

ボアホールレーダの我が国における
花崗岩岩盤への適用試験

1989年11月

仙波 毅 尾方伸久 坪田浩二

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所

岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31

TEL 0572-54-1271 FAX 0572-55-4114

ボアホールレーダの我が国における花崗岩岩盤への適用試験

仙波 毅
尾方 伸久
坪田 浩二

要 旨

レーダ法は、波長の短い電磁パルスを岩盤内に発信させ、電磁波の速度や減衰の変化に着目して岩盤中の割れ目の方向や幅を調査する方法のひとつである。

動燃事業団は、1988年度スウェーデンで開発された試錐孔内用レーダシステム (RAMAC) を導入したが、今回RAMACシステムを用いて岐阜県東濃地域の花崗岩に掘削された試錐孔においてシングルホール試験 (反射法試験) (深度450m~975m) を行い、その解析結果と岩芯観察結果との比較検討を試みた。なお、今回の試験で使用したアンテナの中心周波数は20MHzである。その結果、

- (1)レーダ反射図を見ることにより、その深度における割れ目の多さを定性的に知ることができる。
 - (2)レーダ探査は、岩芯観察と比べて分解能が低いため一本一本の割れ目を観察することはできないが、顕著な割れ目帯がどのような深度でどのように連続しているかを知ることができる。
- の2点についてわかった。

Application of borehole radar system to granitic rock in Japan

Takeshi SEMBA, Nobuhisa OGATA
and Koji TSUBOTA

ABSTRACT

The radar technique is one of the methods to obtain geometric information of fracture zones in rock masses. The orientation and width of fractures are mapped as variation of velocity and attenuation of electromagnetic waves.

In 1988, PNC introduced a borehole radar system (RAMAC) developed in Sweden. Singlehole reflection measurements were performed with this system in a borehole in the granite at Tono area in Gifu prefecture (depth:450m ~975m).

Integrated analysis on the result was carried out in the combination of the core logging data. Twenty MHz antenna was used as the center frequency in the measurement.

The following conclusions were obtained from the result of that analysis.

- (1) It is possible to identify geometry of the fractures system at some depth on the radar reflection map.
- (2) By the radar technique, it is not possible to detect each fracture but fracture zones, because the resolution of the radar with several metres is lower than that of core observation with several centimetres.

目 次

| | |
|---------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. RAMACシステム | 2 |
| 3. 試験の概要 | 5 |
| 3.1 目的 | |
| 3.2 試験の地域 | |
| 3.3 対象地域 | |
| 3.4 試験期間 | |
| 4. 試験方法 | 6 |
| 5. 試験結果 | 9 |
| 6. 岩芯観察結果との比較 | 24 |
| 7. まとめ | 33 |
| 8. 参考文献 | 33 |

1. はじめに

我が国の地層処分において花崗岩は重要な岩種の一つである。その性能評価に必要な深部地下における水理特性については、他の国々に比べまだデータは十分でなく不明な点が多い。我々の目標はその特性を明らかにすることに加え、そのための効率的で精度の高い、すなわち最適な調査手法を確立することにある。現在は、その水理特性を把握するため様々な手法を適用する段階にある。そのような手法の中で、レーダ法は岩盤の水理パラメータの空間的分布を知るうえで、現在最も実用的で有力な手段の一つと考えられているものである。

レーダ法は、波長の短い電磁パルスを岩盤内に発信させ、電磁波の速度や減衰の変化に着目して、岩盤中の割れ目の方向や幅を調査する方法である。電磁波は岩盤内で透過力が強く、岩盤物性変化に対する特性変化が大きいことなどから、この方法は地質環境を限られた場所から非破壊的に詳細な調査を行うのに適した手法の一つであると考えられる。

動燃事業団は、1988年度スウェーデン廃棄物管理公社（SKB）が開発した、試錐孔内用レーダシステム（RAMAC）を導入したが、今年度RAMACシステムを用いて岐阜県東濃地域の花崗岩（AN1号孔；深度1000m）において、シングルホール試験（反射法試験）を行った。AN1号孔では、岩盤の水理特性調査の観点から、それと岩盤中の割れ目の性状・割目充填鉱物の性状・母岩の変質形態との関係を明らかにするために岩芯観察、物理検層が行われており、ここでの試験結果とそれらの対比が可能である。

今回は、RAMACシステムの岩芯観察結果に対する適合性を調べるために比較検討を行ったので、その結果について報告する。尚AN1号孔の深度0～450mについては既に佐久間・坪田（1988）が予備調査を行っているので、ここでは450m以深について報告する。

2. RAMACシステム

RAMACシステムは、OECD/NEAの高レベル放射性廃棄物処分に関するストリパプロジェクトの機器開発の一環として開発された孔内用レーダ法機器であり、次の5つのパートから成る。

- (1)マイクロコンピュータ・・・20MByteハードディスクと5インチフロッピーディスクを持つ、測定制御、データ保存、データ表示、データ解析装置。
- (2)コントロールユニット・・・サンプリングのタイミングとスタッキング制御装置。
- (3)トランスミッタ・・・波長の短いレーダパルス発信装置。
- (4)レシーバ・・・レーダパルス受信とデジタイズ装置。
- (5)ケーブルウインチ・・・プローブとコントロールユニットを接続し、光ファイバケーブルを持ったモータ稼働の装置。

また、このシステムの特徴として次の6つが挙げられる（佐久間・坪田，1988）。

- (1)トランスミッタとレシーバは、直接接続しておらず、どちらのプローブもコントロールユニットと接続されている。よって、シングルホールとクロスホールの両方で使用可能である。
- (2)プローブから地表機器へのデータの転送は、光ファイバケーブルを用い、ケーブルを伝わるノイズをなくしている。
- (3)ダイナミックレンジは150dBであり大きい。
- (4)システムの利得は正確にキャリブレーションが可能であり、電磁波の減衰に関するトモグラフィ処理が可能である。
- (5)電磁波伝播速度を絶対時間で測定できるので、電磁波の速度に関するトモグラフィ処理が可能である。
- (6)生データをリアルタイムで出力することができ、測定現場でデータの品質管理や結果の検討ができる。

ここで、トランスミッタとレシーバのブロックダイアグラムをFig. 2.1に、RAMACシステムの詳細な技術的仕様をTable 2.1にそれぞれ示す。

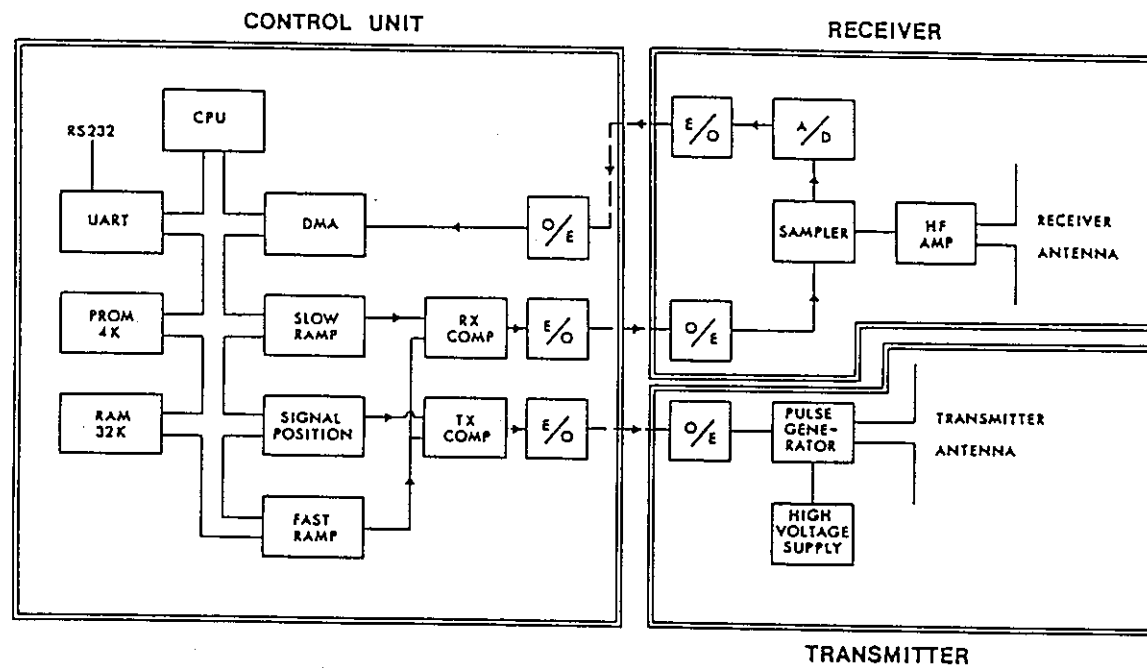


Fig. 2.1 RAMACシステム構成図

Table 2.1 RAMACシステムの技術的仕様

| | |
|--|--------------|
| <u>General</u> | |
| Frequency range | 20-80 MHz |
| Total dynamic range | 150 dB |
| Sampling time accuracy | 1 ns |
| Maximum optical fiber length | 1000 m |
| Maximum operating pressure | 100 Bar |
| Outer diameter of transmitter/receiver | 48 mm |
| Minimum borehole diameter | 56 mm |
| <u>Transmitter</u> | |
| Peak power | 500 W |
| Operating time | 10 h |
| Length | 4.8 m |
| Weight | 16 kg |
| <u>Receiver</u> | |
| Bandwidth | 10-200 MHz |
| A/D converter | 16 bit |
| Least significant bit at antenna terminals | 1 μ v |
| Data transmission rate | 1.2 MB |
| Operating time | 10 h |
| Length | 5.4 m |
| Weight | 18 kg |
| <u>Control unit</u> | |
| Microprocessor | RCA 1806 |
| Clock frequency | 5 MHz |
| Pulse repetition frequency | 43.1 KHz |
| Sampling frequency | 30-1000 MHz |
| No of samples | 256-4096 |
| No of stacks | 1-32767 |
| Time window | 0-11 μ s |

3. 試験の概要

3.1 目的

RAMACシステムを用いてシングルホール試験を行い、RAMACシステムで得られた結果の、岩芯観察結果に対する適合性を調べる。

3.2 試験内容

RAMACシステムには中心周波数が20MHzのアンテナと60MHzのアンテナの2種類があるが、今回は中心周波数20MHzのアンテナを用いて、正馬様洞AN1号孔においてシングルホール試験を行った。

試験はAN1号孔深度450mから975mまで1m毎に行った。

得られたデータを解析し、岩芯観察結果との比較を試みた。

3.3 対象地域

岐阜県瑞浪市正馬様洞AN1号孔深度450m～975m。

3.4 試験期間

1989年 4月19日(水) ～ 4月21日(金)

4. 試験方法

シングルホール試験は、トランスミッタとレシーバを同一孔内に降ろし、一定間隔でプローブを下降あるいは上昇させたときそれぞれ測定を行い、割れ目の方向や連続性を調べる方法である（佐久間・坪田, 1988）。このとき、トランスミッタとレシーバはガラスファイバー棒で接続され一定間隔に保たれている。

割れ目の方向と連続性は、トランスミッタで発信された電磁波が割れ目で反射しレシーバで受信されたとき、その伝播時間と、そのときのプローブの位置をそれぞれ求めることにより求められる。

Fig. 4.1に電磁波が割れ目で反射したときの様子と解析結果の模式図を示す。

図に示すように孔と割れ目が交差していれば、解析結果はハの字型となって現れる。

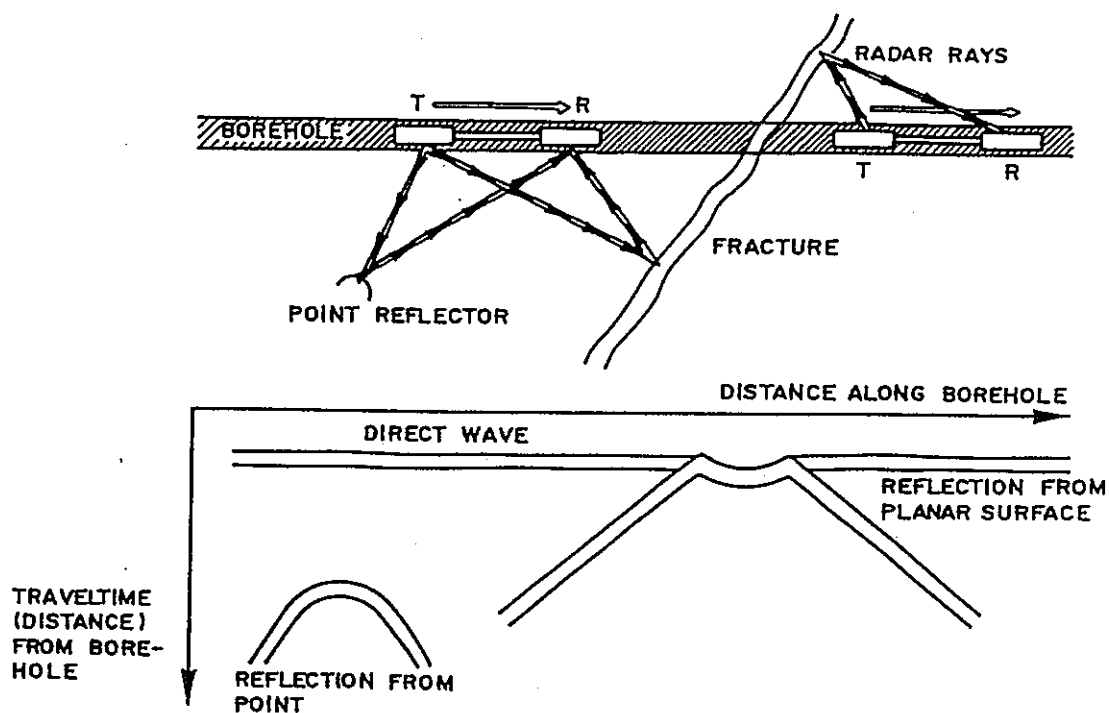


Fig. 4.1 電磁波が割れ目で反射したときの様子と解析結果の模式図

今回の試験では、トランスミッタとレシーバ間のグラスファイバー棒の長さを4mとし、測定は深度450mから975mまで1m毎にそれぞれ行った。

Fig. 4.2に孔内に降ろしたときのプローブの様子を示す。

Table 4.1に測定仕様を示す。

Table 4.1 測定仕様

| | | |
|----------------------------------|---------|-----|
| Sampling frequency: | 253.883 | MHz |
| Number of samples: | 512 | |
| Number of stacks: | 128 | |
| Transmitter receiver separation: | 9.3 | m |
| Measurement point separation: | 1 | m |
| Logged depth: | 450-975 | m |
| Total number of measured traces: | 526 | |

