

PNC T
J 7586 97-001

限定資料

AN-1号孔における指向性レーダーを用いた
シングルホール調査

報告書

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年6月

株式会社 物理計測コンサルタント

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

◎ 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 1997

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。については、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センタ 技術開発課

~~限 定 資 料~~

PNC T
7 7586 97-001

1997年6月



AN-1号孔における指向性レーダーを用いたシングルホール

調査報告書

橋本憲和* 松岡清幸* 長田和洋*

要 旨

1. 本報告書は、ハイドロフォンVSP調査法技術開発の一環として、ハイドロフォンVSPデータから推定された透水性割れ目の深度と走向の値の検証データを得ることを目的として、AN-1号孔において指向性レーダーを用いたシングルホール調査を実施した結果をまとめたものである。
2. 指向性レーダーの解析結果は総数60ヶ所の反射面の解析が可能であった。そのうち25ヶ所が反射面の方位・傾斜角度が決定出来た。反射面の走向はN20Wに卓越し、その傾斜は50~80度に分布している。また、反射面の拡がりで最長のものは102mである。
3. VSPハイドロフォンチューブウェーブ発生深度と指向性レーダの反射面深度は15ヶ所で一致した。そのうち反射面の方位が対比可能なものは8ヶ所である。

本報告書は、株式会社物理計測コンサルタントが動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号 : 08C1423

事業団担当部課室 : 東濃地科学センター 技術開発課

* (株)物理計測コンサルタント

~~RESTRICTED~~
PNC T~~Z~~J7586 97-001
June 1997

THE REPORT OF SINGLE HOLE INVESTIGATION USED DIRECTIONAL
RADAR IN THE AN-1 DRILL HOLE.

) Norikazu Hashimoto*, Kiyoyuki Matsuoka *, Kazuhiro Nagata *

A b s t r a c t

1. The paper presents summarized the result of Single hole investigation used directional borehole radar in the AN-1 drill hole as one method of the technical development about hydrophone VSP investigation, this one is purpose to inspect the depth and the strike direction of permeable cracks that presumed from data of hydrophone VSP and reflectional planes analysed from directional borehole radar.
2. The analysis of directional radar was possible to be total 60 reflectional planes in the AN-1 drill hole.
25 points in the reflectional plaes decide to these directions and inclination angles, so that these directions excel N 20° W and inclinations distribute 50~80 degrees.
Radial distance of 105 meters is the longest plane in the spread of reflectional planes.
It is the longest plane of 105 meters in the spread of reflection planes.
3. The depths of reflectional planes from directional borehole radar and generational depths of VSP hydrophone tube wave agreed with 15 points in AN-1 drill hole, so 8 points in these points are possible to compare with the direction of reflectional planes.

Work performed by Geophysical Surveying Co., Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

) Contract Number : 08C1423

PNC liaison : Tono Geoscience Center Geotechnics Development Section

* Geophysical Surveying CO.,Ltd.

目 次

頁

1. はじめに	-----	1
2. 調査概要	-----	1
2.1 調査件名	-----	1
2.2 調査目的	-----	1
2.3 調査場所	-----	1
2.4 調査期間	-----	1
2.5 調査孔	-----	1
2.6 調査内容	-----	1
2.7 調査工程	-----	3
2.8 調査担当	-----	3
3. ボアホールレーダー使用機器及び測定原理方法	-----	4
3.1 使用機器	-----	4
3.1.1 RAMACシステムの構成	-----	4
3.1.2 RAMACシステムの動作原理	-----	6
3.2 測定原理・方法	-----	8
4. 調査結果及び解析結果	-----	10
4.1 調査結果	-----	10
4.2 解析結果	-----	15
4.2.1 解析方法	-----	15
4.2.2 解析結果	-----	16
5. 考察	-----	49
6. おわりに	-----	52

図 目 次

	頁
図 2.1 調査位置図	2
図 3.1 RAMAC システムダイヤグラム	7
図 3.2 サンプルタイミング図	7
図 3.3 反射法測定の原理図	8
図 3.4 孔内ゾンデ配置と指向性レーダーの概略図	9
図 4.1.1 指向性レーダー合成記録 (バンドパスフィルター処理; 18.4~800m)	11
図 4.1.2 指向性レーダー合成記録 (バンドパスフィルター処理; 800~960.4m)	12
図 4.2.1 指向性レーダー合成記録 (ムービングアベレージ処理; 18.4~800m)	13
図 4.2.2 指向性レーダー合成記録 (ムービングアベレージ処理; 800~960.4m)	14
図 4.3 反射面の方位・傾斜角度解析手順	15
図 4.4.1.(1) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 18.4~200m)	17
図 4.4.1.(2) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 18.4~200m)	18
図 4.4.2.(1) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 200~400m)	19
図 4.4.2.(2) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 200~400m)	20
図 4.4.3.(1) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 400~600m)	21
図 4.4.3.(2) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 400~600m)	22
図 4.4.4.(1) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 600~800m)	23
図 4.4.4.(2) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 600~800m)	24
図 4.4.5.(1) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 800~960.4m)	25
図 4.4.5.(2) 指向性レーダー分割記録 (45°毎; バンドパスフィルター処理; 800~960.4m)	26
図 4.5.1.(1) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 40~140m)	27
図 4.5.1.(2) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 40~140m)	28
図 4.5.1.(3) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 40~140m)	29
図 4.5.1.(4) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 40~140m)	30
図 4.5.1.(5) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 40~140m)	31
図 4.5.2.(1) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 200~320m)	32
図 4.5.2.(2) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 200~320m)	33
図 4.5.2.(3) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 200~320m)	34
図 4.5.2.(4) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 200~320m)	35
図 4.5.2.(5) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 200~320m)	36
図 4.5.3.(1) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 450~510m)	37
図 4.5.3.(2) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 450~510m)	38
図 4.5.3.(3) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 450~510m)	39
図 4.5.3.(4) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 450~510m)	40
図 4.5.3.(5) 指向性レーダー分割記録 (10°毎; バンドパスフィルター処理; 450~510m)	41

	頁
図 4. 6 反射面の傾斜方位分布図	4 5
図 4. 7 反射面の傾斜方位頻度分布図	4 6
図 4. 8 反射面の走向頻度分布図	4 6
図 4. 9 反射面の連続長分布図	4 7
図 4. 10 反射面の 3 次元分布図	4 8
図 5. 1 走向・傾斜ずれ分布図	5 0

)

表 目 次

表 3. 1 ボアホールレーダー機器使用一覧表	5
表 4. 1 測定諸元	1 0
表 4. 2. 1 指向性レーダー反射面解析結果一覧表	4 3
表 4. 2. 2 指向性レーダー反射面解析結果一覧表	4 4
表 5. 1 指向性レーダー反射面深度とVSPチューブウェーブ発生深度比較表	4 9
表 5. 2 指向性レーダーとチューブウェーブ深度・走向・傾斜比較表	5 0

)

1. はじめに

動力炉・核燃料開発事業団では、地表から掘削された大深度の試錐孔を用いて、透水性割れ目が試錐孔と交差する深度やその3次元的な拡がりを把握できるハイドロフォンVSP調査法の技術開発を実施しており、平成6年度および平成7年度にAN-1号孔を利用して取得したデータの解析より透水性割れ目の深度と走向、傾斜が推定されている。

本報告書はハイドロフォンVSP調査法技術開発の一環として、ハイドロフォンVSPデータから推定された透水性割れ目の方向や連続性（3次元的な広がり）を異なる手法で確認することを目的として、AN-1号孔において指向性レーダーを用いたシングルホール調査を実施した結果をまとめたものである。

2. 調査概要

2.1 調査件名

AN-1号孔における指向性レーダーを用いたシングルホール調査

2.2 調査目的

本調査は、ハイドロフォンVSP調査法技術開発の一環として、ハイドロフォンVSPデータから推定された透水性割れ目の方向や連続性（3次元的な広がり）を異なる手法で確認することを目的として、AN-1号孔において指向性レーダーを用いたシングルホール調査を実施するものである。

2.3 調査場所

岐阜県瑞浪市明世町月吉正馬様洞試験サイト内 AN-1号孔（図2.1）

2.4 調査期間

自平成9年 2月18日 至平成9年 6月18日

2.5 調査孔

AN-1号孔（垂直）

- ・掘進長 1010m
- ・孔径 98.7mm

2.6 調査内容

指向性レーダーシングルホール法によるデータ取得作業

- ・測定区間 18.4～960.4m
- ・測定間隔 50cm

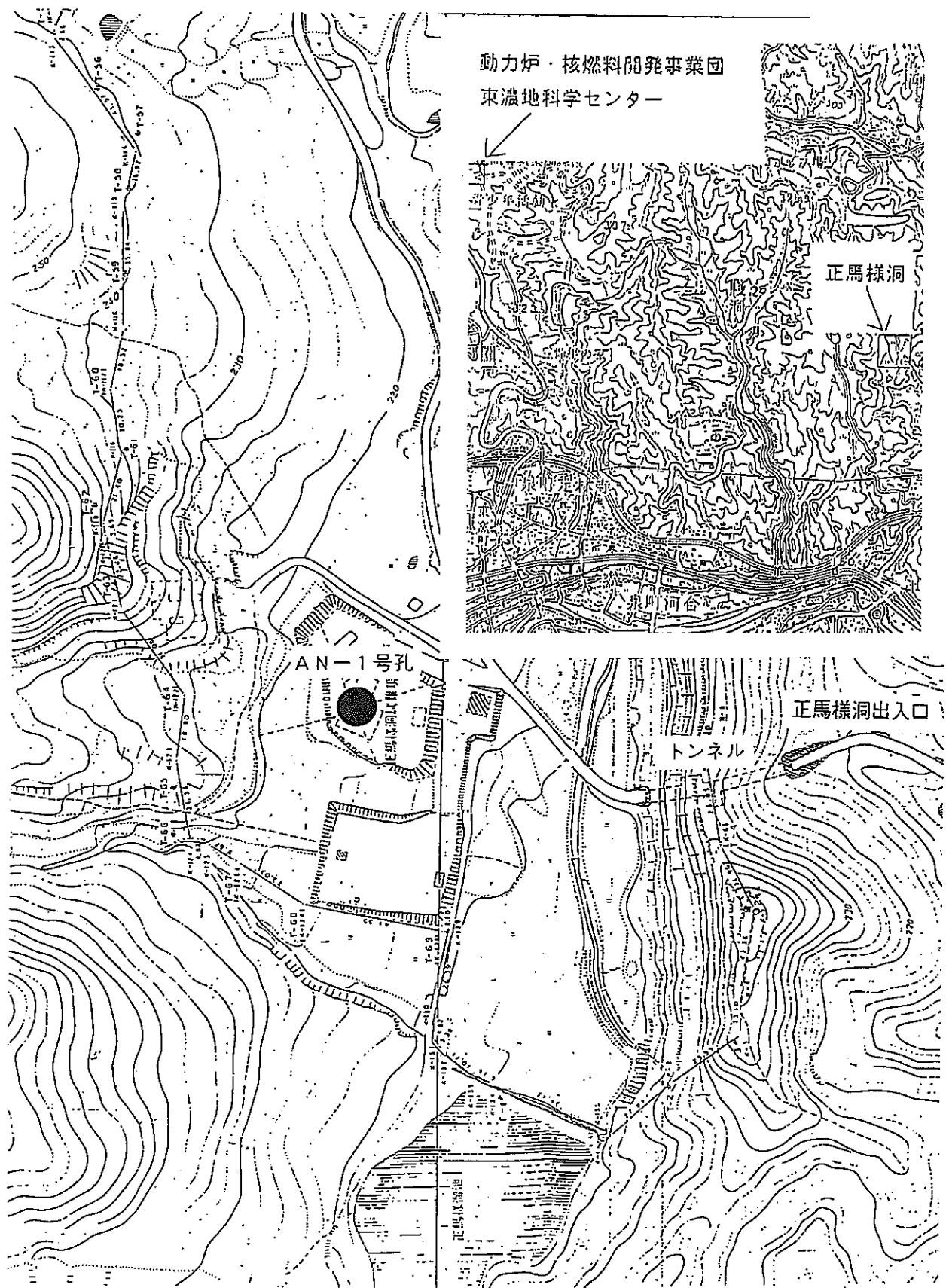


図2.1 調査位置図

指向性レーダによる反射面解析

- ・反射面深度
- ・反射面の連続長
- ・反射面角度
- ・反射面方位

2.7 調査工程

平成9年 2月18日～ 平成9年 3月 8日 事前準備・打合せ
平成9年 3月 9日～ 平成9年 3月15日 現地調査
平成9年 3月16日～ 平成9年 6月17日 解析・報告書作成

2.8 調査担当

株式会社 物理計測コンサルタント
本社 ⑤103 東京都中央区日本橋浜町3-6-3

☎ 03-3668-6262

現地調査担当 長田 和洋

梶川 和弘

金子 英行

守谷 宏雅

報告者担当 橋本 憲和

松岡 清幸

長田 和洋

3. ボアホールレーダー使用機器及び測定原理方法

ボアホールレーダー法は、ボーリング孔を利用して測定される電磁波探査法である。岩盤中の電磁波の伝播は、岩盤の電気的特性、主に比誘電率と導電率により影響を受ける。これらの特性は直接的には岩盤中の断層破碎帯の存在あるいは含水率の変化など物理的特性に関係している。従ってボアホールレーダー法とは、ボーリング孔内の送信器より岩盤中に短パルス状の電磁波を発射し、岩盤中を透過、反射してきた電磁波信号を受信し、それを解析し岩盤中の物理的特性の変化を調査するものである。

3.1 使用機器

3.1.1 RAMACシステムの構成

使用されたボアホールレーダー装置は通称RAMACシステムと呼ばれている。

RAMACの送信器が発射する電磁波の中心周波数は20MHzと60MHzのいずれかを選ぶ事が出来る。一般的にいって送信周波数が高ければ（波長が短い）、分解能は良いが伝播エネルギーの減衰は大きい。従って送受信器は探査深度、岩盤の性質によって選択される。表3.1に使用機器一覧表を示す。

又、当システムはシングルホール、クロスホールの測定が可能であり、クロスホール法でのデータの解析は、走時と振幅のトモグラフィー処理が可能である。

RAMACシステムの構成はマイクロコンピュータ、地上コントロールユニット、光ファイバーケーブル、各々アンテナを装着した孔内送受信器より構成されている。

60MHz帯域の孔内受信器のみ方位計が装着され、反射波の方位と傾斜を知ることが出来る（指向性反射法）

マイクロコンピューターは現場に手軽に運べるようにコンパクトに設計されていてその主な機能は次の通りである。

- ・測定を制御するパラメーターの選択（サンプル数、スタック数）
- ・測定結果のカラー表示、プリンターへの出力
- ・シグナルプロセッシング（バンドパスフィルタリング等）
- ・信号の表示や波形のスペクトロ表示等
- ・データの入出力（3.5インチフロッピーデスク×1）
- ・反射波の方位、傾斜解析及びトモグラフィー処理

地上コントロールユニットの主な機能は次の通りである。

- ・サンプリング間隔や受信パルスの位置の選択
- ・記録信号の時間間隔の収録
- ・単一波形のスタッキング
- ・外部コンピューターへのデータへ転送

光ファイバーケーブルは4本の光ファイバーとその介在物とケブラーとそれを被服するウレタン樹脂より構成されている。又、200m以浅の孔井の場合は単線の光ファイバーケーブルとケブラーケーブルを使用することも可能である。光ファイバーの外径は125μmであり、内径は50μmである。1本は送信のトリガー用に、もう

表3.1 ボアホールレーダー機器仕様一覧表

		仕 様		
地上装置	コントロールユニット	マイクロプロセッサ :RCA 1806 クロック周波数 :5MHz パルス繰り返し周波数:43.1KHZ サンプリング周波数 :30-1000MHz	サンプル数 :256-4096 スタッキング数:1-32767 タイムウインドウ:0-11 μsec	
	マイクロコンピュータ (Compaq486)	メモリー :110MByte ハードディスク ディスクドライブ :3.5" x1 フロッピーディスク		
	プリンター (ITOH-1550)	24ピンドットマトリックス 136 行表示 モノクロ		
孔内装置	送信器 60MHz	中心周波数 :60MHz ピーク電力 :500W	長さ :1.34m 重量 :6kg 外径 :48mm	
	受信器 (指向性) 60MHz ループアンテナ	周波数帯域 :10-200MHz データ転送レート :1.2Mb/s アンテナ端最小ビット :1 μV A/D コンバータ :16bit 方位・傾斜計: azimuthal rotation sensor (gravity sensor) flux gate magnetometer plunge sensor	長さ :2.52m 重量 :8kg 外径 :48mm	
	バッテリーパック (4個)	動作時間 :3 時間 / 10 時間 重量 :10kg 長さ :1.23m / 2.57m		
	ワインチ	電動1000m級ワインチ		
ケーブル	光ファイバーケーブル	長さ :1000m ファイバー外径 :125 μm	ファイバー内径 :50 μm	

1本は受信のタイミング用トリガー、もう1本は受信信号の伝送用に使用され、もう1本は指向性アンテナの場合だけ方位計の信号用の合計4本の光ファイバーが使用されている。光源は、波長890nmのLEDを使用し、光受信はフォートダイオードを使用している。

送信器はコントロールユニットからのトリガーパルスによってトランスマッターにパルス電圧が放電されアンテナによって地層に電磁波が発射される。パルス幅はアンテナの長さに比例し1m長のアンテナは10n秒のパルス幅になる。送信器は、バッテリーからの電力が供給され駆動する。バッテリーの寿命は約10時間である。

受信器はアンテナに入力した電磁波を電圧パルスに変換し、更にA/D変換した後光ファイバーを通してコントロールユニットに送る機能をもつ。

受信器は60MHzのみダイポールアンテナの無指向性とループアンテナの指向性とがある。指向性アンテナは方位計が装着されており、4組のループアンテナで得られた信号がどちらの方向からものかがわかる。

3.1.2 RAMACシステムの動作原理

RAMACシステムのブロックダイヤグラムを図3.1に示す。システムはコントロールユニットとバッテリーをそれぞれ装備した送信器と受信器とそれらを接続する光ファイバーにより構成されている。

まずコンピューターを介してコントロールユニット内でスタッカ回数やサンプリング間隔等のパラメーターを決定したのちコントロールユニットからのトリガーパルスを電気信号から光信号に変換し光ケーブルを介してトリガー信号を送信器に伝送する。送信器内ではそのトリガー信号を光信号から電気信号に変換され、そのトリガー信号によって高圧の直流電圧がトランスマッター内に発生する。それをアンテナを介して電磁パルスとして地層中に放射される。そのパルス周期は23.2マイクロ秒に設計されている。

地層中を透過又は反射してきた電磁パルスは受信器内のアンテナによって受信され高周波增幅(10~200MHz)、A/D変換された後、電気信号を光信号に変換され光ケーブルを通してコントロールユニット内に伝送される。コントロールユニット内ではさらに光信号を電気信号に変換され、時間と振幅のデータとして取り込まれ記憶される。

受信信号の取り込みのタイミングは23.2マイクロ秒の鋸状電圧のファーストランプとサンプリング間隔を決める設定可能なスローランプの電圧パルスによって決定される。その電圧パルスは光ファイバーケーブルを介して受信器内に送られ、信号のサンプリングのタイミングを決定している。(図3.2) 地層中を透過、又は反射して来た電磁波の走時は光ケーブルの長さによって変わる。

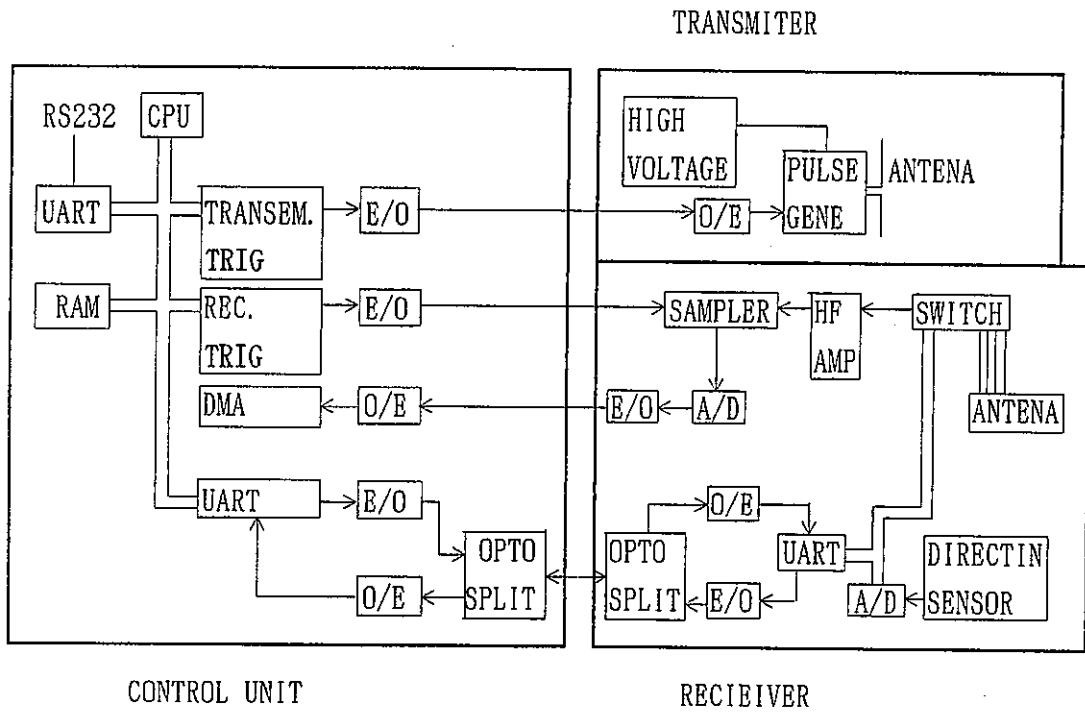


図 3.1 RAMAC システムダイヤグラム

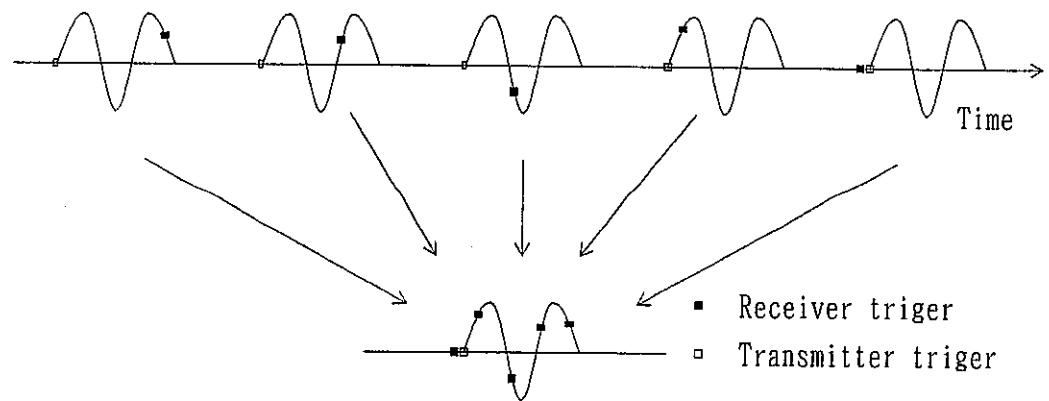


図 3.2 サンプルタイミング原理図

3.2 測定原理・方法

反射法の測定方法は図3.3に示す。送信器と受信器は一定の距離を置いて、同一孔内に降ろされ、一定間隔（一般的には50cm）毎にプローブを停止させ測定する。その結果はC R T画像に縦軸に深度（その測定時の位置）、横軸に振幅の時間表示（伝播波の濃淡表示）で表現される。この濃淡表示は、波の負の部分を白、波の正の部分を黒で表示している。

反射物までの距離は、直接波と反射波の時間差を測定する事によって決定され、その時の岩盤中の電波の伝播速度は一定であると仮定される。

反射波の基本パターンは図3-3に示された様に球面反射と平面反射の2つのものがある。レーダー反射測定からは、孔井と交差するフラクチャーの角度や孔井からの空洞の距離を知ることが出来る。

