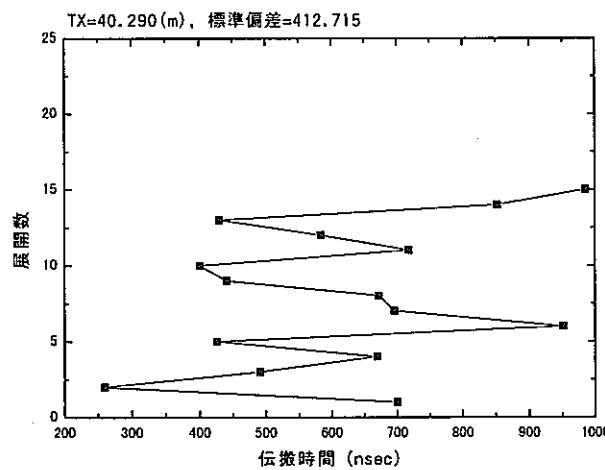
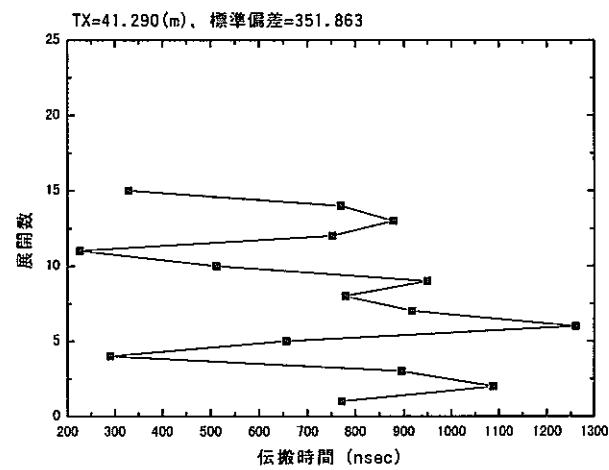
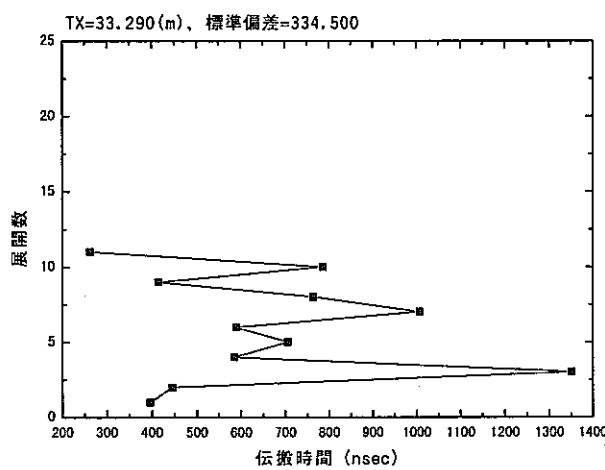
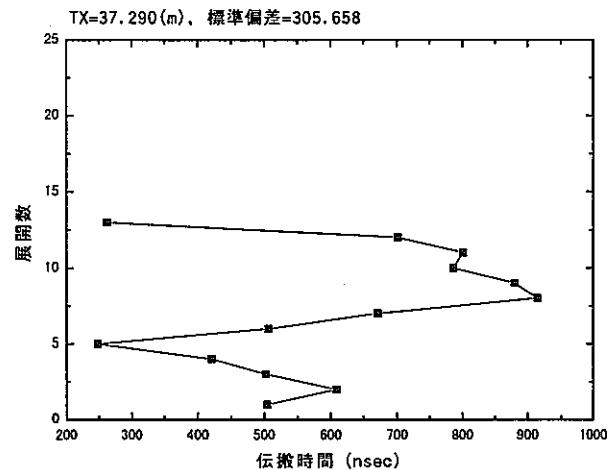
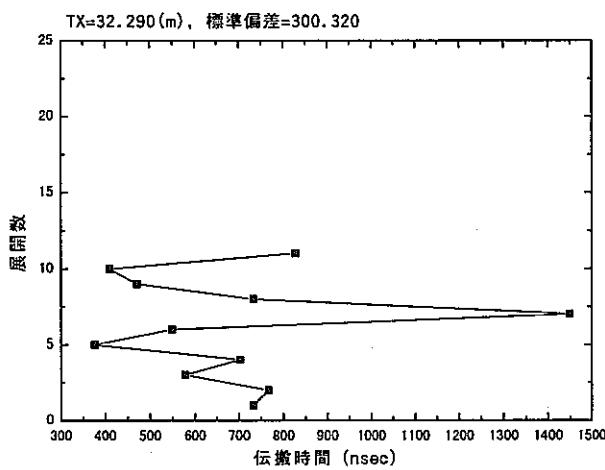
—送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



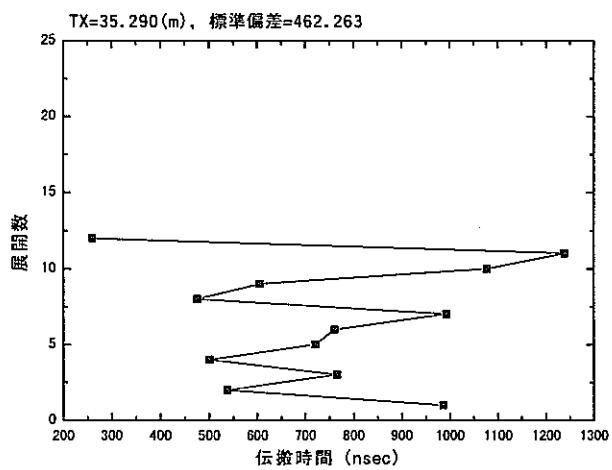
一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)



一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)

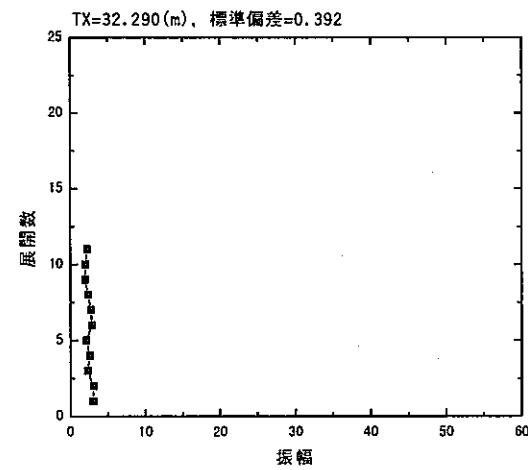
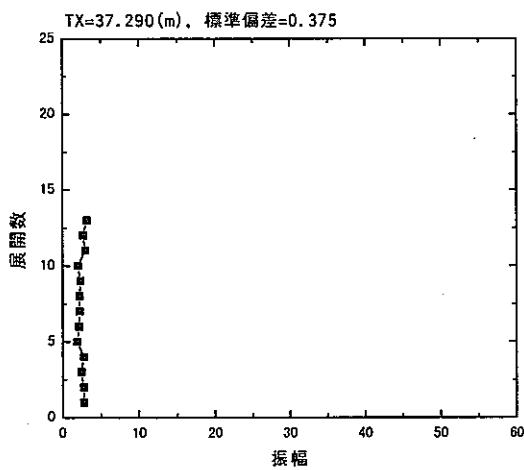
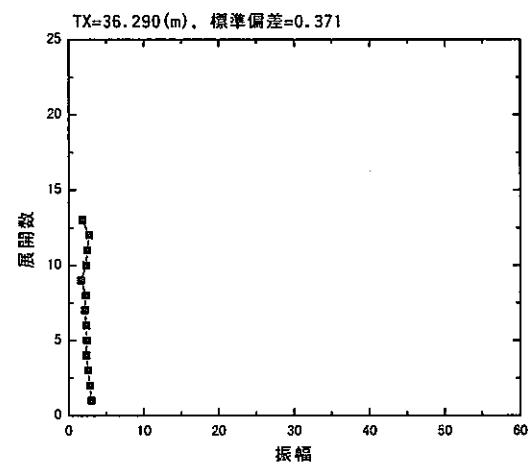
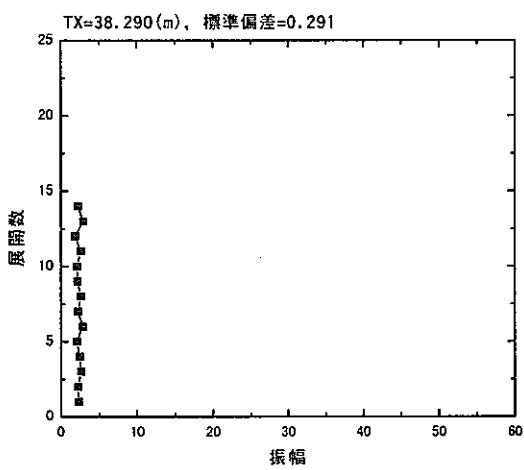
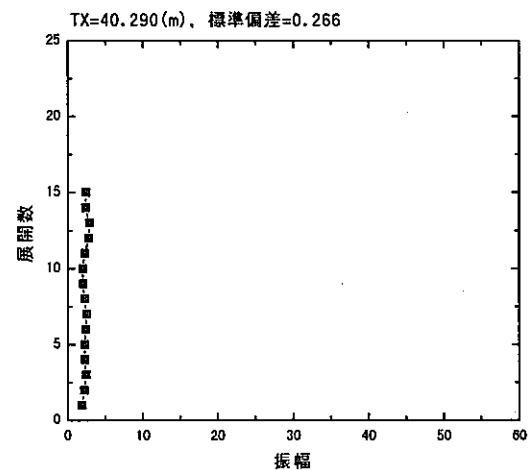
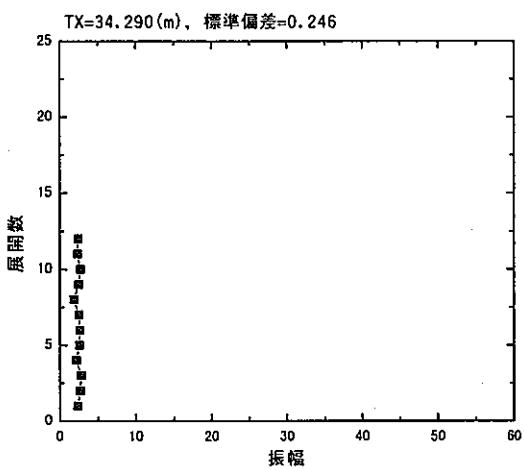


一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)

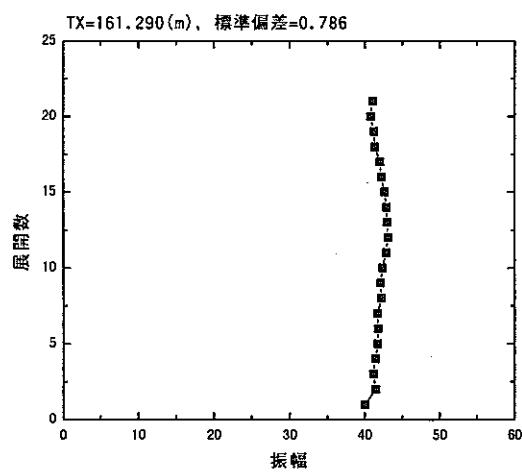
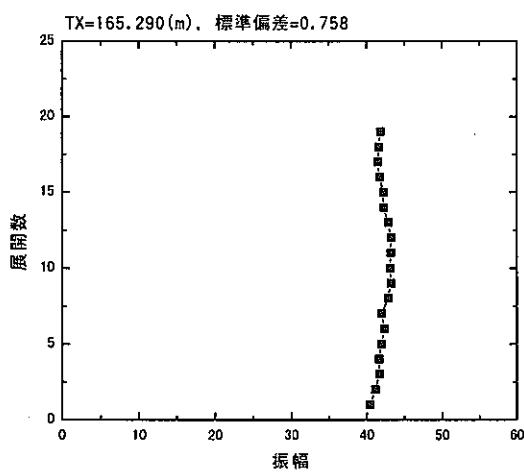
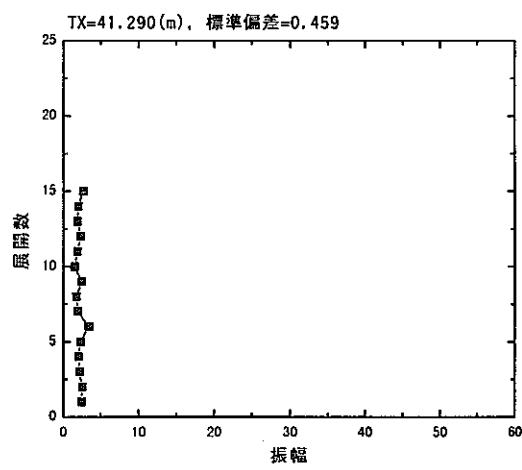
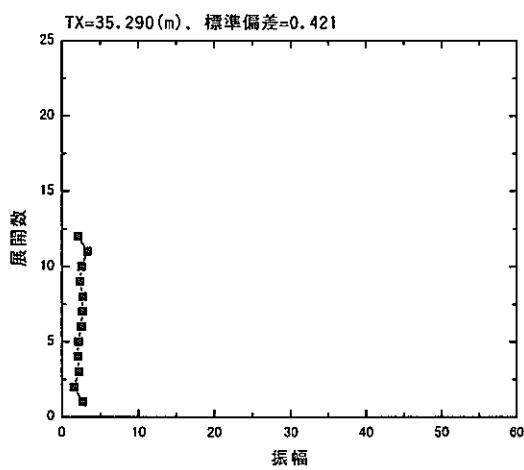
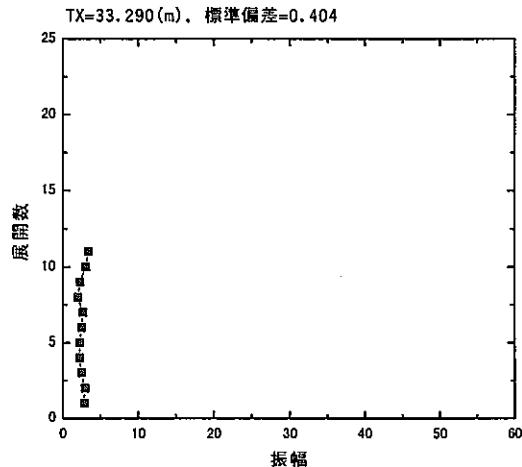
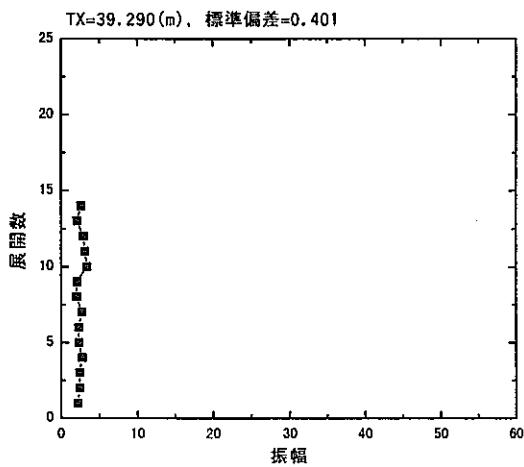


一送信点から得られた受信記録(伝搬時間)