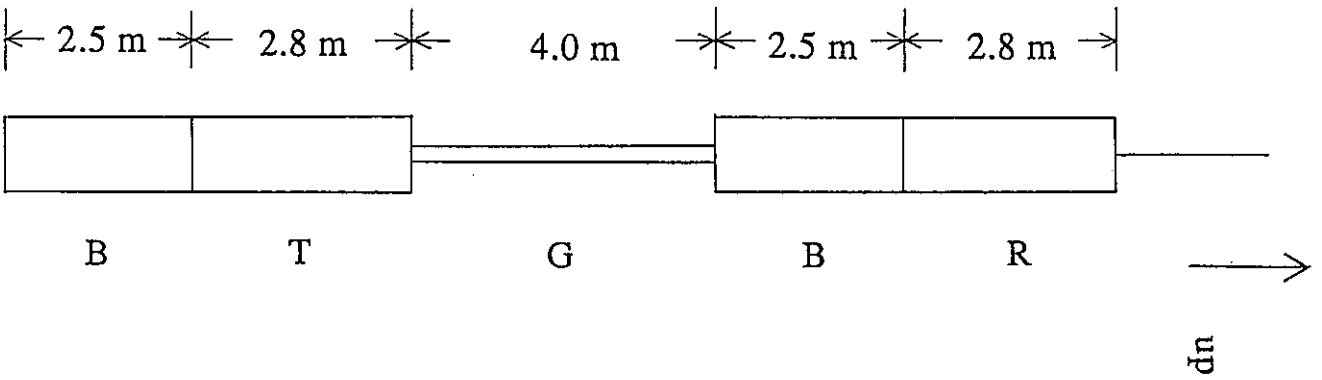


Fig. 4.2 RAMACフローザ

- R: レシーバ
- T: トランスミッタ
- B: バッテリー
- G: グラスファイバ棒

5. 試験結果

Table 4.1の仕様で測定した結果(レーダ反射図)をFig. 5.1に示す。ここで、Fig. 5.1の縦軸は深度であり、また横軸は往復伝播時間および岩盤内を伝播する電磁波の速度が120 m/ μ secで一定であるとしたときの片道伝播距離を示している。なお、Fig. 5.1はDCレベルのみを調整したものである。

レーダ反射図は白と黒の強弱で表されているが、白で表されている範囲はレーザで捕られた電磁波の振幅が100unitsより小さい部分を、黒で表される範囲は振幅が100unitsより大きい部分をそれぞれ示している。

Fig. 5.1を見ると、例えばFig. 5.4の割れ目No. 1の様に割れ目の存在をはっきりと確認し難い。これは、例えばFig. 5.2の周波数スペクトルに示すように、低周波のノイズが強いためである。

そこで、低周波および高周波成分をできる限り除き、必要な周波数のみで解析できるようにバンドパスフィルタをかける。フィルタをかけた後の周波数スペクトルをFig. 5.3に示す。

Fig. 5.3は、10MHz \sim 45MHzを解析に使用する周波数としたときの結果である。

Fig. 5.2とFig. 5.3は同じ深度で測定したものであり、両者を比較すると、Fig. 5.2はFig. 5.3の10MHz未満の周波数と45MHzより大きい周波数におけるノイズをカットしたものであることがわかる。

ここで、Fig. 5.1にこのフィルタをかけたものをFig. 5.4に示す。Fig. 5.4の縦軸および横軸はFig. 5.1と同様である。

Fig. 5.4より、No.1 \sim No.22の割れ目が認められるが、それぞれの割れ目が試錐孔と交差する深度と図で見掛け上割れ目が消えると思われる深度との間隔、および見掛け上割れ目が消えると思われる深度における電磁波の伝播時間により、試錐孔と割れ目とのなす角を求めることができる。

ここで、No.1 \sim No.22のそれぞれの割れ目が試錐孔となす角をTable 5.1に示す。

なお割れ目の傾斜角度は、90度からこの値を引けば求められる。

Fig. 5.5に深度500mから50m毎の受信波形とその周波数スペクトルを示す。

Fig. 5.4をみると、深度450m \sim 575mと深度800m以深で図が乱れていることがわかる。

これは、岩盤内部に破碎帯のような低比抵抗帯が存在していることを示している。

Fig. 5.5の周波数スペクトルで、大規模な破碎帯の存在する深度500m, 550mのものは、破碎帯がないと考えられる深度750mのものとを比較すれば、そのAmplitude(振幅)は、かなり小さくなっていることがわかる。また深度750mのものは、振幅の最大値をとる周波数は20MHzであるのに対し、深度500m, 550mの最大値をとる周波数は20MHzより低周波側に移動していることがわかる。しかもこのときの受信波形をみると、深度500m, 550mの振幅は深度750mのものと比較して小さくなっており、また波形自体が単純になっている。これは、電磁波が破碎帯のような低比抵抗帯を通過する際減衰したためである。

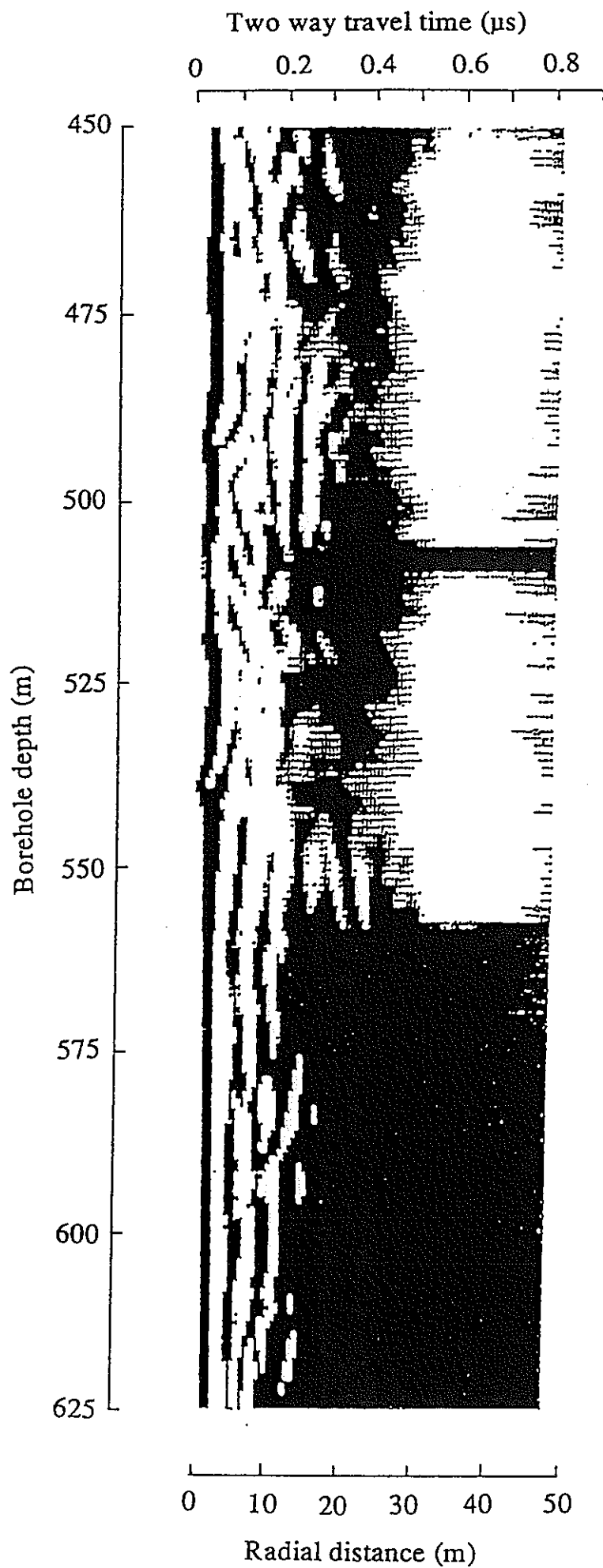


Fig. 5.1a レーダ反射図 (450 m~625 m ; DCレベルのみ調整)

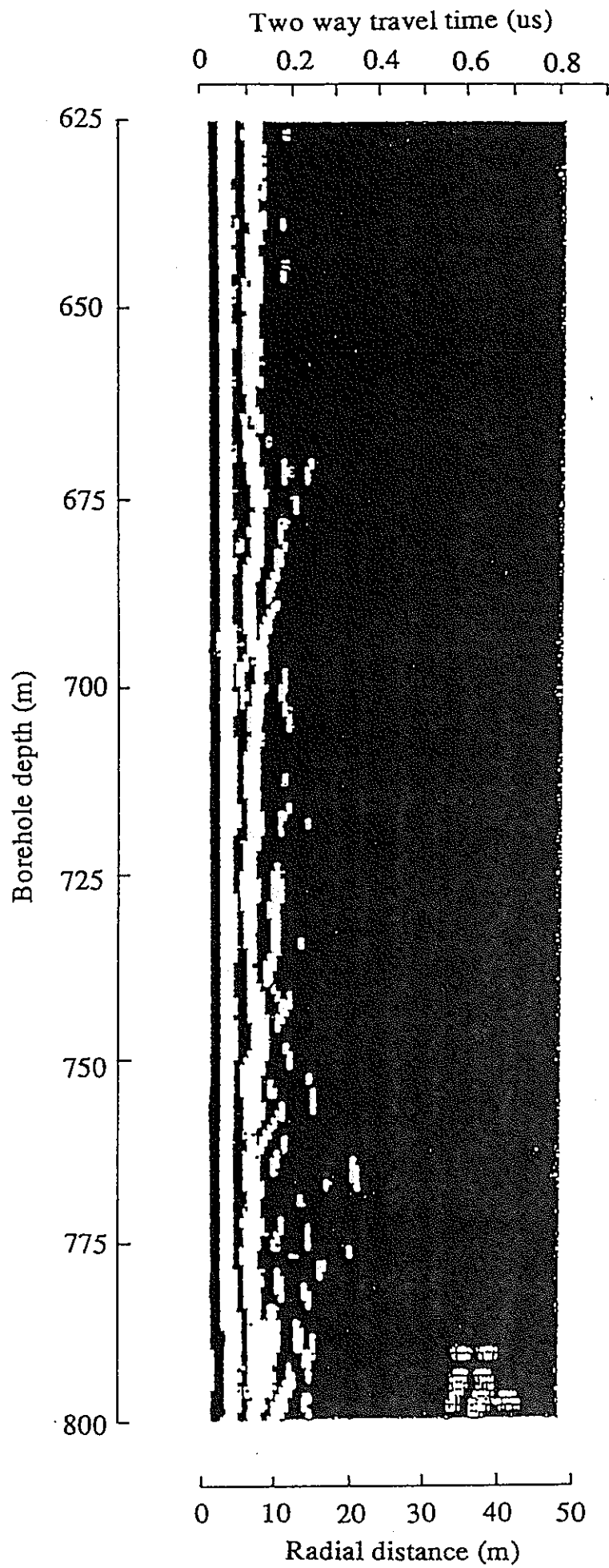


Fig. 5.1b レーダ反射図 (625 m~800 m ; DCレベルのみ調整)

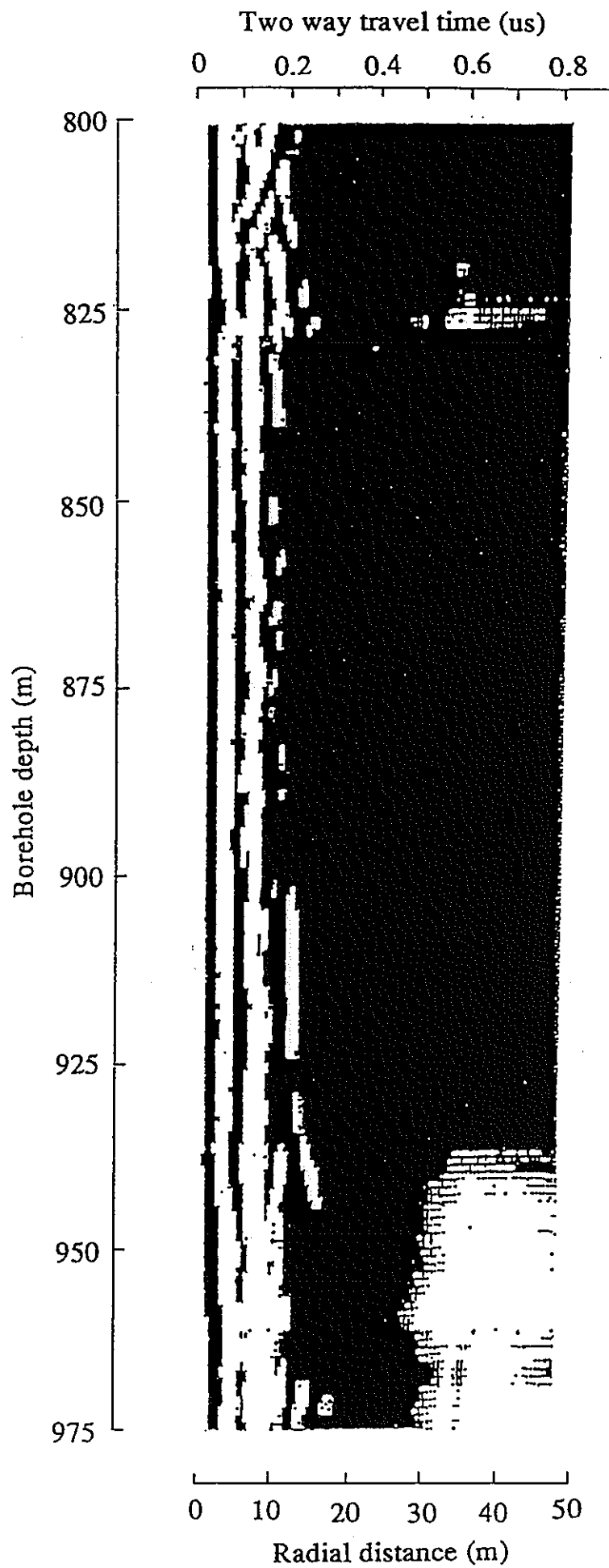


Fig. 5.1c レーダ反射図 (800 m~975 m ; DCレベルのみ調整)