指向性アンテナでは、ダイポール型アンテナでは得られなかった反射面の方位を知る事が出来る。送信アンテナとしては60MHzのダイポール型（無指向性）を使用するが、受信アンテナとしては直行する4個のループアンテナを使用し、1箇所で4方向からの反射波形を順次計測する。

プローブ内には3軸フラックスゲート磁界センサとジマスセンサ（重力センサ）があり、それぞれの基準方位である磁北と鉛直に対してのアンテナ回転方向を計測しており、追加された光ファイバーで地上に転送される。

測定終了後、90°毎の4方向からの反射波形をアンテナ回転と基準方位（磁北又は鉛直）に対してベクトル的に5°毎の72方向に分割される。又、90°毎の反射波形はダイポール合成され全方位受信波形として求められる。

図3.4に孔内ゾンデと指向性アンテナの概略図を示す。

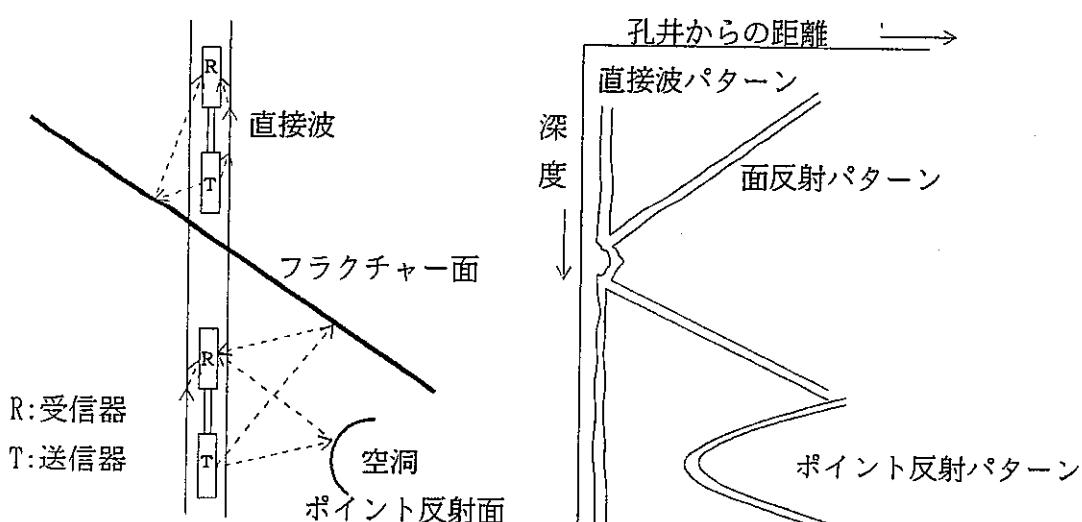


図3.3 反射法測定の原理

解析は、随時 C R T に任意の方位の反射断面記録を出力し、断面図上で最小振幅となる反射面が現れる方位を反射面の方位とし、その時の反射面の傾斜角度を読む。

方位基準は鉛直に近い孔井では磁界を使い水平孔では重力を使う。また、方位角は孔井に向かって時計回りで示され、磁界基準では $N \rightarrow E \rightarrow S \rightarrow W \rightarrow N$ 、重力基準では鉛直→左横→上→右横の順になっている。

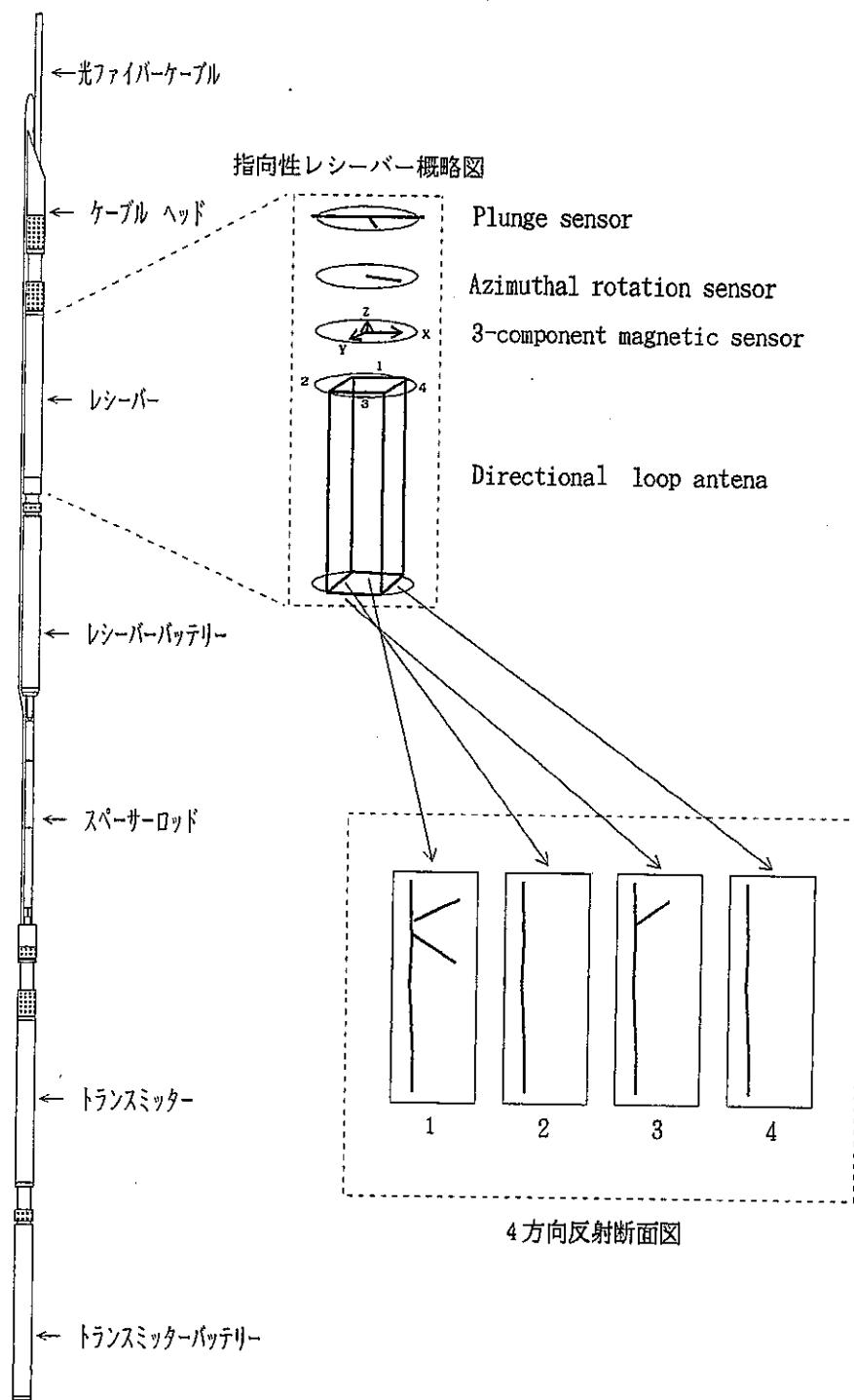


図 3. 4 孔内ゾンデ配置と指向性レーダーの概略図

4. 調査結果及び解析結果

4.1 調査結果

AN-1号孔の指向性レーダー測定は、深度18.4mから960.4m間について50cm毎で実施した。

測定の諸元を表4.1に示す。

表4.1 測定諸元

項目	内 容
測定年月日	平成9年3月10日～平成9年3月14日
孔 井	AN-1 深度；1010m(孔径;98.7mm)
地 質	花崗岩類
測定諸条件	測定深度 ; 18.4m ~ 960.4m 測定間隔 ; 50cm 送受信間隔 ; 5.66m Sampling Frequency ; 893.764MHz Direct Pulse Time ; 0.079μs Number of Sampling ; 512/trace

測定結果は4ループアンテナの合成記録として、バンドパスフィルター処理(8.7~105MHz)したものを図4.1に示し、その合成記録のムービングアベレージ処理したものと図4.2に示した。(バンドパスフィルター処理：ここでは8.7MHz以下の低周波及び105MHz以上の高周波成分をカットした。ムービングアベレージ処理：ここでは5トレースの波形の平均値の差をとっている。従ってムービングアベレージ処理によって、直接波を消し、孔井と交差する反射波を強調する事ができる。)

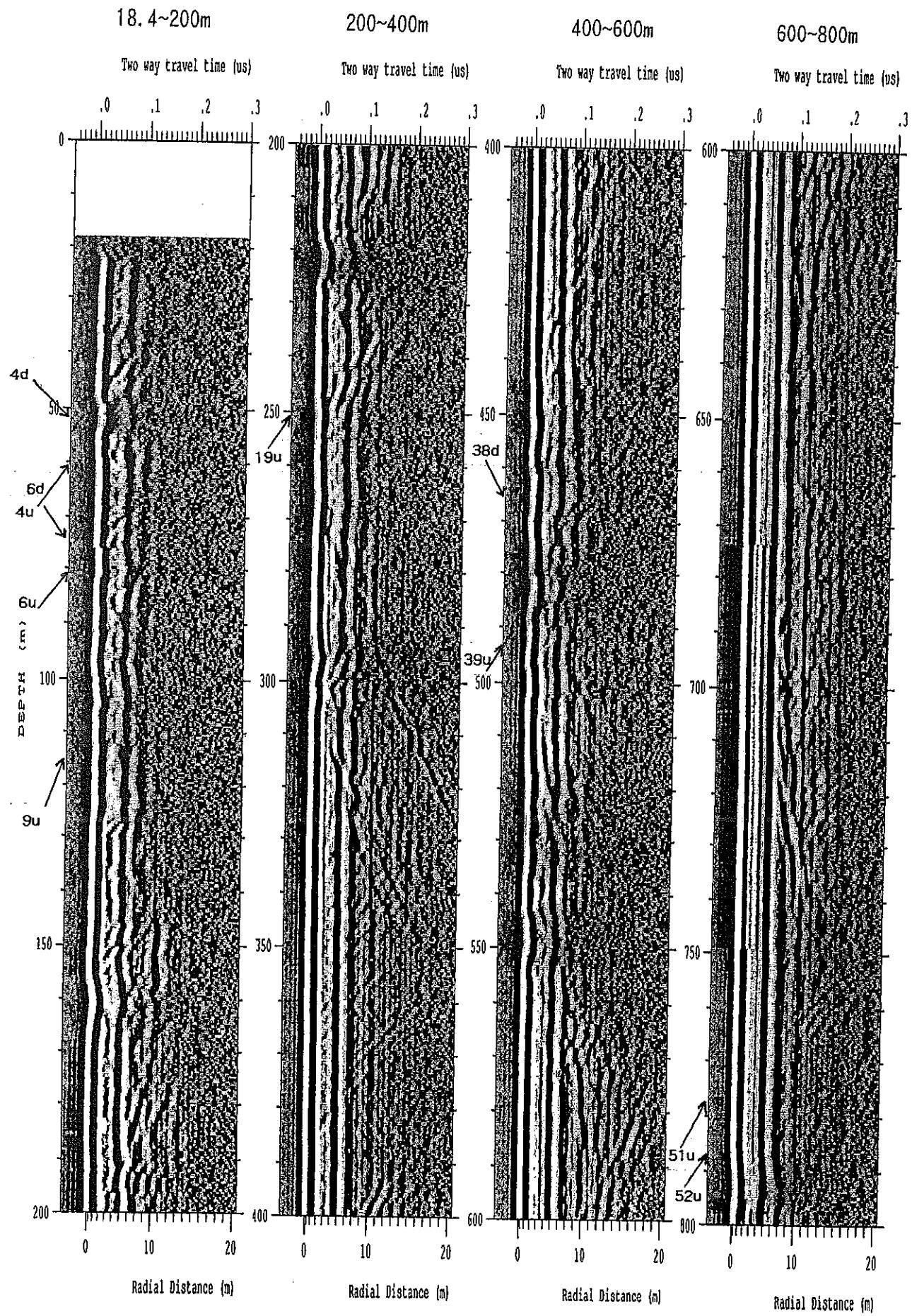


図4.1.1 指向性レーダー合成記録（バンドパスフィルター処理; 18.4~800m）

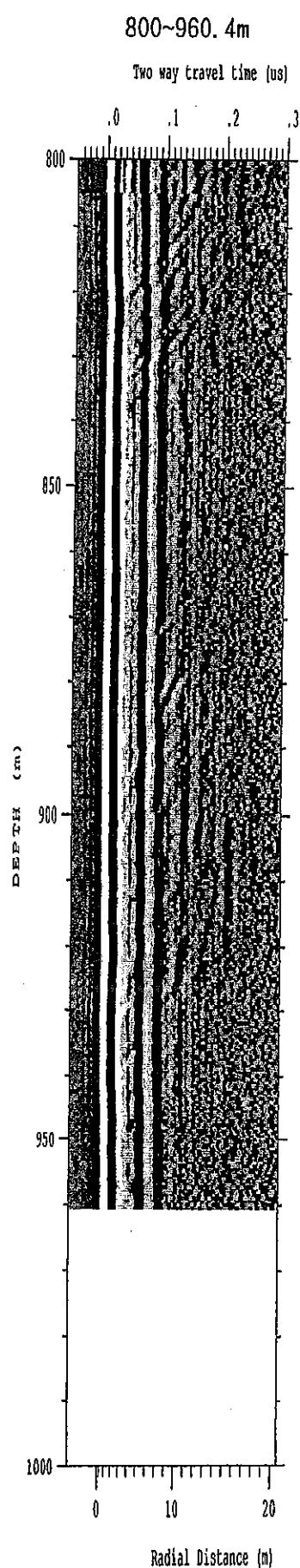


図 4.1.2 指向性レーダー合成記録 (バンドパスフィルター処理; 800~960.4m)

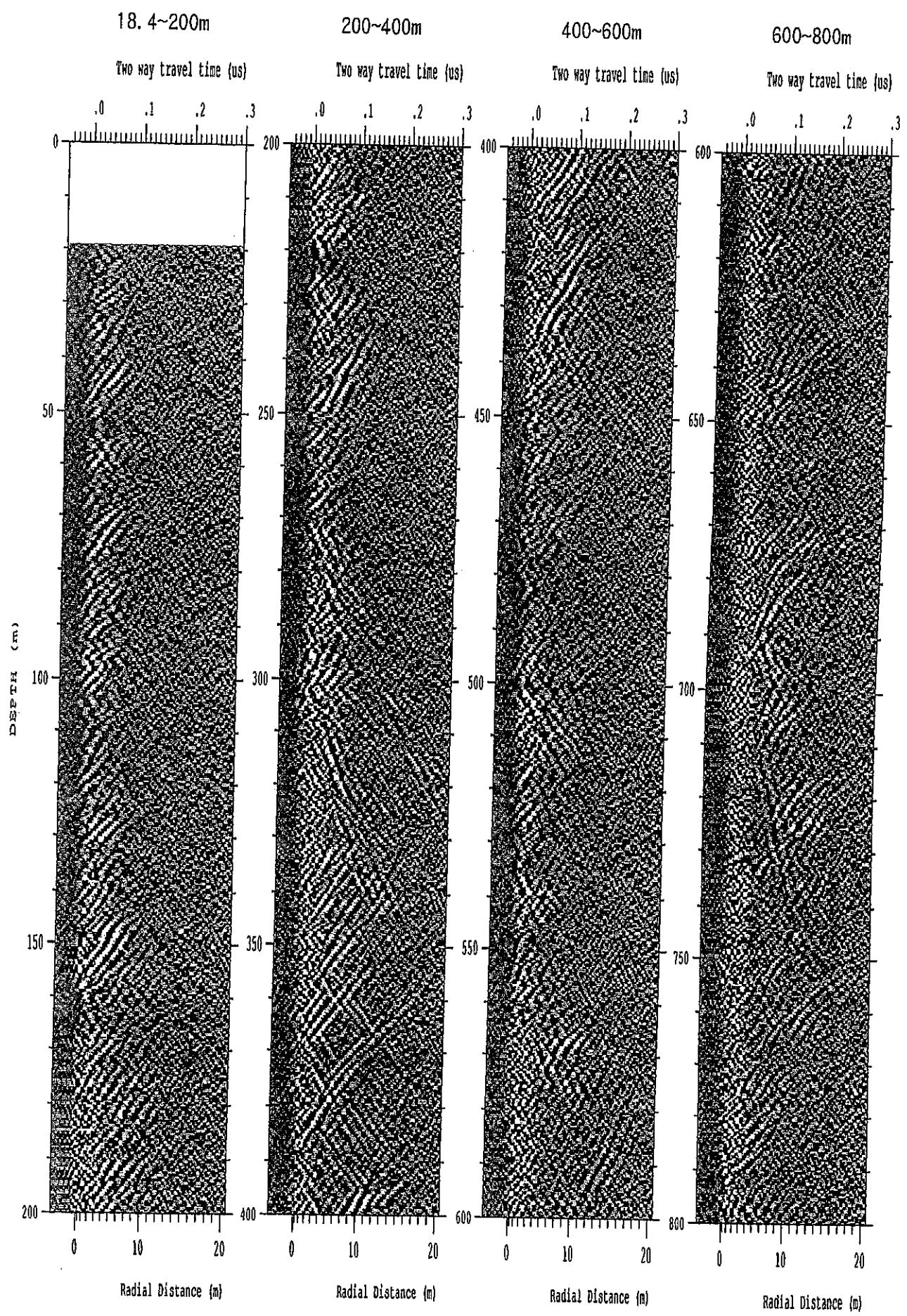


図 4.2.1 指向性レーダー合成記録 (μ -ビングアベージ処理; 18.4~800m)

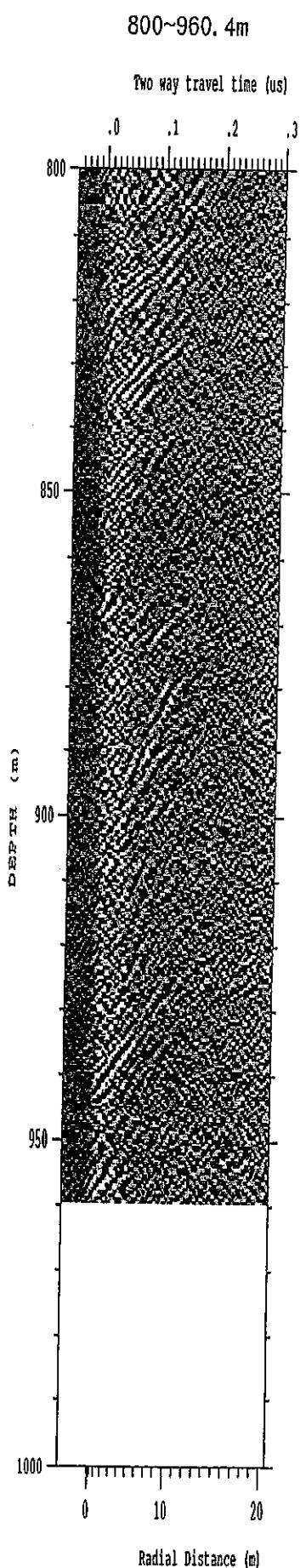


図 4.2.2 指向性レーダー合成記録（ムービングアベージ処理; 800~960.4m）

4.2 解析結果

解析は反射面の方位・傾斜角度・反射面の連続長について行った。

4.2.1 解析方法

(1) 反射面の方位・傾斜角度解析

反射面の方位・傾斜角度解析はRAMAC解析ソフト(RADINTER MODEL FILE Version 2.1 Magnetic Azimut)により行った。

その解析の手順を図4.3に示す。

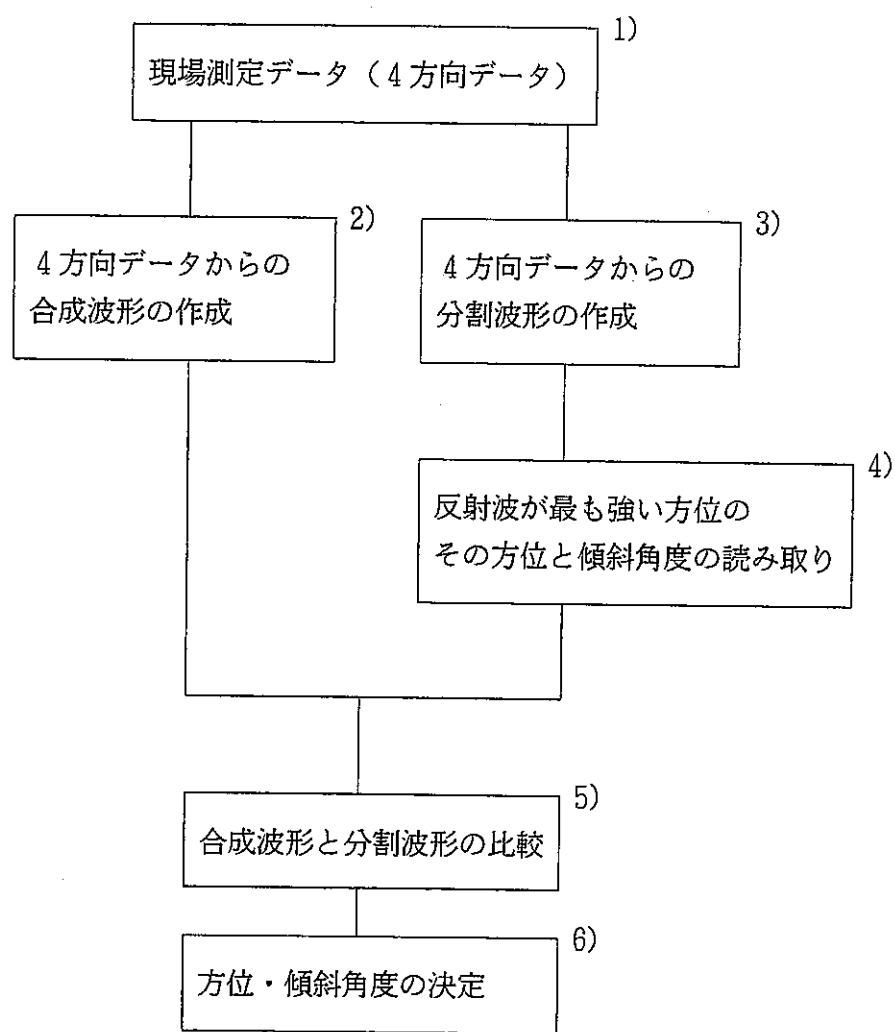


図4.3 反射面の方位・傾斜角度解析手順

2)の処理は4個のループアンテナで受信した波形を全方向からの受信波形として合成される。これは無指向性のダイポールアンテナで受信された波形と同一のものとなる。(図4.1.1～図4.1.2)