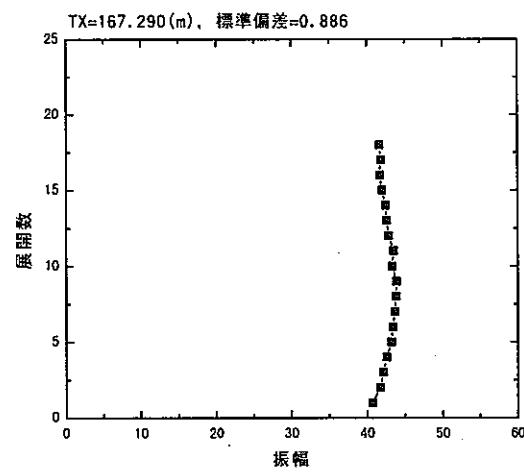
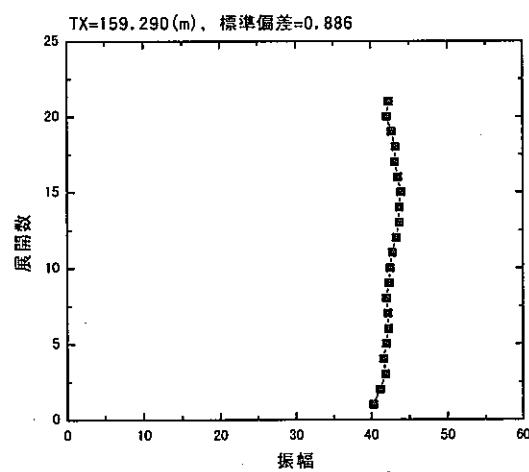
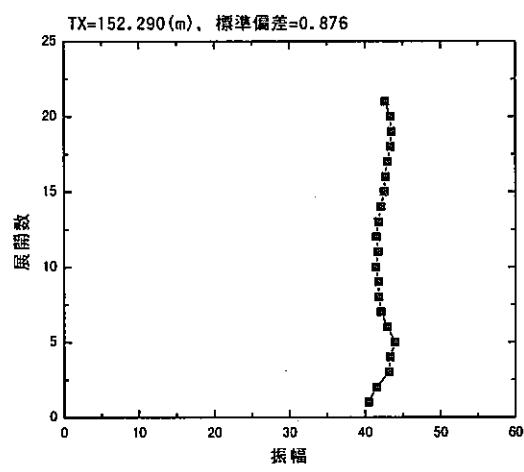
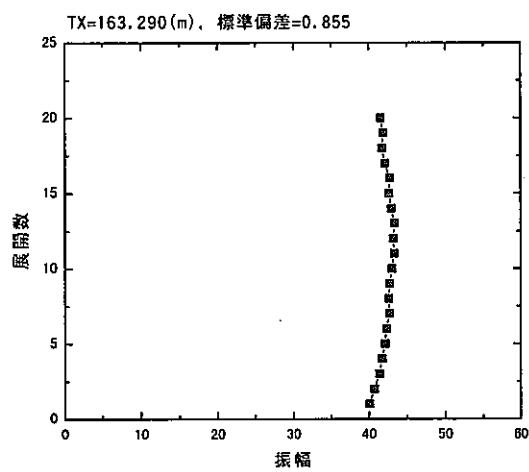
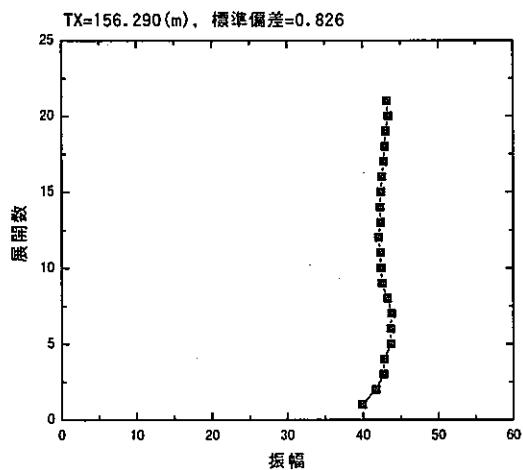
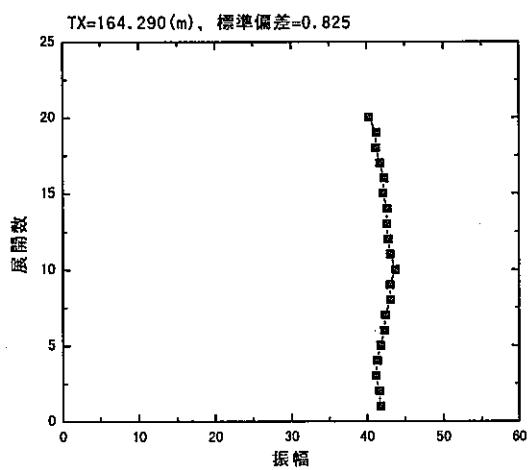
一送信点から得られた受信記録（振幅）



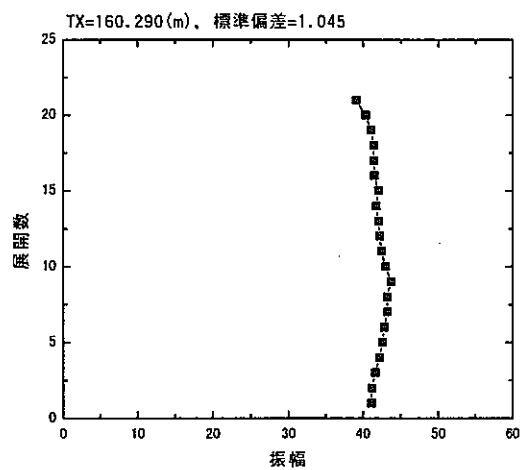
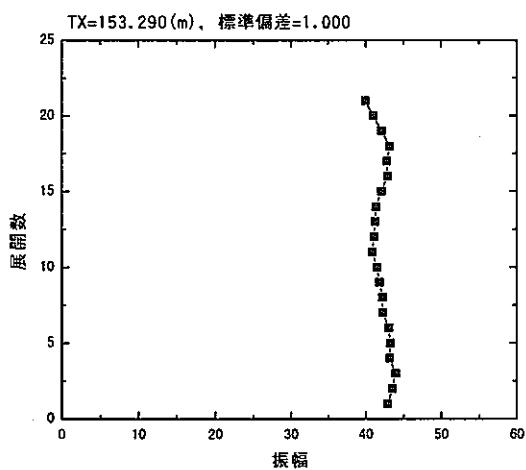
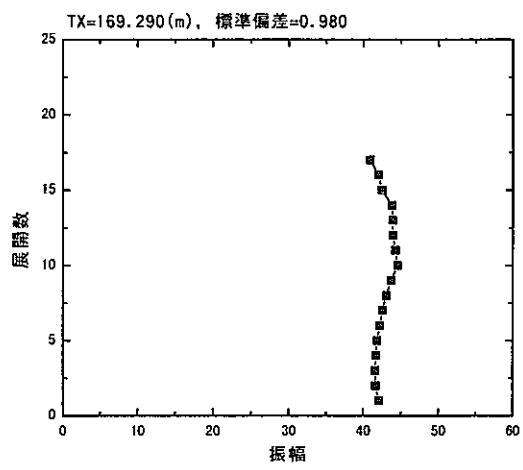
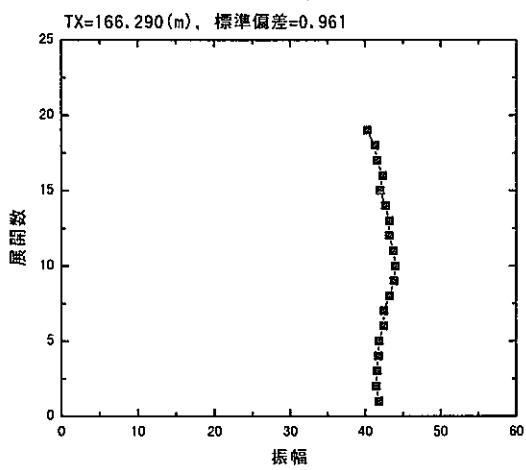
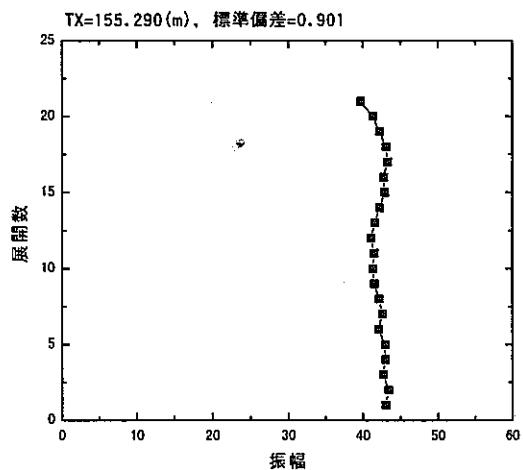
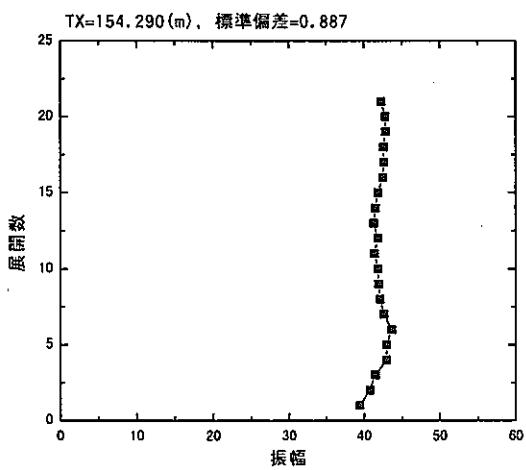
一送信点から得られた受信記録(振幅)



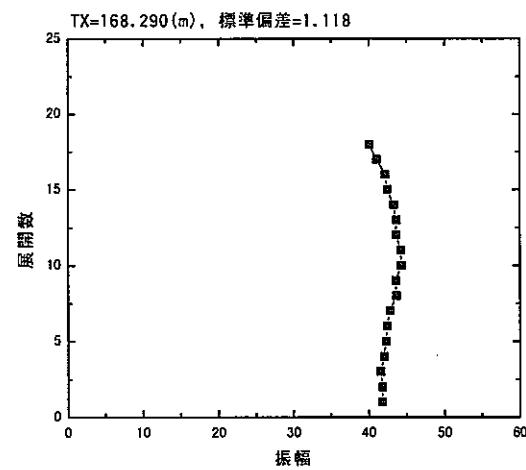
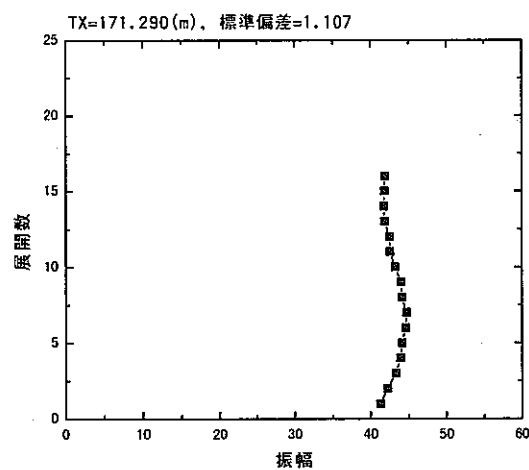
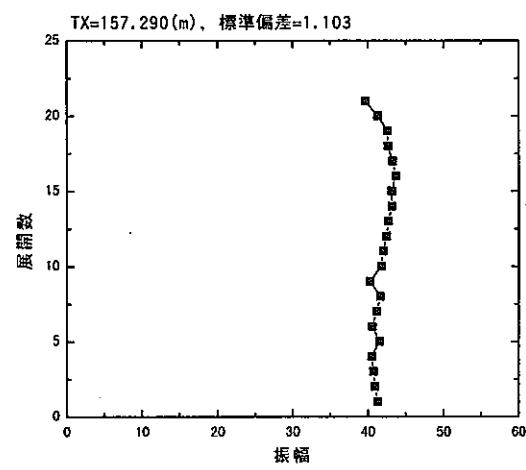
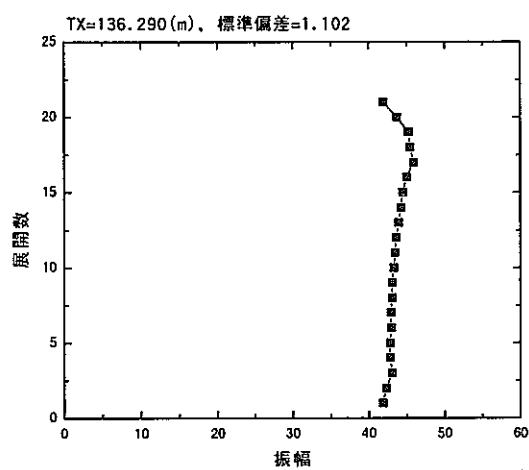
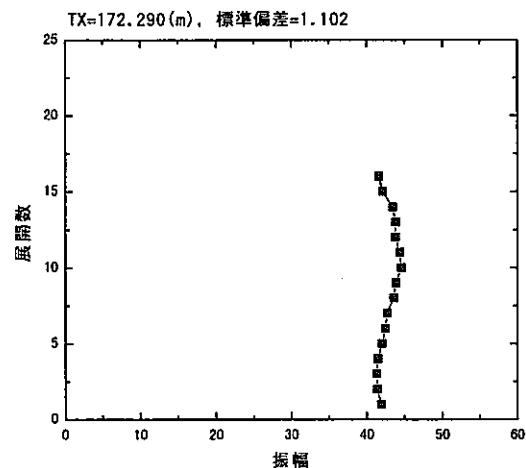
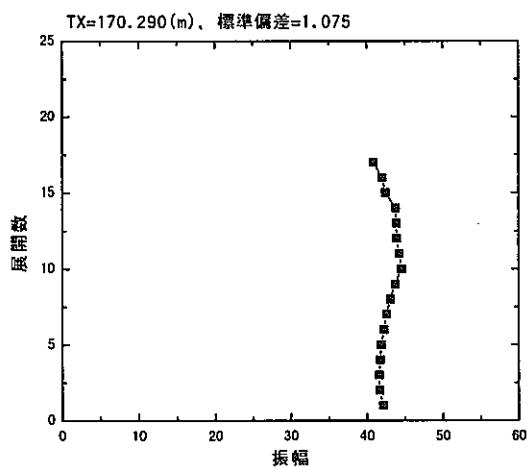
一送信点から得られた受信記録(振幅)



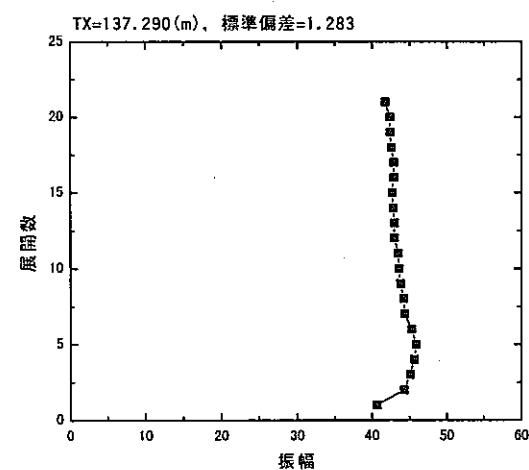
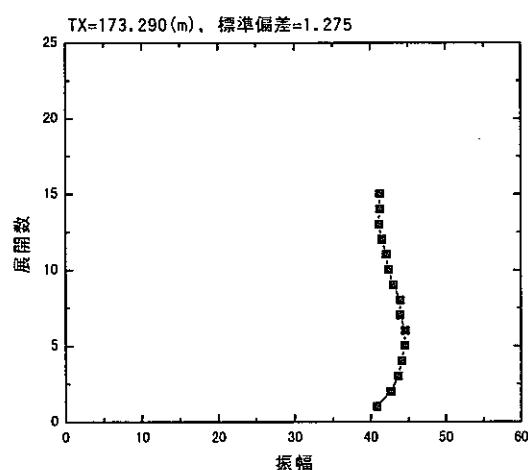
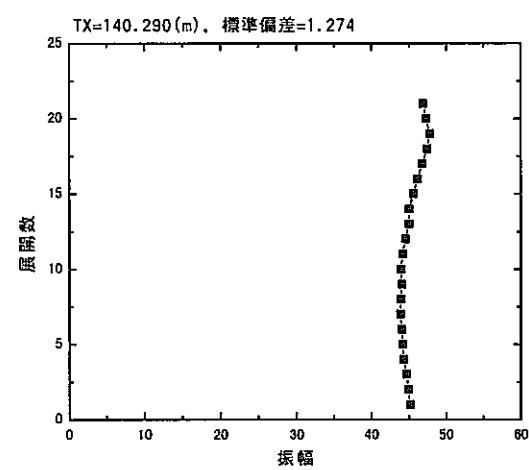
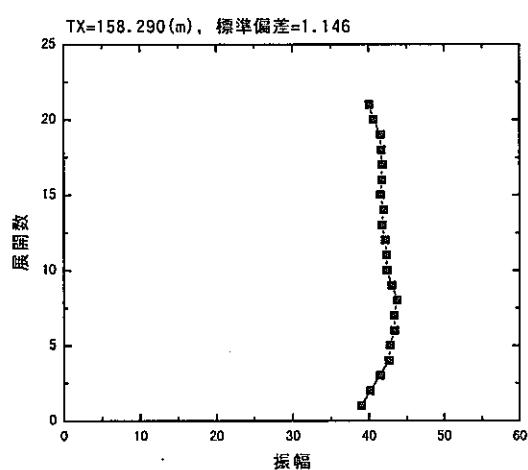
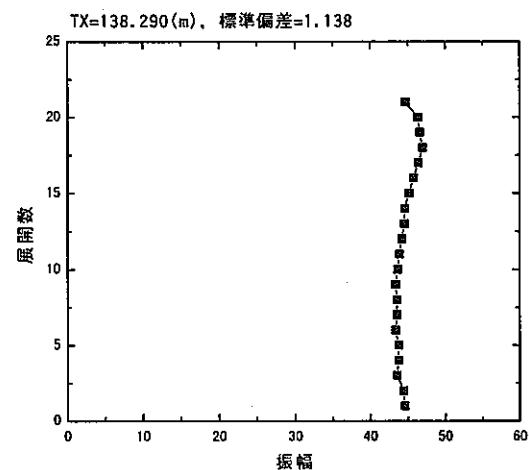
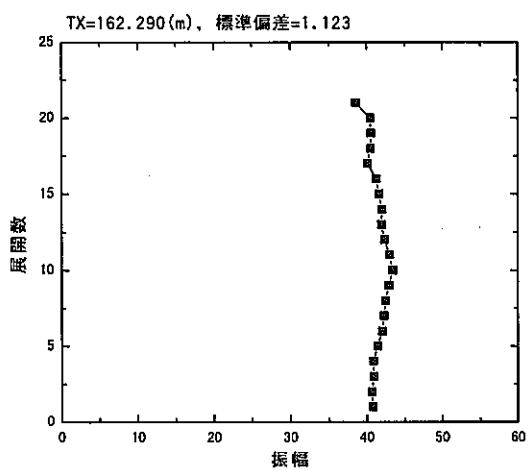
一送信点から得られた受信記録(振幅)