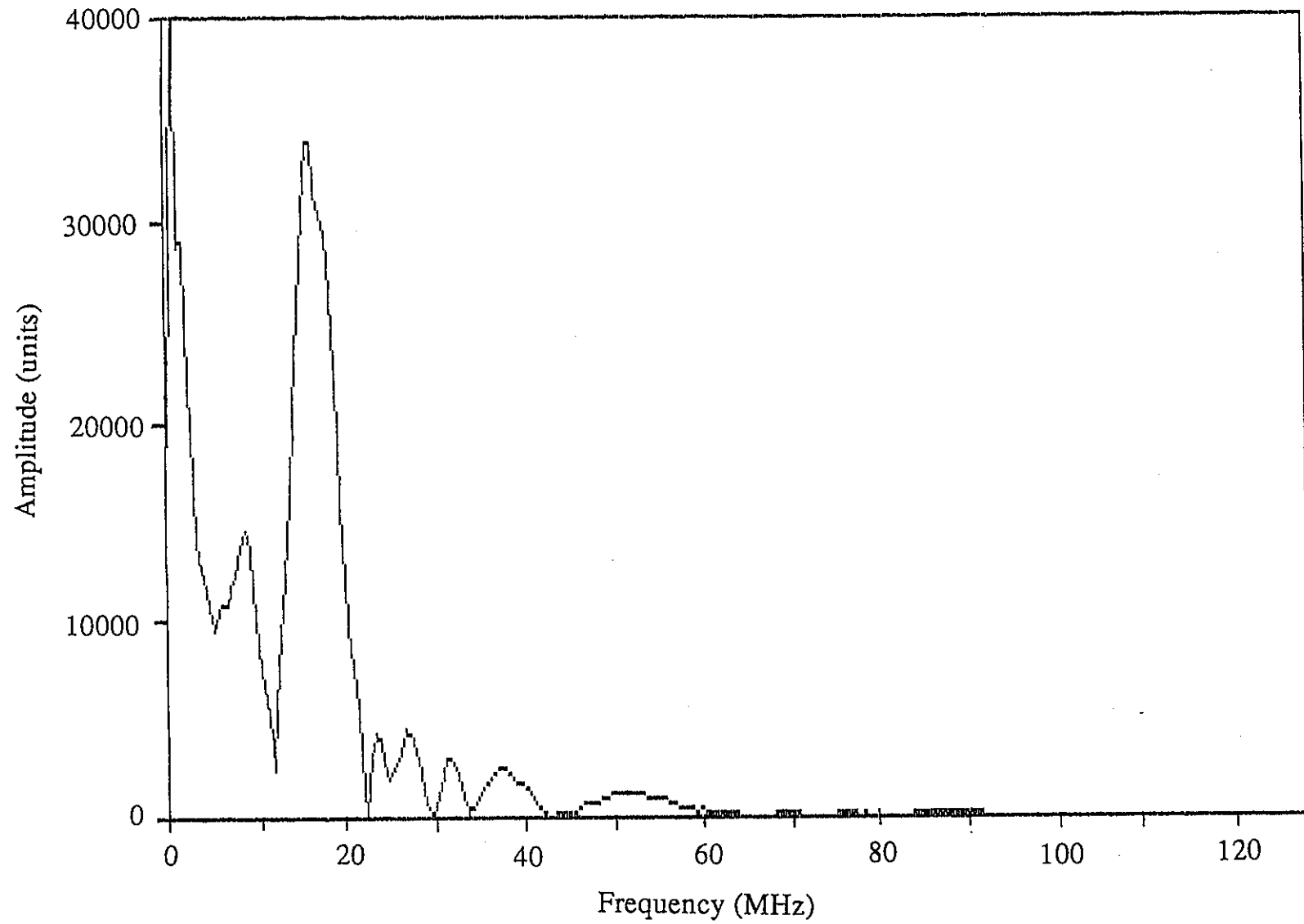


Fig. 5.2 周波数スペクトル 深度:750m
(DCレベルのみ調整)

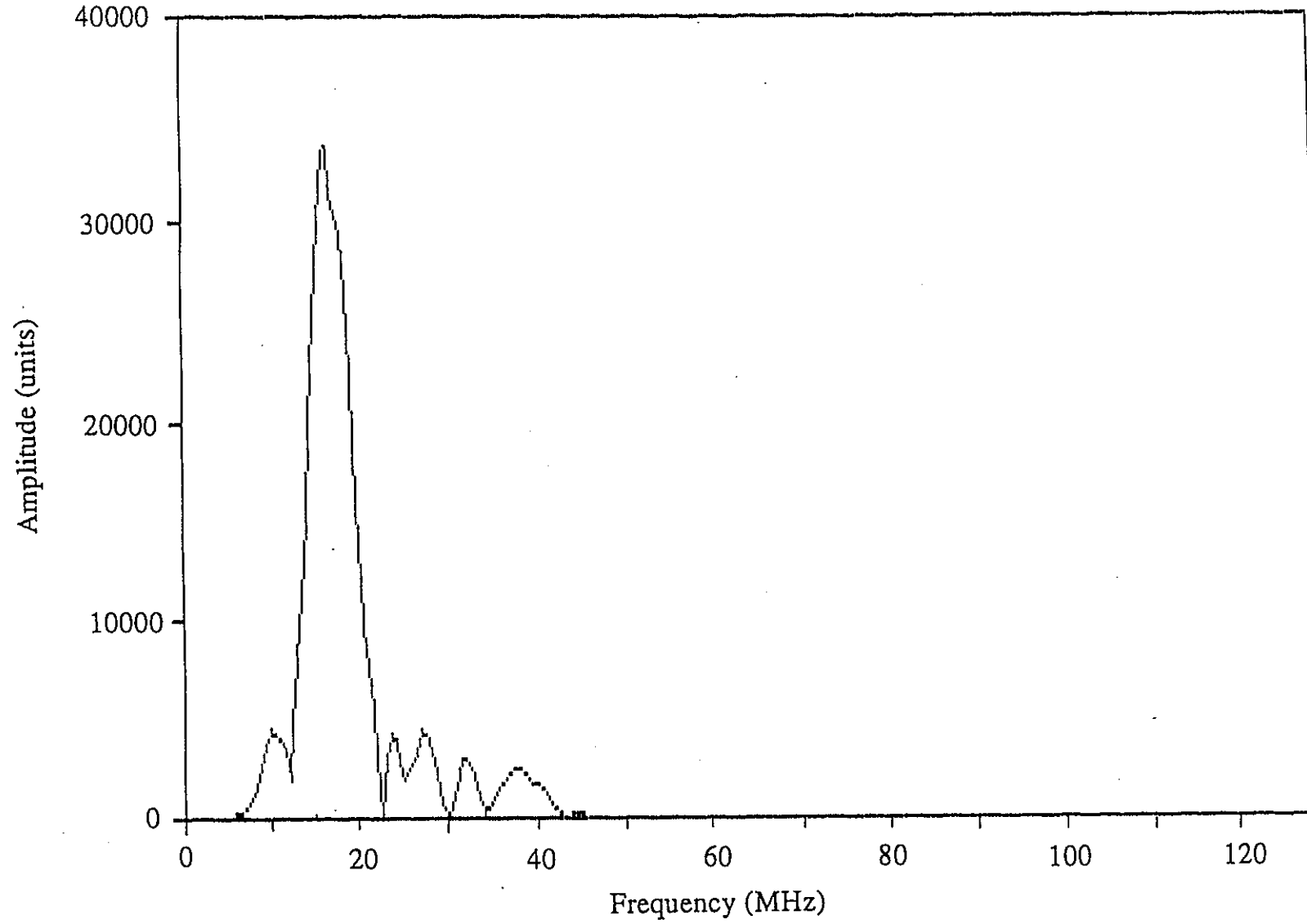


Fig. 5.3 周波数スペクトル 深度:750m
(10MHz~45MHzのバンドパスフィルタ処理後)

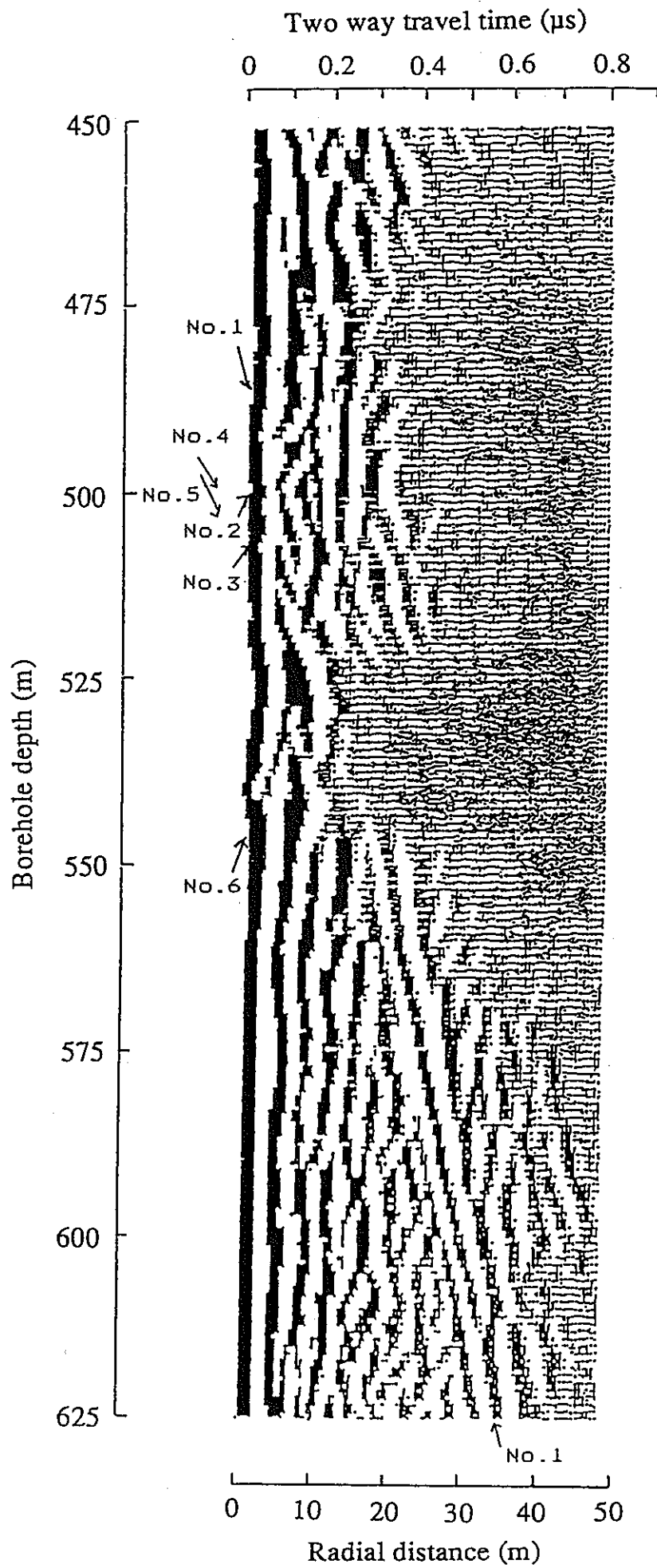


Fig. 5.4a レーダ反射図 (450 m~625 m ; 10MHz~45MHz のバンドパスフィルタ処理後)

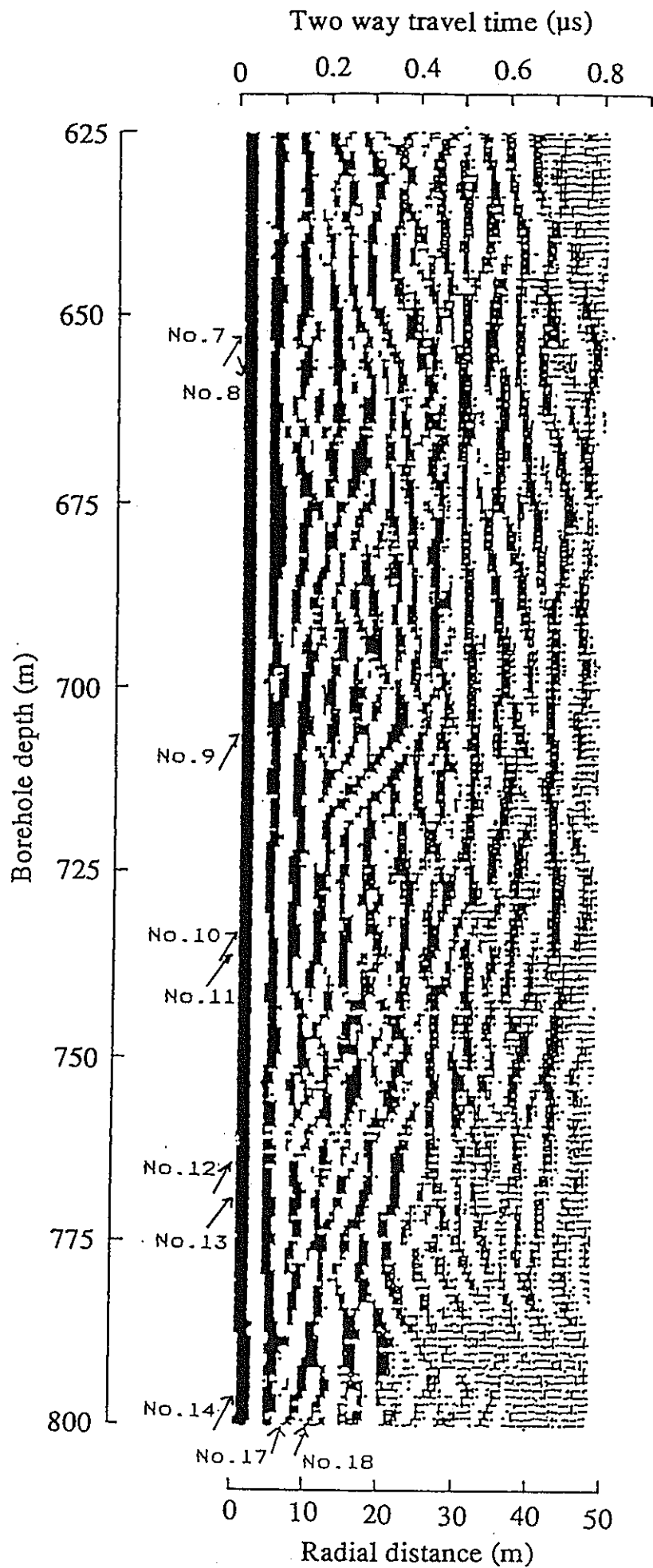


Fig. 5.4b レーダ反射図 (625 m~800 m ; 10MHz~45MHz のバンドパスフィルタ処理後)