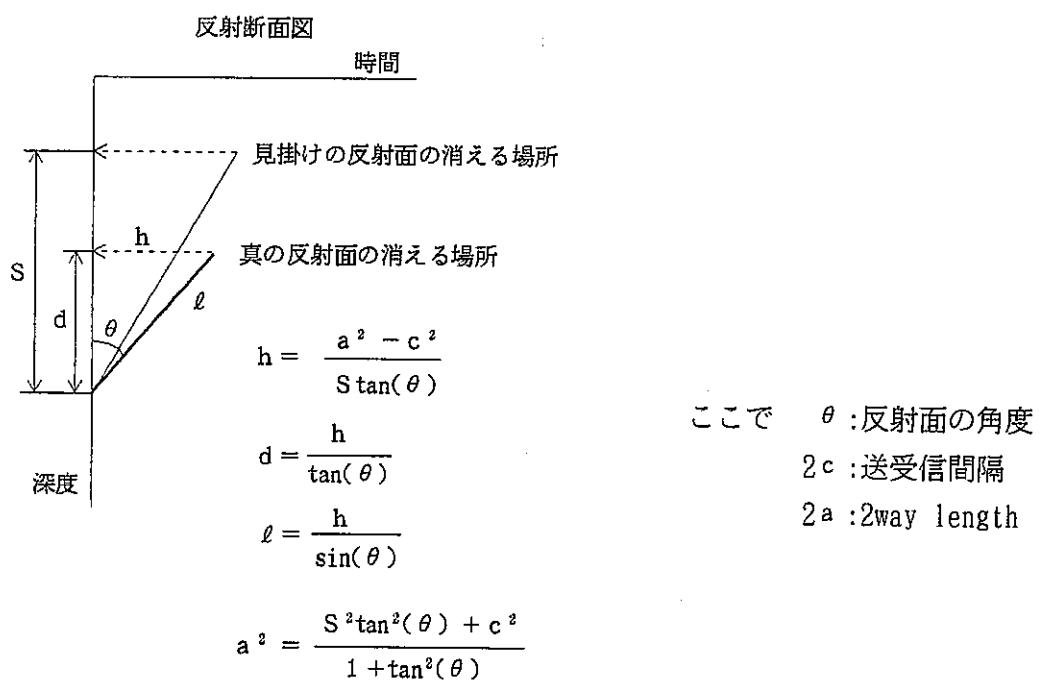
3)の処理は4個のループアンテナで受信した波形をそれぞれある角度毎に分割し

たものである。図4.4.1～図4.4.5に全深度の45°毎に分割した記録を示す。又、図4.5.1に40～140m間、図4.5.2に200～320m間、及び図4.5.3に450～510m間の10°毎の分割した記録を示す。

5)では方位・傾斜角度を読み取ったその方位の分割波形記録と合成波形記録の位相の比較を行っている。これは、当システムの受信アンテナはループアンテナのため180°反対側にも同じ強さの位相のずれた反射波があらわれる。従って、合成波形と方位を読み取った分割波形の位相が同一であることを確認する必要がある。

(2)反射面の連続長

反射断面図はマイグレーション処理をしていないので、その断面図からは直接反射面の拡がりを読み取ることは出来ない。従って、下図に示したような関係から、反射面の消える深度を読み取り、あらかじめ解析してある反射面が孔井と交わる深度及びその反射面の傾斜角度より反射面の拡がりを求めた。



4.2.2 解析結果

反射面の方位・傾斜角度・反射面の連続長の解析結果について表4.2.1～表4.2.2に示した。反射の傾斜角度を解析するにあたり、岩盤の平均電磁波速度を120m/ μ secとした。

表中の番号のudの添字のうちuはアップデップの反射面にのみ解析を行い、dはダウンデップの反射面にのみ解析を行ったことを示す。又、udはアップデップ及びダウンデップの両反射面で解析を行ったことを示す。

方位はダウンデップの反射面の方向を示す。その方位について、反射面の解析方法で述べたように、合成波形記録と反射面の方位を確定した分割波形記録の位相が

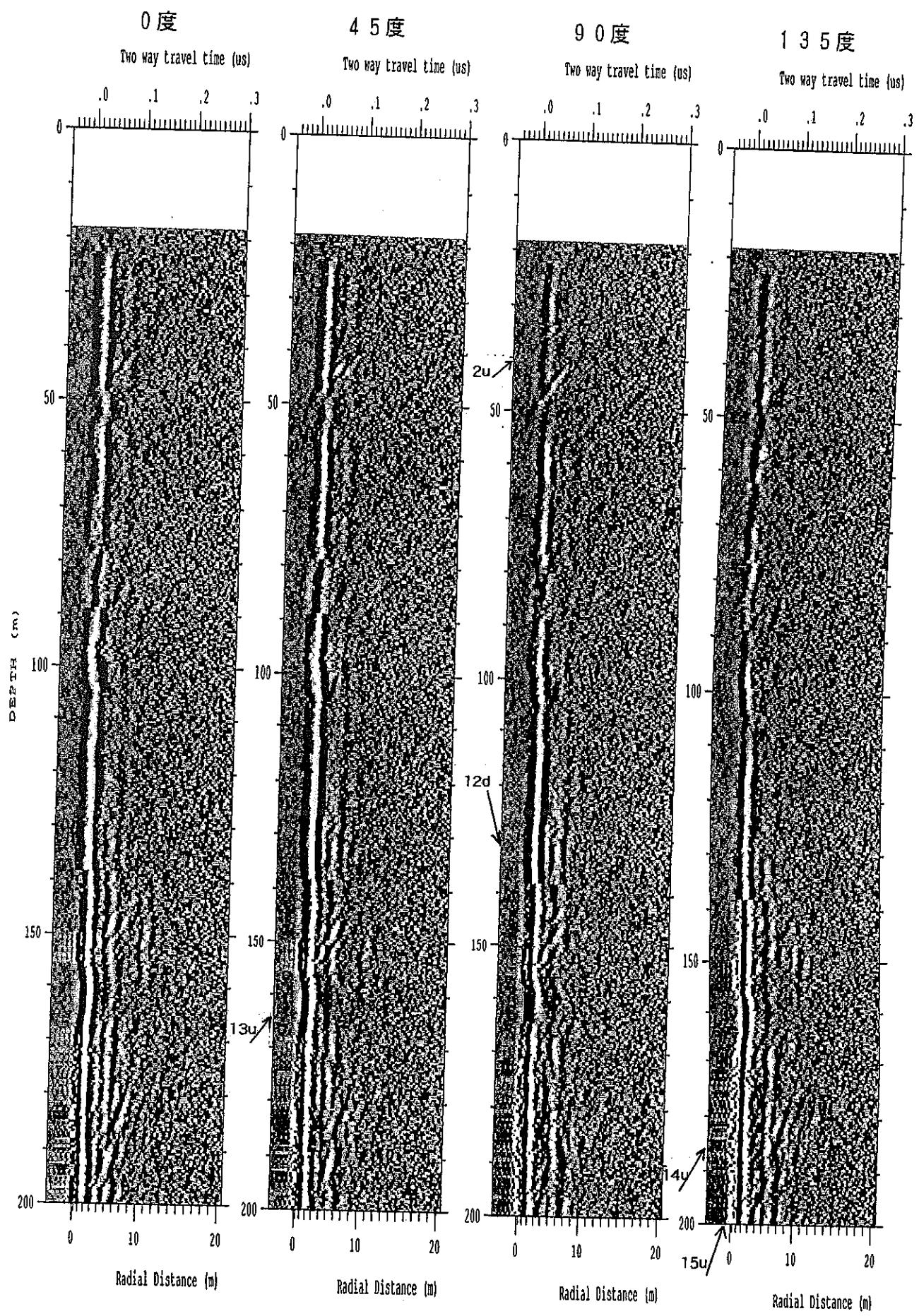


図 4.4.1.(ii) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;18.4~200m)

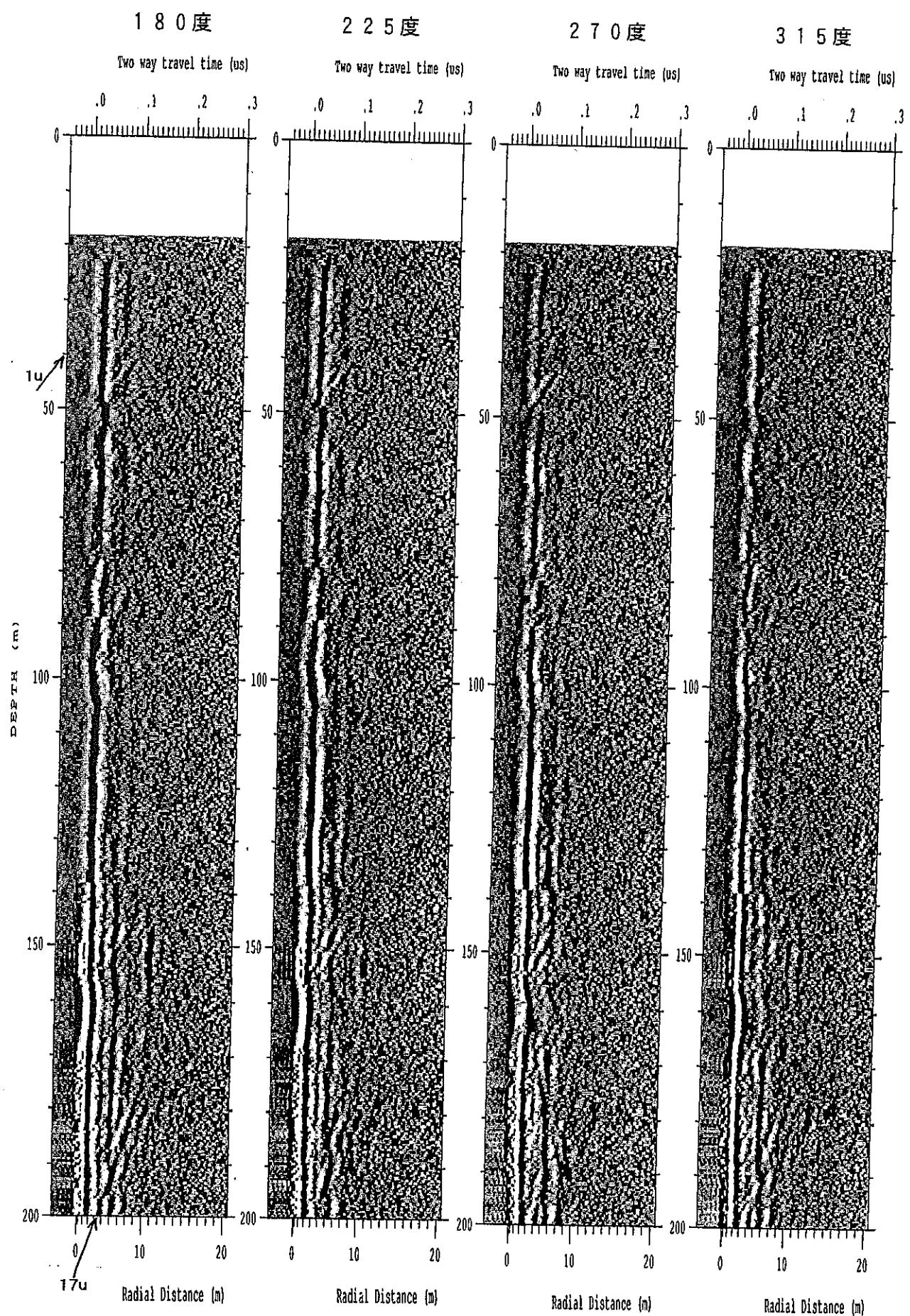


図 4.4.1.(2) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;18.4~200m)

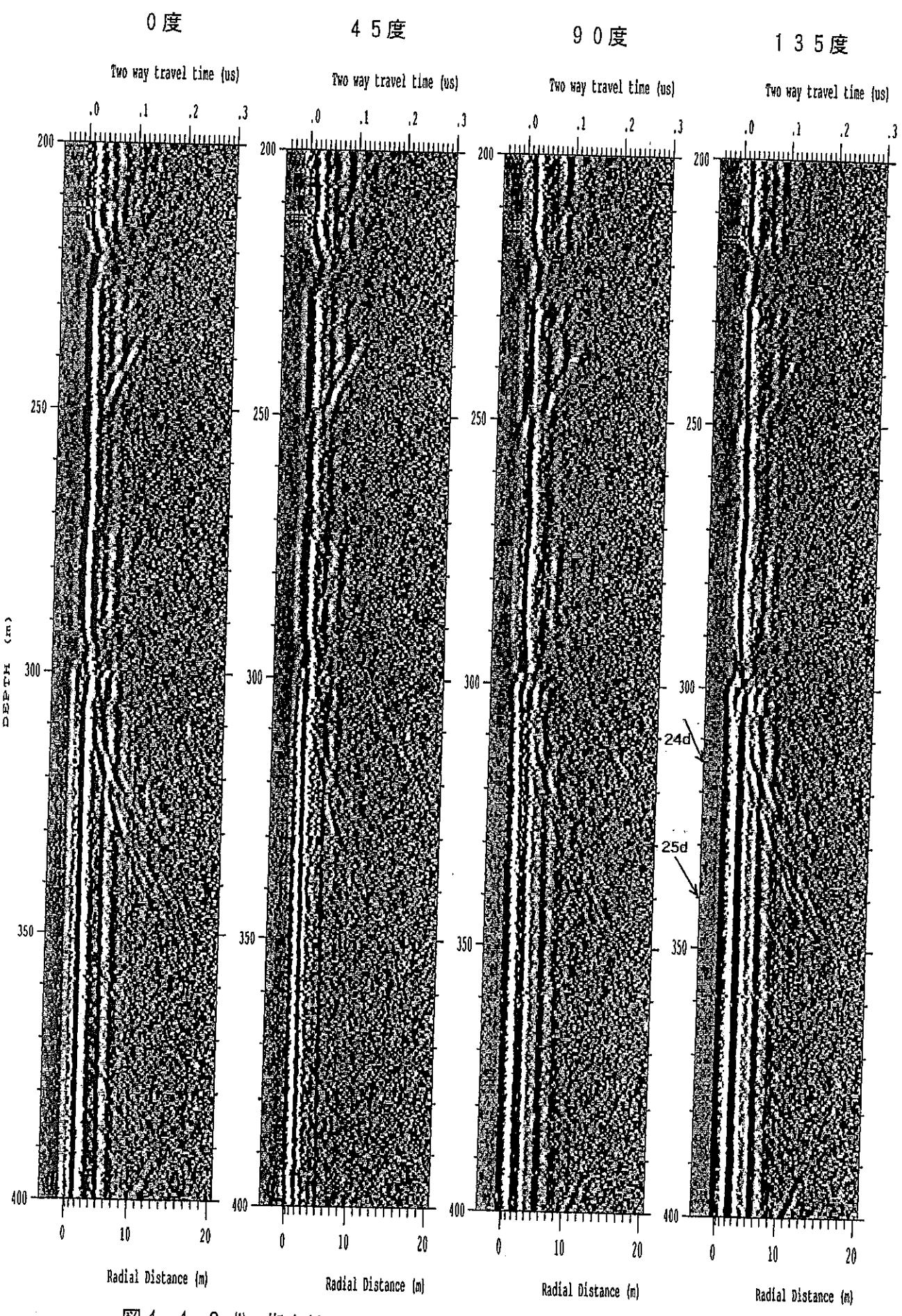


図 4.4.2.(II) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;200~400m)

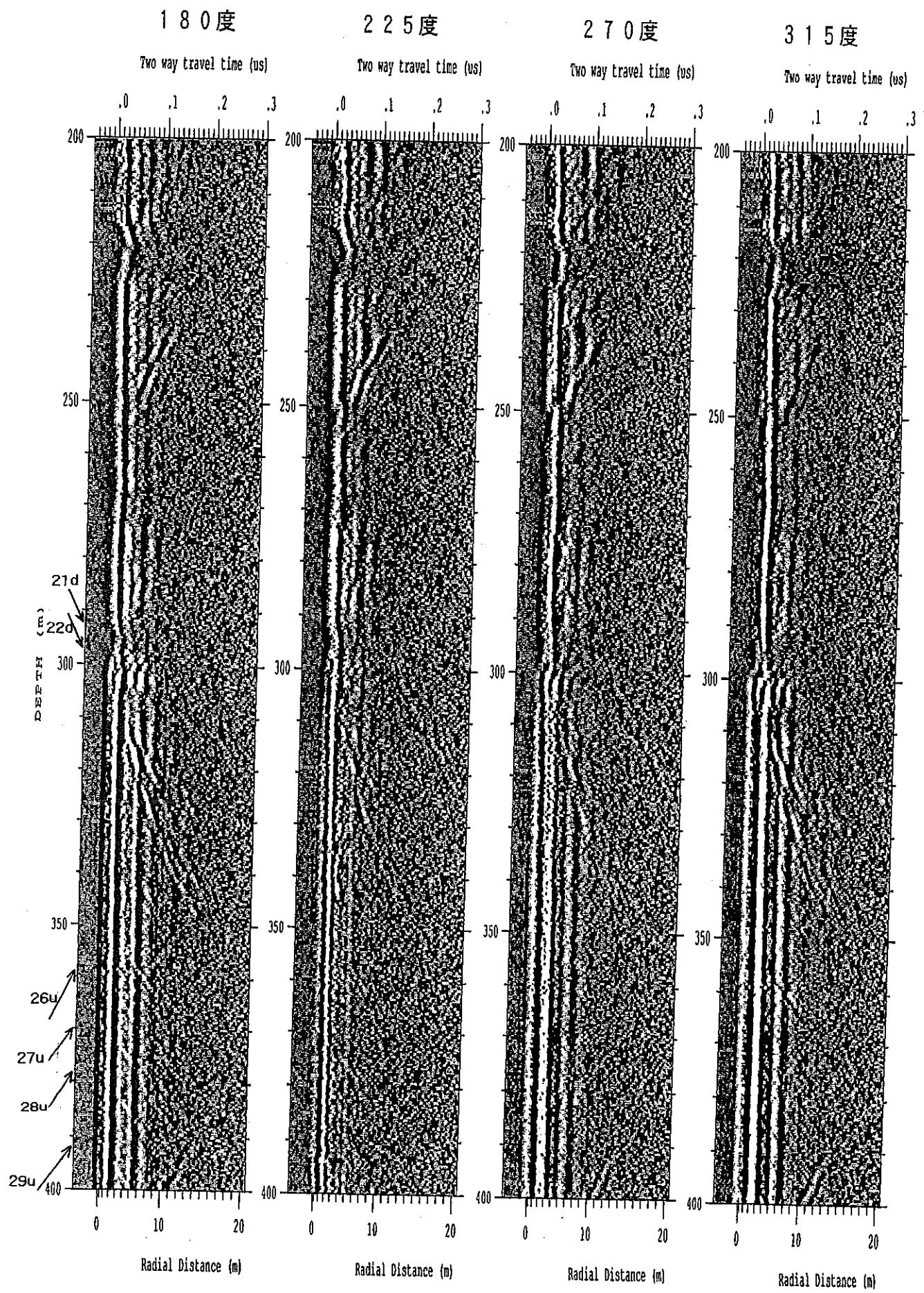


図 4.4.2.(2) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;200~400m)

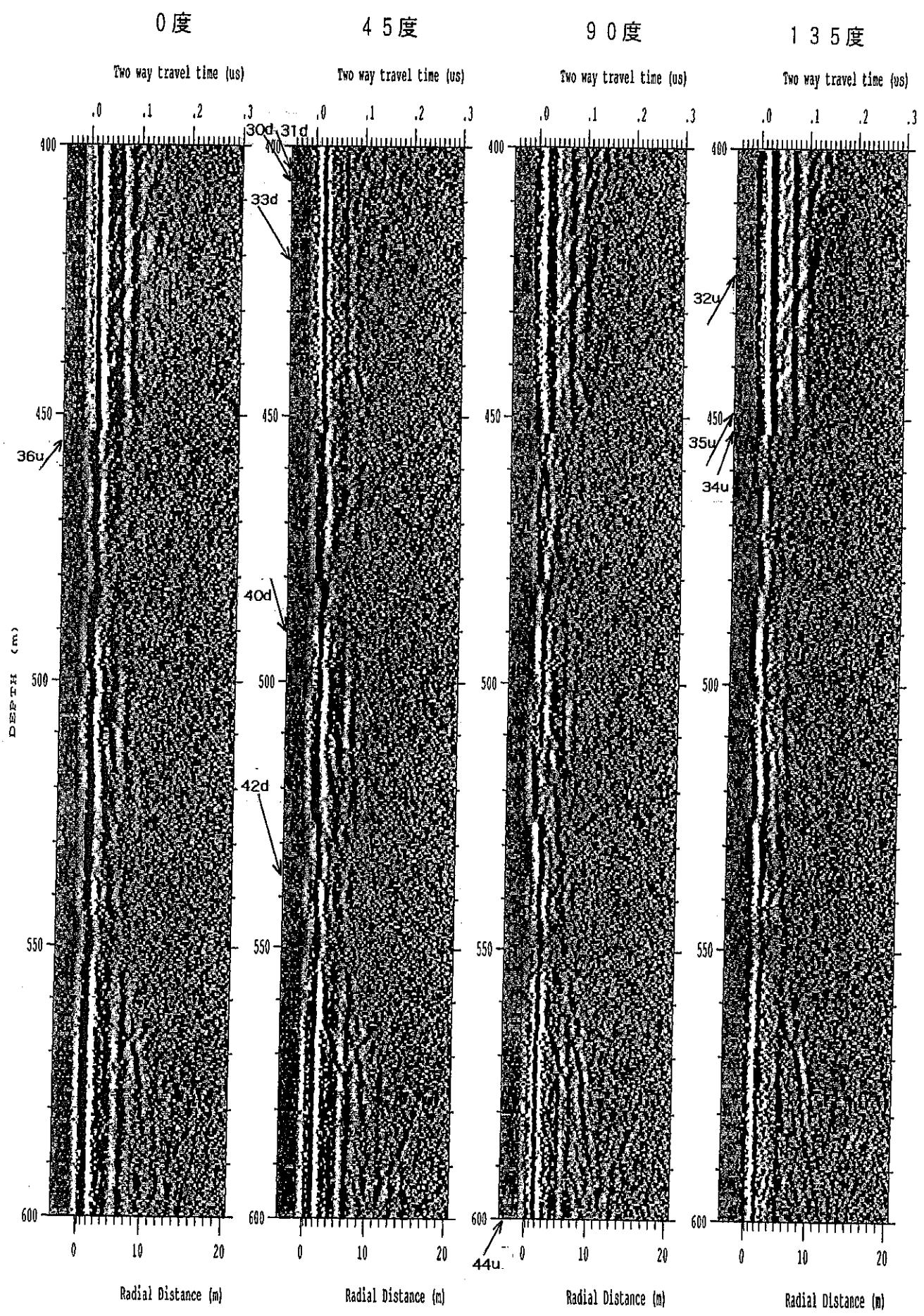


図4.4.3.(ii) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;400~600m)

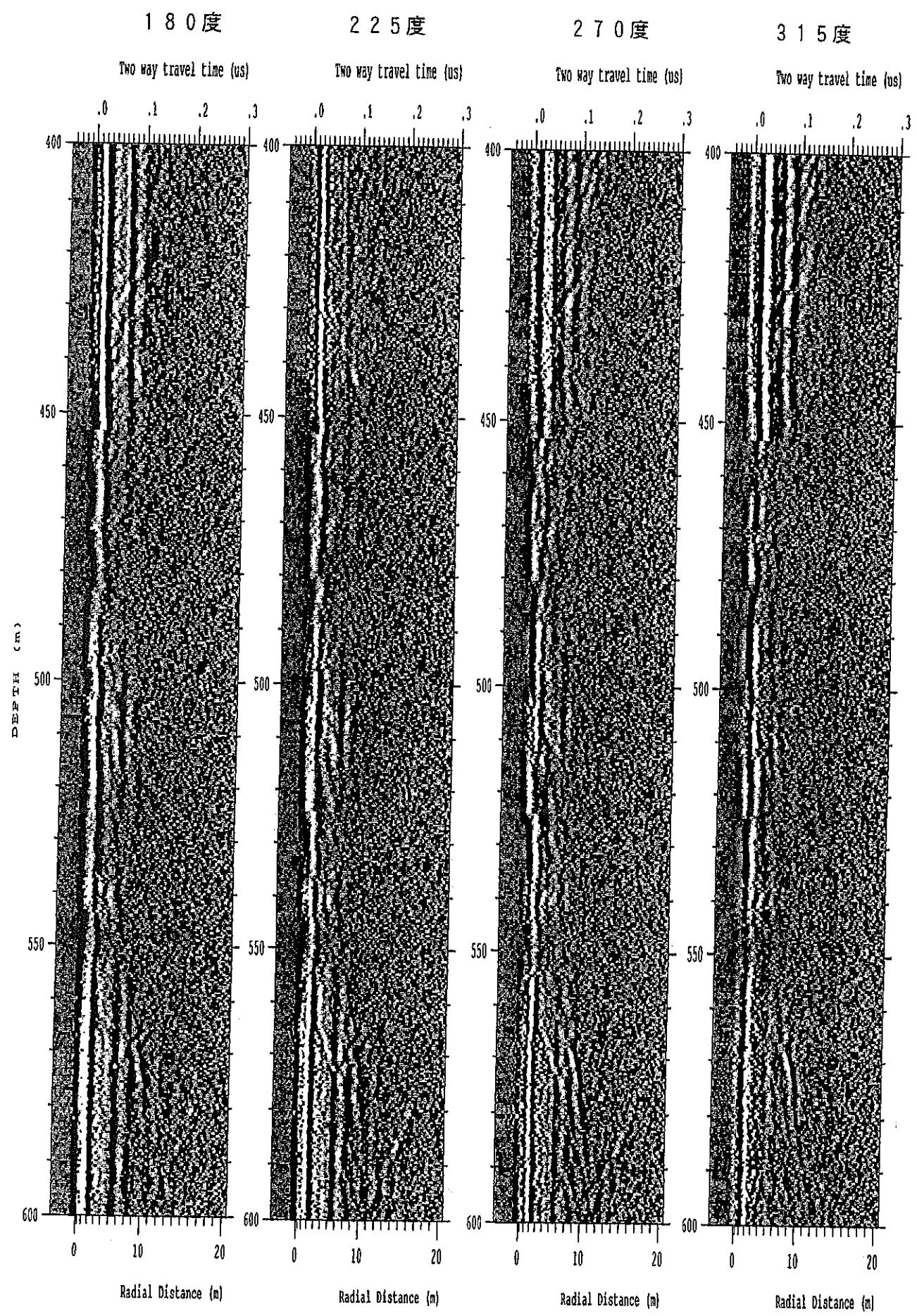


図 4.4.3.(2) 指向性レーダー分割記録(45° 毎; バンドパスフィルター処理; 400~600m)