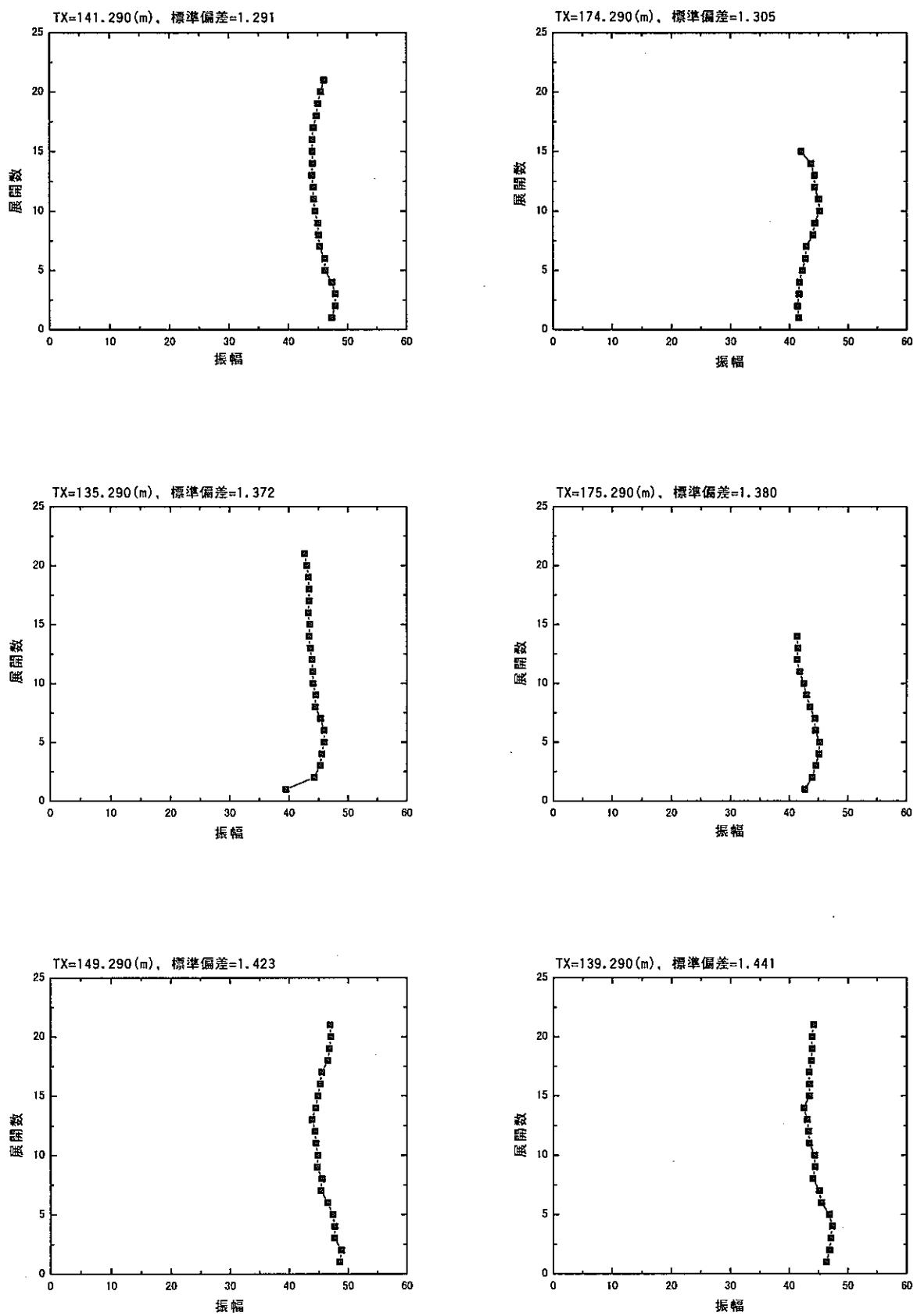
一送信点から得られた受信記録(振幅)



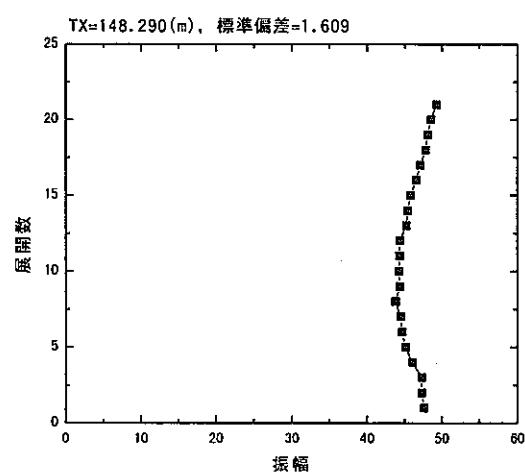
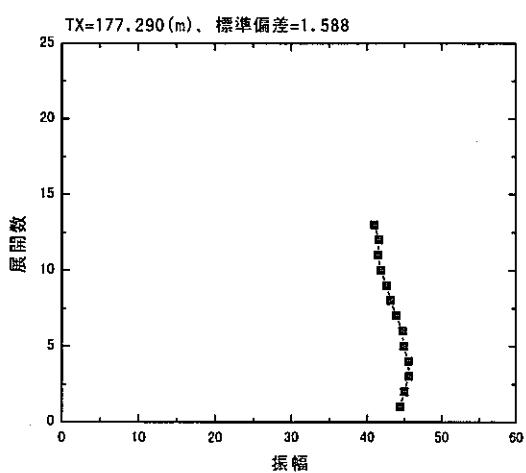
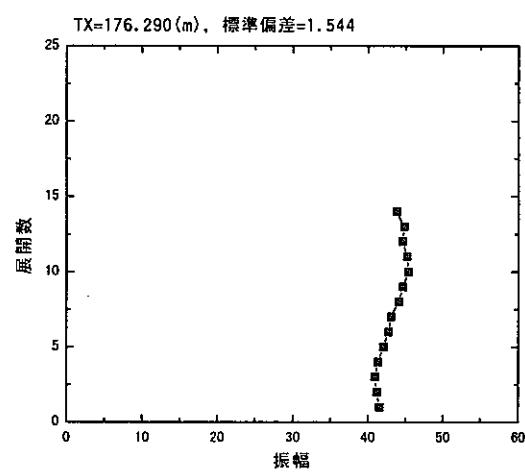
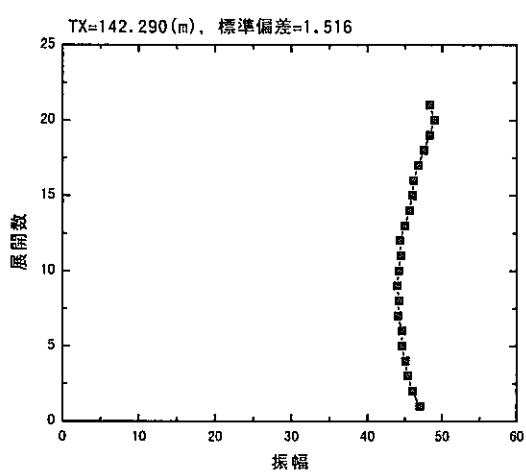
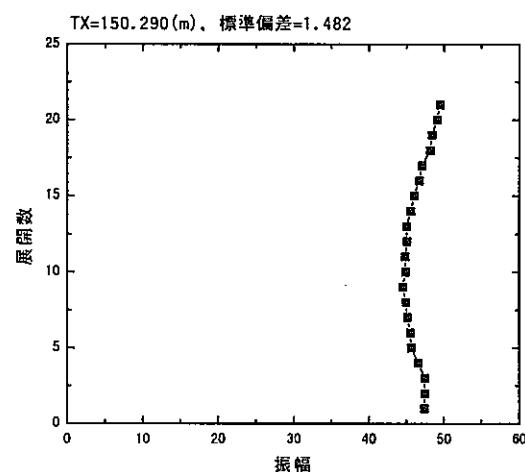
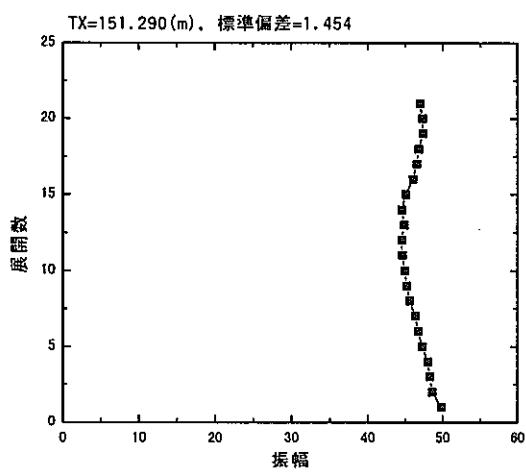
一送信点から得られた受信記録(振幅)



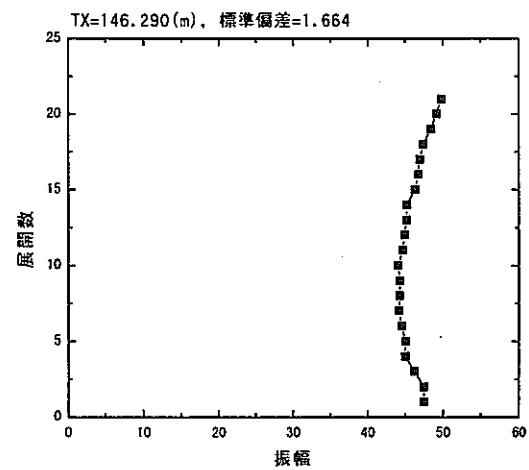
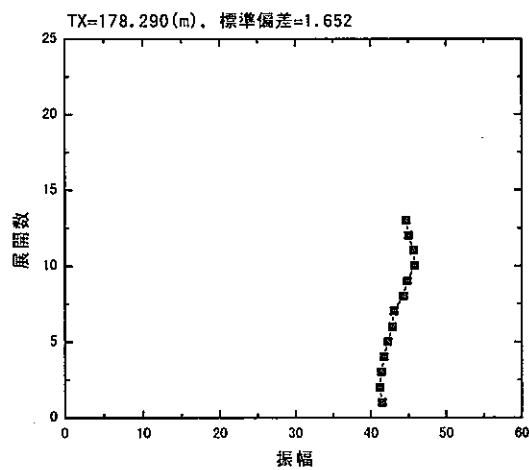
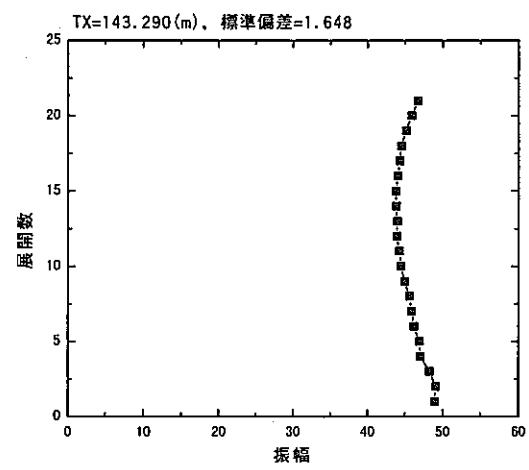
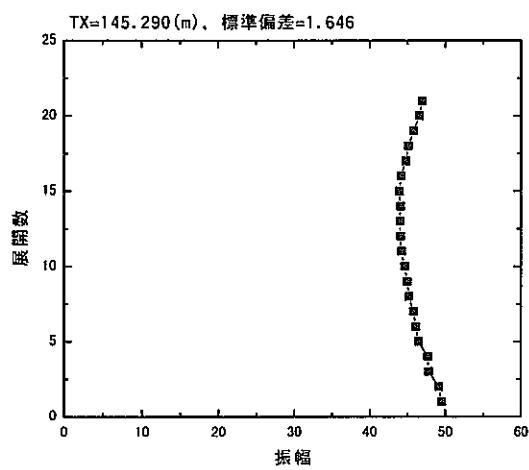
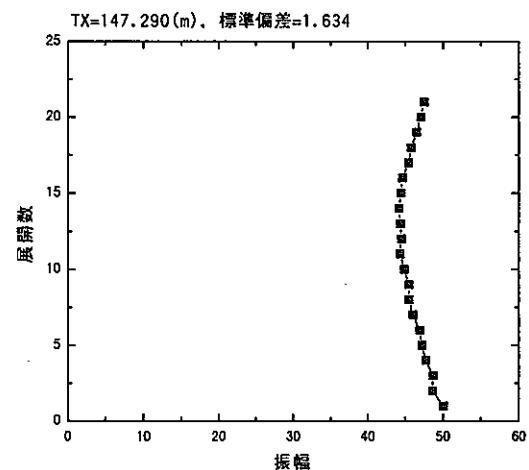
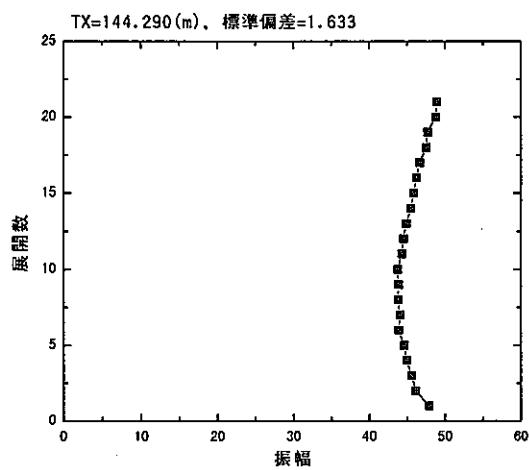
一送信点から得られた受信記録(振幅)