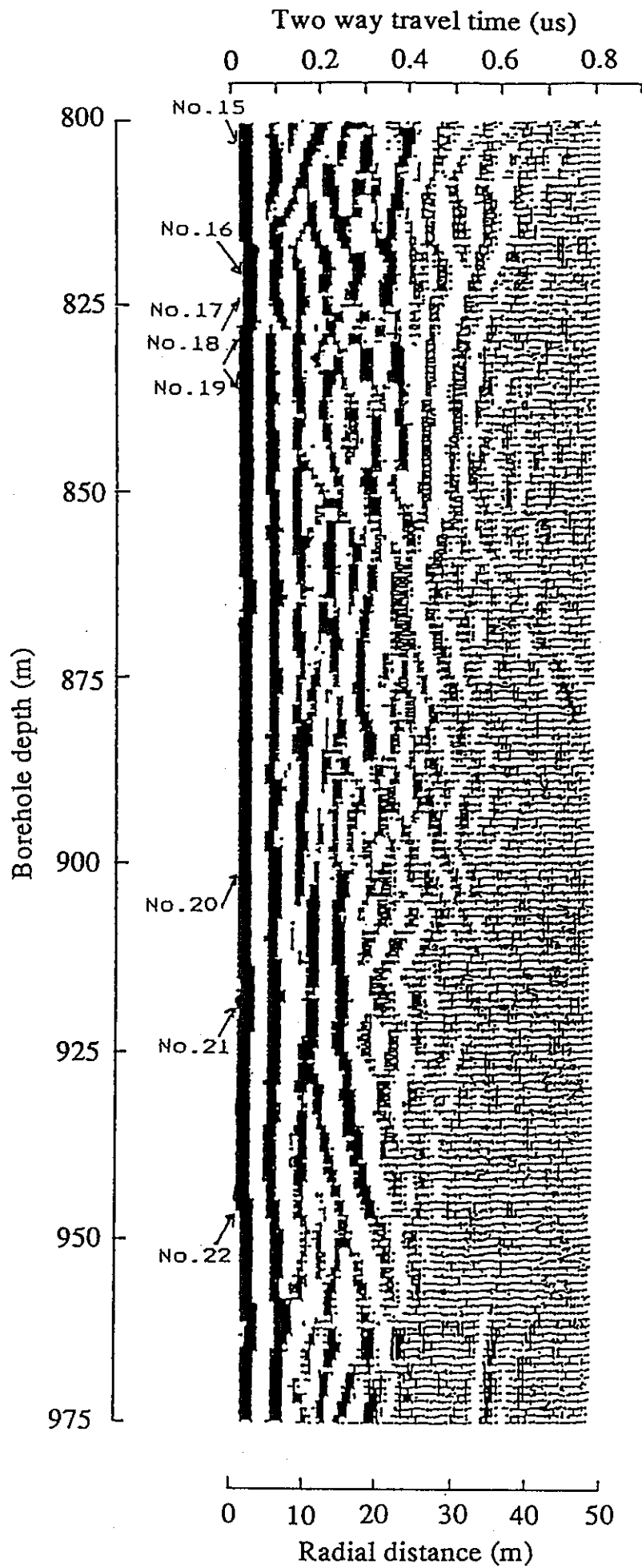


Fig. 5.4c レーダ反射図 (800 m~975 m ; 10MHz~45MHz のバンドパスフィルタ処理後)

Table 5.1 各々の割れ目が試錐孔と交差する深度と試錐孔となす角

| Reflector No. | Borehole intersection (m) | Intersection angle (degree) | |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------|
| | | upper | lower |
| 1 | 488 | | 4 |
| 2 | 500 | 39 | |
| 3 | 506 | 85 | |
| 4 | 510 | | 50 |
| 5 | 515 | | 12 |
| 6 | 544 | 2 | |
| 7 | 645 | 38 | |
| 8 | 654 | | 12 |
| 9 | 708 | 24 | |
| 10 | 730 | 23 | |
| 11 | 733 | 72 | |
| 12 | 763 | 20 | |
| 13 | 768 | 56 | |
| 14 | 795 | 14 | |
| 15 | 804 | | 16 |
| 16 | 821 | | 14 |
| 17 | 822 | 6 | |
| 18 | 825 | | 13 |
| 19 | 837 | | 32 |
| 20 | 901 | 6 | |
| 21 | 918 | 23 | |
| 22 | 946 | 24 | |

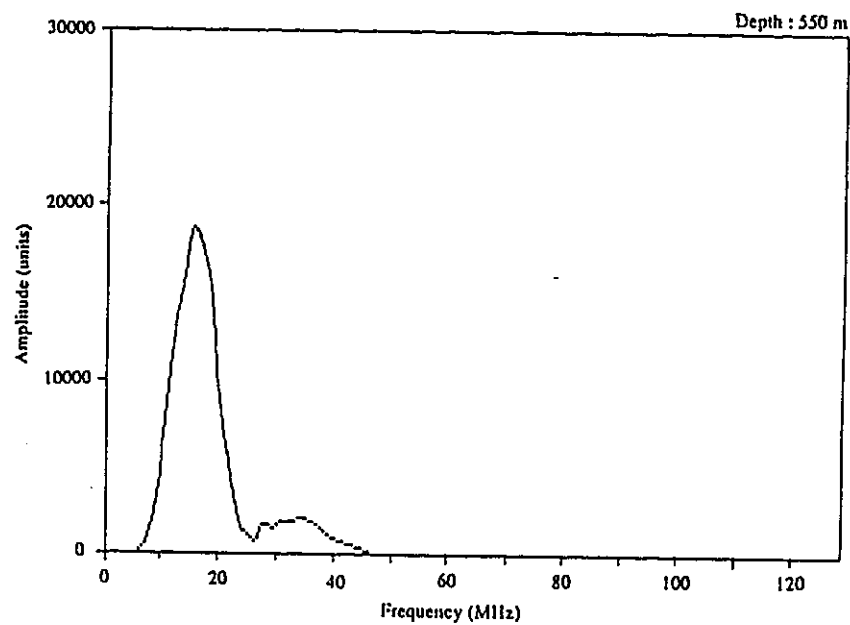
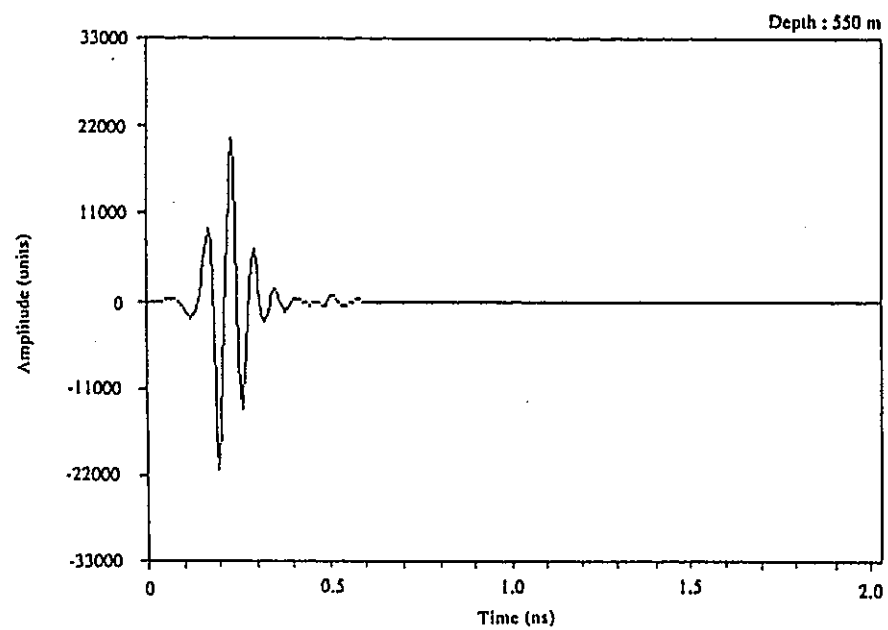
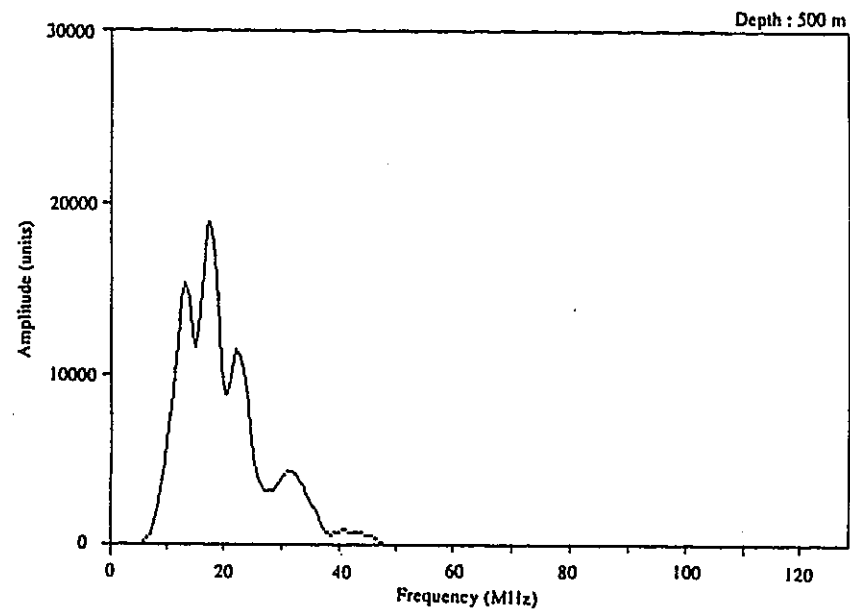
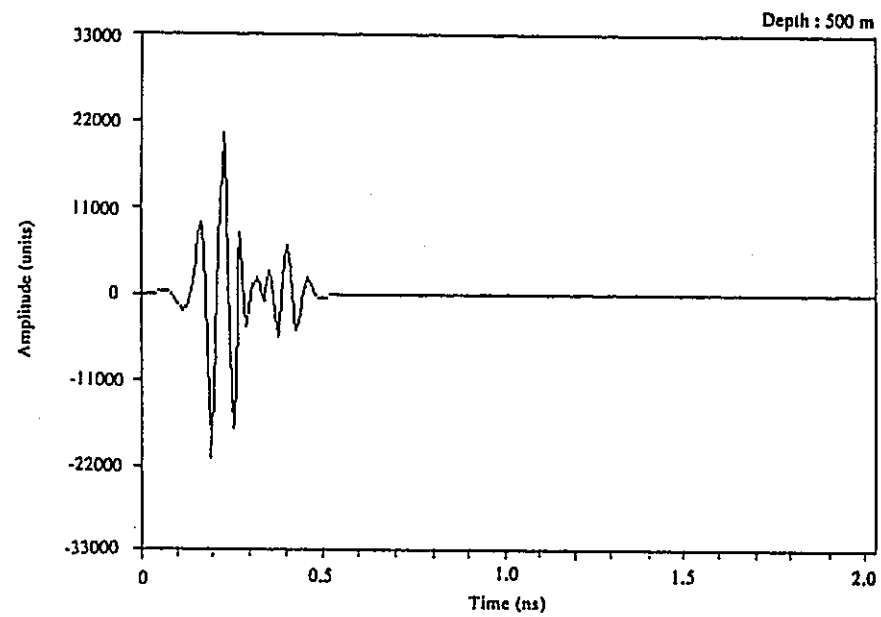


Fig. 5.5a 受信波形とその周波数スペクトル (500, 550 m)