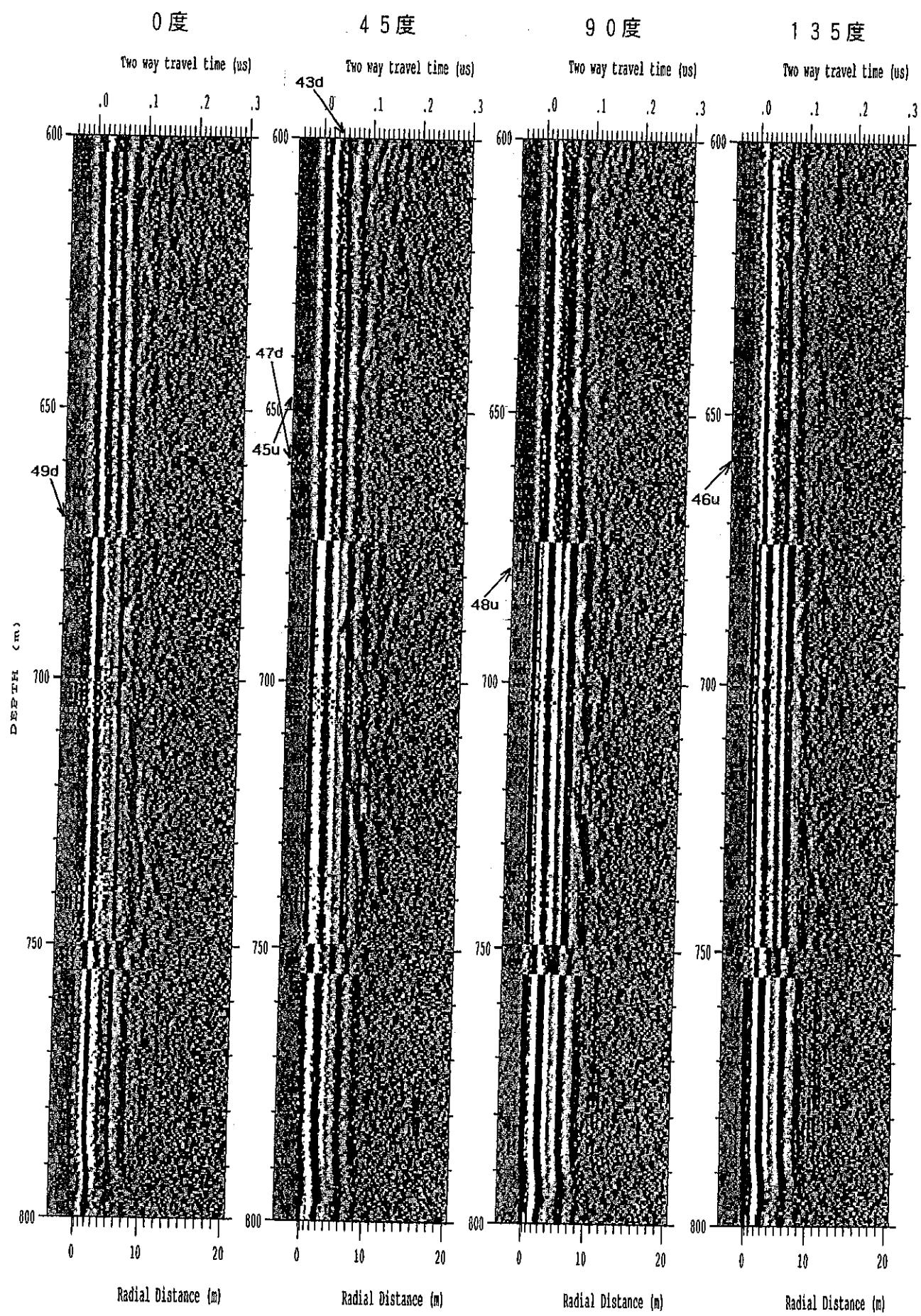


図 4.4.4.(ii) 指向性レーダー分割記録(45°毎; バンドパスフィルター処理; 600~800m)

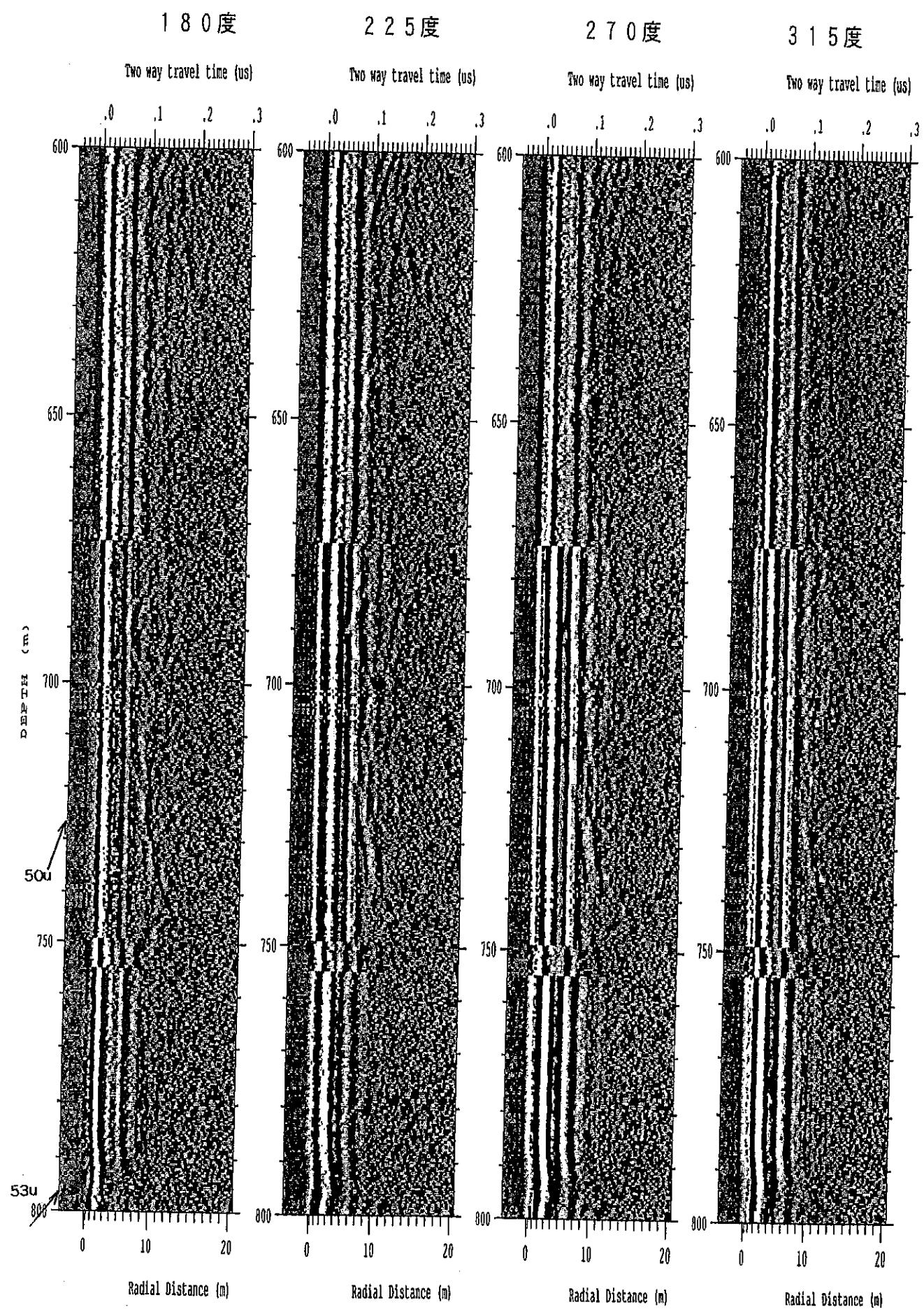


図 4.4.4.(2) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;600~800m)

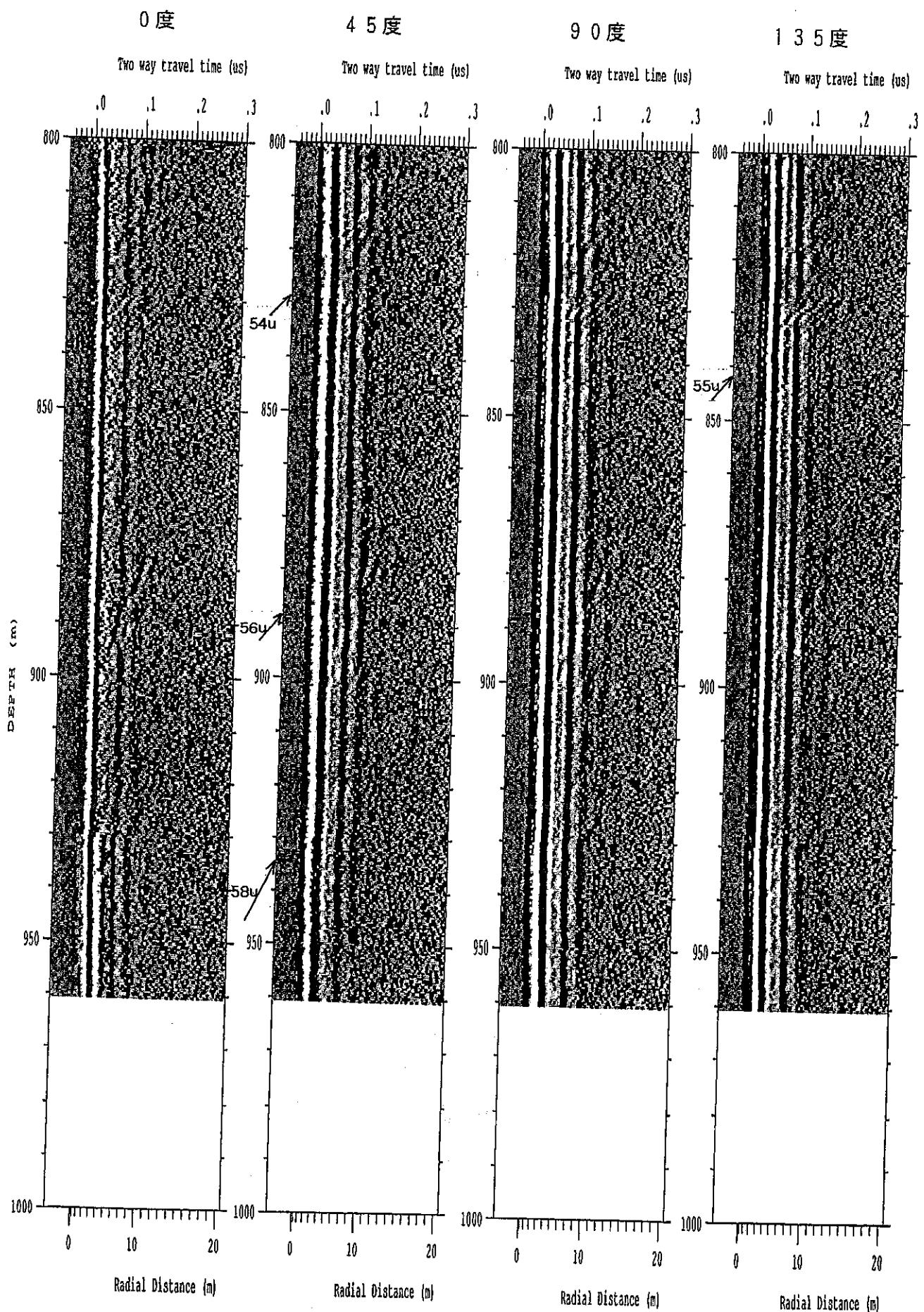


図 4.4.5.(ii) 指向性レーダー分割記録(45°毎;バンドパスフィルター処理;800~960.4m)

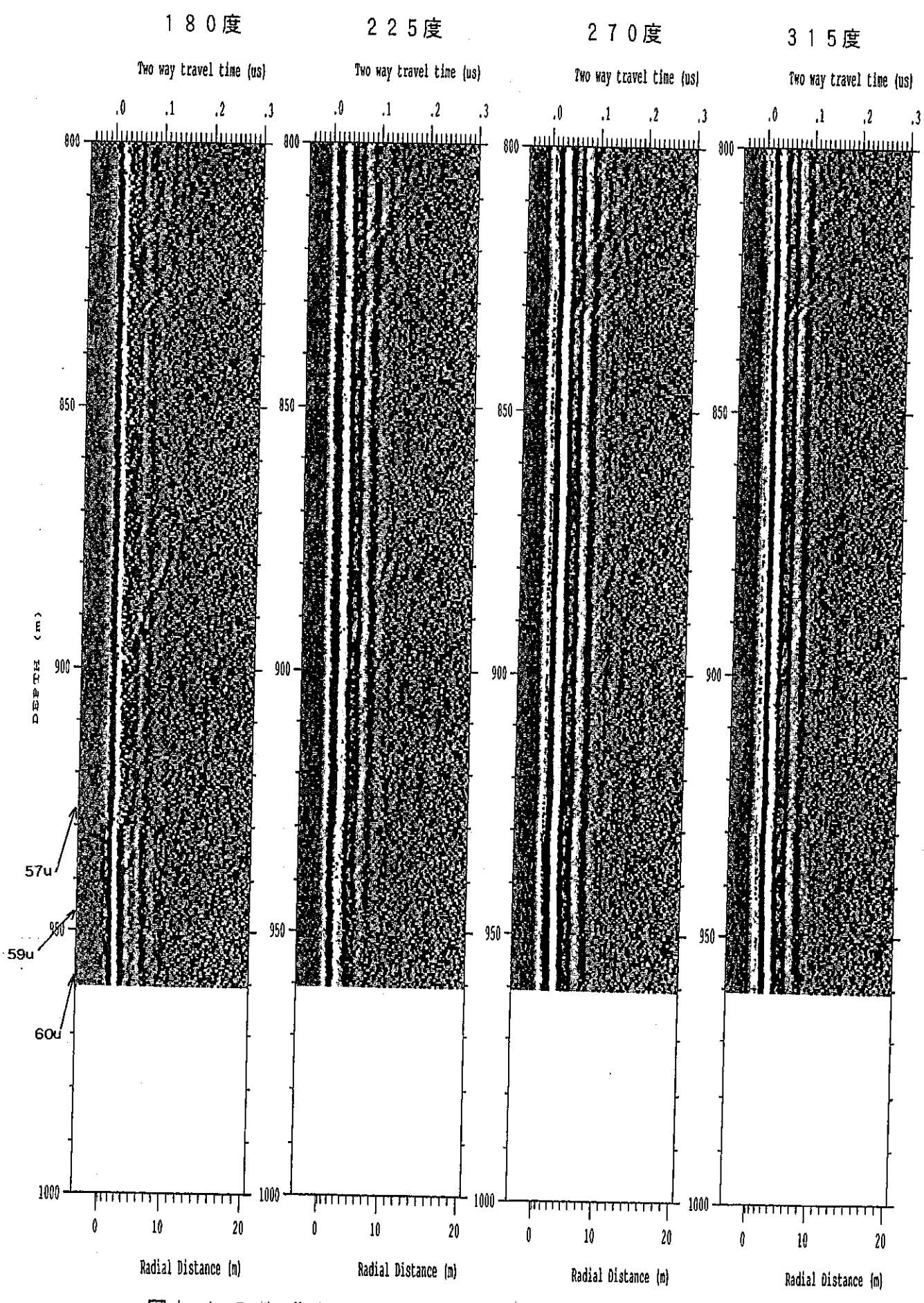


図 4.4.5.(2) 指向性レーダー分割記録(45°毎; バンドパスフィルター処理; 800~960.4m)

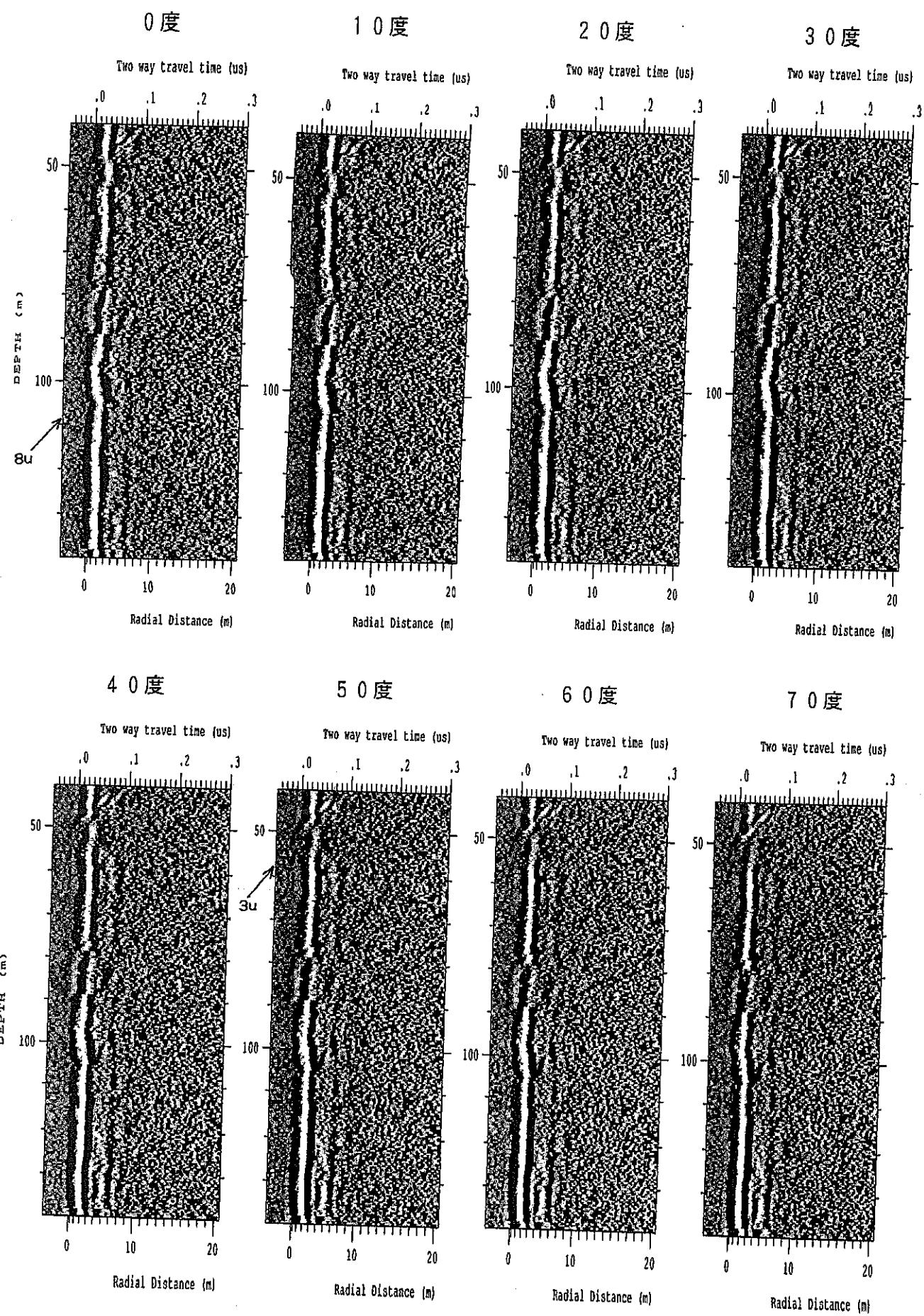


図 4.5.1.(ii) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;40~140m)