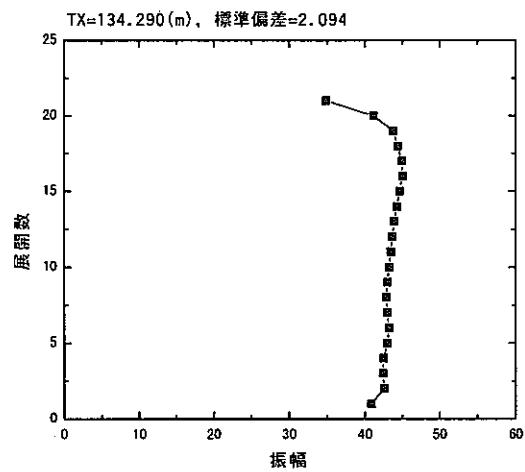
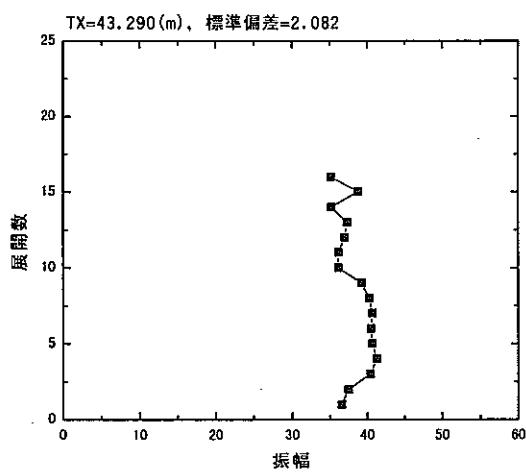
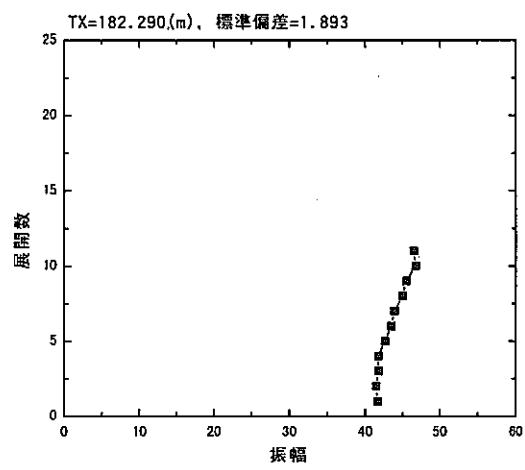
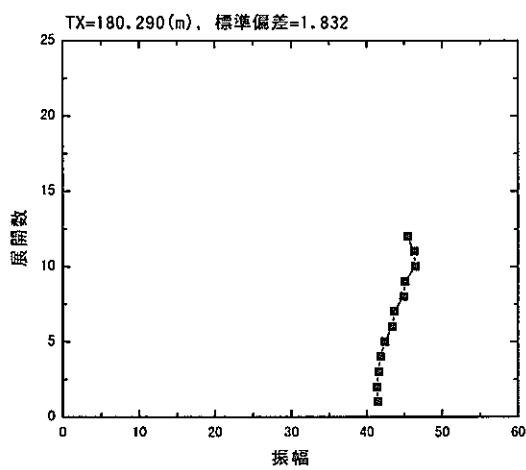
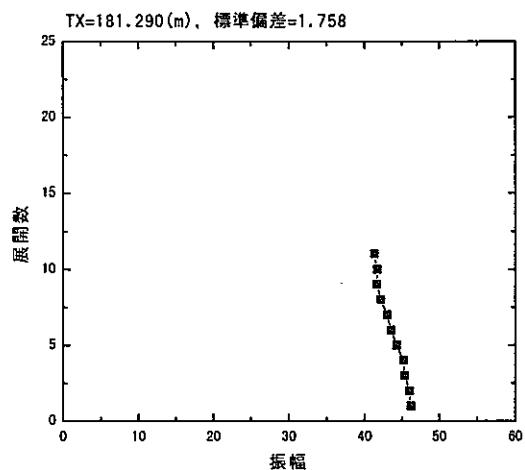
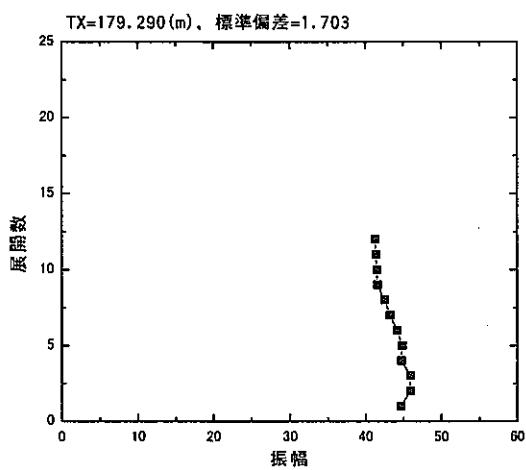
一送信点から得られた受信記録(振幅)



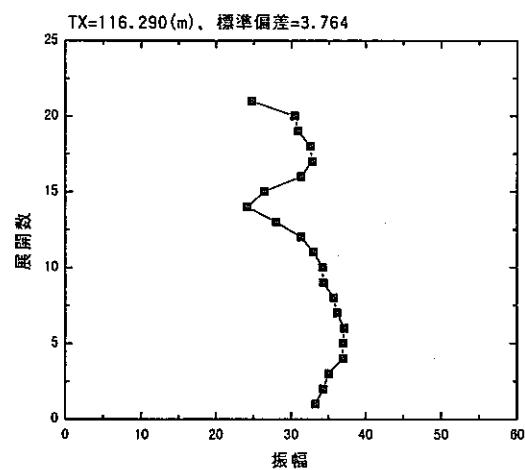
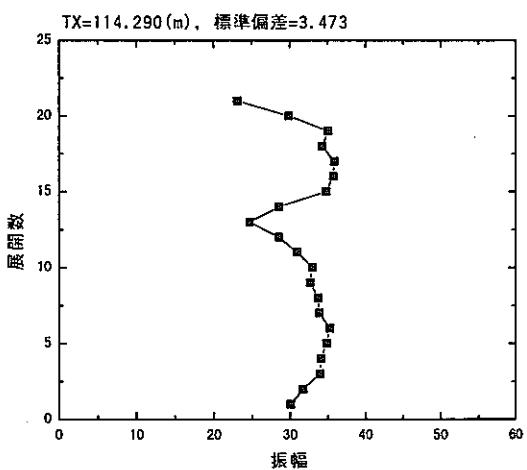
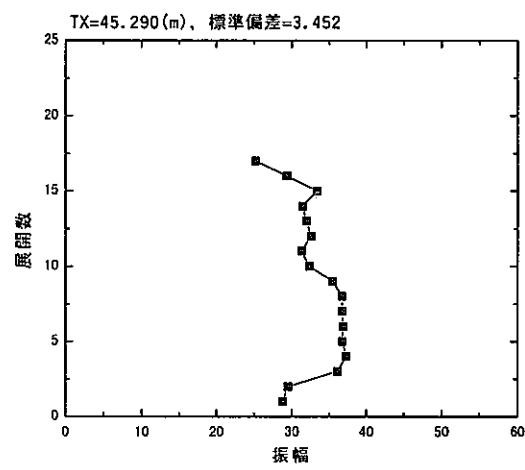
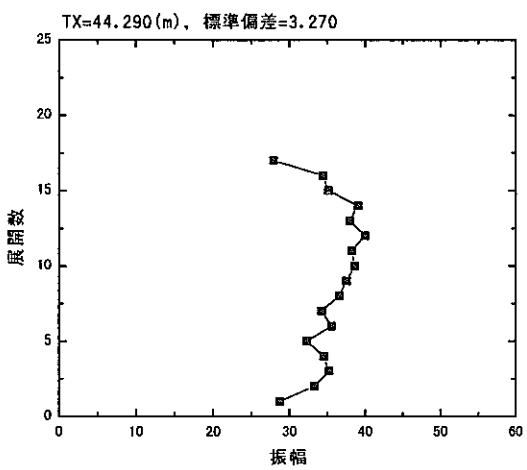
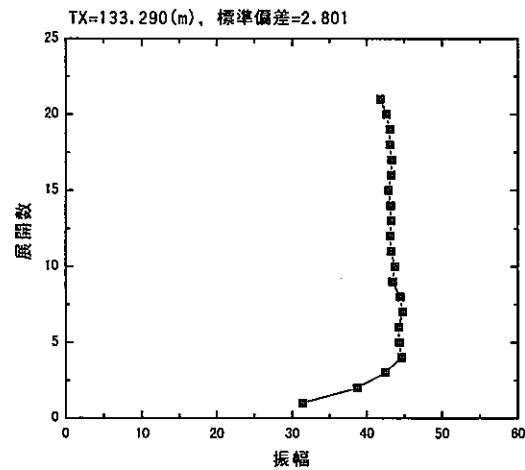
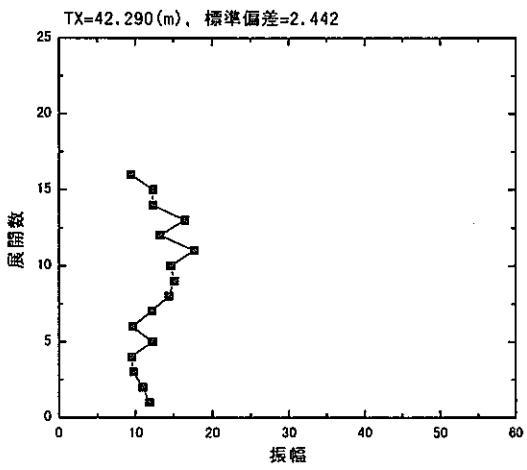
一送信点から得られた受信記録(振幅)



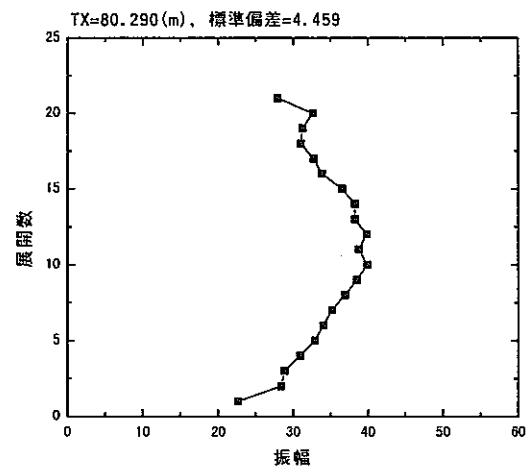
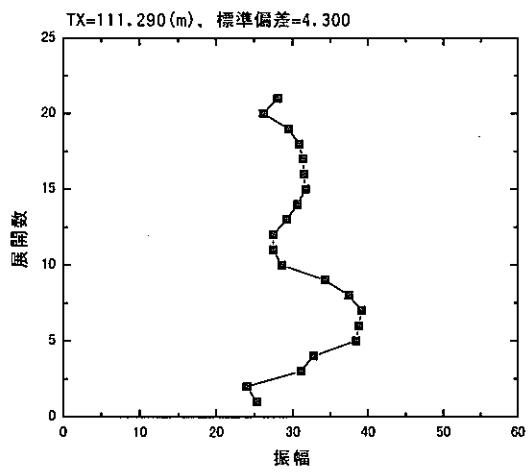
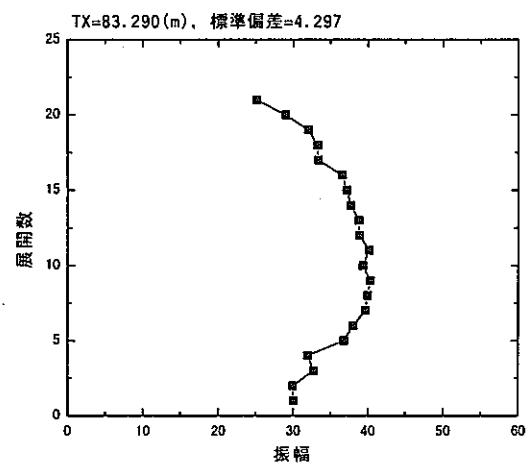
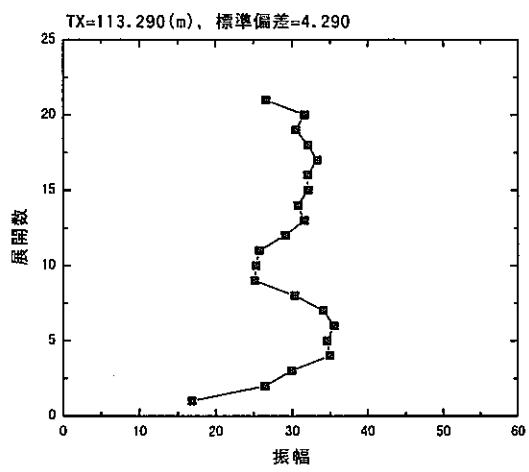
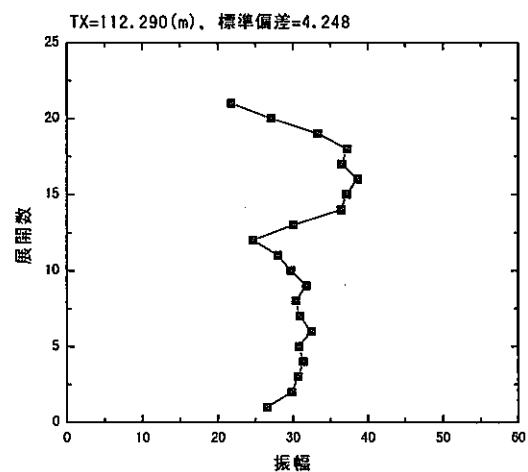
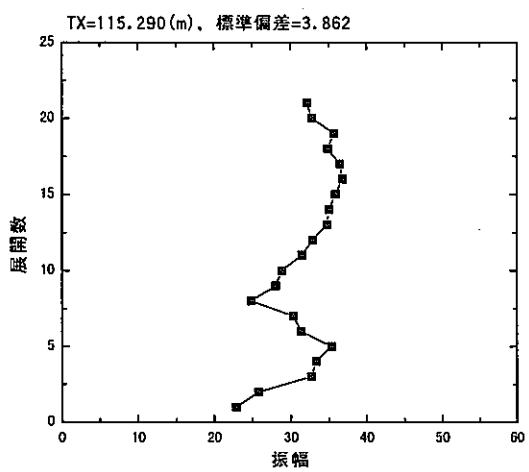
一送信点から得られた受信記録(振幅)



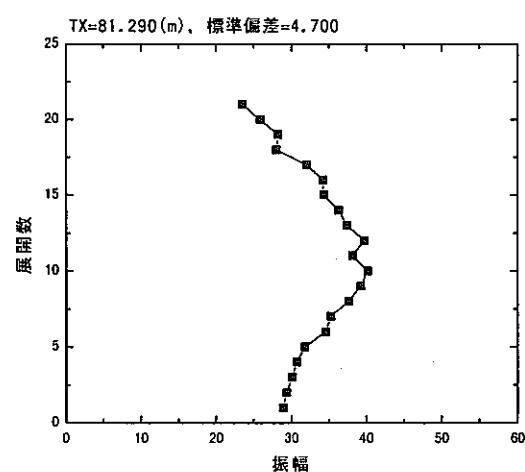
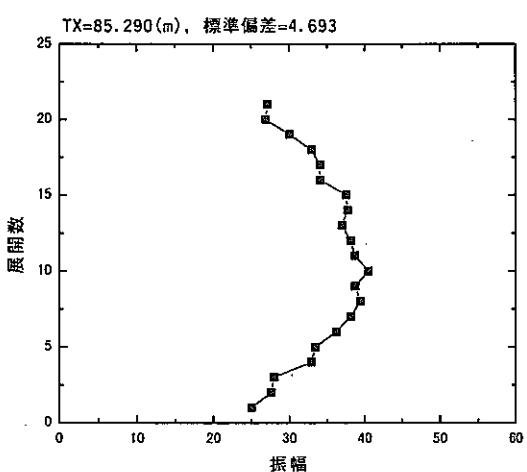
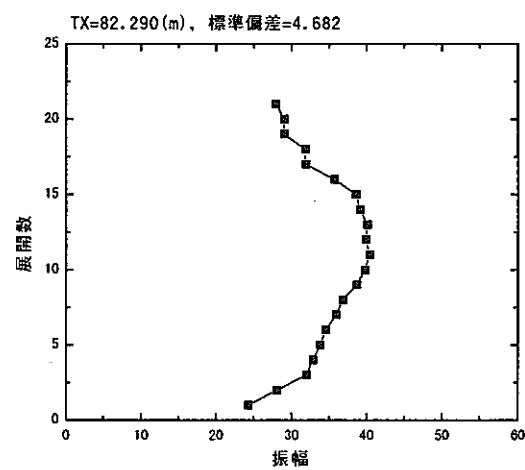
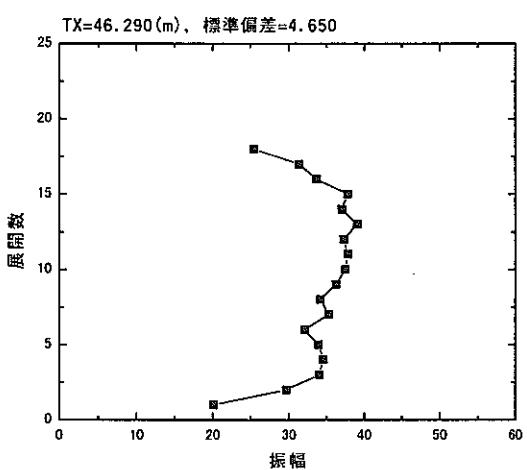
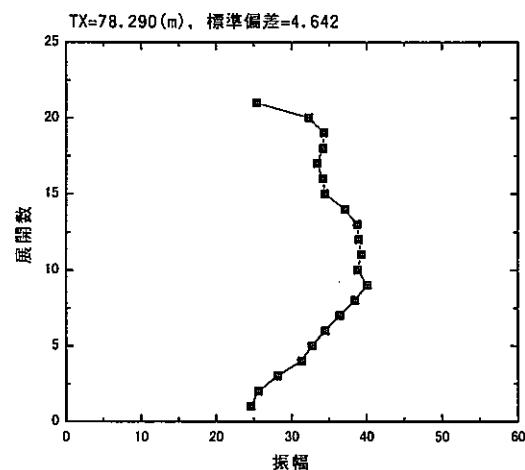
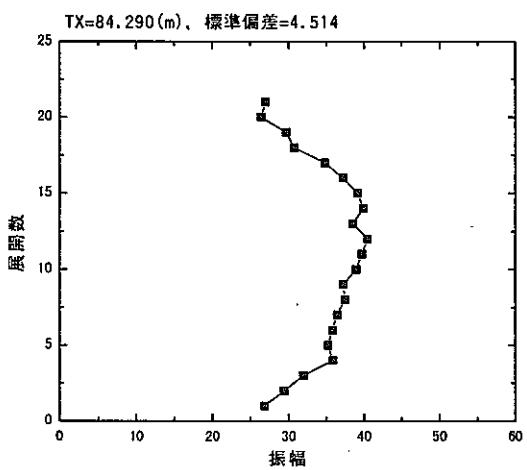
一送信点から得られた受信記録(振幅)