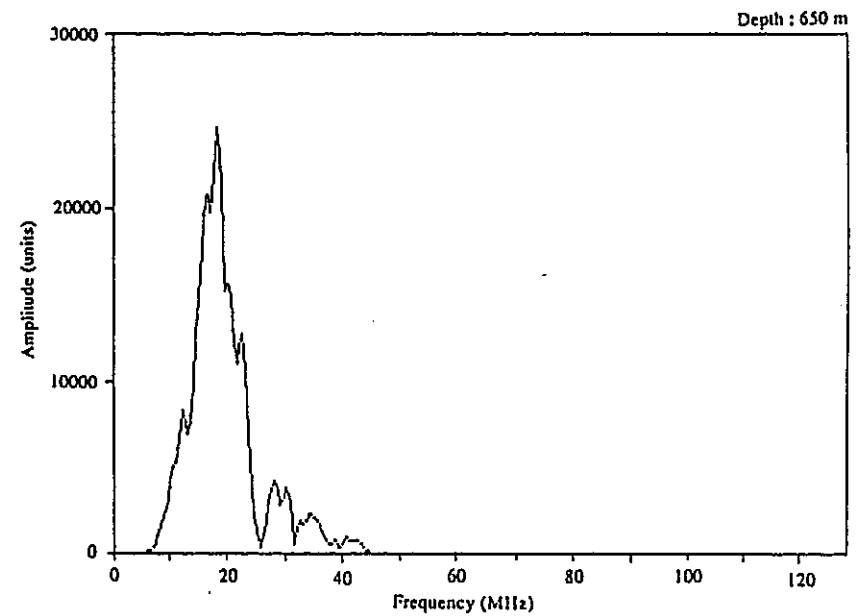
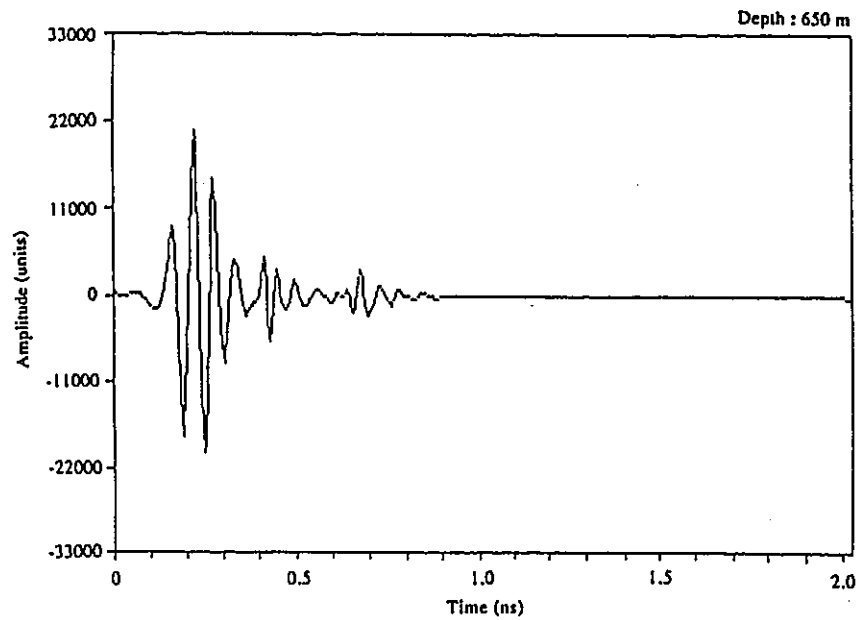
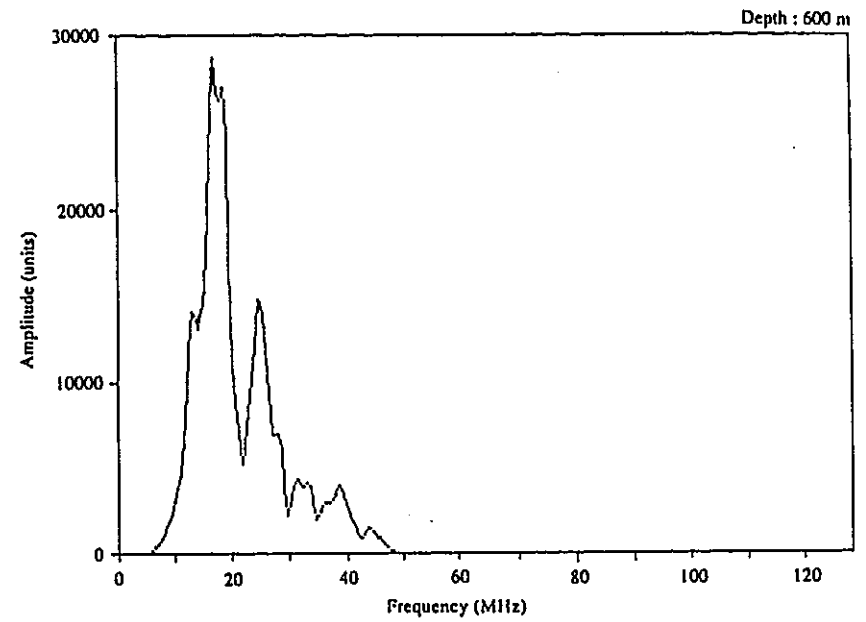
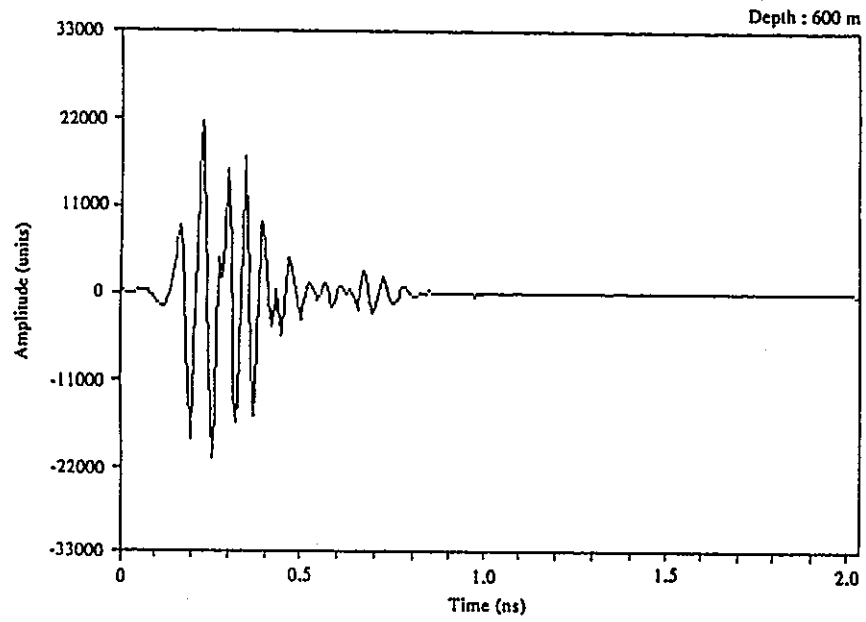


Fig. 5.5b 受信波形とその周波数スペクトル (600, 650 m)

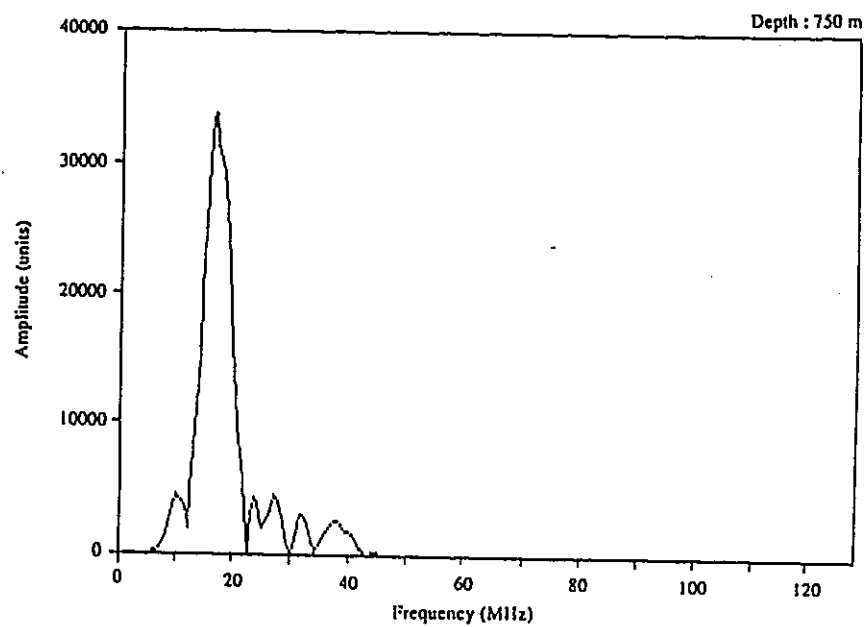
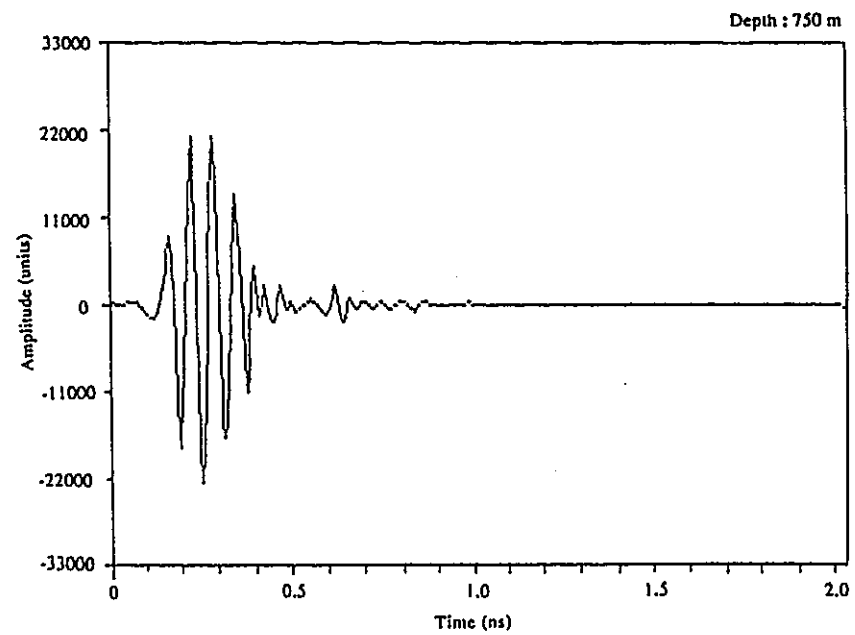
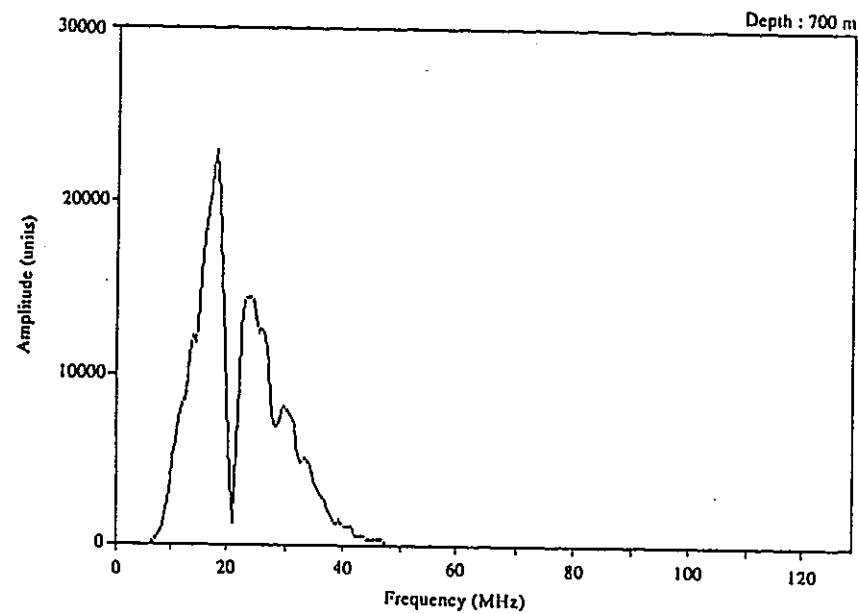
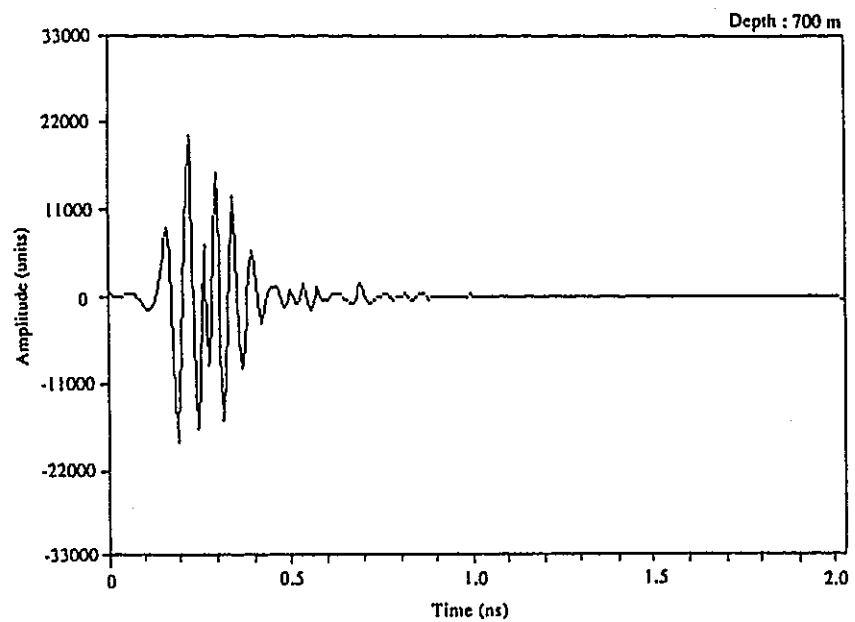


Fig. 5.5c 受信波形とその周波数スペクトル (700, 750 m)