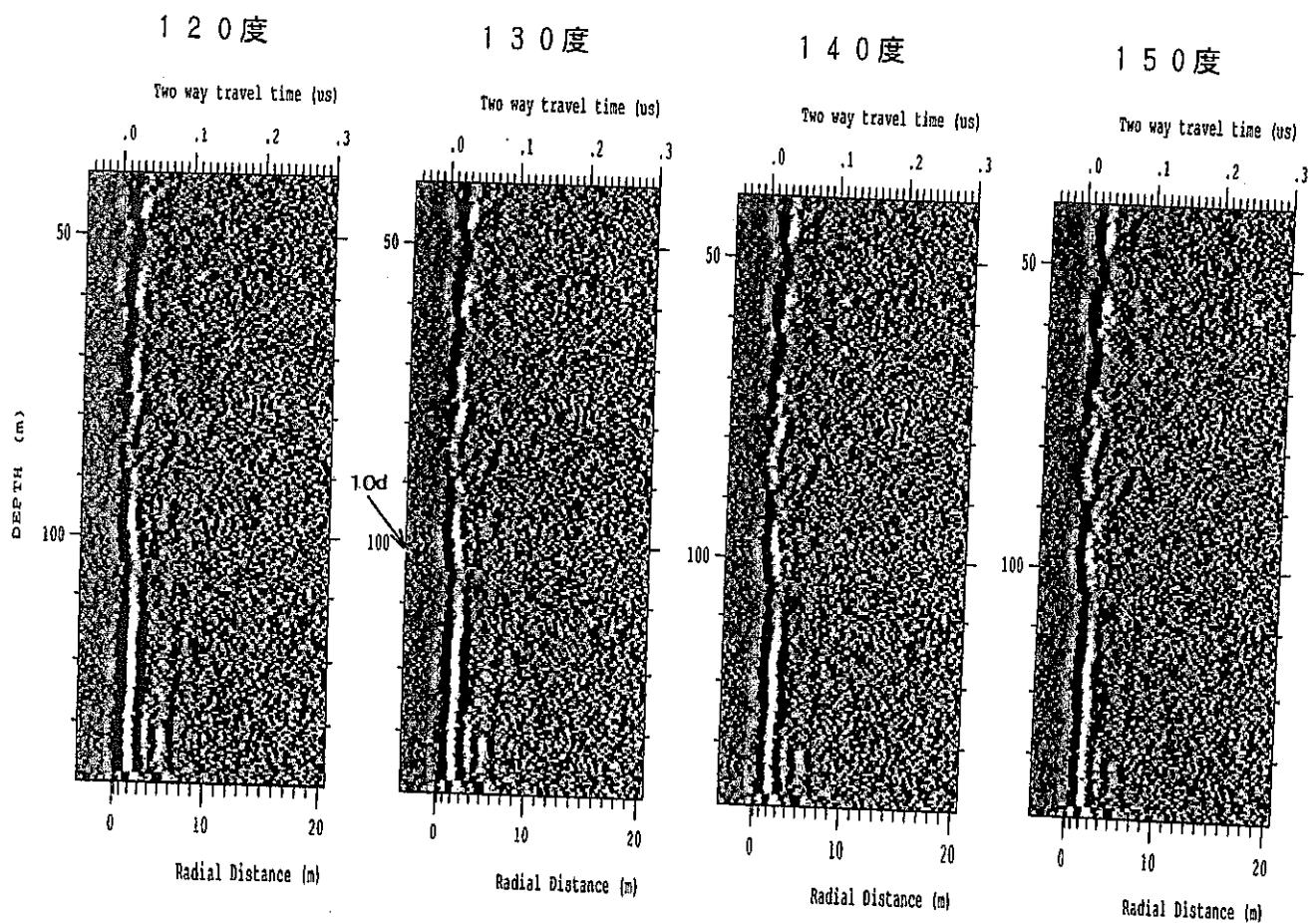
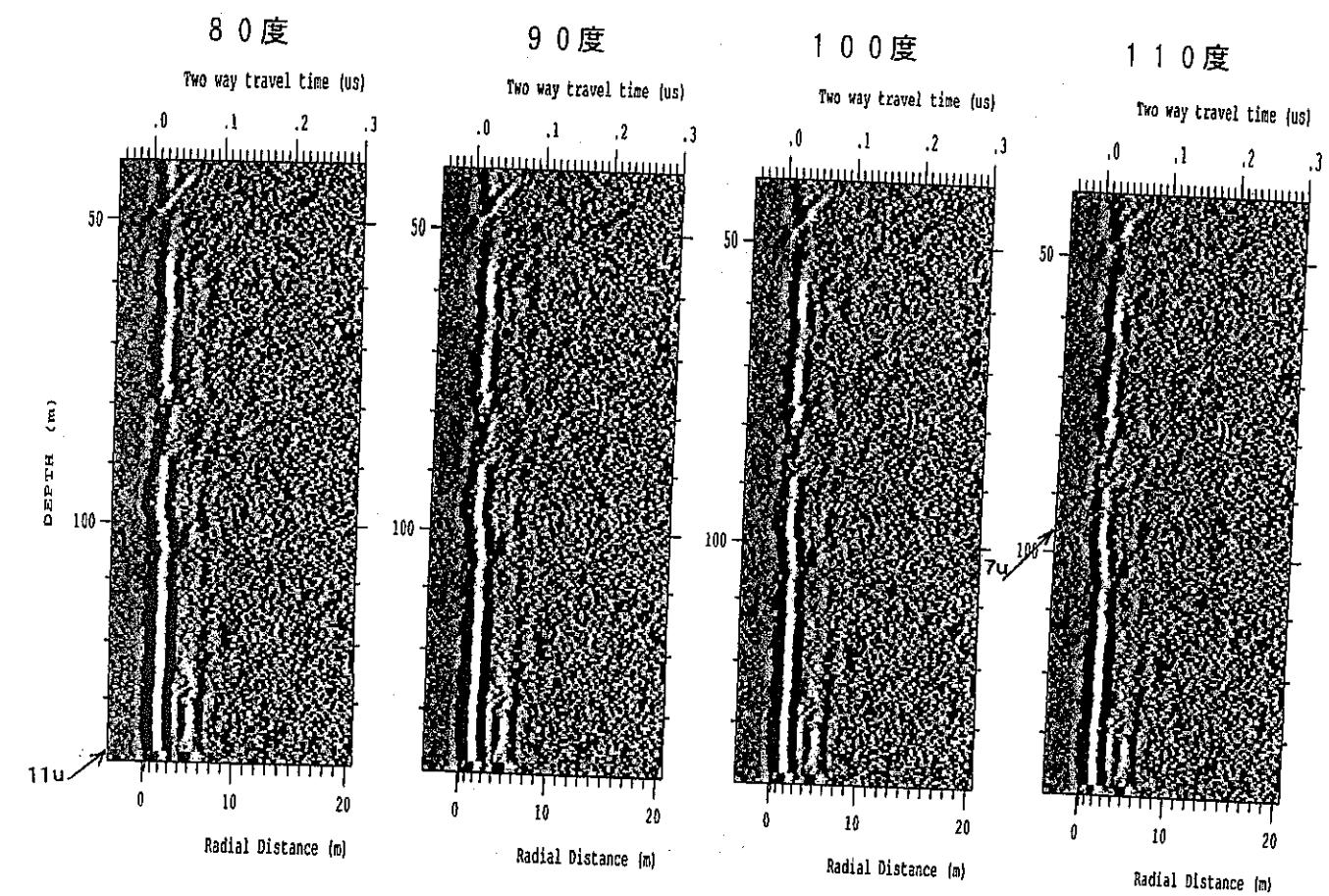


図 4.5.1.(2) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;40~140m)

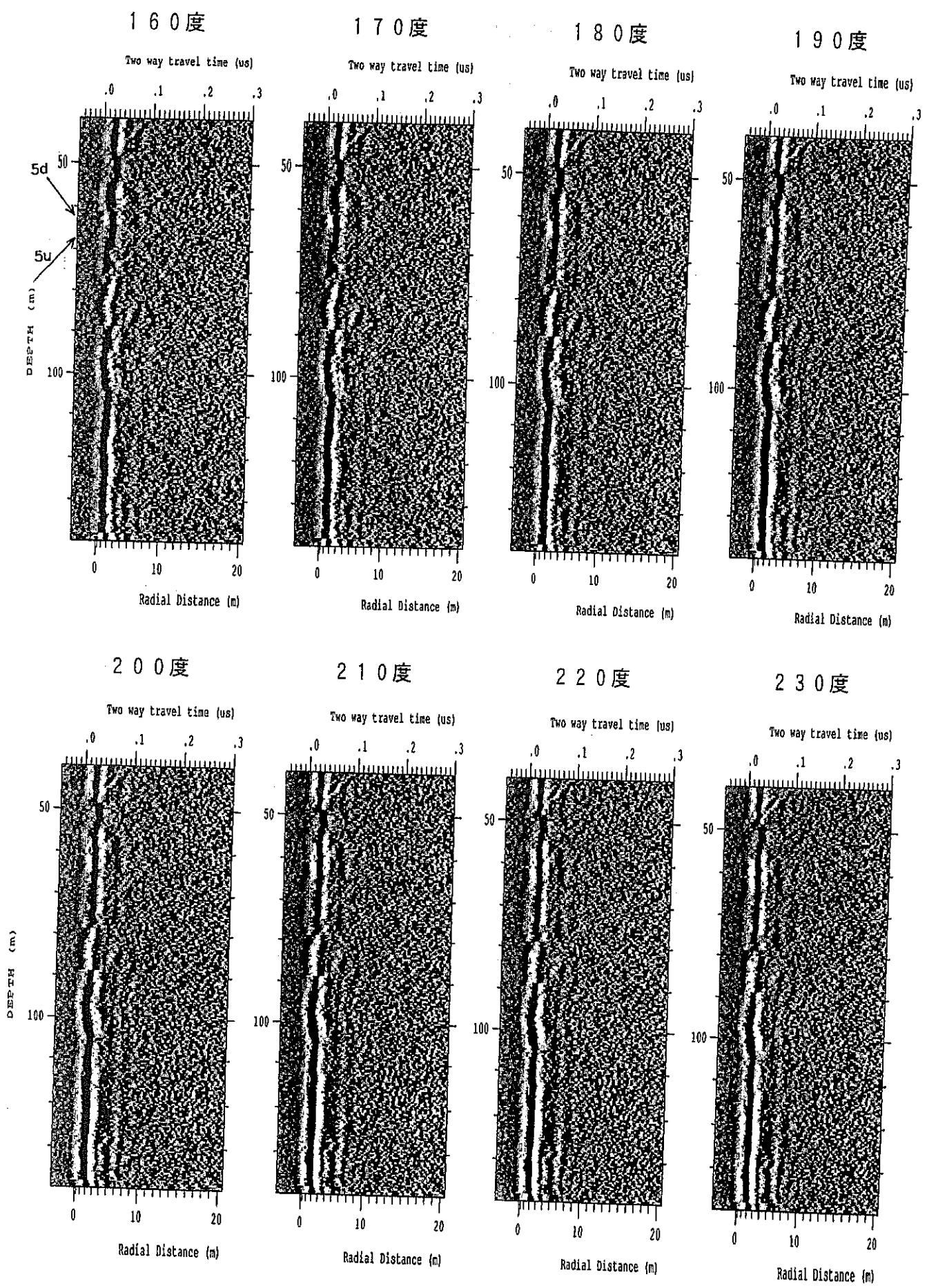


図4.5.1.(3) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;40~140m)

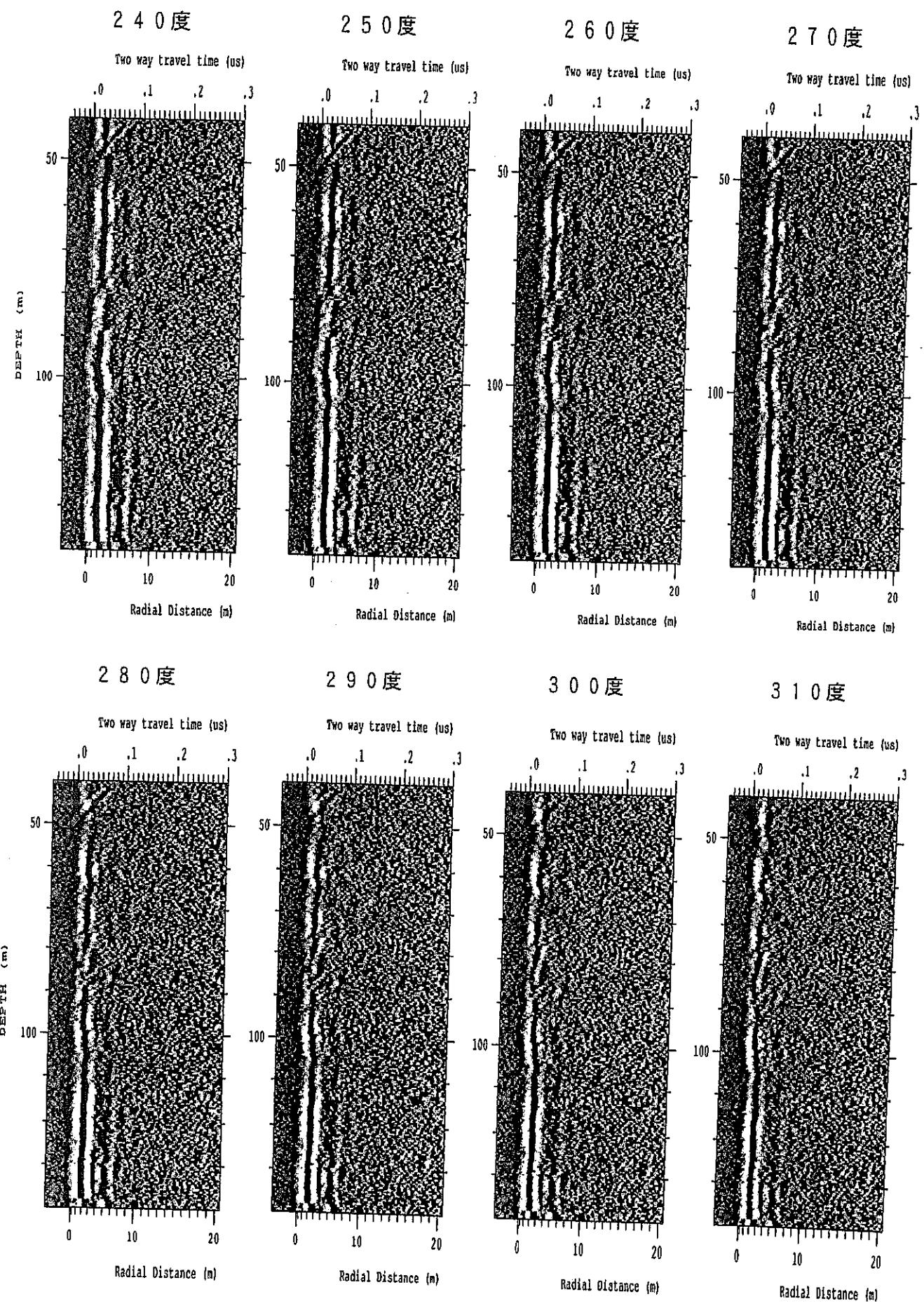


図 4.5.1.(4) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;40~140m)

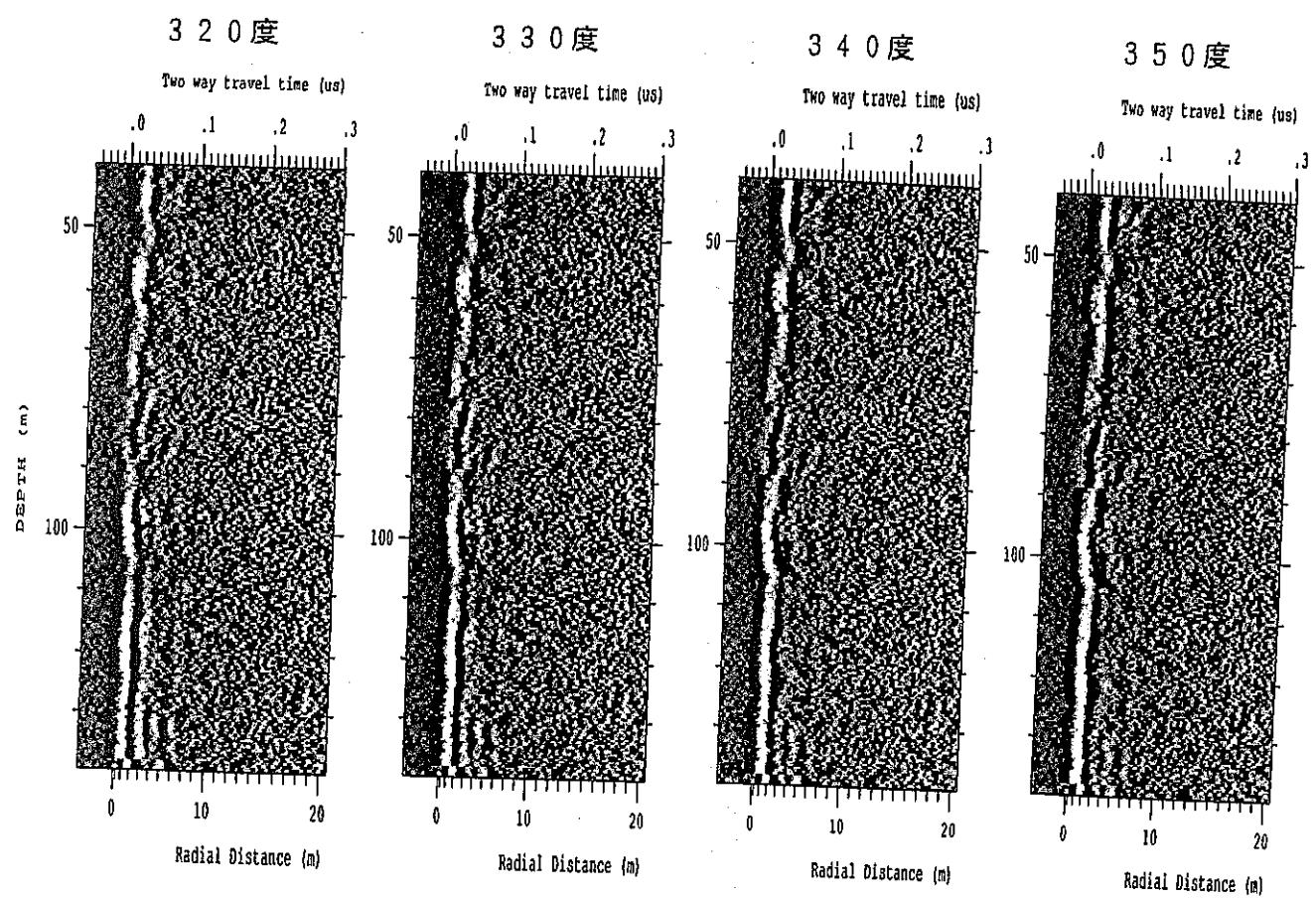


図 4.5.1.⑯ 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;40~140m)

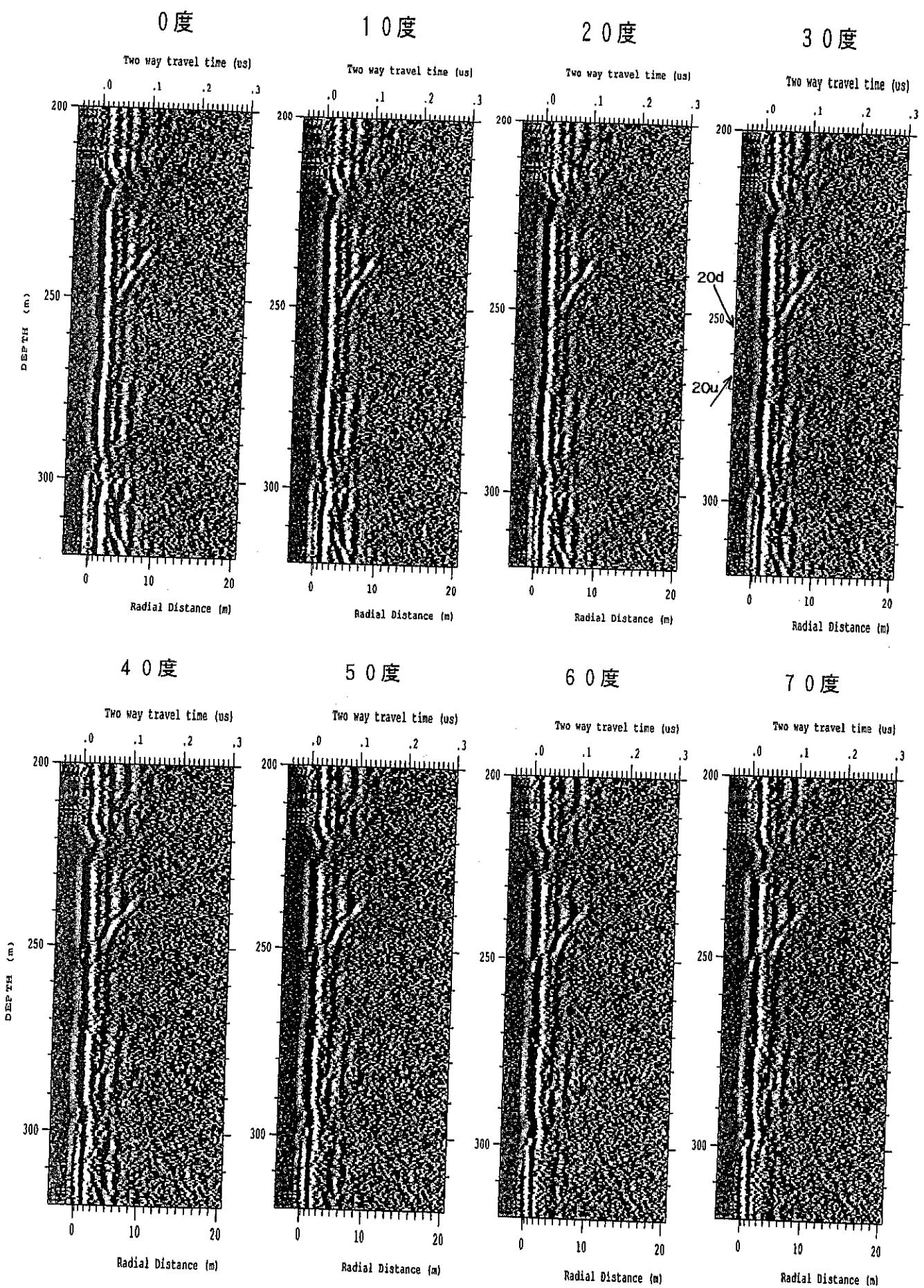


図 4.5.2.(ii) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;200~320m)

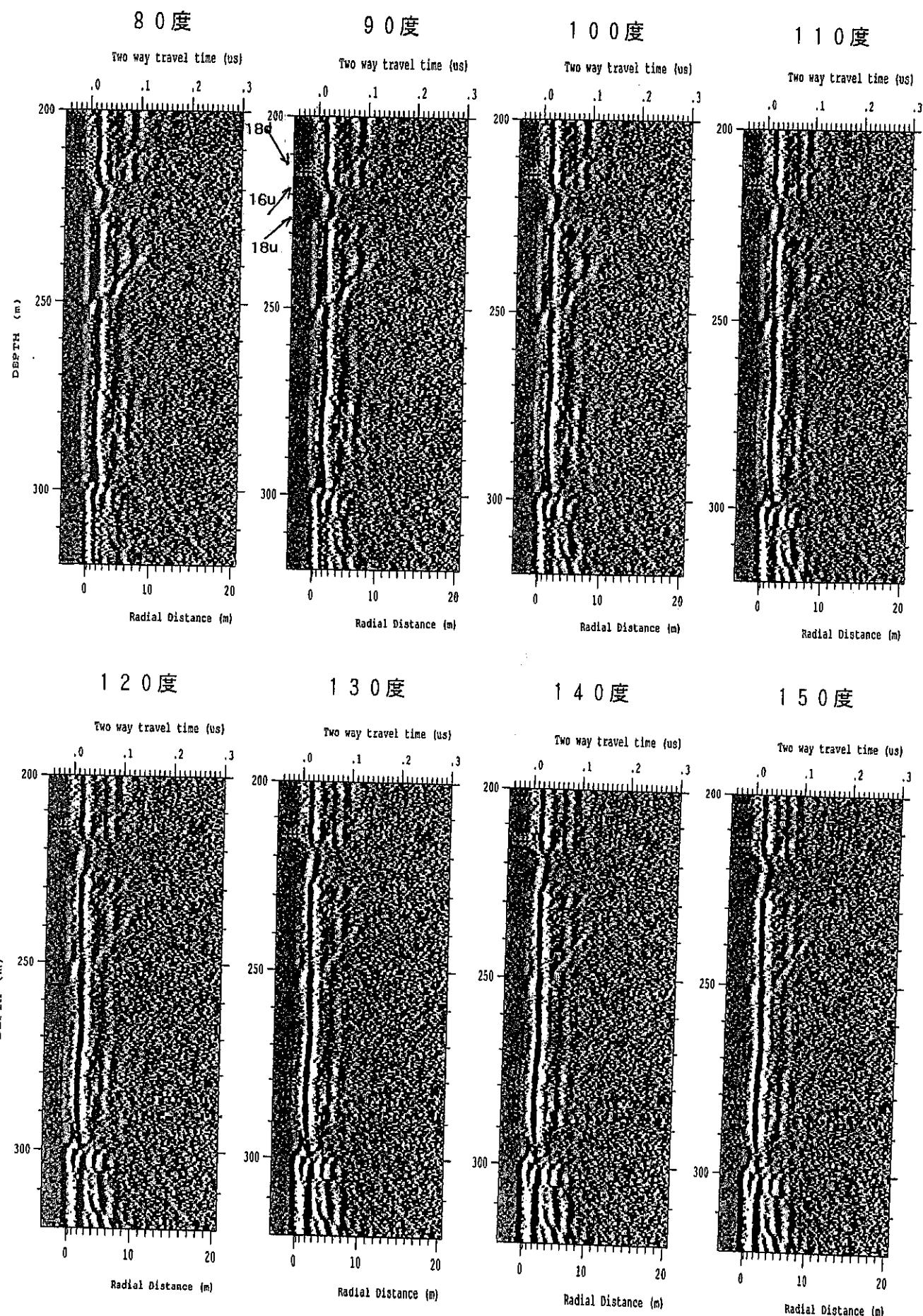


図 4.5.2.(2) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;200~320m)