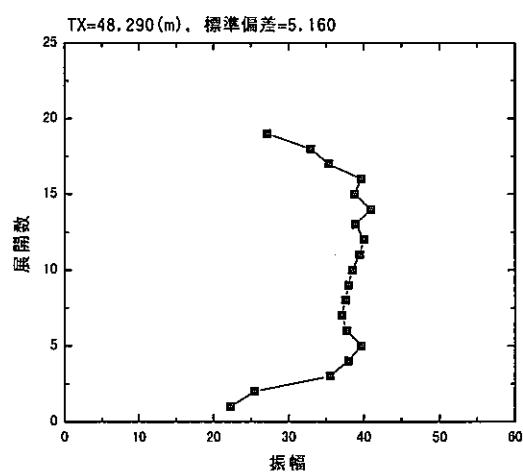
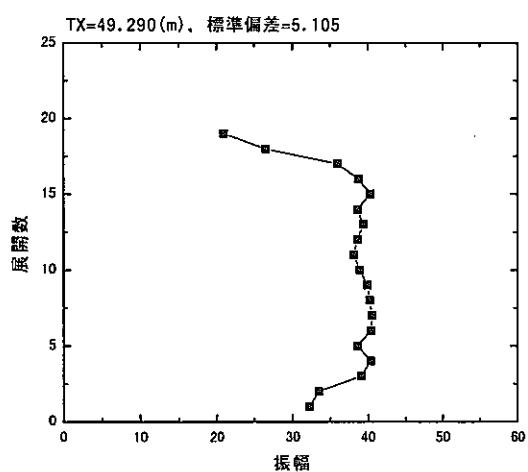
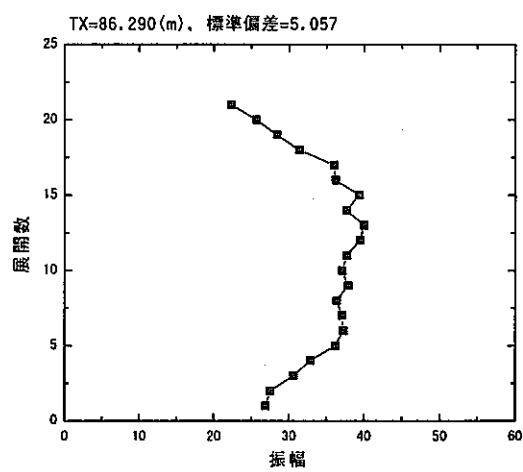
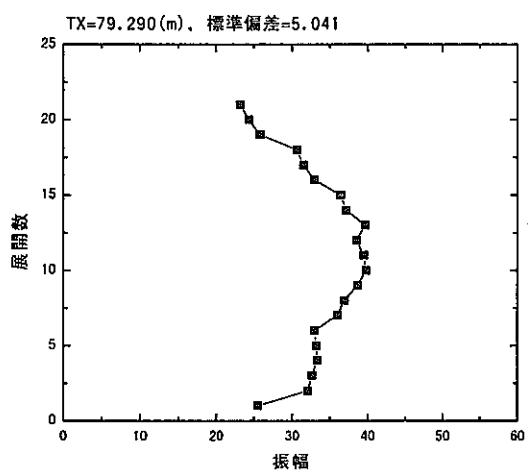
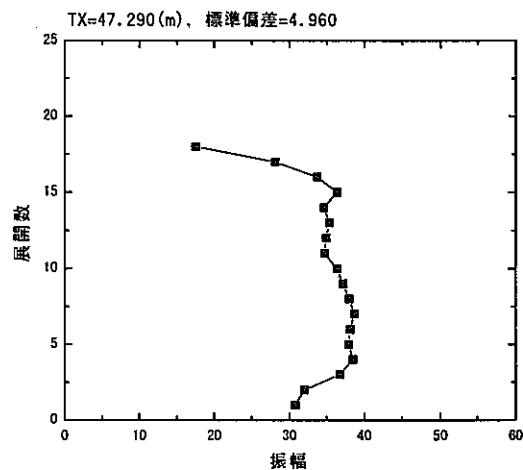
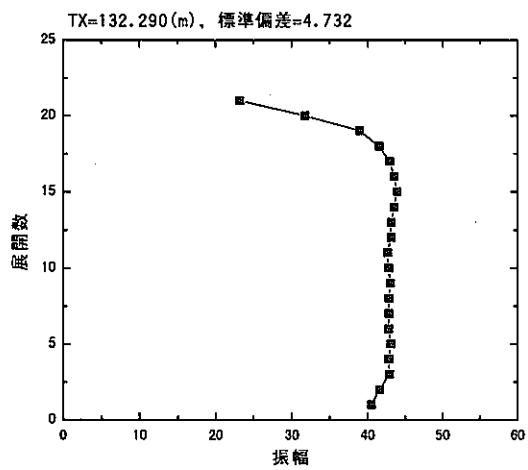
一送信点から得られた受信記録(振幅)



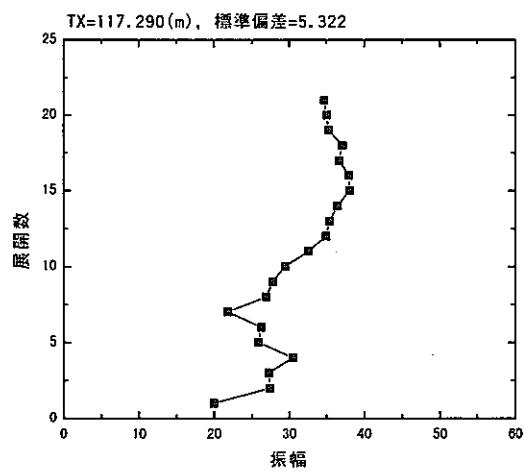
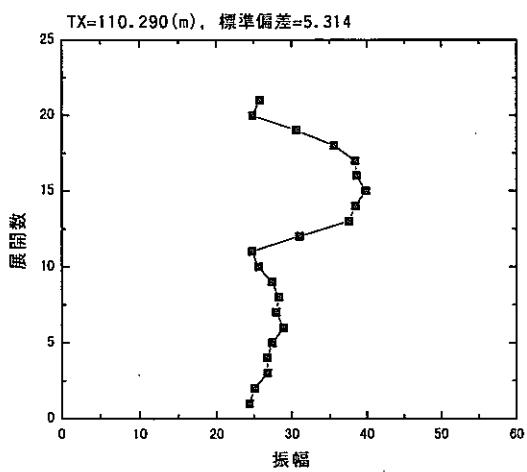
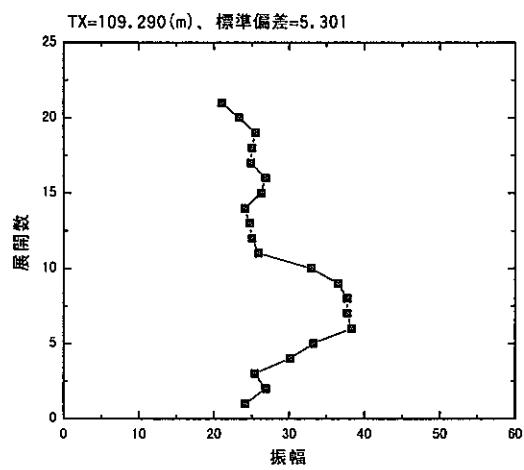
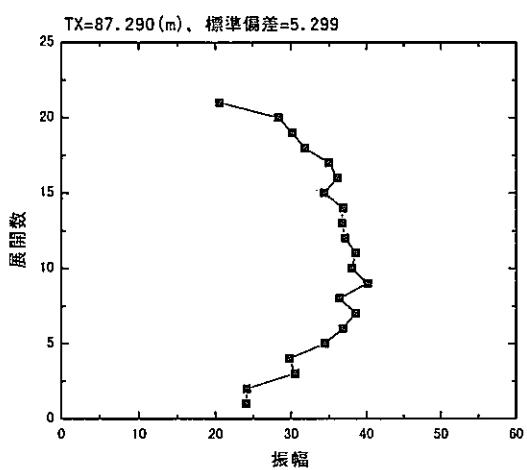
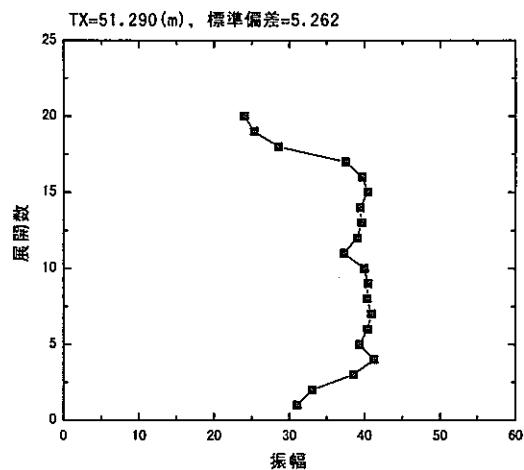
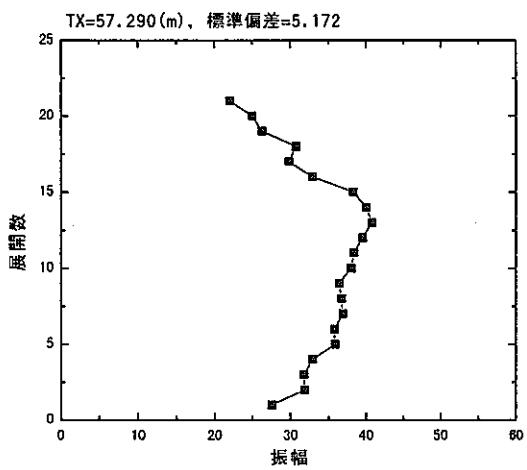
一送信点から得られた受信記録(振幅)



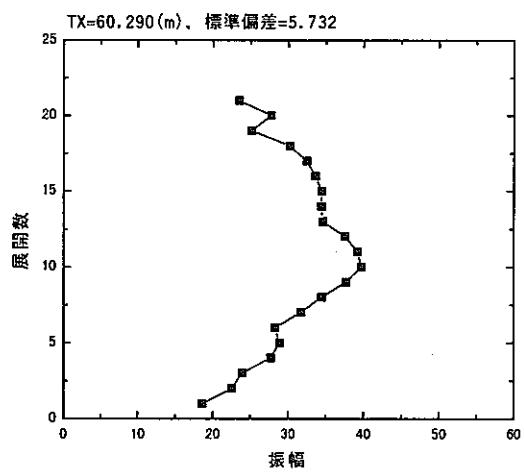
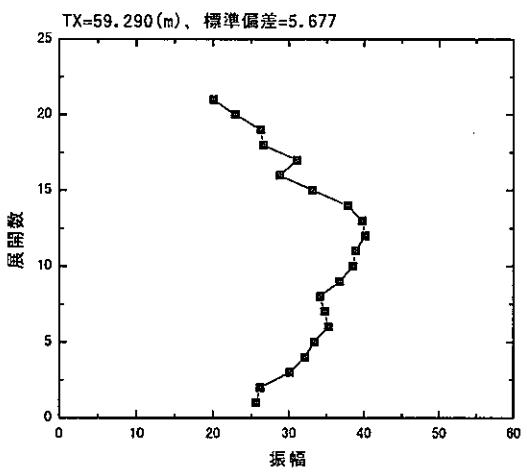
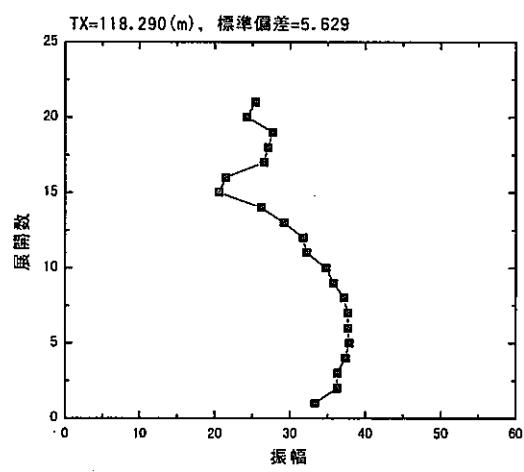
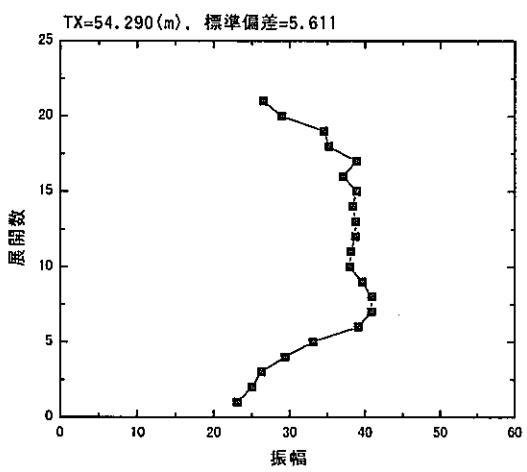
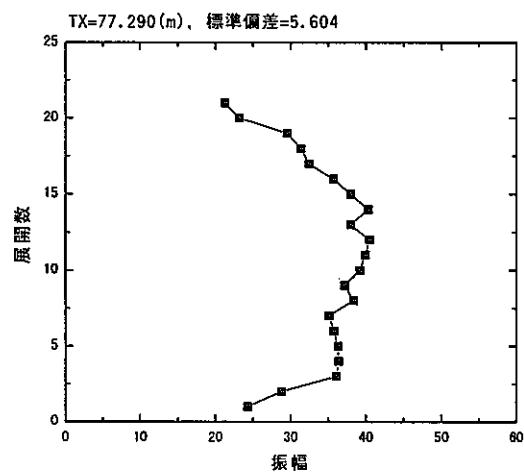
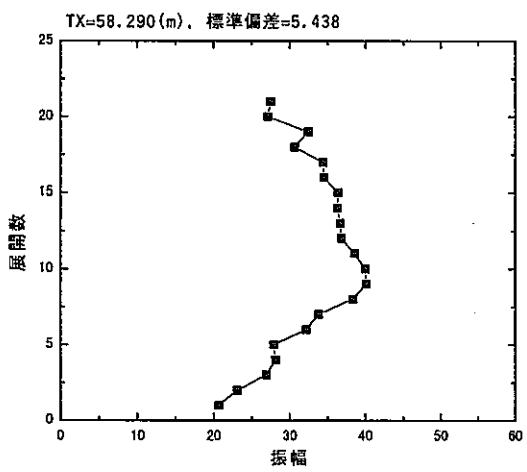
—送信点から得られた受信記録(振幅)