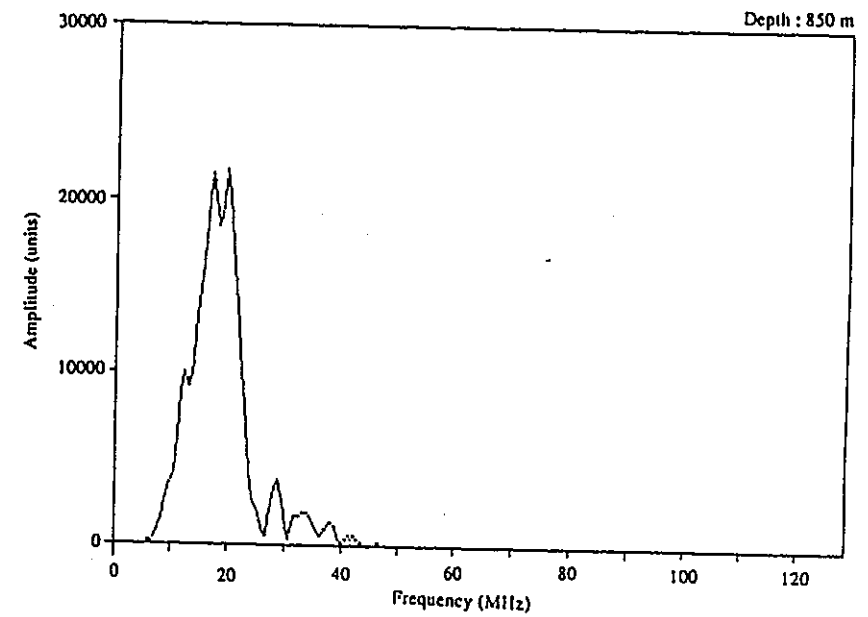
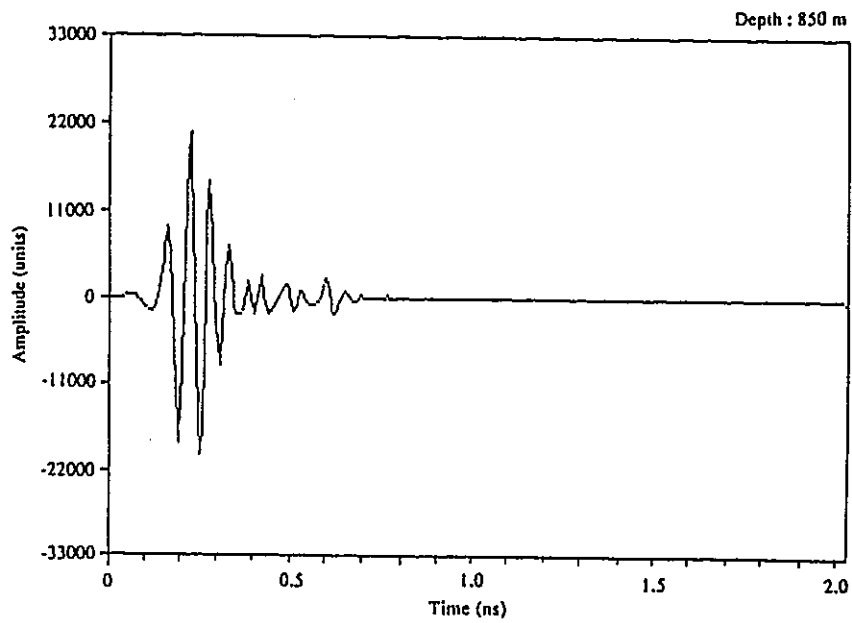
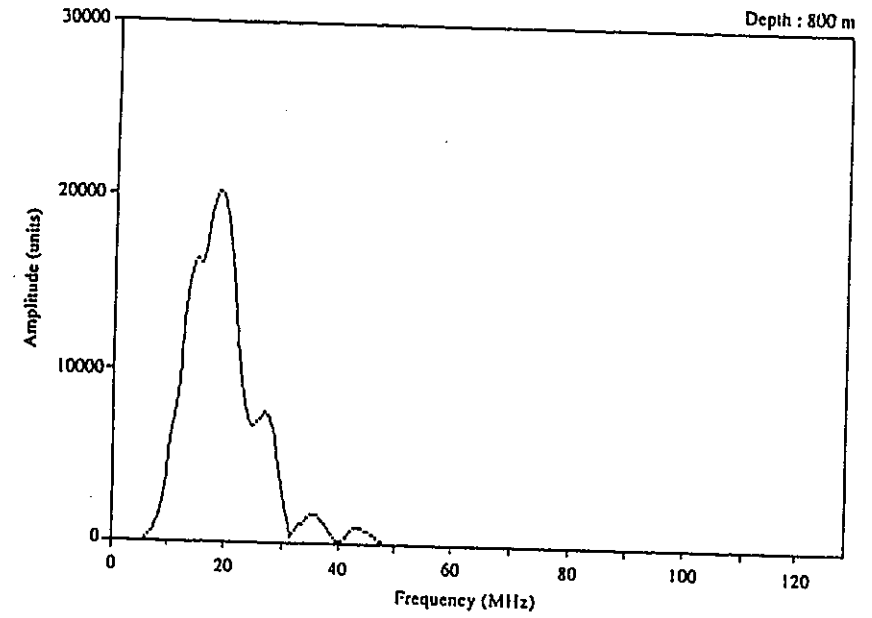
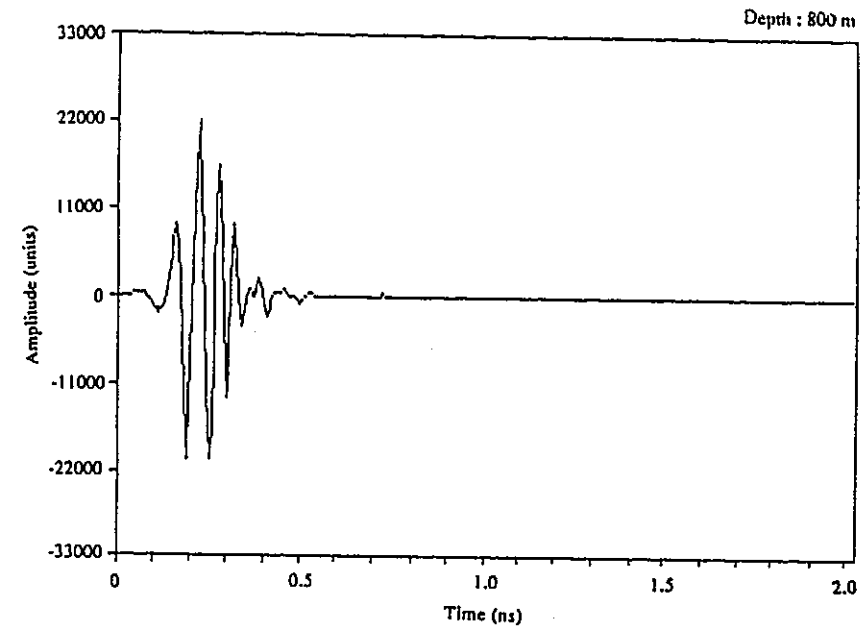


Fig. 5.5d 受信波形とその周波数スペクトル (800, 850 m)

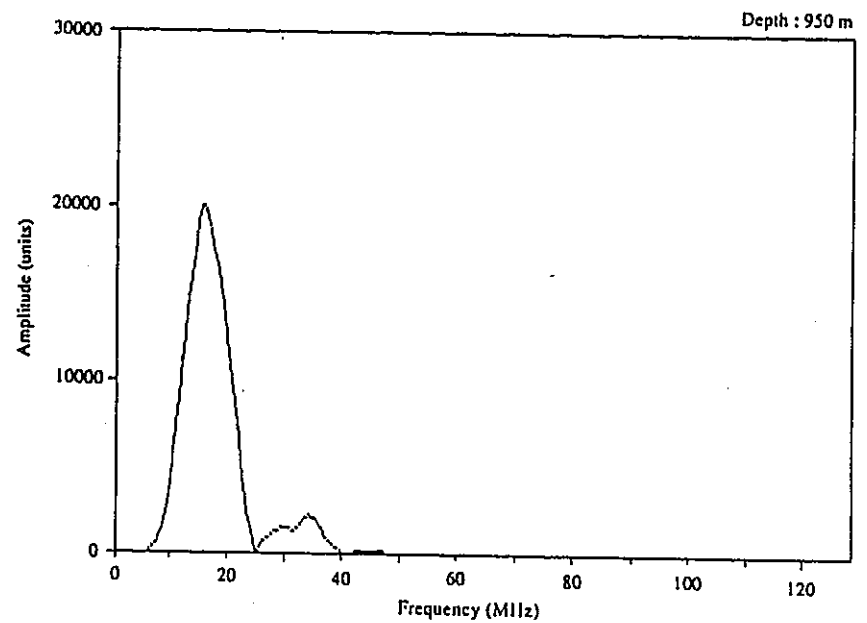
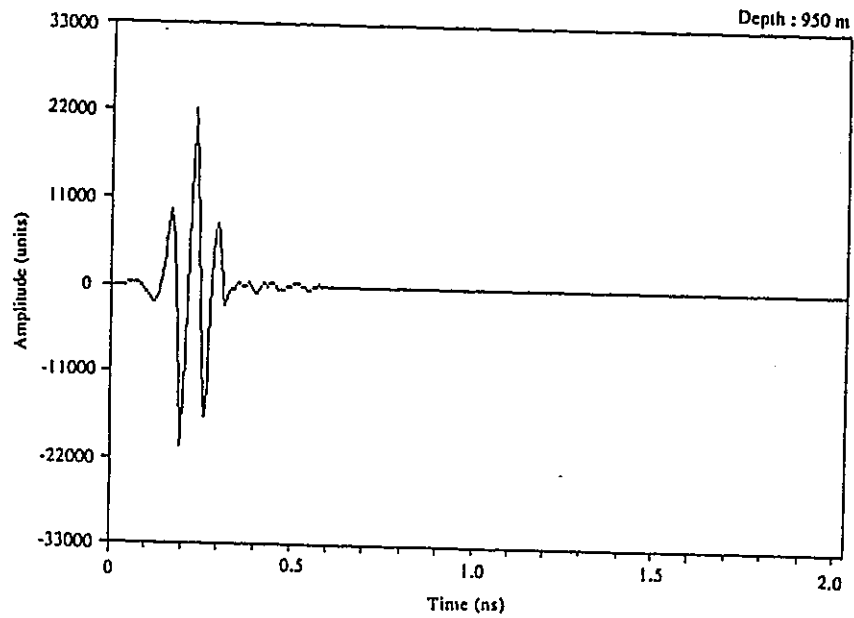
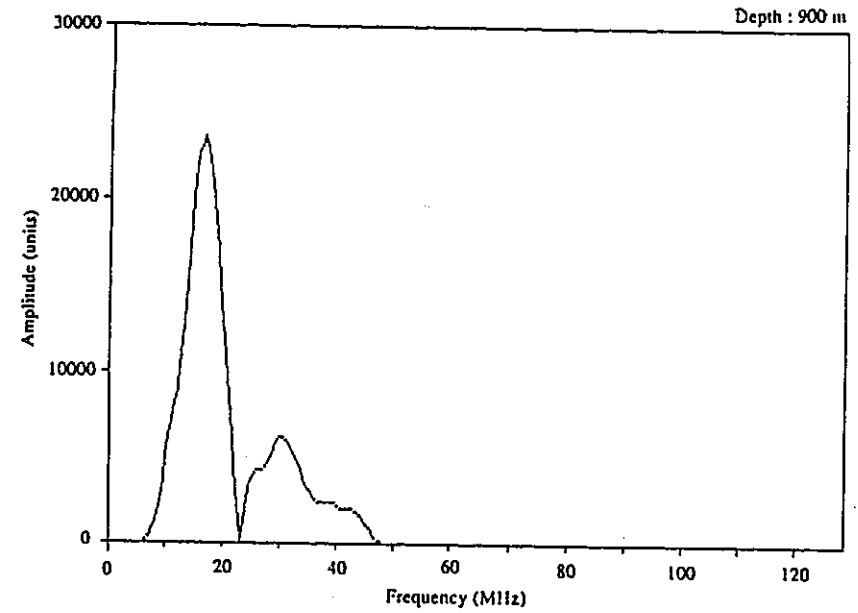
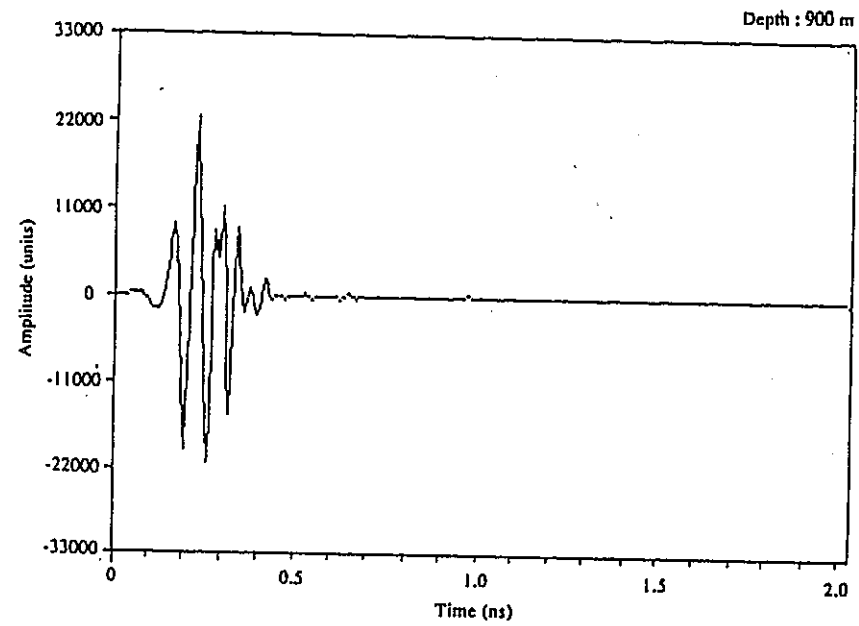


Fig. 5.5e 受信波形とその周波数スペクトル (900, 950 m)

6. 岩芯観察結果との比較

Fig. 6.1に各々の深度に対するレーダ反射図と岩芯観察結果とを比較した図を示す。左図がレーダ反射図、右図が岩芯観察結果である。両者の深度は一致させてある。レーダ反射図はFig. 5.4と同様である。岩芯観察結果は5つのブロックに分かれており、左から①地質柱状図、②割れ目によるブロック化をした部分・変質帯・破碎帯の位置と幅、③②の深度、④連続の割れ目と不連続の割れ目それぞれの岩芯1mあたりの割れ目の本数、⑤R Q Dがそれぞれ示されている。ここで②の割れ目によるブロック化とは、割れ目が非常に発達しておりコア採集時にコアがばらばらになってしまった部分であり、⑤のR Q Dは、

$$R Q D = \frac{10 \text{ cm以上のコアの総長}}{1 \text{ m掘進長 (1 m)}} \times 100 \quad \text{で示している。}$$

なお記載の対象とする割れ目は、岩芯において見られる割れ目のうち掘削以前に既に岩盤内において割れ目として存在していたと判断されるものであり、掘削の際に新たに人工的に生じたと判断されるような割れ目は記載の対象とされない。

岩芯観察結果で割れ目の数は深度450m~575mで多くなっているが、この深度のレーダ反射図を見ると割れ目の多い抵比抵抗帯が広がり、電磁波の到達距離は短くなっている。また割れ目の数は深度800m以深で再び多くなっているが、レーダ反射図をみると深度450m~575mと同様割れ目の多い低比抵抗帯が広がり、電磁波の到達距離は短くなっている。逆に割れ目の数の少ない深度700m~775mでは、電磁波の到達距離は長くなっている。このように、レーダ反射図を見ることによって、その深度における割れ目の多さを定性的に知ることができる。

Fig. 6.2に深度400m~960m(深度500m~700mは除く)において、深度に対する岩芯より読み取った割れ目の傾斜角度を示す。

Fig. 5.4において、顕著な割れ目はNo.1であるが、その傾斜角度は84度である(Table 5.1)。No.1はAN1号孔と交わるとすればその交差深度は488mとなるが、深度488m前後で高傾斜角度をとる割れ目が多く存在しており(Fig. 6.2)一致していると思われる。

しかしながらレーダ法、岩芯観察結果共におよそ800mより深くなると高傾斜角度をとる割れ目が多くなっているが(Table 5.1, Fig. 6.2)、岩芯観察の場合この深度では低傾斜角度をとる割れ目も多く存在しており、RAMACシステムによる解析結果と岩芯観察結果とは必ずしも一致しない。

このように一致しない理由としては、レーダ反射図で読み取ることができる割れ目が試錐孔と交差しない場合もあると考えられるが、一番大きな原因として、岩芯観察は数cmのオーダーでできることに對し、レーダ法では例えば20MHzのアンテナで試験を行う場合、電磁波の岩盤内における伝播速度が120m/ μ secであるため、その分解能は6mとなり両者の分解能の差が大きく検出できる割れ目の規模に差があるためであると考えられる。

このように、RAMACシステムで解析できるのは岩芯上の一本一本の割れ目ではなく、何本もの割れ目の集合体であると考えられる。一方、岩芯観察ではその岩芯上の割れ目のみが観察が可能であるが、その割れ目が試錐孔より岩盤内部に連続しているのかどうかを判断することは難しい。