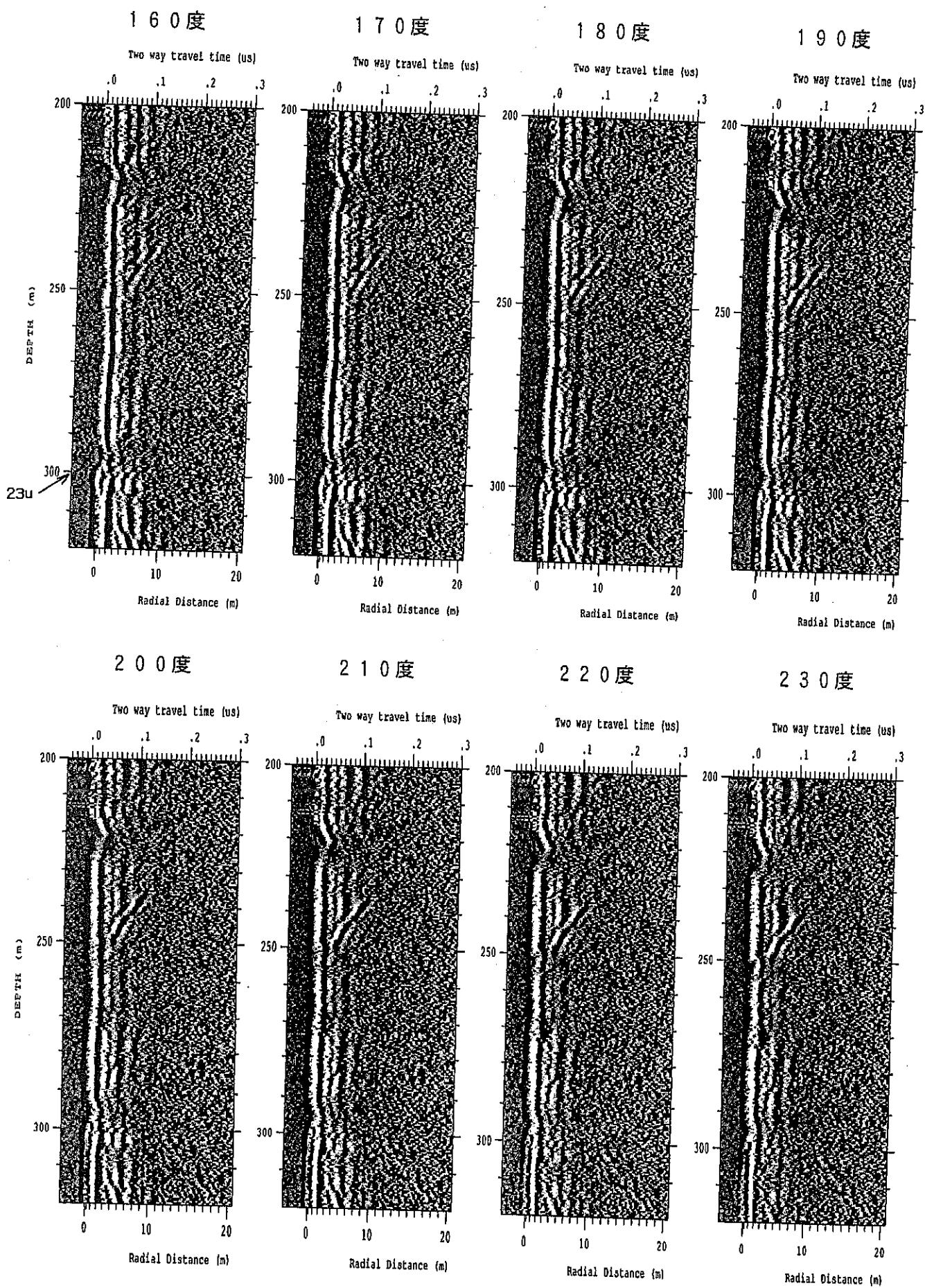


図 4.5.2.(3) 指向性レーダー分割記録(10°毎; バンドパスフィルタ処理; 200~320m)

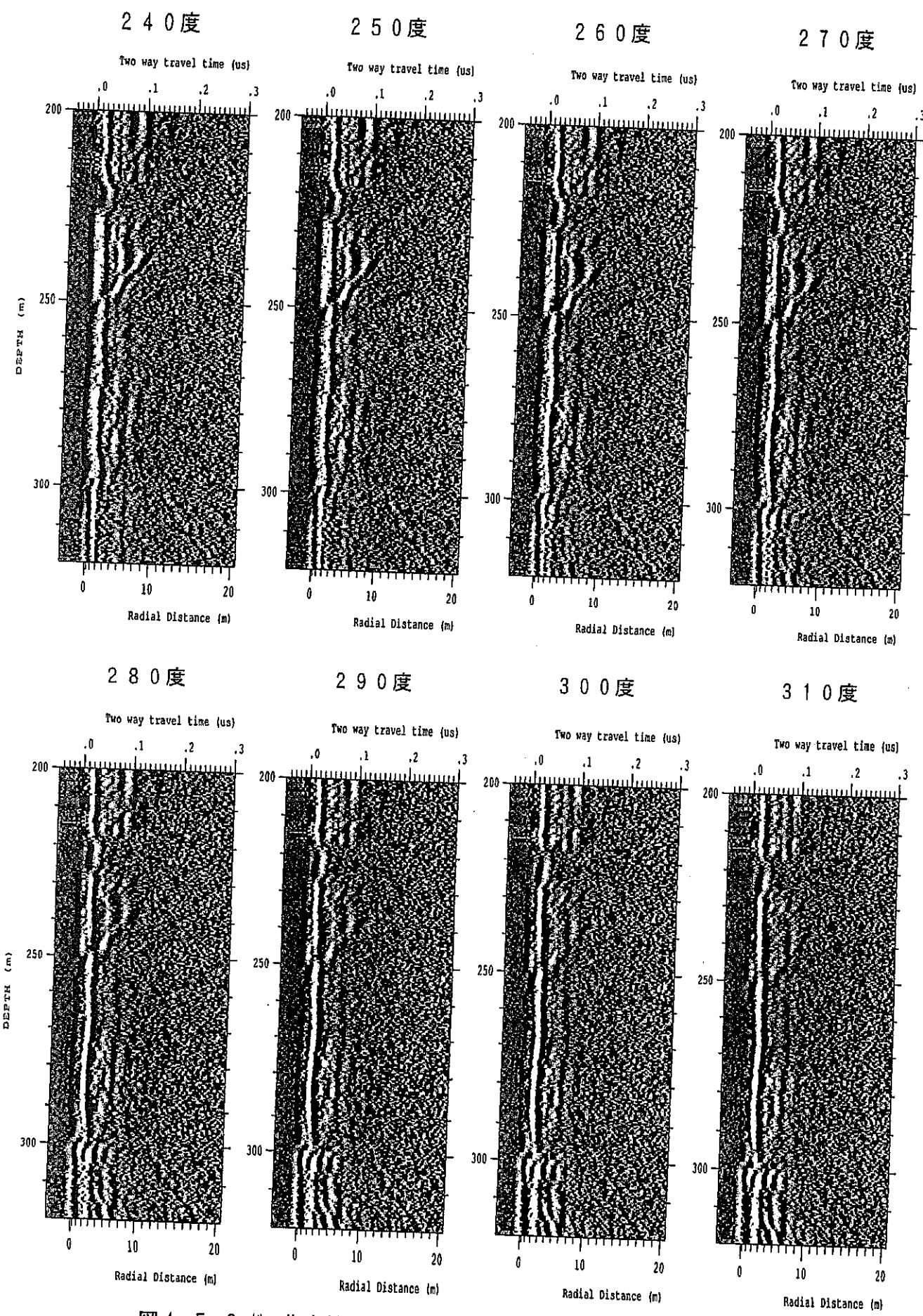


図4.5.2.(4) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;200~320m)

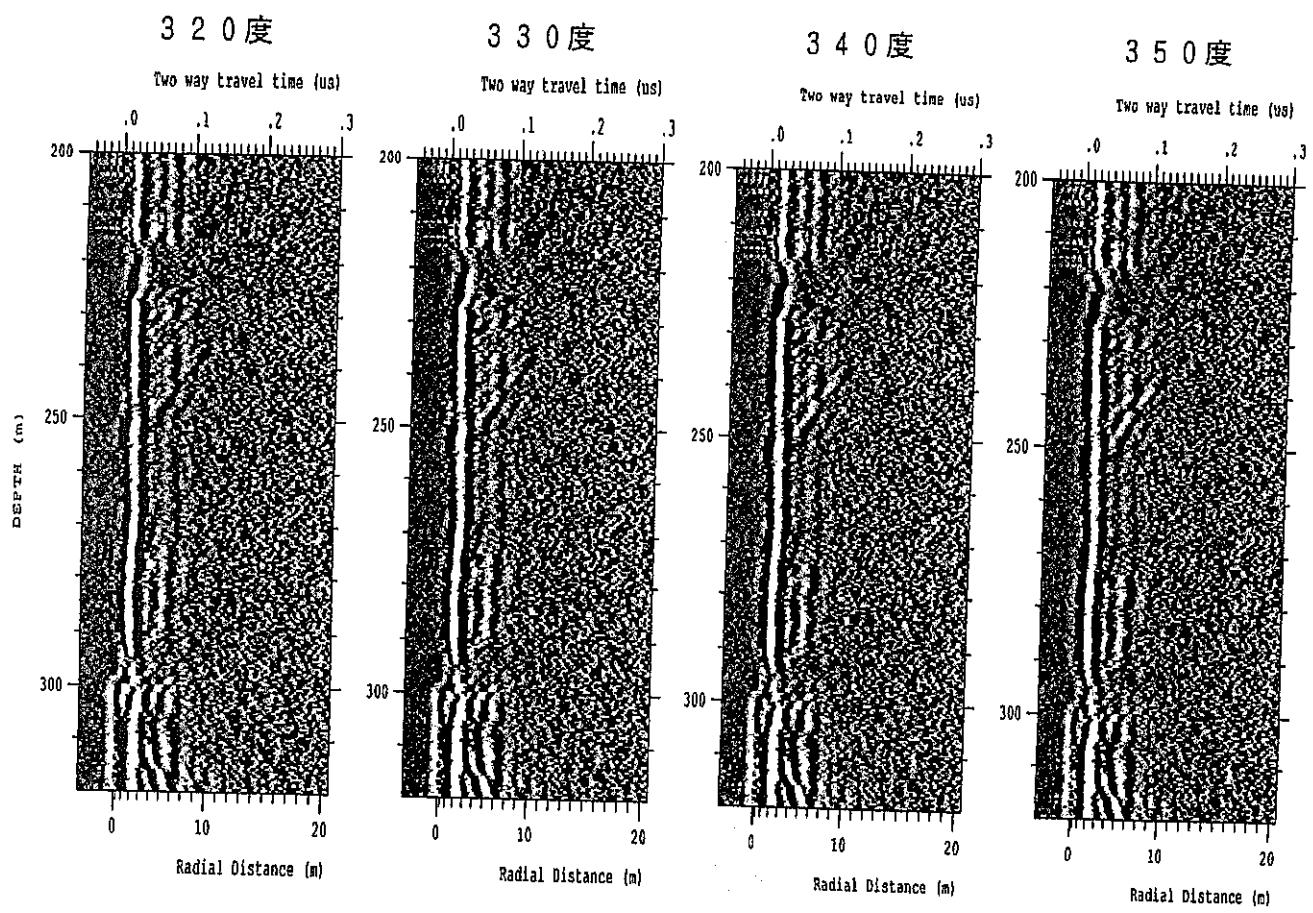


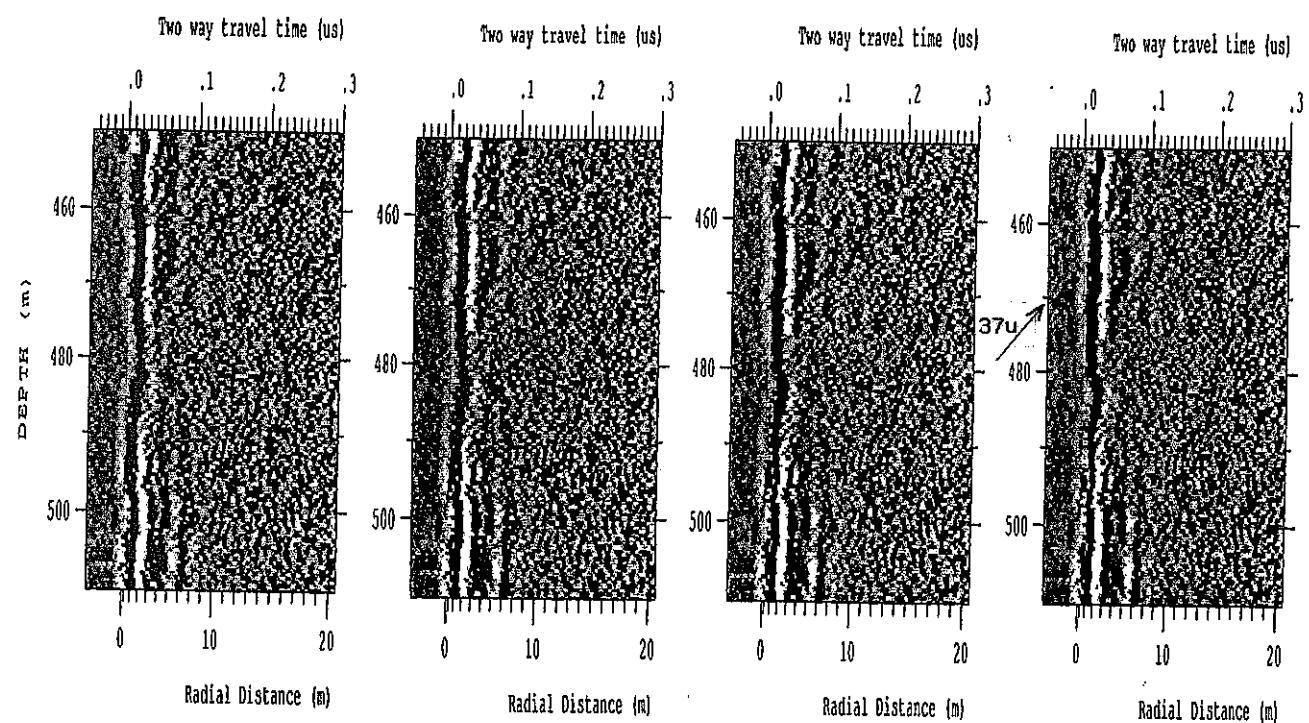
図 4.5.2.(5) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;200~320m)

0 度

10 度

20 度

30 度



40 度

50 度

60 度

70 度

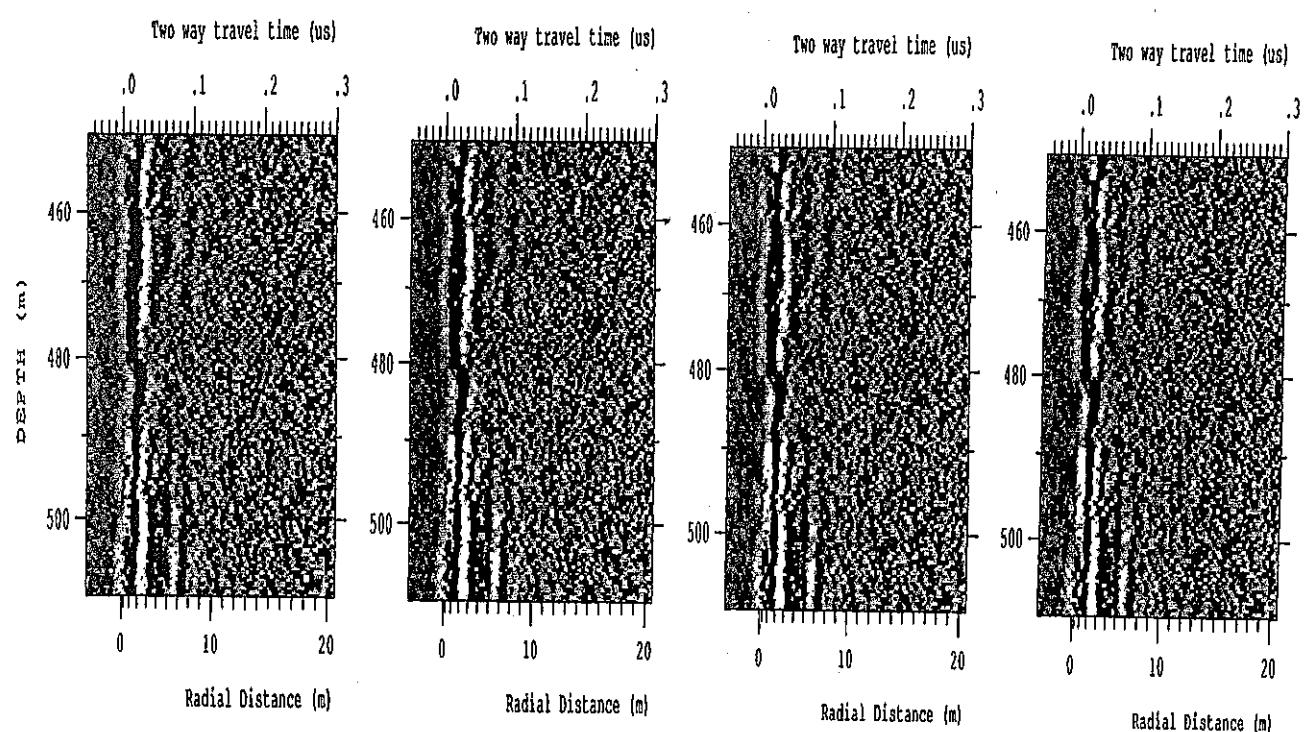


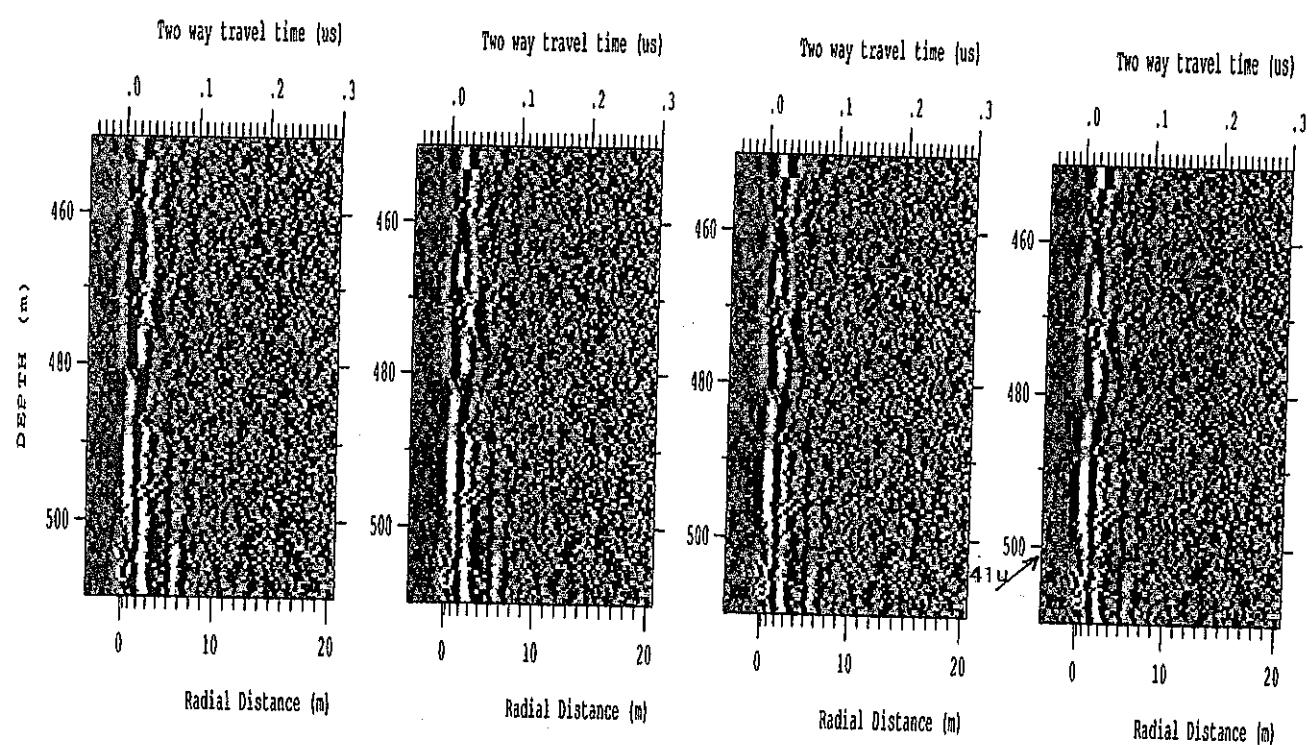
図 4.5.3.ii) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;450~510m)

80度

90度

100度

110度



120度

130度

140度

150度

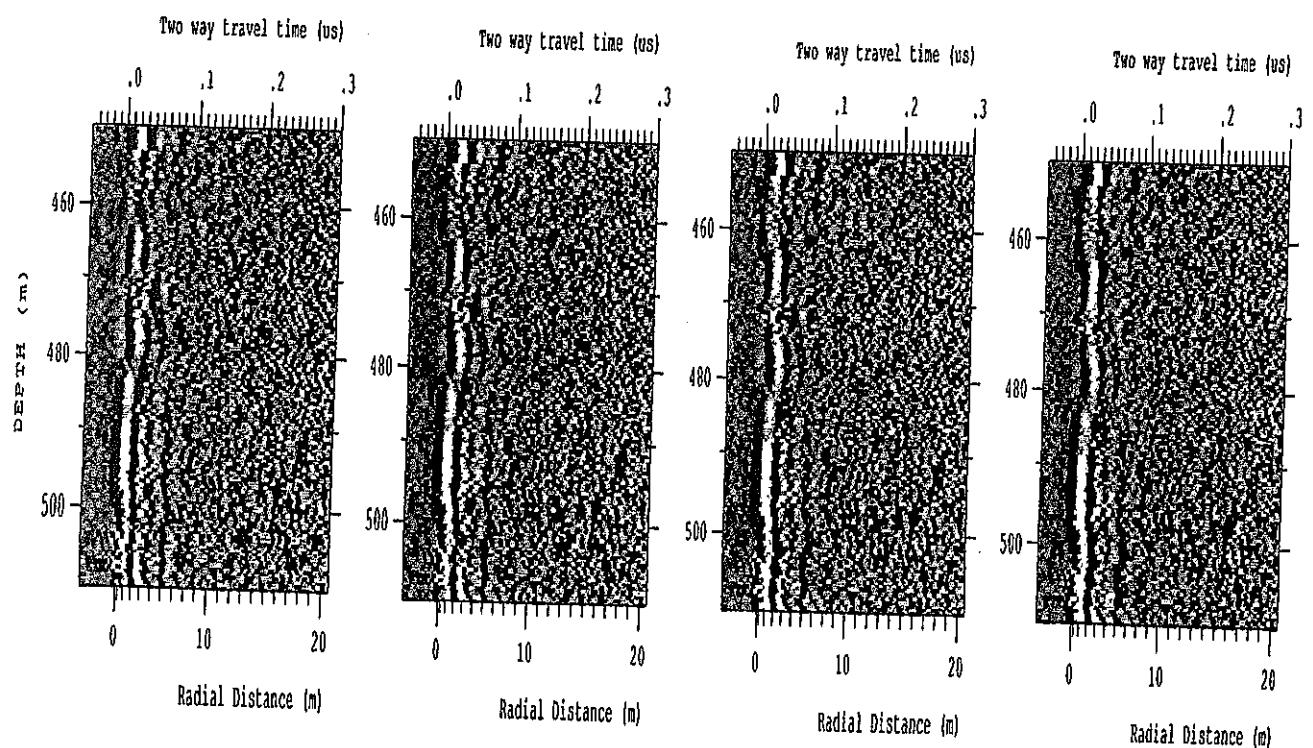


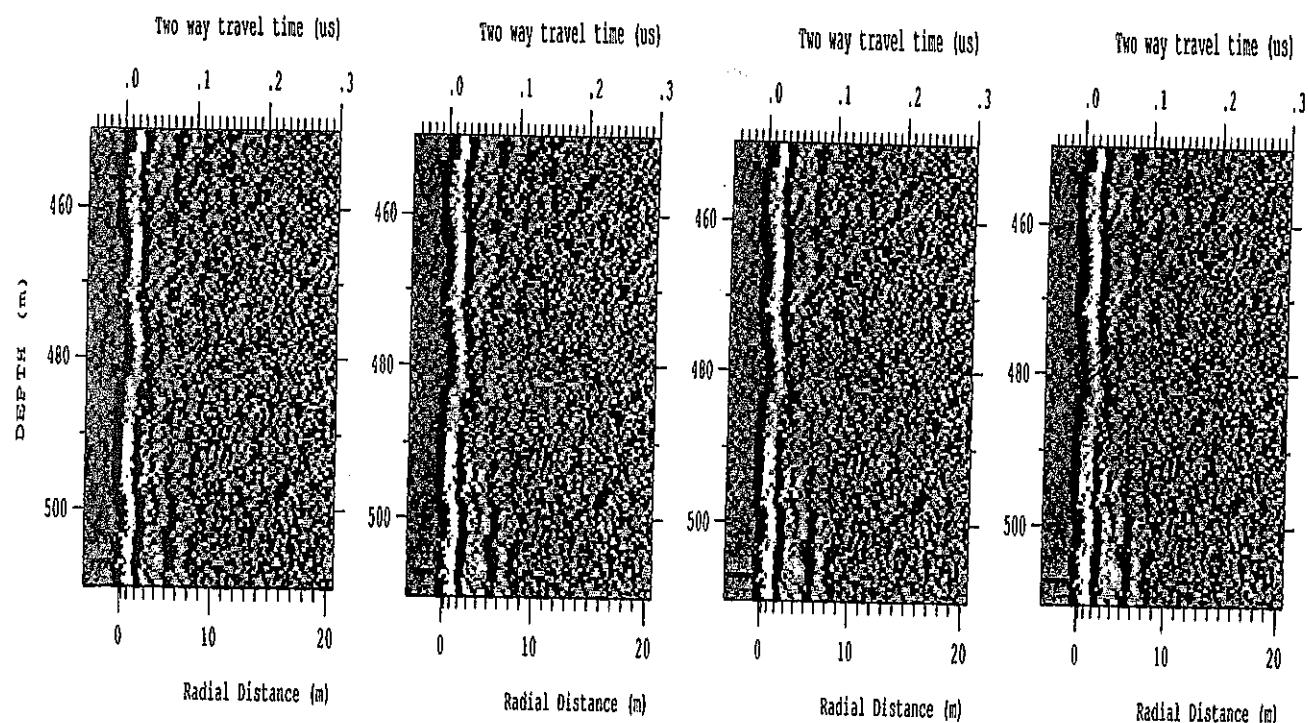
図4.5.3.(2) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;450~510m)