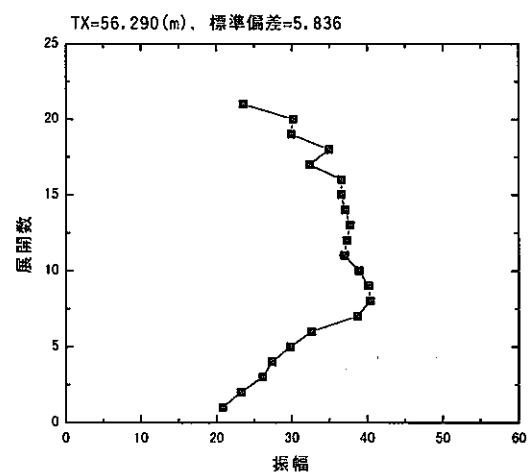
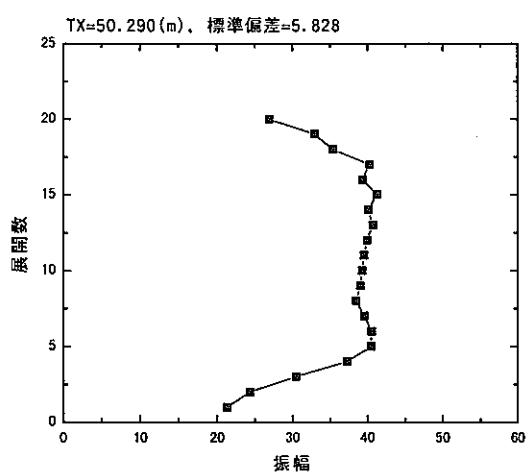
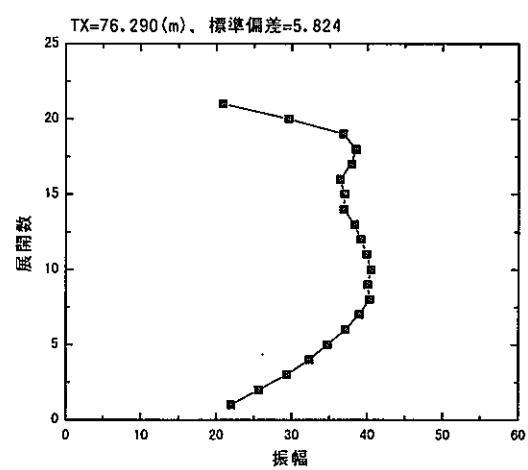
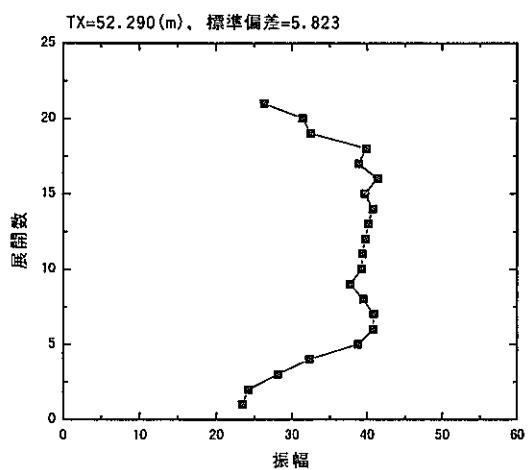
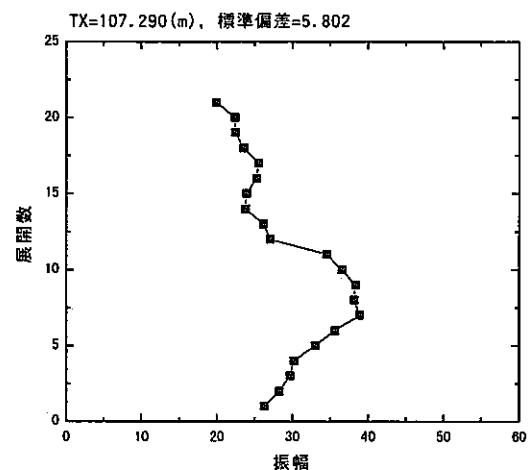
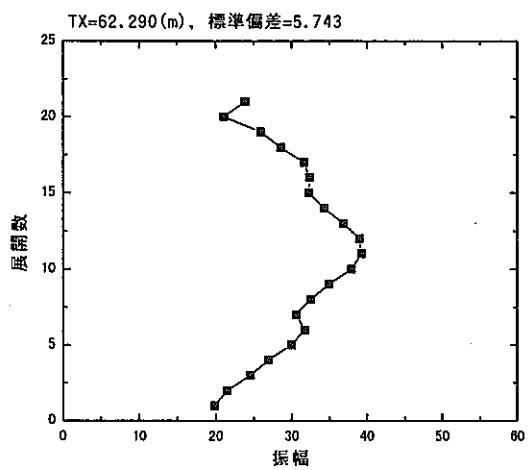
一送信点から得られた受信記録(振幅)



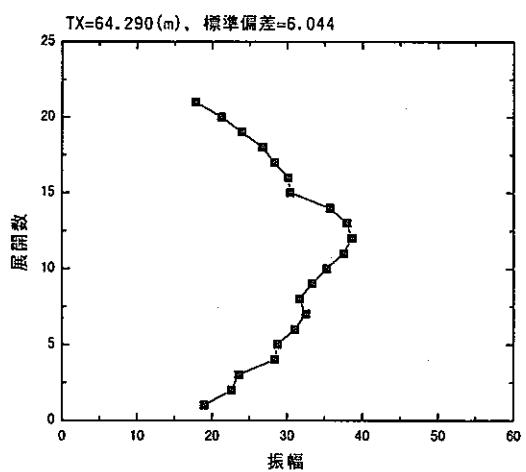
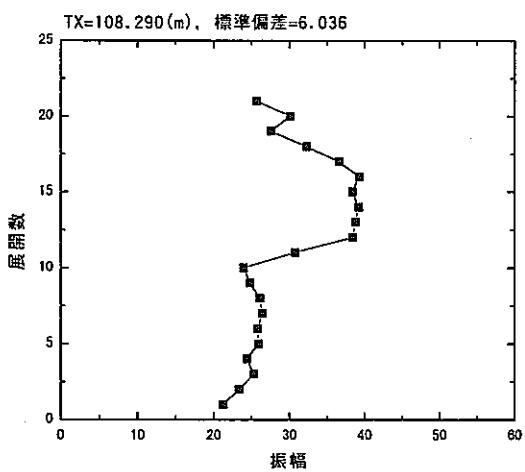
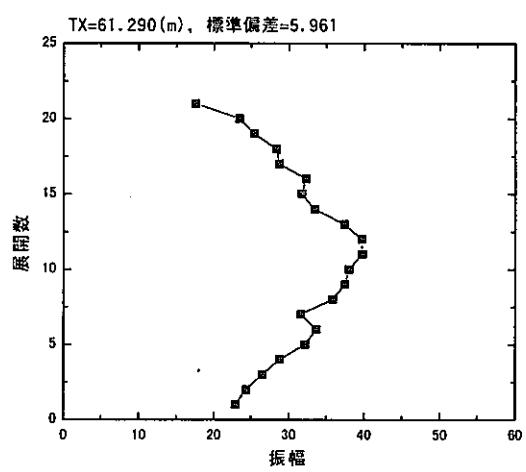
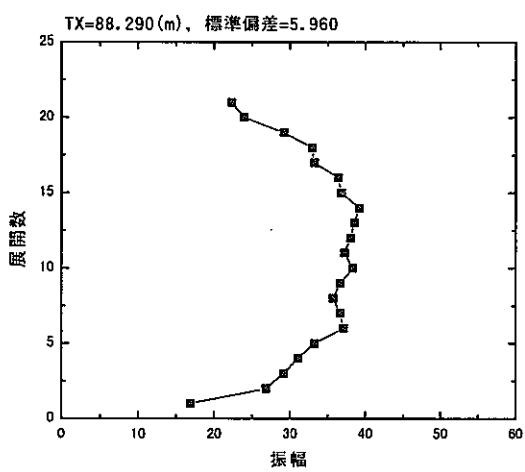
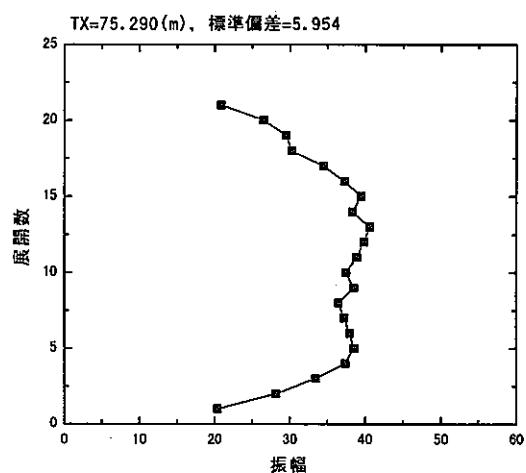
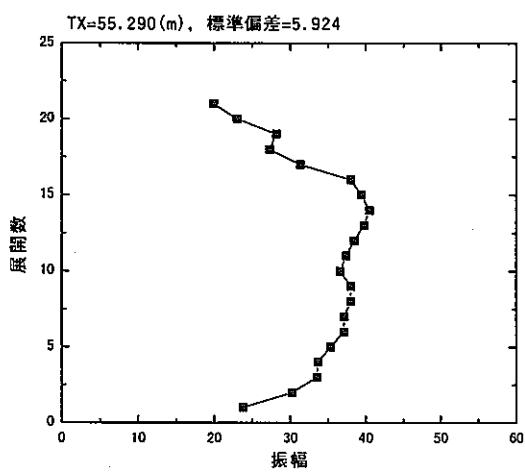
一送信点から得られた受信記録(振幅)



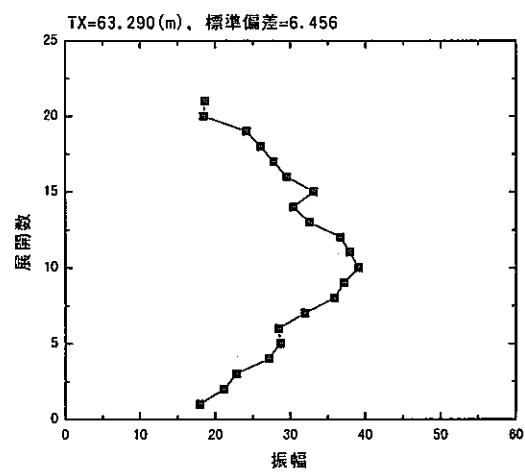
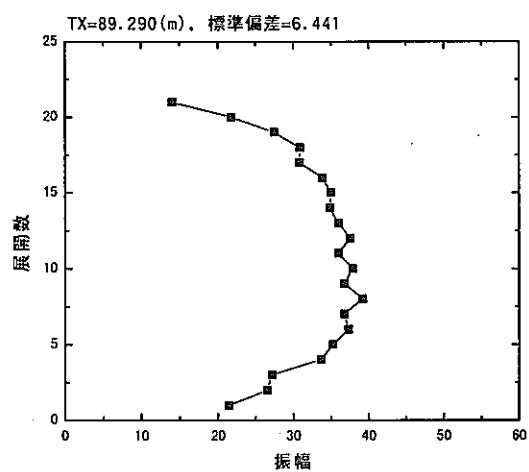
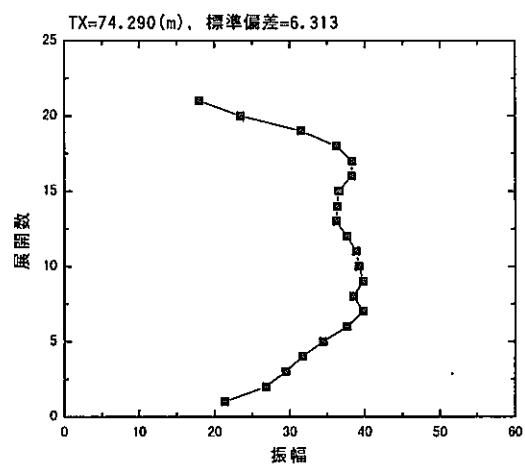
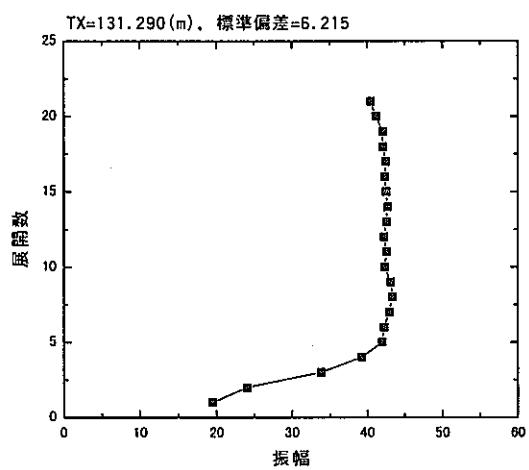
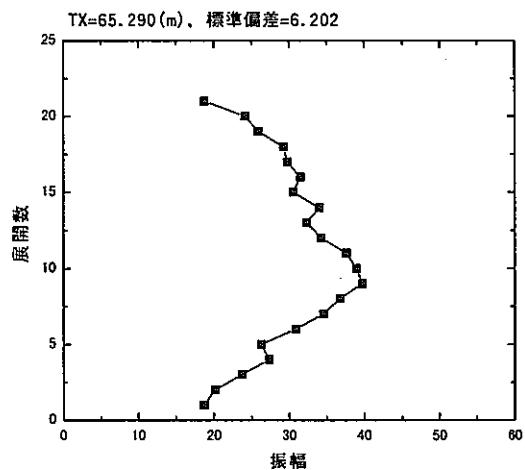
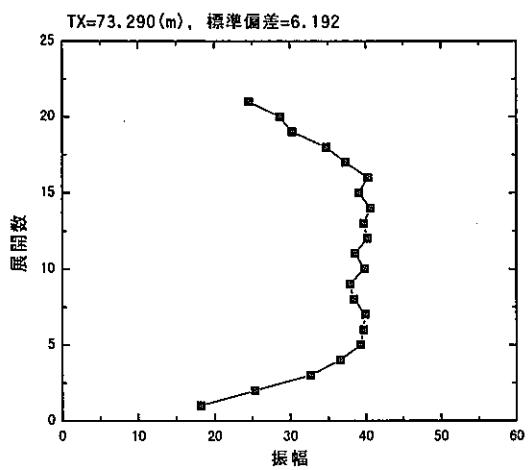
一送信点から得られた受信記録(振幅)



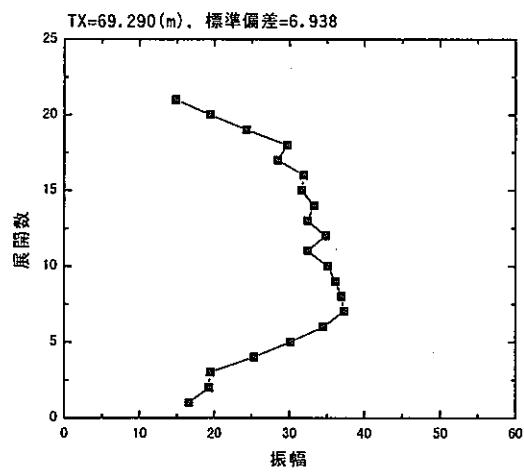
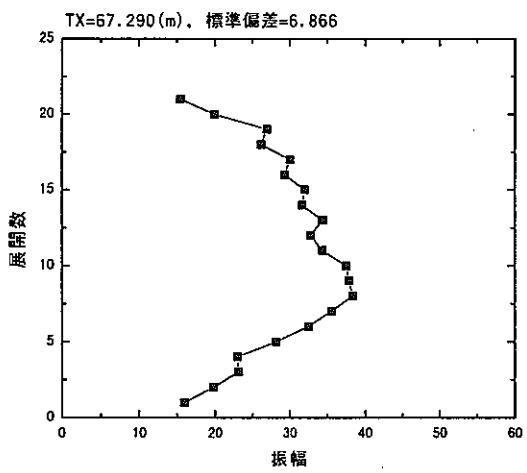
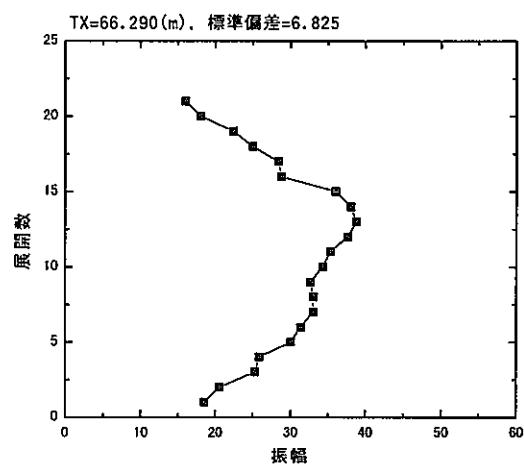
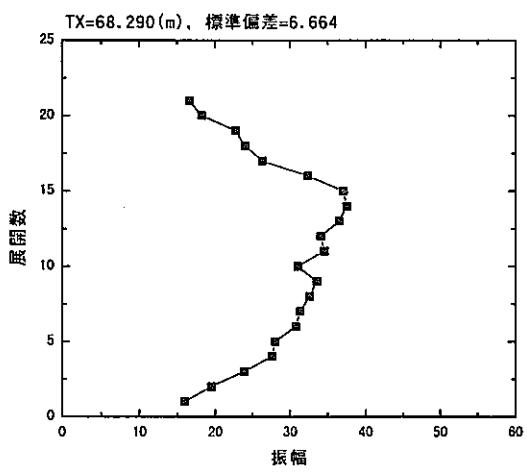
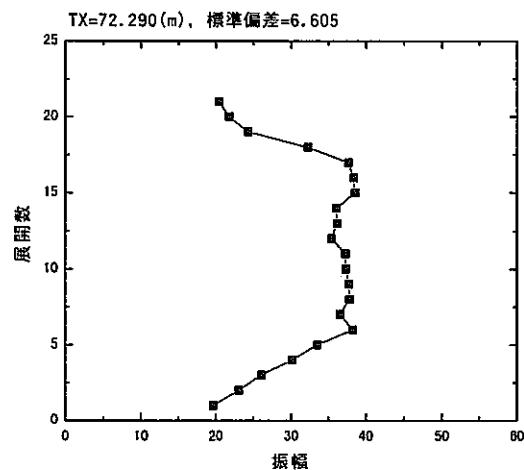
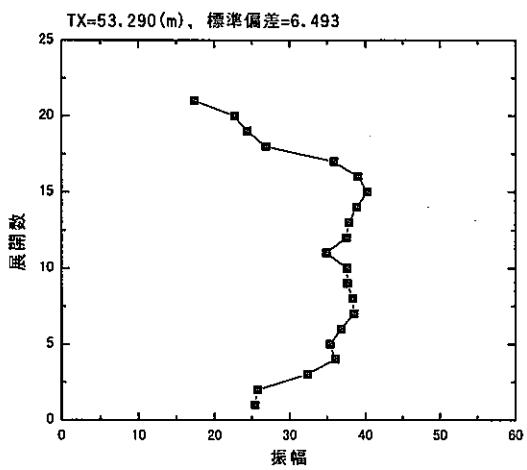
一送信点から得られた受信記録(振幅)