したがって、岩芯観察とレーダ探査を効果的に組合わせて実施することにより、岩盤内

部の小さな割れ目やその集合体そして連続性を正確に把握することが可能となろう。

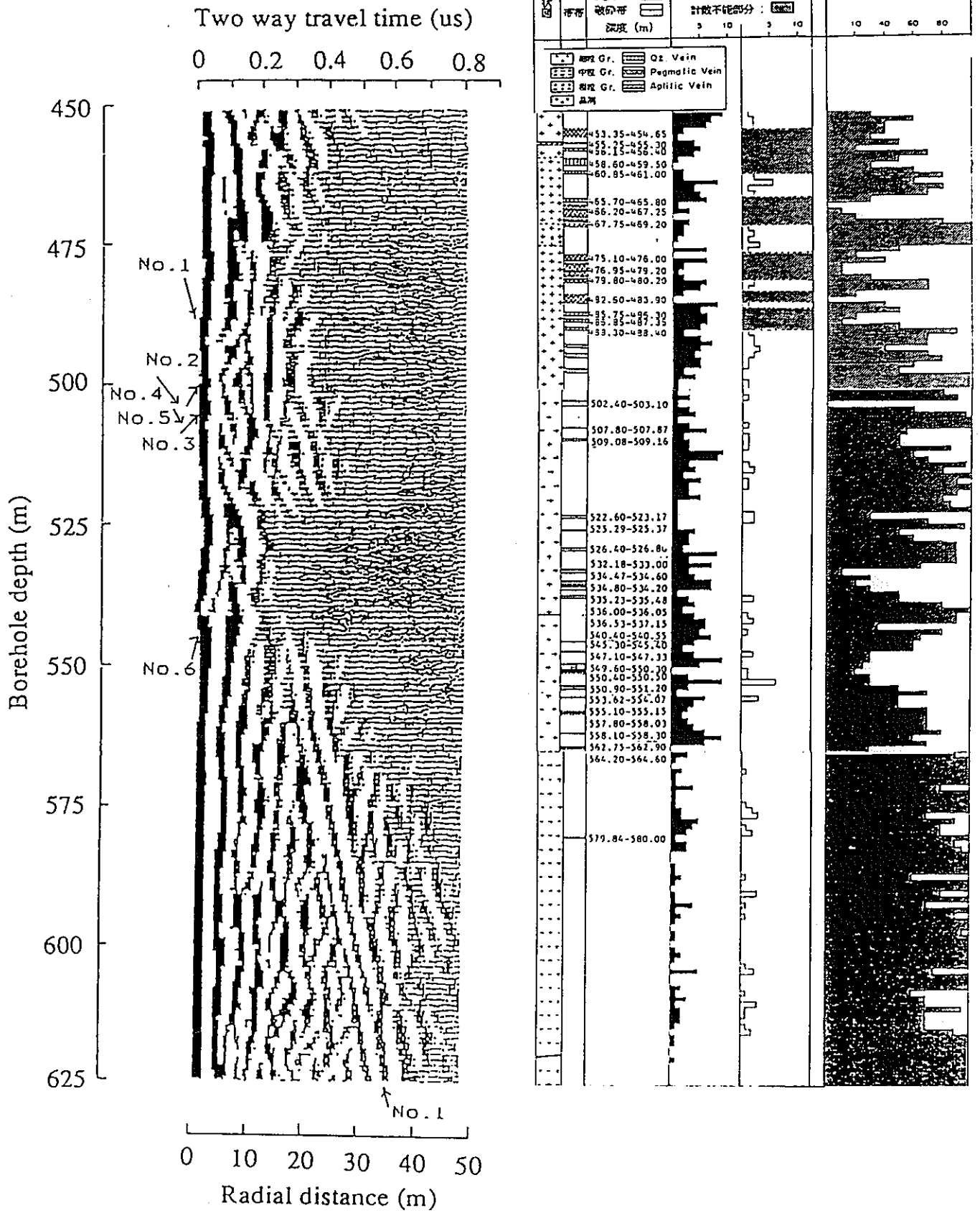


Fig. 6.1a レーダ反射図と岩芯観察結果との比較図 (450~625 m)

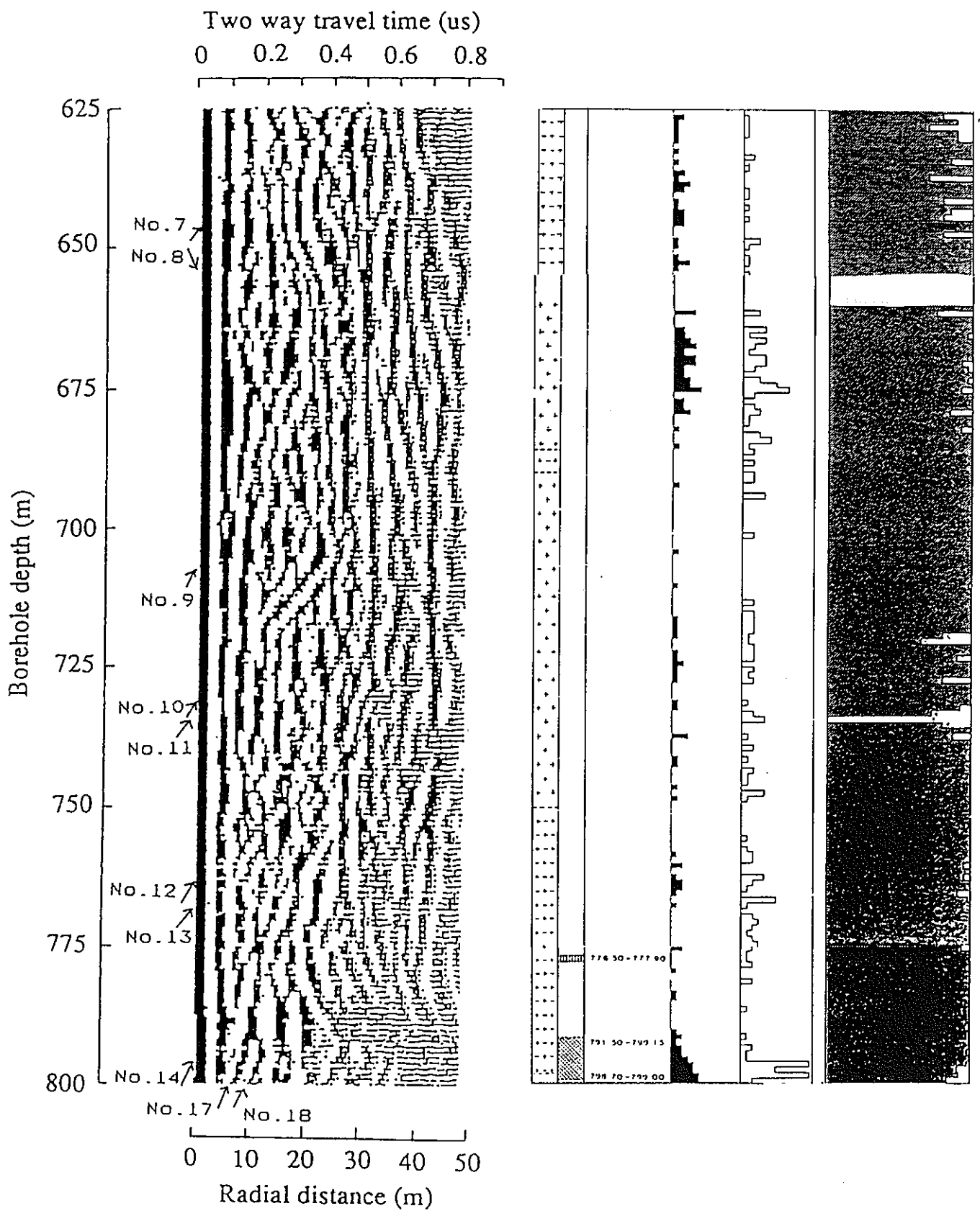


Fig. 6.1b レーダ反射図と岩芯観察結果との比較図 (625~800 m)

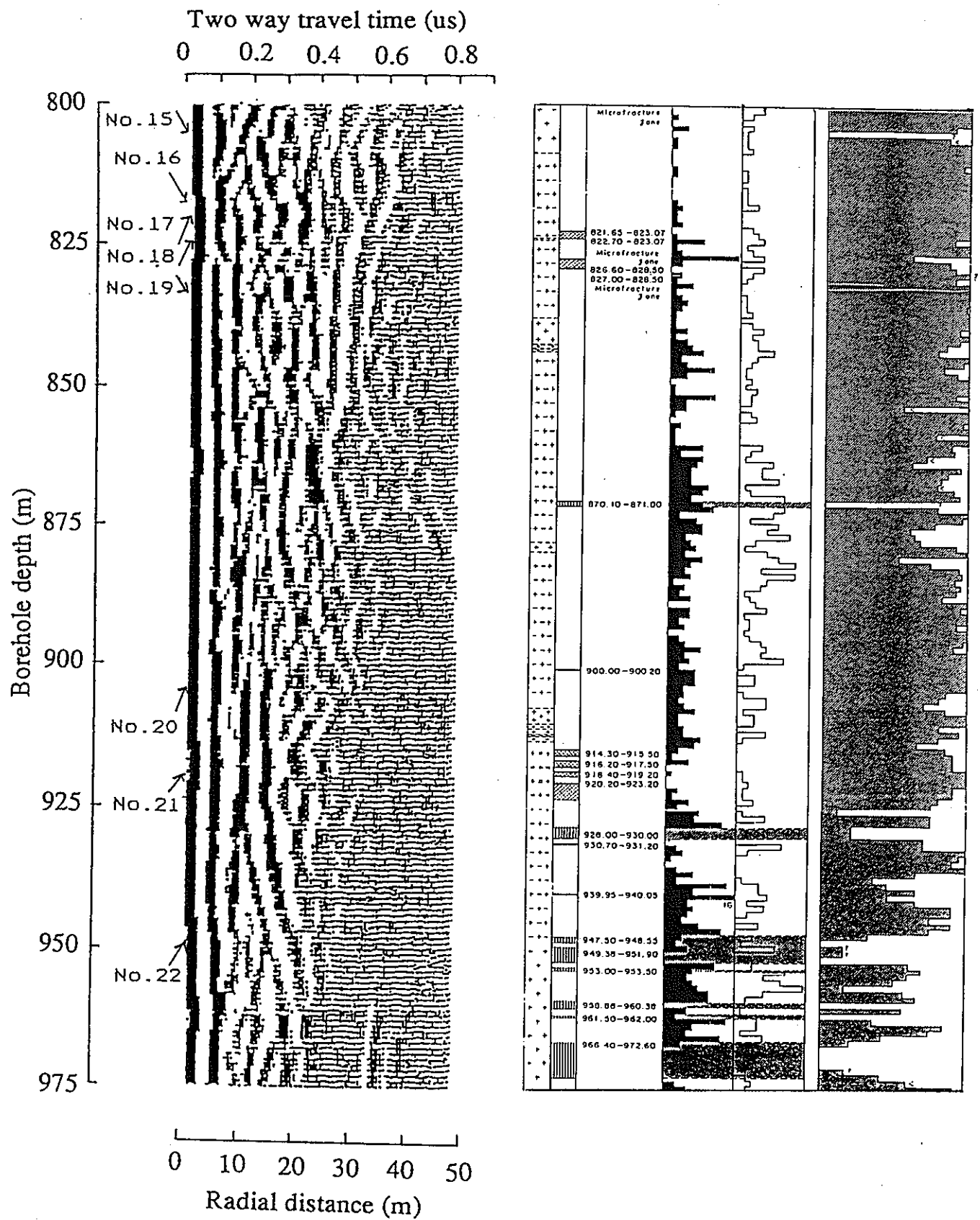


Fig. 6.1c レーダ反射図と岩芯観察結果との比較図 (800~975 m)

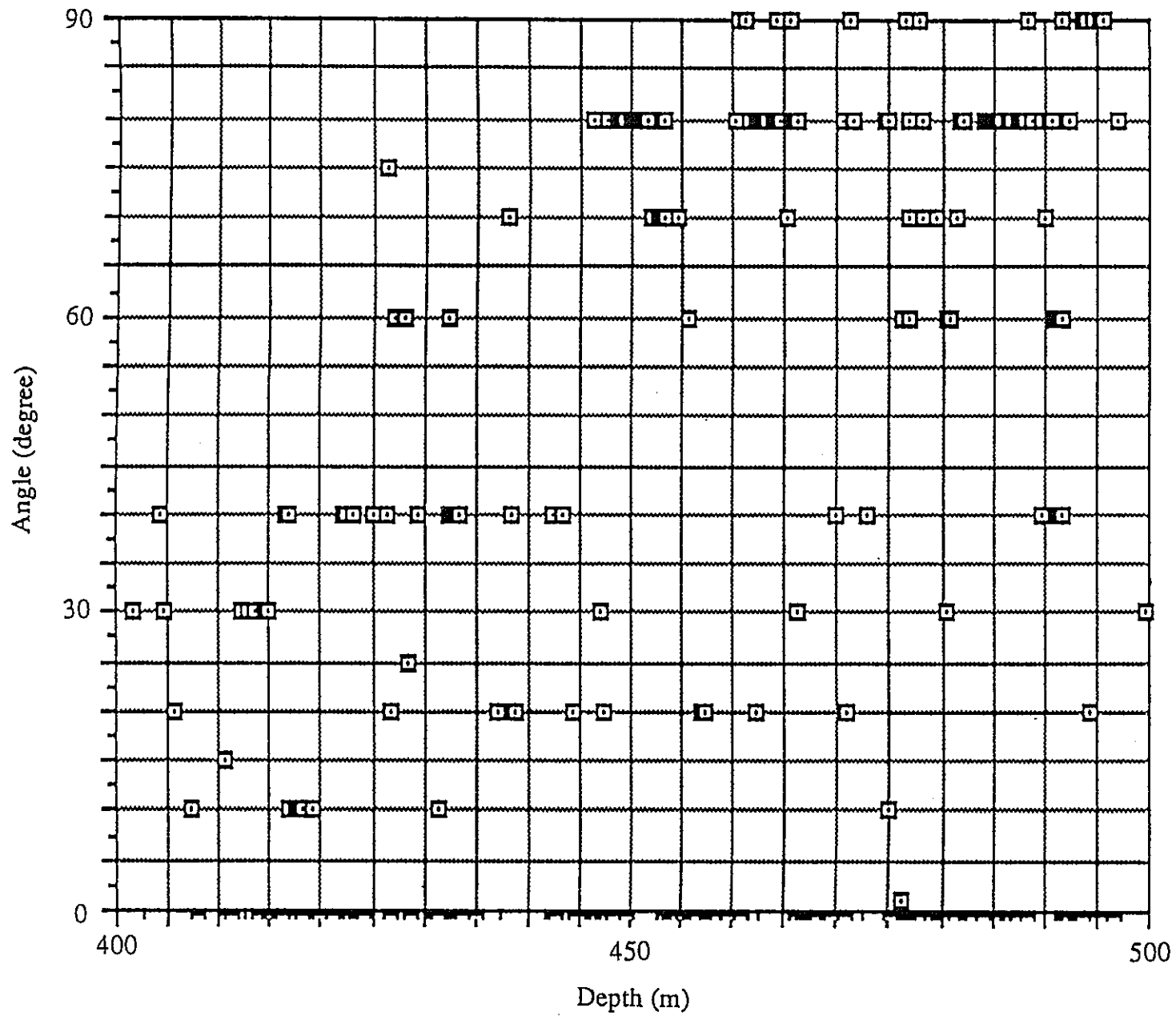


Fig. 6.2a 岩芯より読み取った割れ目の傾斜角度 (400~500 m)