160 度

170 度

180 度

190 度



200 度

210 度

220 度

230 度

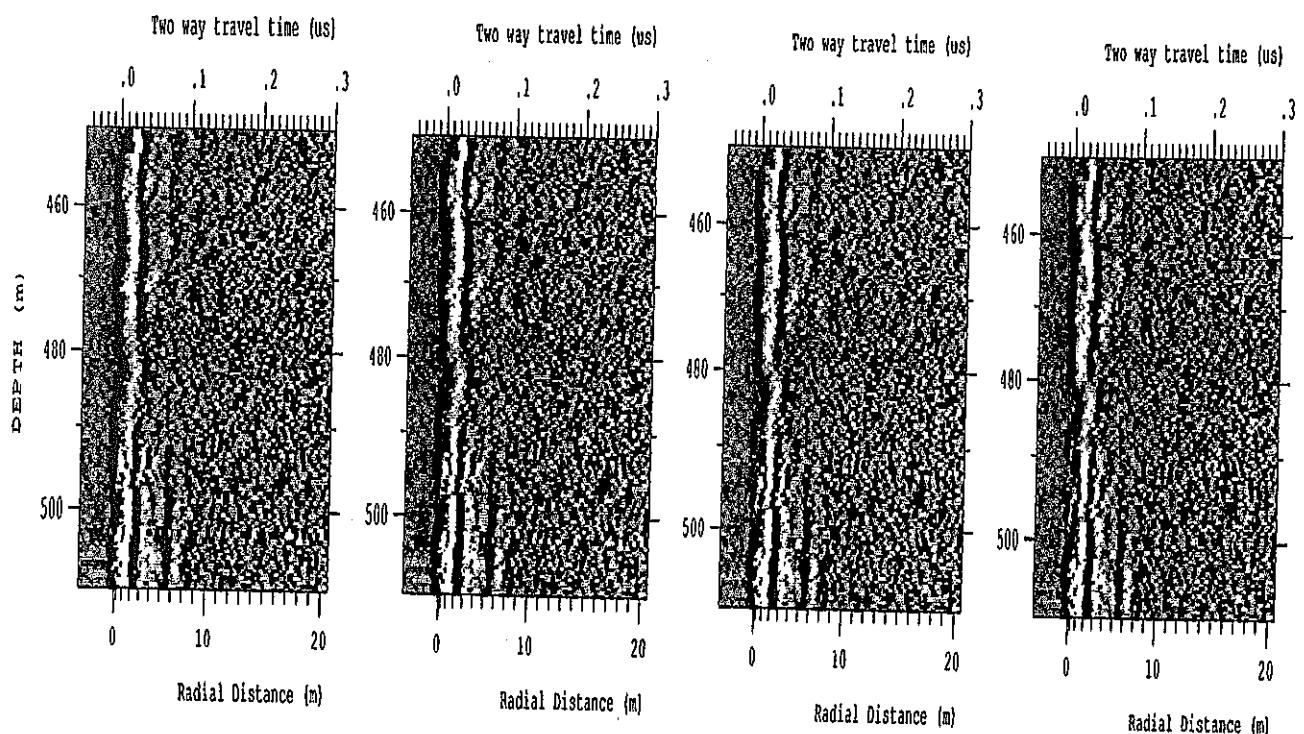
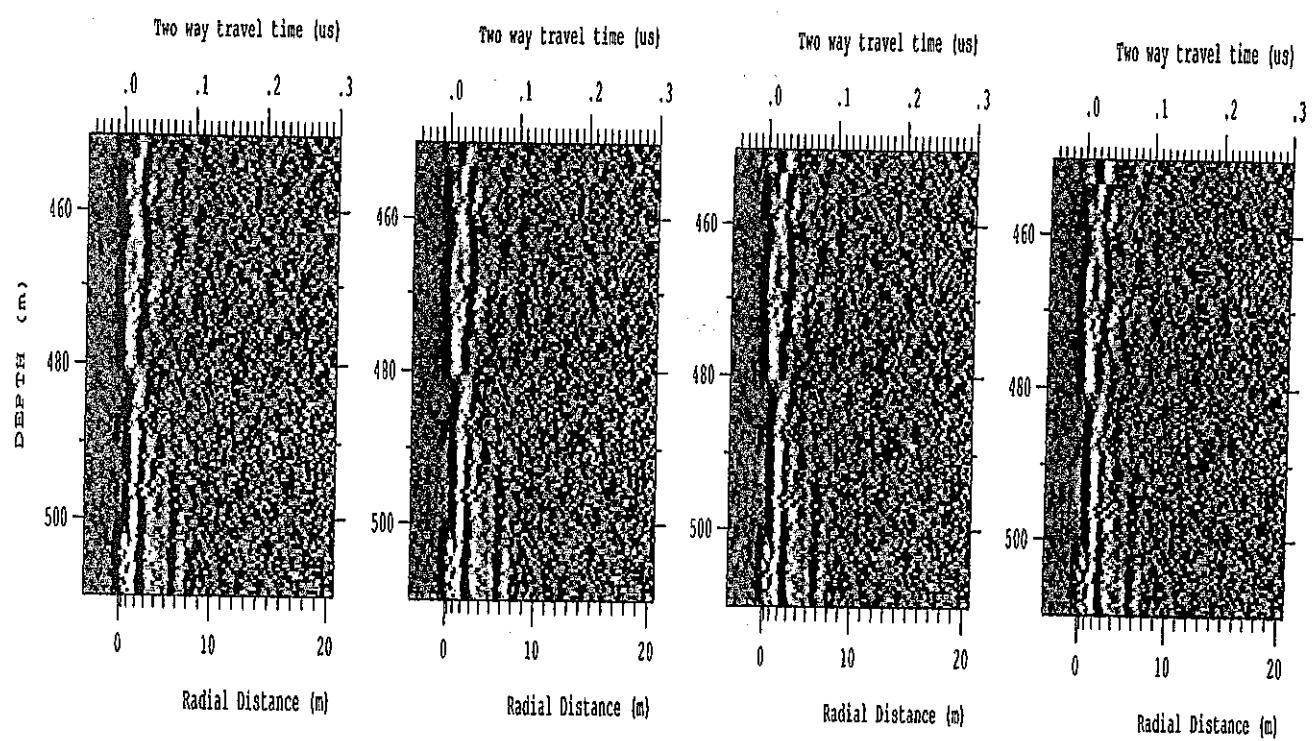


図 4.5.3.(3) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;450~510m)

240度 250度 260度 270度



280度 290度 300度 310度

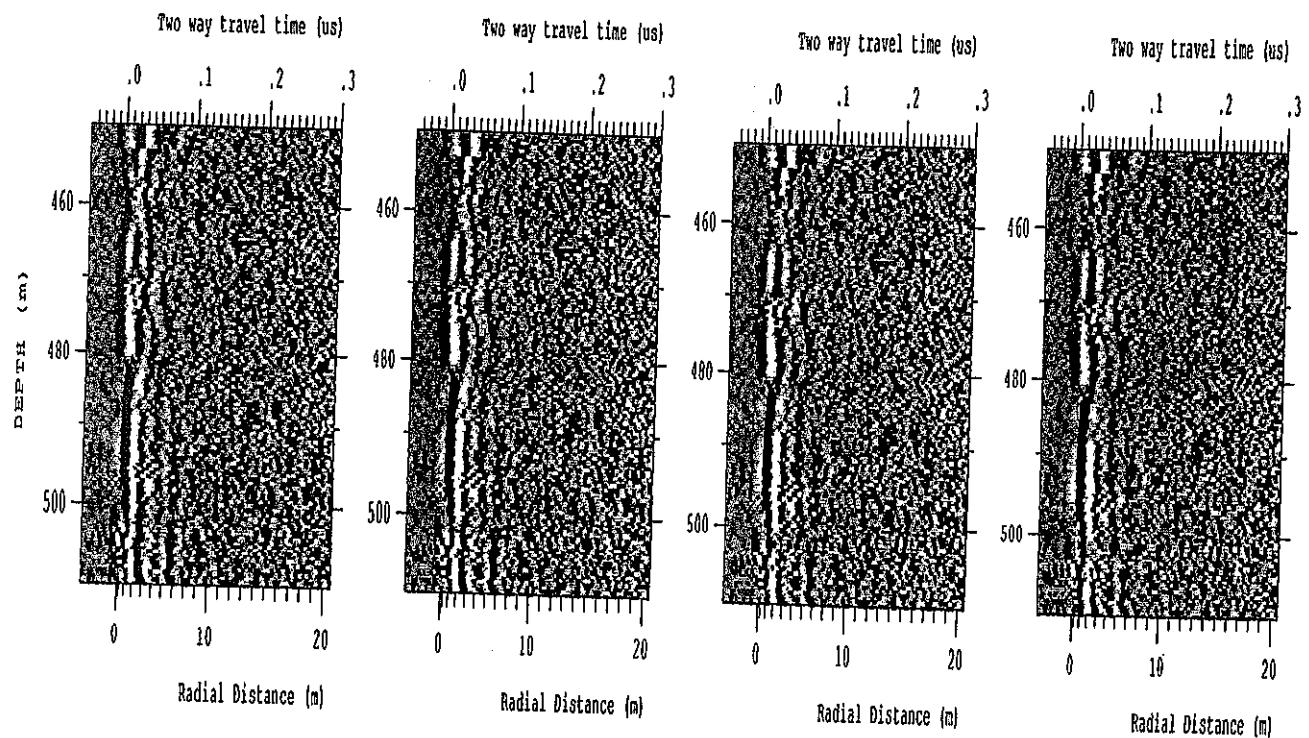


図4.5.3.4) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルタ処理;450~510m)

320度

330度

340度

350度

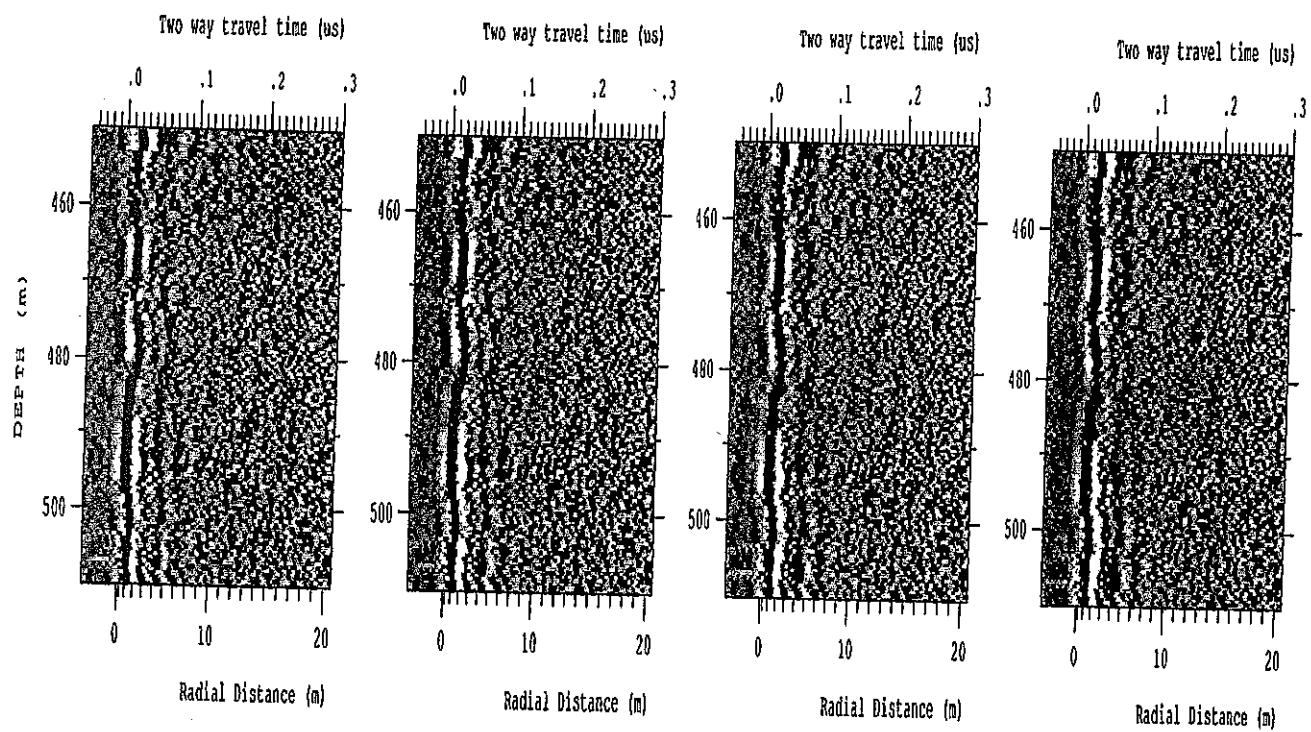


図4.5.3.(5) 指向性レーダー分割記録(10°毎;バンドパスフィルター処理;450~510m)

明瞭でないものについては 180° 反対の方位も示した。

角度は水平からの傾斜角度を示す。又、グレードについては下記のように分類した。

- A : 反射面の記録が明瞭で反射面の方位・傾斜が決定出来た。
- B : 反射面の記録がやや不明瞭だが反射面の方位・傾斜が決定出来た。
- C : 反射面の記録が不明瞭で反射面の方位は 180° 反対の反射面かどうか決定出来なかった。
- D : 反射面の記録が不明瞭で反射面の傾斜角度は決定出来たが、方位が決定出来なかった。

総解析ヶ所は60であり、そのうちグレードAは15ヶ所、Bは10ヶ所、Cは27ヶ所、Dは8ヶ所である。

解析結果一覧表中の反射面の連続長は、孔井から伸びる反射面の長さで示した。このうちアップデップに伸びるもの、ダウンデップに伸びるもの、その両方に伸びるもので分類した。反射面の連続長は必ずしも亀裂の長さを表すものでは無い。つまり、岩盤によりどれだけ電磁波が透過するかという意味合いを含んでいるためである。全体的に風化の進んだ岩盤中では反射波は不明瞭となり電磁波の透過能力も低下する。逆に、新鮮な岩盤中に亀裂が存在する条件下では電磁波の透過も大きく新鮮な岩盤と亀裂のコントラストもよく反射面は明瞭となり、反射面の連続長は長くなる。

(1)反射面の方位・傾斜角度

反射面の方位・傾斜角度の読み取りが可能であった反射面（グレードA及びB）の傾斜・方位分布図を図4.6に、また、その頻度分布図を図4.7に示した。

反射面の走向まで解析可能であった反射面（グレードA, B及びC）の走向頻度分布図を図4.8に示した。

解析された反射面の角度は $50\sim80^{\circ}$ に分布し、その傾斜方位はS70W、走向はN20Wに卓越する。

(2)反射面の拡がりとその分布

反射面の拡がりとその分布を図4.9に示した。反射面の拡がりは孔井から最大で27mに達するものがあり（深度638.9m）、これを反射面の長さで表すと102mになる。大半は孔井から10~20m以内である。また、反射面の三次元分布を図4.10に示した。

表4.2.1 指向性レーダー反射面解析結果一覧表

番号	深度 (m)	方位 (度)	角度 (度)	グレ -F	走向・傾斜	反射面の連続長(m)	
						Down Dip	Up Dip
1u	35.6	80, 260	42.6	C	N 10W 42.6NE(SW)		8.1
2u	39.9	160, 340	32.7	C	N 70E 32.7NW(SE)		3.7
3u	52.0	320	58.0	A	N 50E 58.0NW		8.7
4ud	57.1	—	54.8	D	54.8	10.9	11.9
5ud	66.7	250	55.5	B	N 20W 55.5SW	16.4	11.7
6ud	79.4	—	52.6	D	52.6	16.1	10.2
7u	91.8	200	48.5	B	N 70W 48.5SW		6.7
8u	102.6	90, 270	35.4	C	N - S 35.4E(W)		9.9
9u	105.6	—	73.5	D	73.5		26.2
10d	110.0	40, 220	62.2	C	N 50W 62.2NE(SW)	20.0	
11u	136.4	170, 350	48.2	C	N 80E 48.2NW(SE)		8.0
12d	145.5	170, 350	79.6	C	N 80E 79.6NW(SE)	70.2	
13u	162.0	320	65.2	A	N 50E 65.2NW		16.9
14u	180.1	30, 210	66.1	C	N 60W 66.1NE(SW)		19.9
15u	197.5	50, 230	61.2	C	N 40W 61.2NE(SW)		22.1
16u	214.4	0, 180	62.1	C	E - W 62.1N(S)		14.1
17u	216.2	80	75.9	A	N 10W 75.9NE		42.7
18ud	223.6	0	62.8	A	E - W 62.8N	24.1	18.9
19u	244.9	—	59.3	D	59.3		17.6
20ud	263.3	120	70.5	A	N 30E 70.5SE	59.0	28.3
21d	292.6	70	74.5	A	N 20W 74.5NE	37.7	
22d	294.3	60	77.3	A	N 30W 77.3NE	52.2	
23u	297.3	70, 250	33.8	C	N 20W 33.8NE(SW)		6.5
24d	325.6	60	66.9	B	N 30W 66.9NE	24.0	
25d	344.6	60	63.1	A	N 30W 63.1NE	23.3	
26u	353.6	70, 250	62.4	C	N 20W 62.4NE(SW)		28.7
27u	365.1	250	55.8	A	N 20W 55.8SW		18.0
28u	375.7	250	58.9	A	N 20W 58.9SW		20.9
29u	392.5	250	59.9	A	N 20W 59.9SW		28.8
30d	411.2	120, 300	63.1	C	N 30E 63.1NW(SE)	15.5	

表4.2.2 指向性レーダー反射面解析結果一覧表

番号	深 度 (m)	方 位 (度)	角 度 (度)	ル -ド	走向・傾斜	反射面の連続長(m)	
						Down Dip	Up Dip
31d	416.7	140, 320	73.1	C	N 50E 73.1SE(NW)	40.3	
32u	417.8	220	61.6	A	N 50W 61.6SW		18.9
33d	424.2	120, 300	60.4	C	N 30E 60.4SE(NW)	12.4	
34u	440.5	210	75.4	B	N 60W 75.4SW		48.7
35u	441.8	230	64.2	A	N 40W 64.2SW		21.1
36u	452.9	290	59.7	B	N 20E 59.7NW		15.9
37u	468.6	120, 300	60.1	C	N 30E 60.1SE(NW)		14.0
38d	470.2	—	73.5	D	73.5	48.6	
39u	490.1	—	69.5	D	69.5		40.2
40d	502.0	140	76.5	B	N 50E 76.5(SE)	31.9	
41u	502.3	20, 200	33.1	C	N 70W 33.1SW(NE)		4.6
42d	548.9	330	73.3	B	N 60E 73.3NW	38.3	
43d	593.4	140, 320	61.1	C	N 50E 61.1NW(SE)	9.7	
44u	595.8	160, 340	72.3	C	N 70E 72.3NW(SE)		33.9
45u	638.9	140, 320	75.3	C	N 50E 75.3NW(SE)		105.3
46u	656.8	40, 220	47.2	C	N 50W 47.2SW(NE)		11.2
47d	672.3	140, 320	81.3	C	N 50E 81.3NW(SE)	68.8	
48u	678.2	170, 350	63.2	C	N 80E 63.2NW(SE)		24.9
49d	678.9	290	68.0	A	N 20E 68.0NW	27.7	
50u	709.6	250	69.6	B	N 20W 69.6SW		28.4
51u	772.0	—	63.7	D	63.7		38.4
52u	781.1	—	55.3	D	55.3		22.1
53u	794.9	80, 260	59.2	C	N 10W 59.2SW(NE)		17.6
54u	829.5	120	58.2	A	N 30E 58.2SE		15.4
55u	841.4	210	54.5	B	N 60W 54.5SW		11.3
56u	885.6	130, 310	46.8	C	N 40E 46.8NW(SE)		13.3
57u	911.9	80, 260	70.3	C	N 10W 70.3SW(NE)		26.9
58u	923.0	130, 310	68.4	C	N 40E 68.4NW(SE)		24.8
59u	946.9	250	61.1	B	N 20W 61.1SW		14.4
60u	948.9	80, 260	77.0	C	N 10W 77.0SW(NE)		38.7