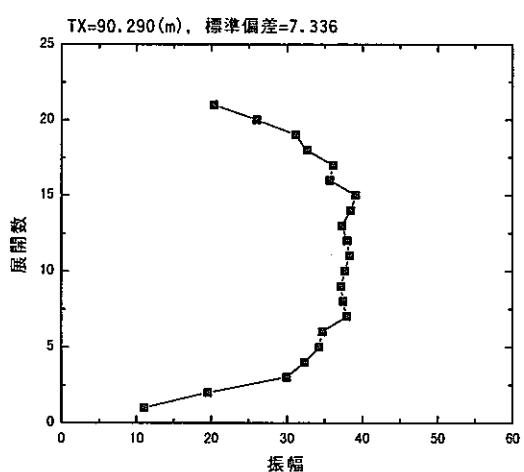
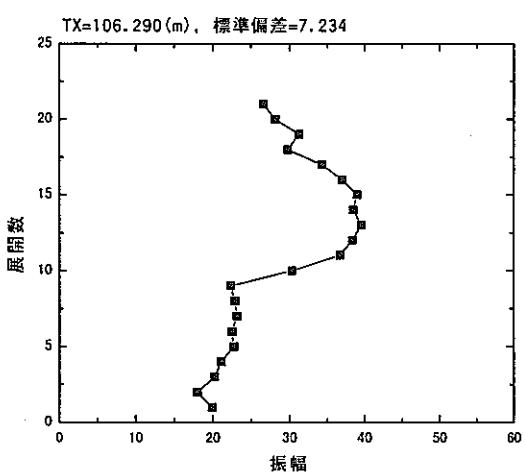
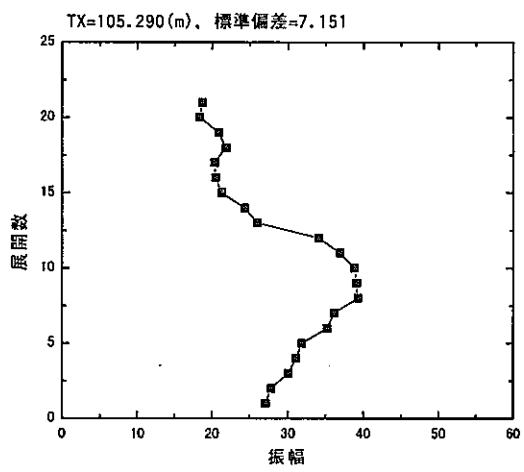
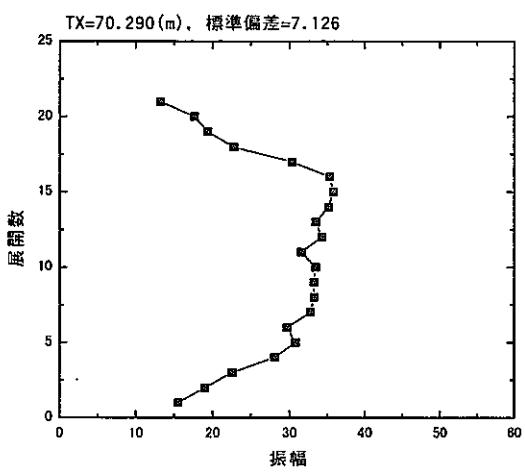
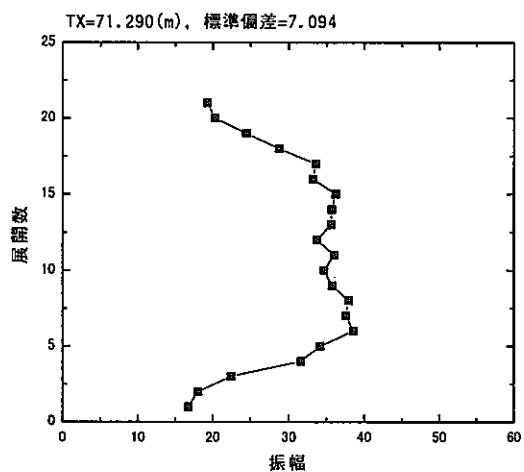
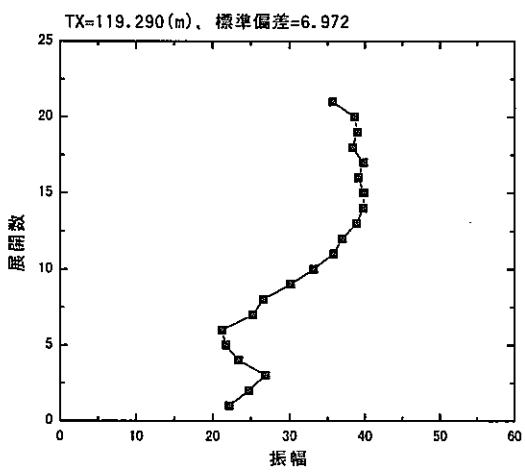
一送信点から得られた受信記録(振幅)



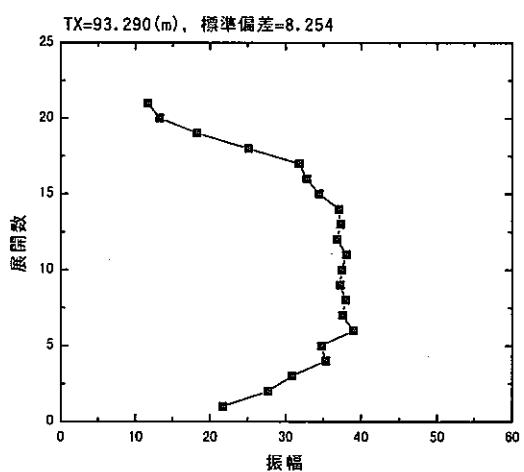
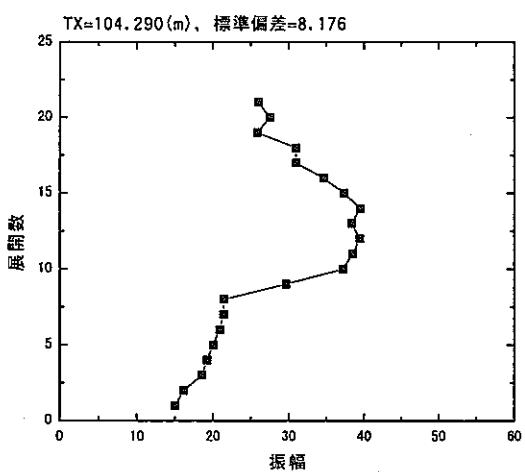
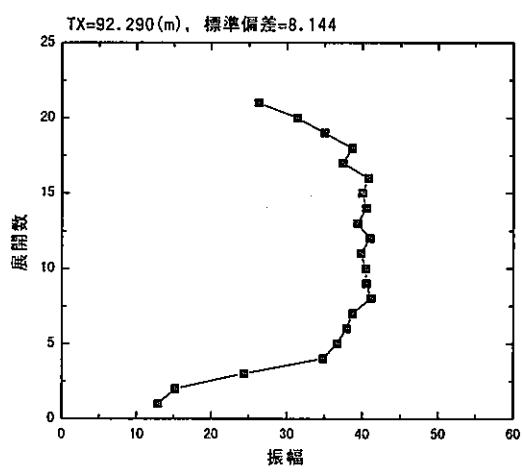
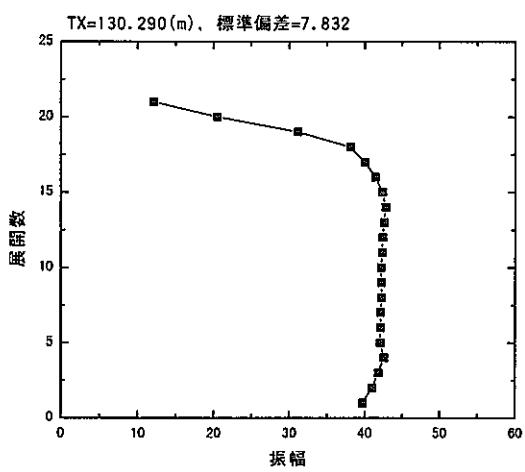
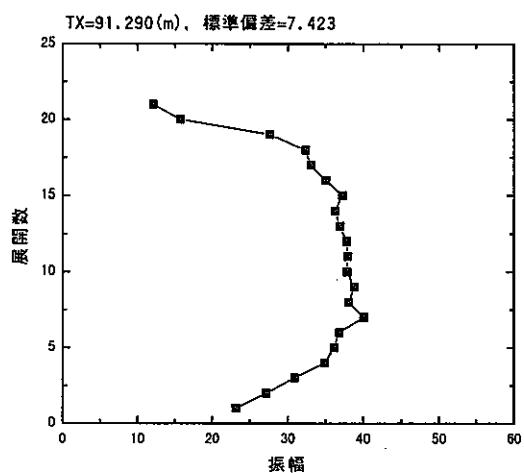
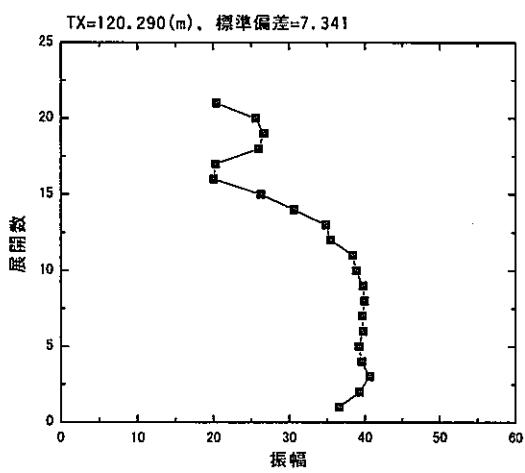
一送信点から得られた受信記録(振幅)



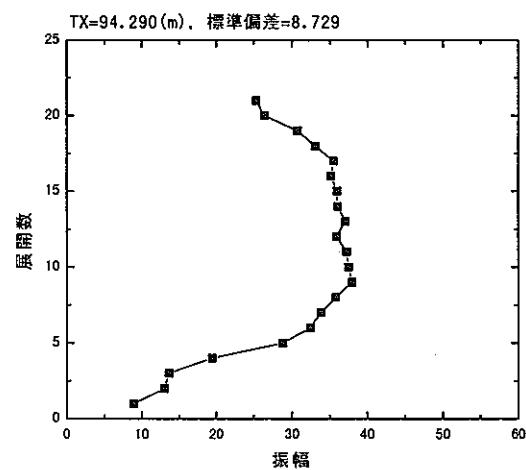
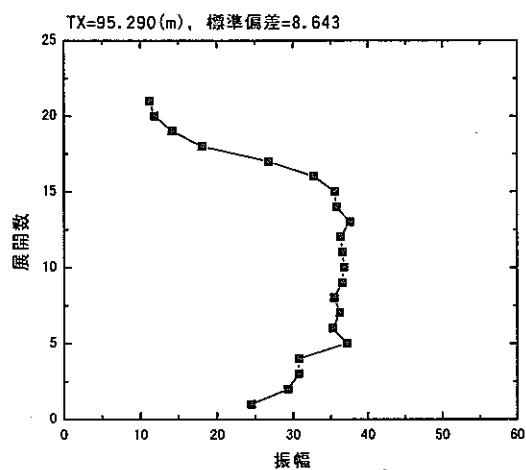
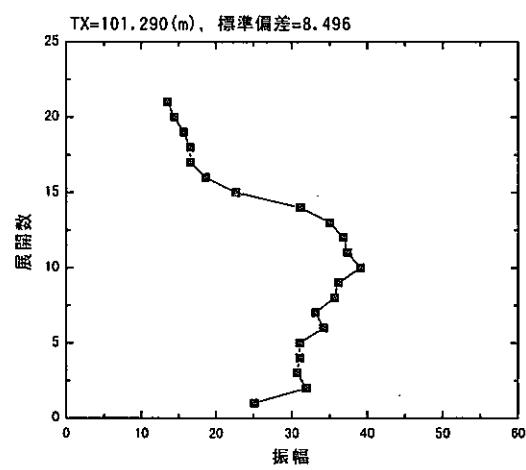
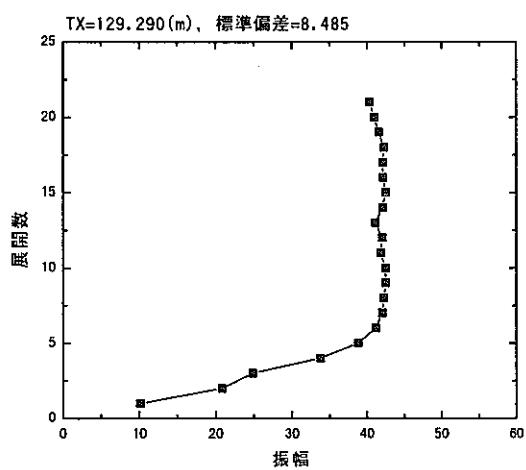
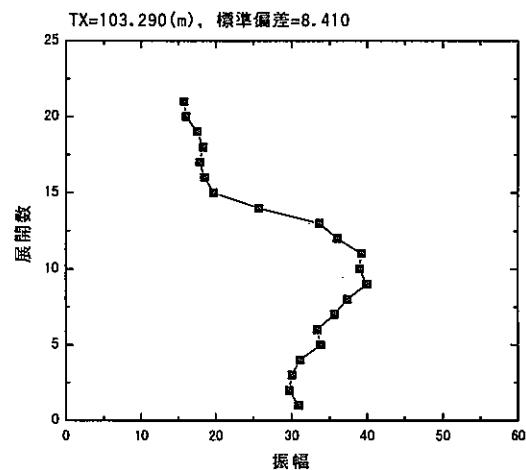
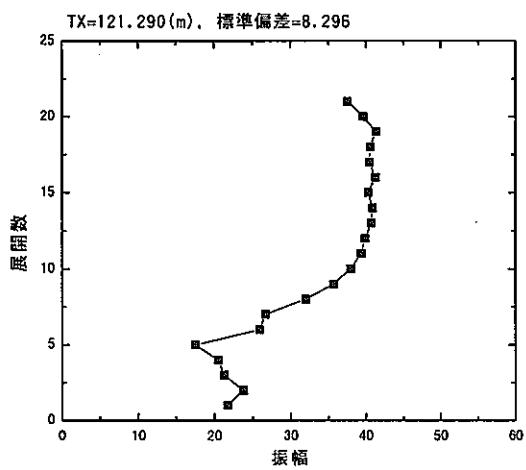
一送信点から得られた受信記録(振幅)