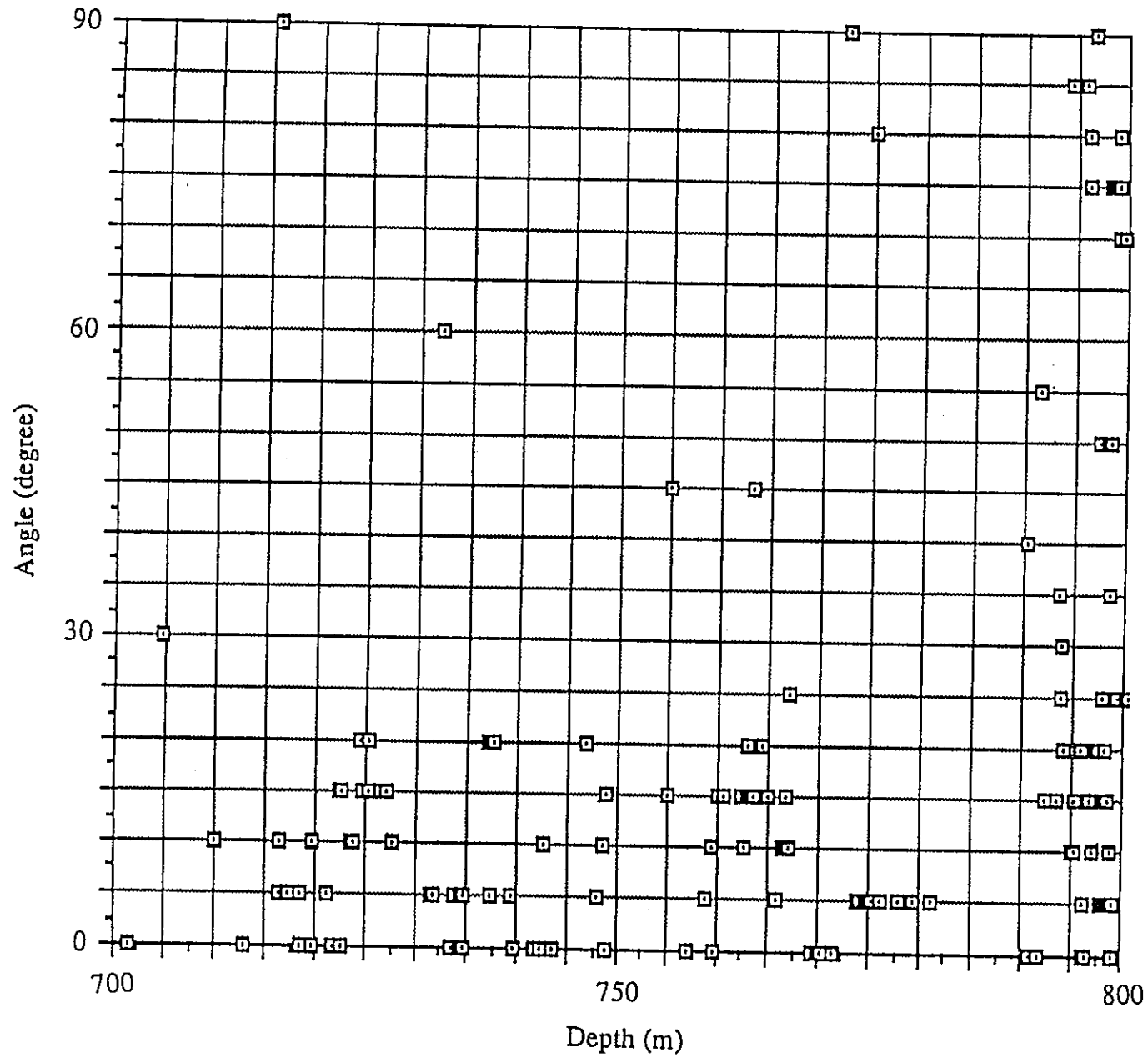


Fig. 6.2b 岩芯より読み取った割れ目の傾斜角度 (700~800 m)

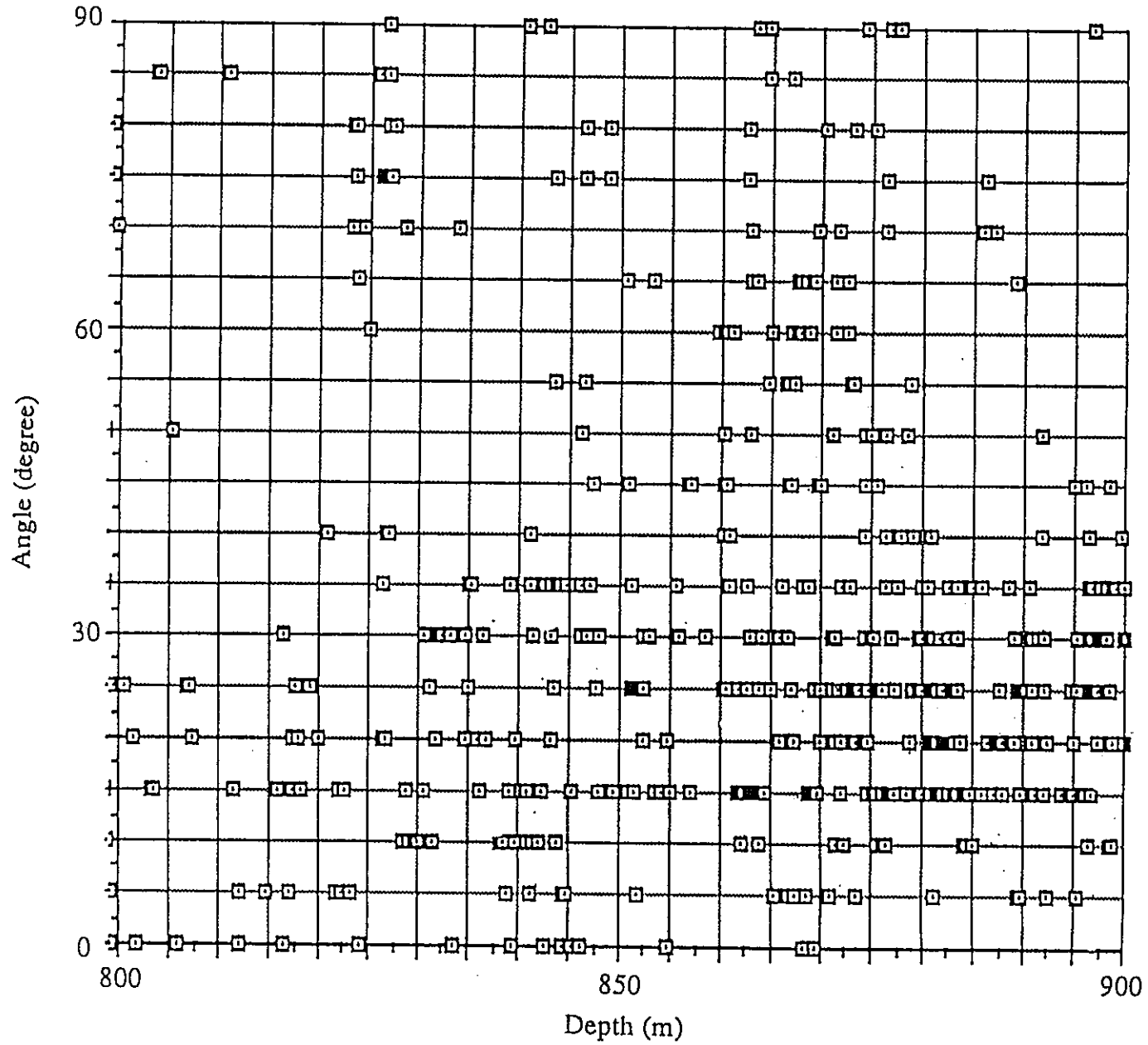


Fig. 6.2c 岩芯より読み取った割れ目の傾斜角度 (800~900 m)

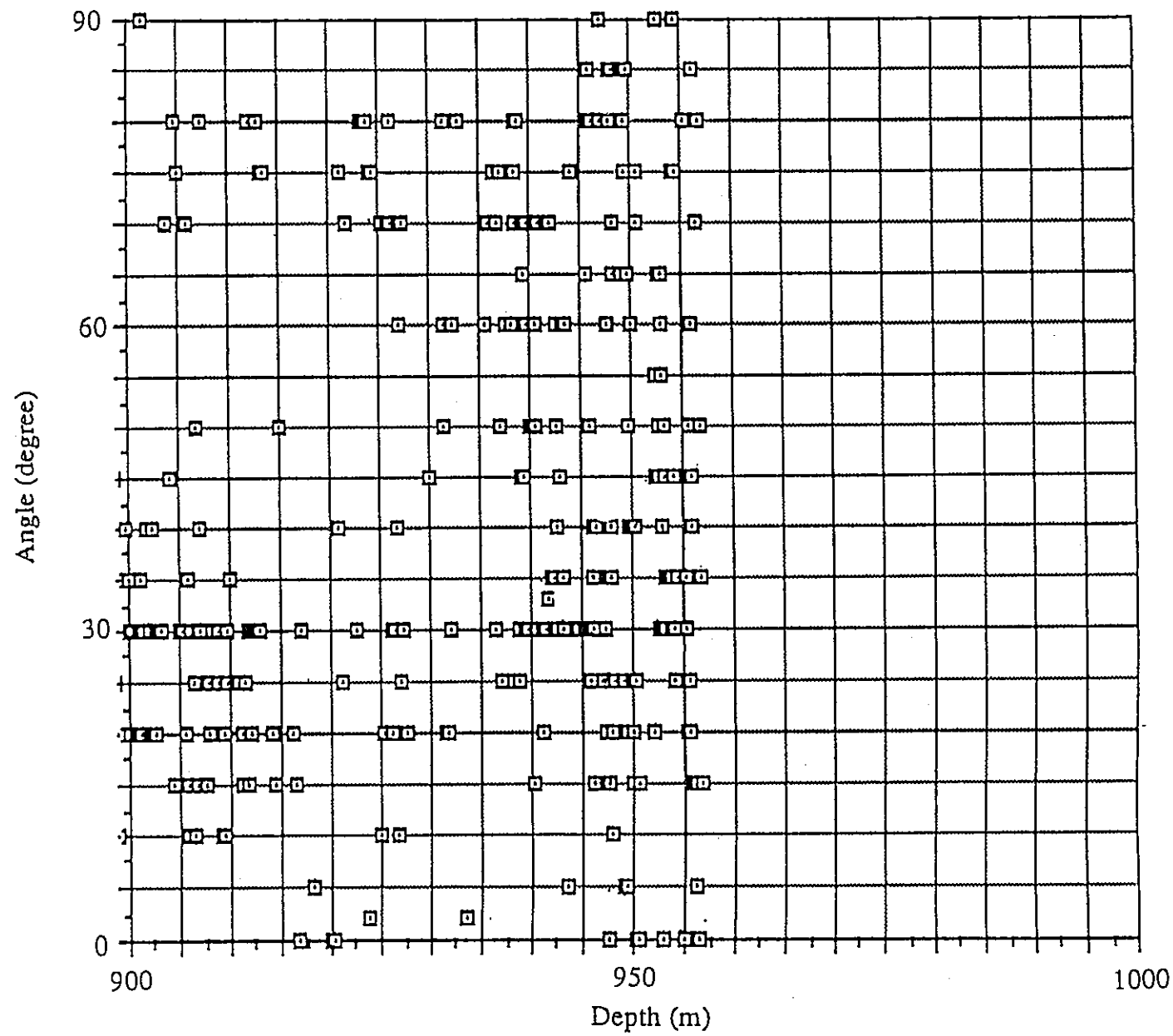


Fig. 6.2d 岩芯より読み取った割れ目の傾斜角度 (900~960 m)

7. まとめ

今回のRAMACシステムで20MHzのアンテナを用いてシングルホール試験を行った解析結果と岩芯観察結果を比較検討した結果、

- (1)岩芯観察において割れ目が多い深度では、レーダ反射図を見ると低比抵抗帯が広がっていることがわかり、逆に割れ目が少ない深度では、電磁波の到達距離が長くなっている。このようにレーダ反射図を見ることにより、その深度における割れ目の多さを定性的に知ることができる。
- (2)レーダ探査は、岩芯観察と比べ分解能が低いため一本一本の割れ目を観察することはできないが、顕著な割れ目帯がどのような深度でどのように連続しているかを知ることができる。

の2点についてわかった。今後は以下のことを行う。

- (1)中心周波数60MHzのアンテナを用いた試験。

周波数60MHzの電磁波は20MHzの電磁波と比較して減衰が大きいため、探査のできる範囲は狭くなるが、分解能は3倍となる。分解能が3倍となれば、レーダ反射図における割れ目の分布もより明確になると予想され、20MHzのアンテナを用いた場合に比べ、岩芯観察結果とより良い対比が可能になると思われる。

- (2)種々の物理検層結果との比較。

AN1号孔では、岩芯観察だけではなく種々の物理検層も行われている。種々の物理検層結果と比較することは、RAMACシステムの試験結果がそれらの結果のうちどれと一番相関があるか、レーダ反射図がどのような物理的性質と深い関係があるのかを知ることができ、RAMACシステムの相対的な精度を知る上でも重要となる。

- (3)割れ目に関する検討

岩盤内に、たとえ同じ様な角度を持つ割れ目が集まっている場所があるとしても、必ずしもレーダ反射図でそれを捕らえているとは限らない。このようにレーダ反射図で見られる割れ目はいったいどのようなものなのか、これからさらに詳しく調べる必要がある。

8. 参考文献

- (1)佐久間 秀樹, 坪田 浩二(1988):土岐花崗岩におけるRAMACシステム適応試験, 第78回物理探査学会講演論文集, 305-309