AN-1

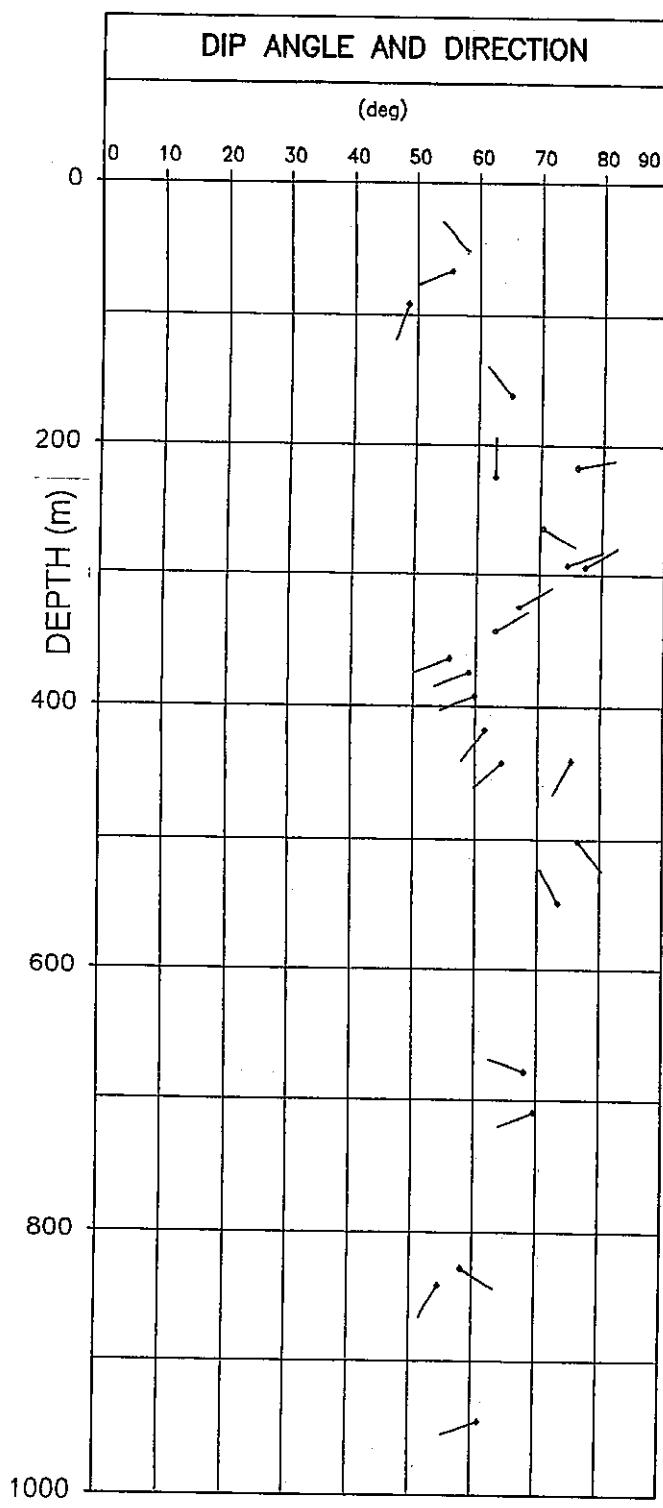


図4.6 反射面の傾斜方位分布図

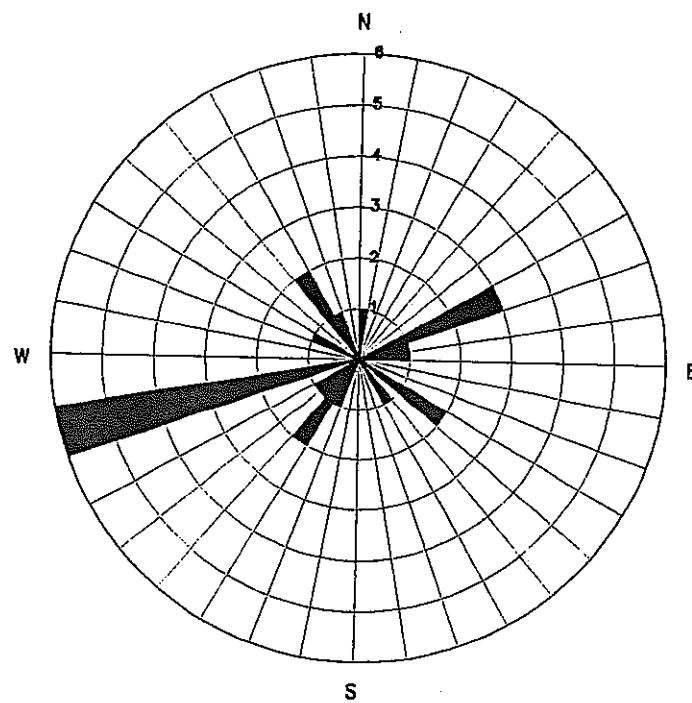


図 4.7 反射面の傾斜方位頻度分布図

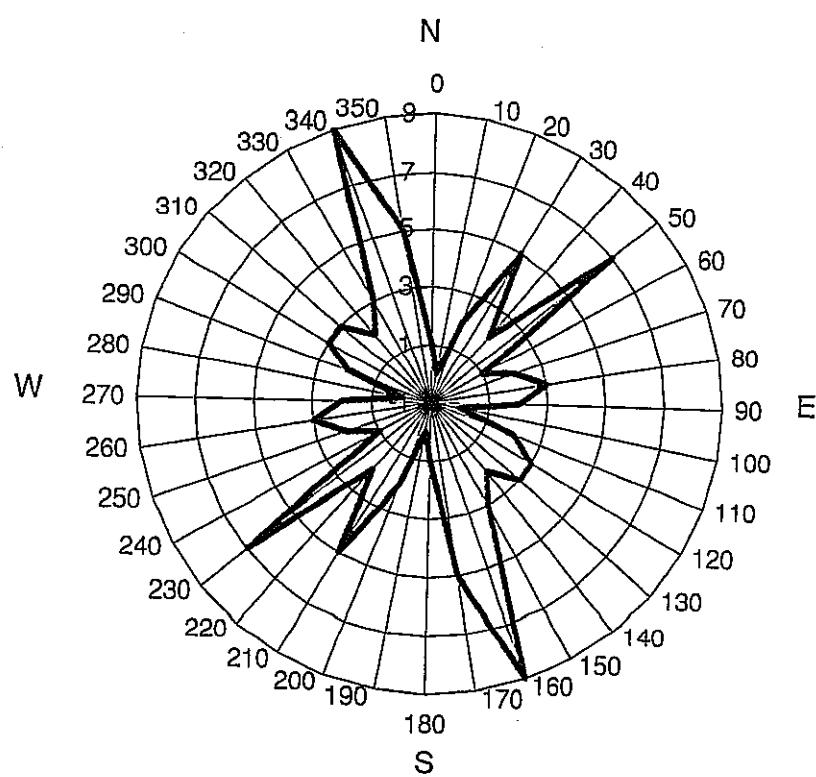


図 4.8 反射面の走向頻度分布図

AN-1 : FRACTURE MAP from Directional Borehole Radar

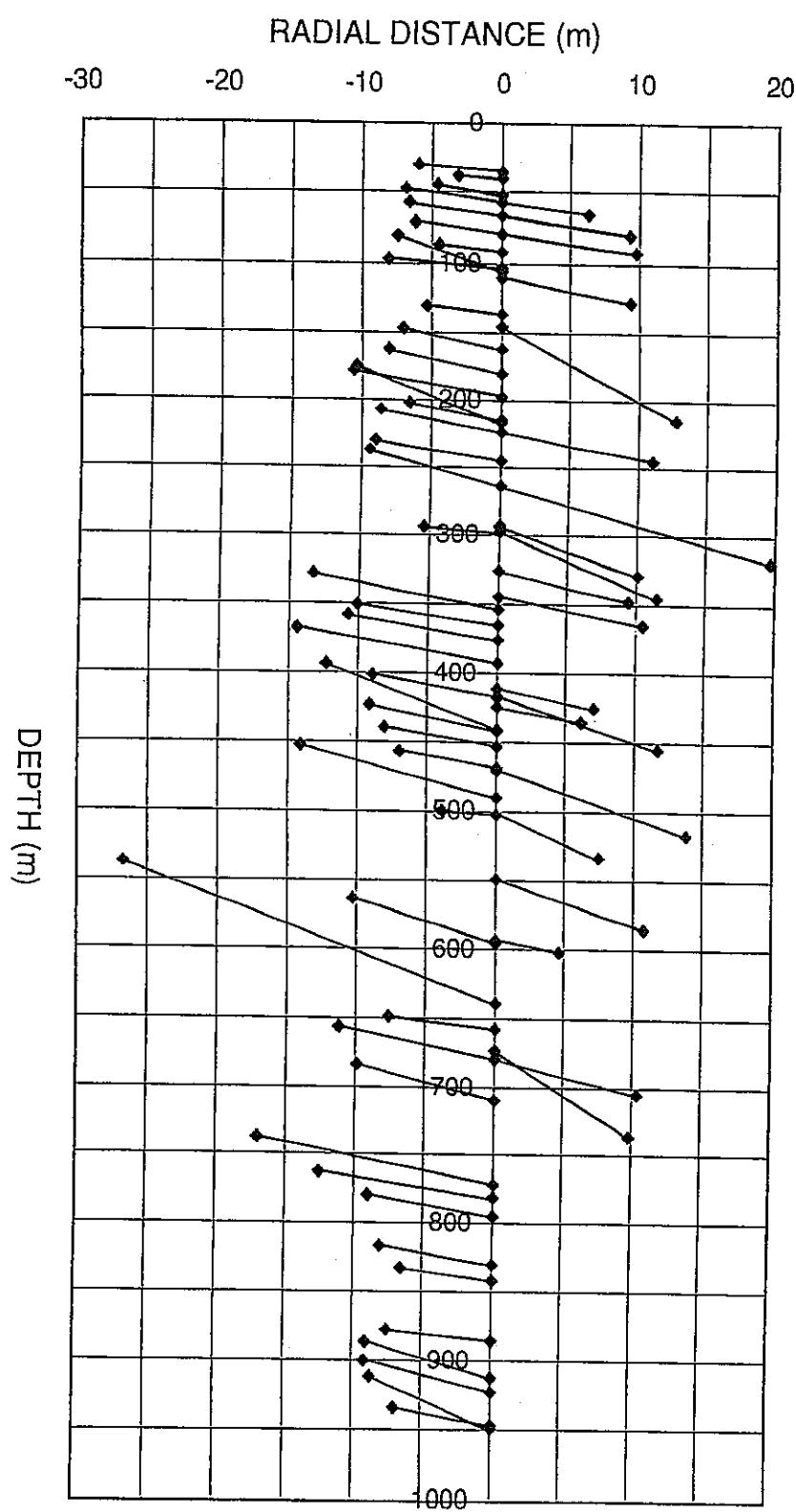


図 4.9 反射面の連続長分布図

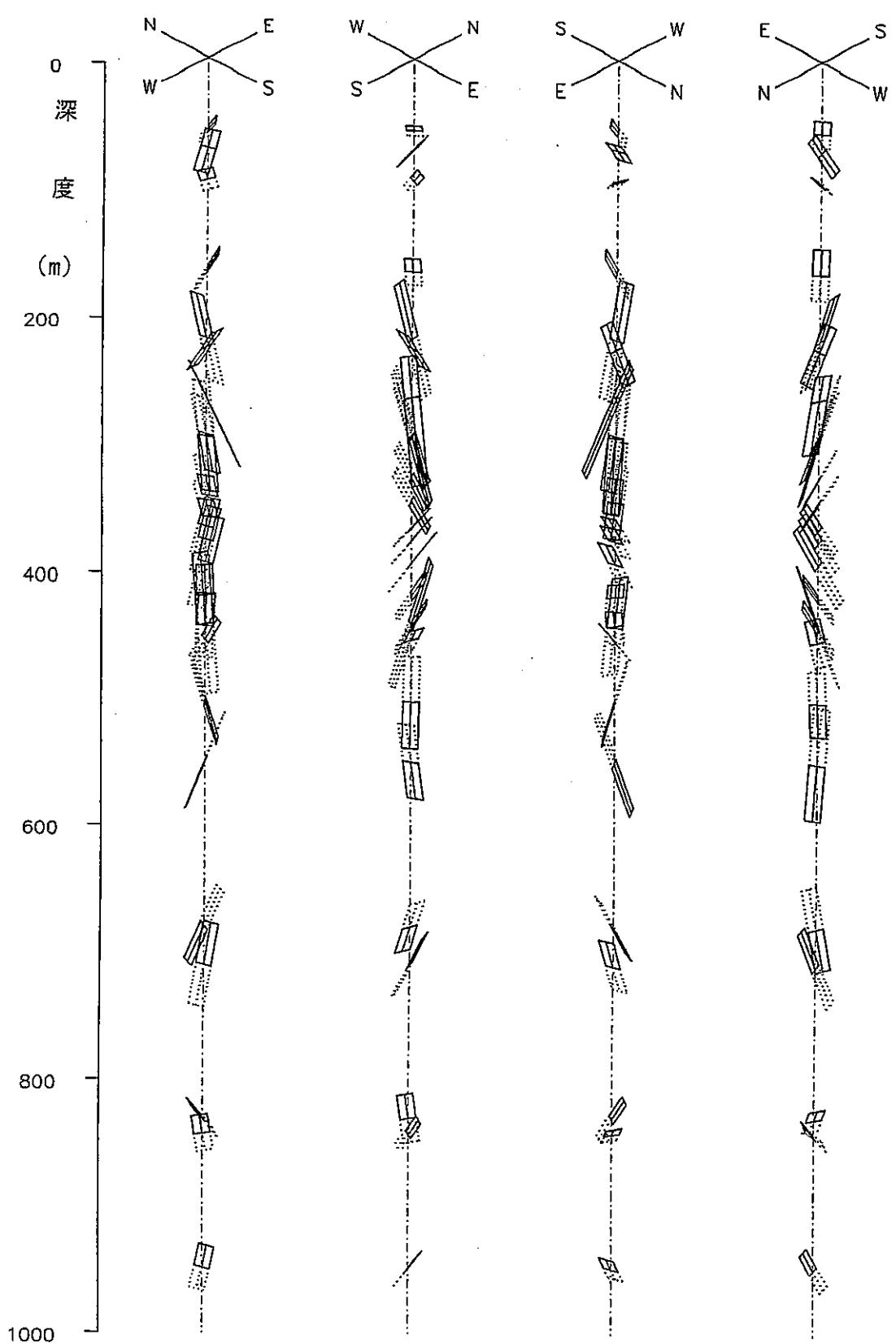


図 4.10 反射面の 3 次元分布図

5. 考察

調査結果の章で述べたように、指向性レーダー調査は、AN-1号孔の深度18.4mから960.4mの区間で測定間隔を50cmに設定して実施し、60ヶ所の反射面が抽出された。この内、反射面の走向・傾斜角度まで決定出来たものは25ヶ所であり、これらの走向はN20°Wに卓越し、傾斜角度は50~80°に分布する結果が得られた。また、反射面の連続長は最大で105mまで確認出来るものがあった。

本調査の目的である、ハイドロフォンVSPチューブウェーブデータ³⁾との比較検討を行うため、チューブウェーブ発生深度と指向性レーダーによる反射面の抽出深度を比較し、表5.1に示した。深度の比較においては、互いの深度誤差を考慮して、2mの範囲内で一致するものを対比した。また、チューブウェーブ発生深度付近で、2ヶ所に反射面があるものは、両方とも表5.1に示してある。これを1ヶ所と見なせば、チューブウェーブデータと対比可能な反射面は15ヶ所である。

表5.1 指向性レーダー反射面深度とチューブウェーブ発生深度比較表

番号	深 度 (m)	グレ -F	走向・傾斜	反射面の連続長(m)		VSP チューブウェーブ 発生深度 (m)
				Down Dip	Up Dip	
2u	39.9	C	N 70E 32.7NW(SE)		3.7	39
3u	52.0	A	N 50E 58.0NW		8.7	52
6ud	79.4	D	52.6	16.1	10.2	79
8u	102.6	C	N - S 35.4E(W)		9.9	103
13u	162.0	A	N 50E 65.2NW		16.9	164
18ud	223.6	A	E - W 62.8N	24.1	18.9	224
20ud	263.3	A	N 30E 70.5SE	59.0	28.3	264
23u	297.3	C	N 20W 33.8NE(SW)		6.5	297
30d	411.2	C	N 30E 63.1NW(SE)	15.5		411
34u	440.5	B	N 60W 75.4SW		48.7	441
35u	441.8	A	N 40W 64.2SW		21.1	441
36u	452.9	B	N 20E 59.7NW		15.9	452
37u	468.6	C	N 30E 60.1SE(NW)		14.0	467
39u	490.1	D	69.5		40.2	492
40d	502.0	B	N 50E 76.5(SE)	31.9		503
41u	502.3	C	N 70W 33.1SW(NE)		4.6	503
42d	548.9	B	N 60E 73.3NW	38.3		549

次に、反射面の走向・傾斜について対比した結果を、チューブウェーブデータと指向性レーダによる解析結果とのずれとともに、表5.2に示した。チューブウェーブデータと指向性レーダーの両者ともに、必ずしも表5.1に示した全ての反射面について、走向・傾斜が求められている訳ではないことから、対比可能な箇所は8ヶ所にとどまっている。

表5.2 指向性レーダーとチューブウェーブ深度・走向・傾斜比較表

深 度 (m)	グレ -F	走向・傾斜	反射面の連続長(m)		VSP チューブウェーブ		レーダとチューブウェーブ の深度・走向・傾斜ずれ		
			Down Dip	Up Dip	深 度 (m)	走向・傾斜	深度 (m)	走向 (°)	傾斜 (°)
52.0	A	N50E 58.0NW		8.7	52	N33W 24NE	0.0	-88	-34.0
102.6	C	N-S 35.4E(W)		9.9	103	N50W 33SW	0.4	-50	-2.4
162.0	A	N50E 65.2NW		16.9	164	N27W 60SW	2.0	-77	-5.2
223.6	A	E-W 62.8N	24.1	18.9	224	N 1E 82NW	0.4	-89	19.2
263.3	A	N30E 70.5SE	59.0	28.3	264	N16E 88NW	0.7	-14	17.5
297.3	C	N20W 33.8NE(SW)		6.5	297	N17W 65SW	-0.3	3	31.2
468.6	C	N30E 60.1SE(NW)		14.0	467	N12E 87NW	-1.6	-18	26.9
548.9	B	N60E 73.3NW	38.3		549	N83E 24NW	0.1	23	-49.3

注) 深度・傾斜ずれは指向性レーダを基準とし、走向は指向性レーダを基準とし時計回りのずれを正とした

また、走向及び傾斜のずれの分布を、縦軸を深度として図5.1に示した。指向性レーダによる反射面の走向の解析誤差は、 10° 毎にデータを読み取ることから、 $\pm 10^{\circ}$ 程度と考えられる。これを考慮すると、走向に関しては、指向性レーダーの解析結果とチューブウェーブデータとのずれは、大略的に250m以浅ではほぼ直交方向にずれており、250m以深ではほぼ一致する傾向が見られた。傾斜角度については一部を除いて 30° 以内のずれであった。傾斜角度の大きいものはチューブウェーブ解析において低傾斜角度に求め

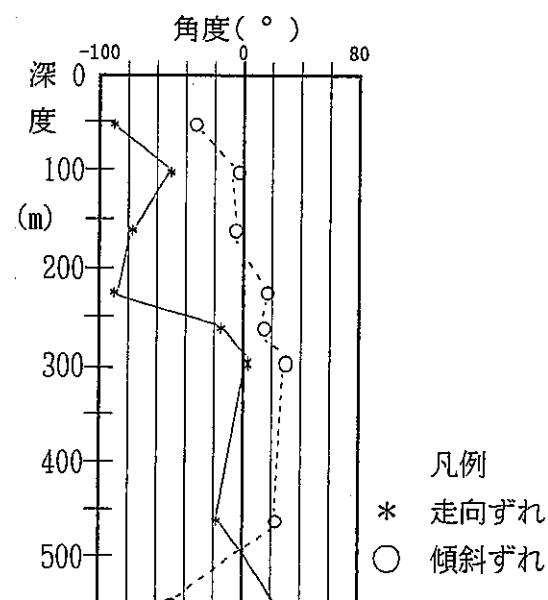


図5.1 走向・傾斜ずれ分布図

られたものに対応する。以上がチューブウェーブデータと指向性レーダの解析結果の比較である。

地質調査所／動燃の報告書³⁾において、チューブ波解析結果とボアホールテレビ記録の亀裂の傾斜・方位の比較をおこなっており、チューブ波発生深度に单一の亀裂が存在する場合には、事例が少ないが、両者の走向と傾斜角の値はほぼ一致する傾向を示したが、複数の亀裂や破碎帯が存在する場合の多くは両者の値が異なったと報告されている。そこでは、両者が一致すべきであるという観点と、一致しなくてもそれが解析上意味があるという場合について検討がなされている。一致すべきである観点では、チューブ波解析モデルが現実に則していない可能性があるとしているが、決定的なことは明らかでないとしている。一致しない場合もあるという観点では、チューブ波解析で得られる特性（数m連続する透水性のある亀裂）とボアホールテレビで見ている特性（孔壁の亀裂）が異なる為としている。

以上の報告を考慮して今回の指向性レーダとの比較を以下の3点について考察する

- ①指向性レーダーの反射面の特性とチューブ波解析による透水性亀裂の関係。
- ②指向性レーダーの反射面の走向とチューブ波解析の走向の関係。
- ③指向性レーダーの反射面の傾斜角度とチューブ波解析の傾斜角度の関係。

①については、指向性レーダーではボアホールテレビの様に孔壁の亀裂を見ているのではなく連続した亀裂をみている。上述の報告書³⁾において、チューブウェーブ解析は、孔壁から数m離れた領域までの透水性の亀裂の影響を受けている可能性があるとの記述があるが、今回、対比をおこなった反射面の連続長は概ね9m以上であることから、亀裂の連続性という観点からは、この考え方をサポートする一つの知見であると考えられる。ただし、レーダーで抽出される反射面は必ずしも透水性のある亀裂で無い場合（例えば比誘電率の異なる貫入岩や粘土でシールされた割れ目帯が上げられる。）もあり、一般的には、レーダー調査から直接、透水性の亀裂に関する議論はできない。しかし、今回の場合は、均一な花崗岩であり、ボアホールテレビ等から亀裂が確認されていることより、レーダーで確認された反射面は連続した透水性の亀裂によるものと考えられる。従って、今回比較されたチューブウェーブは、約9m以上の広がりを有する透水性の亀裂から発生しているものと考えられる。

②の走向に関するずれについて解析誤差を考慮すれば、大略的に一致した。但し約250m以浅部ではほぼ90°のずれがあった。これが偶然なのか、何か理由があるのかは不明である。レーダー調査において、ある深度を境にして解析結果が90°ずれるということは考えられないで、チューブ波解析モデルが浅部の風化・変質部（岩盤が不均質）の影響により現実に則していないのかもしれない。

③の傾斜角度のずれについて検討する。レーダーの解析において、岩盤の電磁波速度を一定として解析しているため、例えば、10%の速度変化を仮定すると、数°以内の誤差が含まれる。個々の反射面について検討すると、反射面の連続長が短い場合（297.3mの反射面）は、読み取りによる解析誤差が大きくなる可能性が考えられる。他に、チューブウ

エーブとレーダーによる傾斜角度のずれの大きいものはチューブウェーブで低角度(24°)として解析されたものである。この低角度をレーダーで解析するのは難しく、レーダーでは同じ深度でチューブウェーブが発生している亀裂とは、異なる亀裂を見ている可能性が考えられる。以上の3ヶ所を除けば誤差は概ね 25° 以内のずれに納まっている。

6. おわりに

本報告書は、ハイドロフォンVSP調査法技術開発の一環として、ハイドロフォンVSPデータから推定された透水性割れ目の方向や連続性(3次元的広がり)を異なる手法で確認することを目的として、AN-1号孔において指向性レーダ用いたシングルホール調査を実施した結果をまとめたものである。

VSPハイドロフォンチューブウェーブ発生深度と指向性レーダの反射面深度は15ヶ所で一致した。そのうち反射面の方位が対比可能なものは8ヶ所であった。

この8ヶ所について比較検討した結果、レーダーの解析誤差を考慮すれば、走向では約250m以浅では 90° のずれ、250m以深では概ね一致した。傾斜についてはレーダーの反射面の短いものや、チューブウェーブ解析による低角度のもののずれが大きい。それ以外では概ね 25° 以内のずれである。

走向の 90° ずれや傾斜のずれについては、その決定的な理由は不明であった。

今後、レーダーの結果との詳細な対比については、チューブウェーブの解析誤差等について検討が必要であると思われる。

参考文献

- 1) RADINTER MANUAL ABEM AB 1990
- 2) 検層技術説明書 (株) 物理計測コンサルタント 1981
- 3) 地質調査所／動燃事業団 (1997):マルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の亀裂性岩盤の適用試験(その2)
- 4) 木口努・伊藤久男他 (1996):ハイドロフォンVSPによる野島断層の透水性評価
物理探査学会第94回学術講演論文集 P.44-47