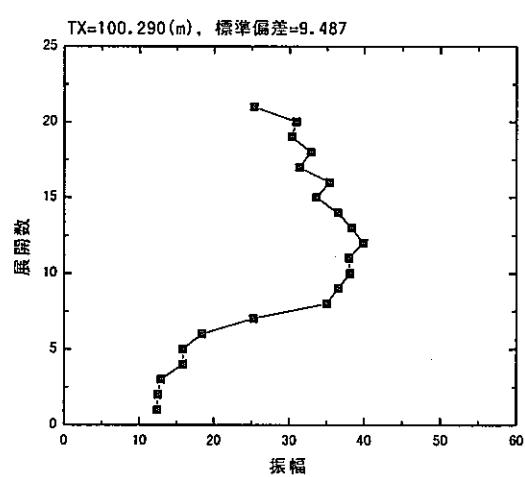
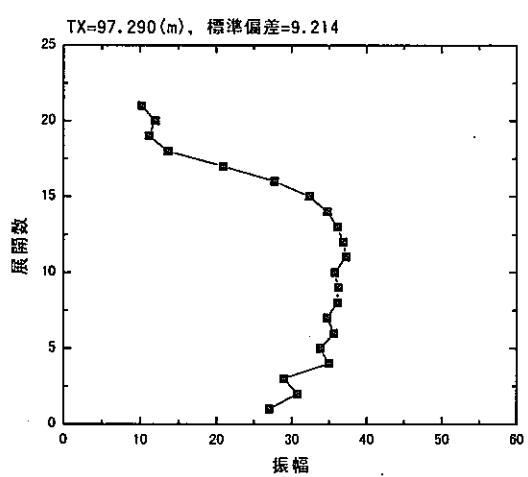
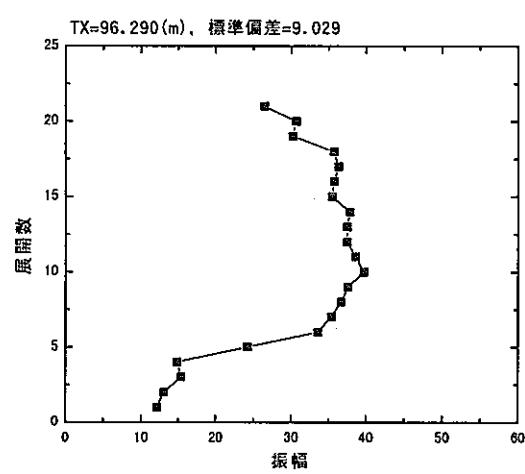
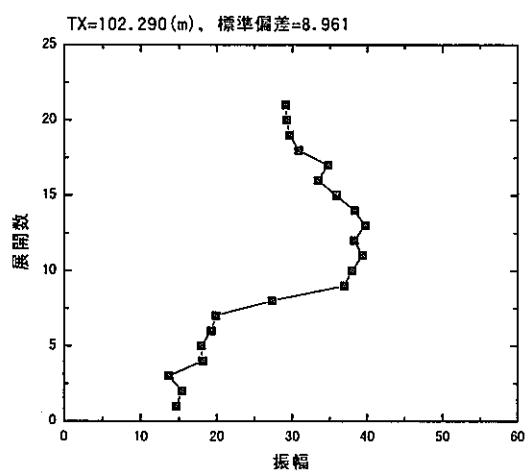
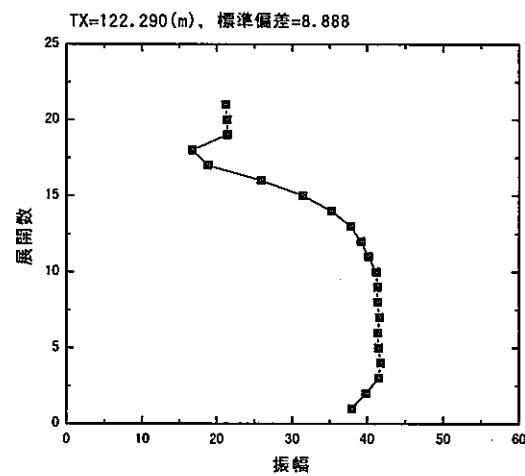
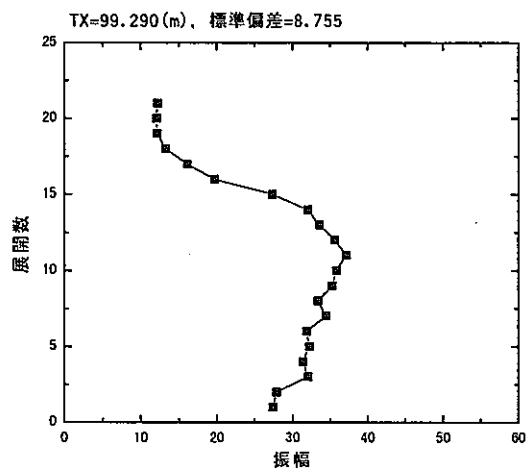
一送信点から得られた受信記録(振幅)



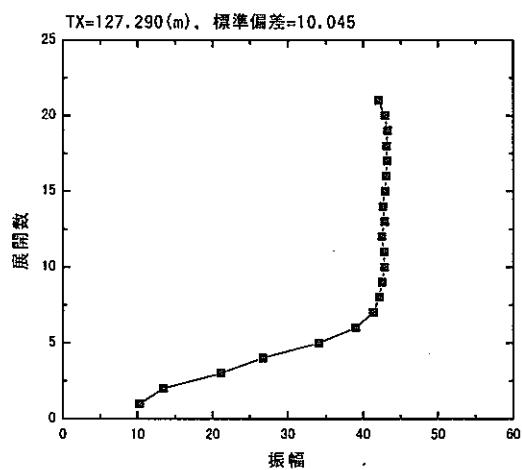
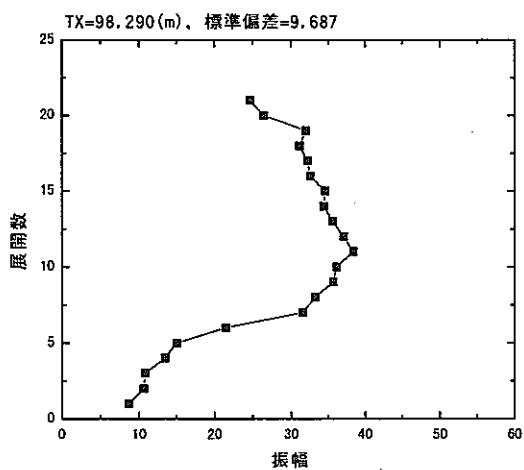
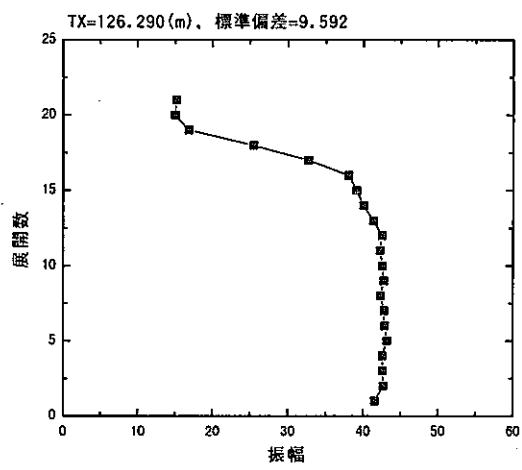
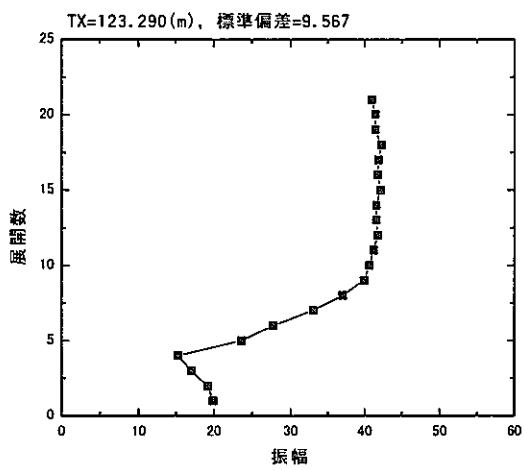
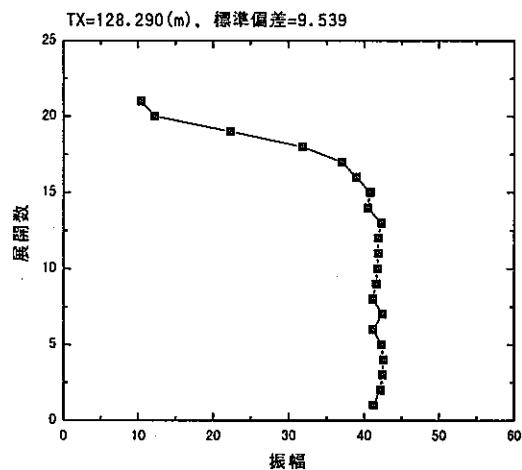
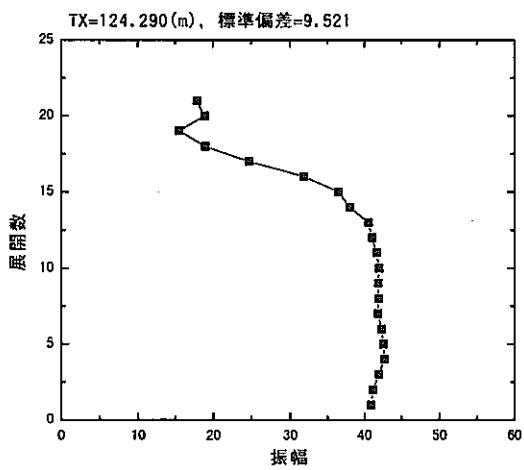
一送信点から得られた受信記録(振幅)



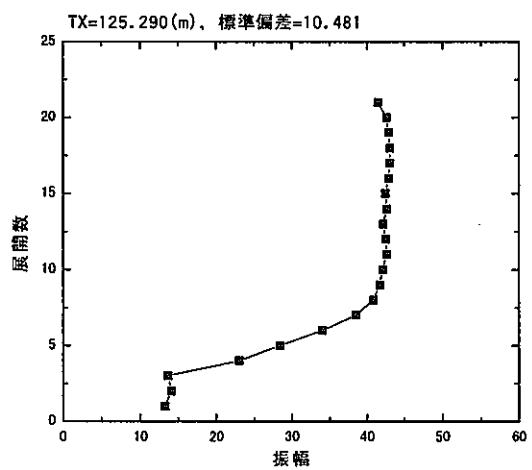
一送信点から得られた受信記録(振幅)



一送信点から得られた受信記録(振幅)

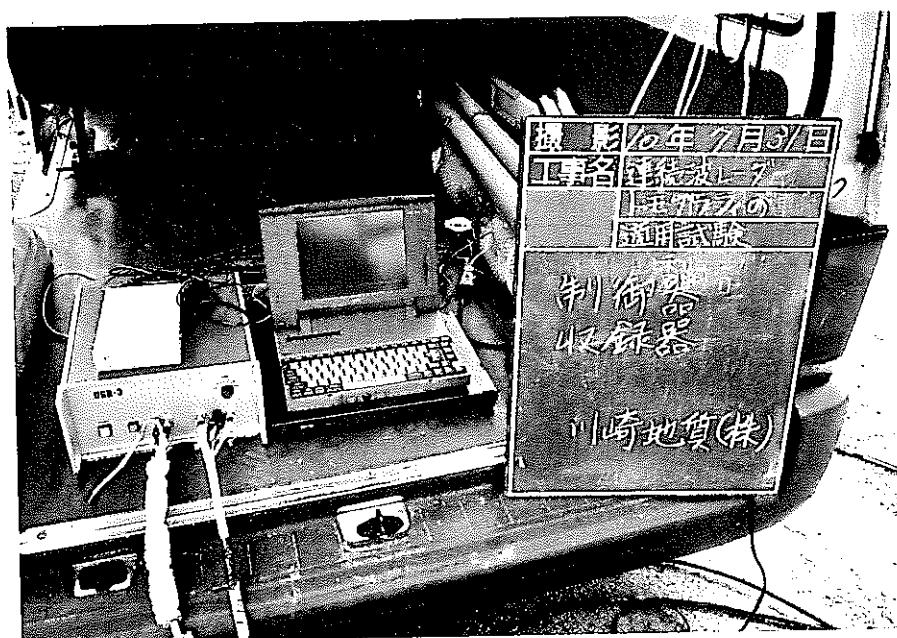


一送信点から得られた受信記録(振幅)

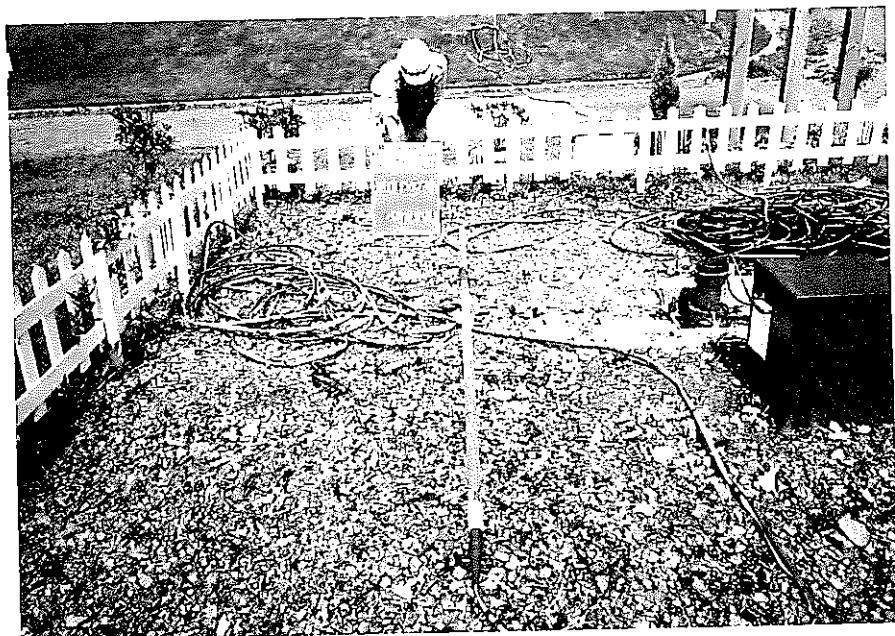


一送信点から得られた受信記録(振幅)

現場関連写真



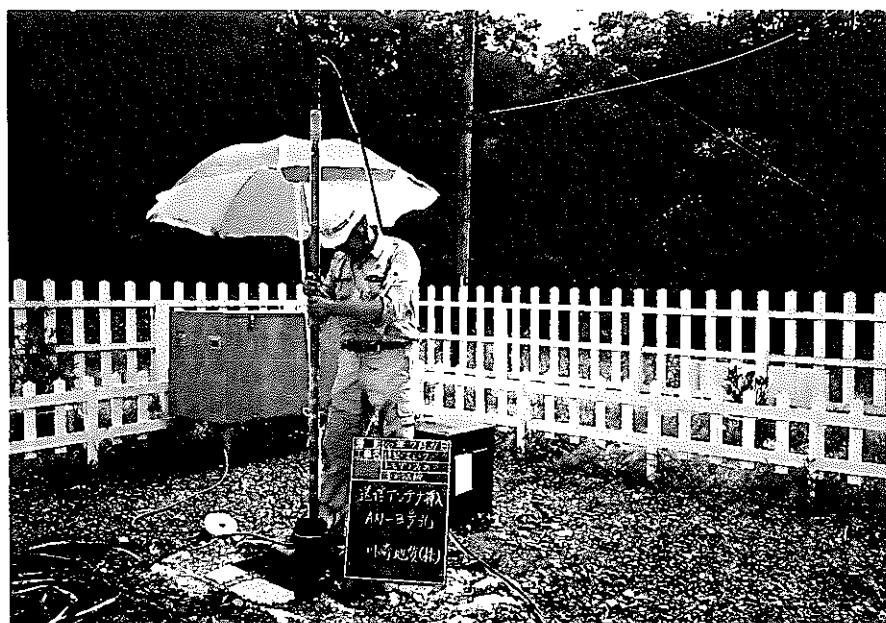
測定本部（制御器、収録器）



送信アンテナ部



受信アンテナ部



送信アンテナ挿入 (AN-3号孔)



受信アンテナ挿入 (AN-1号孔)