

ボアホールレーダーの各種岩盤を対象とした適用試験 — 調査結果について —

1993年1月

動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所

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園戸959-31
動力炉・核燃料開発事業団
中部事業所 技術開発課

限 定 資 料
PNC ZN7410 92-044
1993年1月

ボアホールレーダーの各種岩盤を対象とした適用試験
—調査結果について—

仙波 毅^{*1}, 尾方 伸久^{*2}, 長谷川 健^{*1}

要 旨

動燃事業団では、岩盤内の割れ目帯の位置・規模・その透水性を非破壊で評価する手法の開発を行っており、その一環として、O E C D / N E A ストリパ計画で開発された試錐孔内用レーダーシステム（R A M A C）を導入し、日本の岩盤に対する適用性を把握するために、様々な岩種を対象として適用試験を実施してきた。

本稿では、日本の岩盤を対象に実施したレーダー法シングルホール（反射法）調査結果について述べる。

その結果を要約すると以下のようになる。

- (1) 各試錐孔について、レーダー反射図を作成し、反射面を抽出した。
- (2) 電磁波の岩盤内伝播距離は、岩盤の電気比抵抗に影響をうける。すなわち、岩盤の電気比抵抗が $100\Omega m$ 程度であれば、周波数が $20MHz$ のアンテナで試錐孔から $5m$ 程度の範囲までしか調査を行うことができないが、岩盤の電気比抵抗が $10,000\Omega m$ 程度であれば同じアンテナで試錐孔から $100m$ 程度の範囲まで調査可能であることがわかった。

*1 中部事業所 技術開発課, *2 中部事業所 環境地質課

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC ZN7410 92-044
JANUARY, 1993

Application of borehole radar to various rock masses in Japan

- On the results of singlehole measurements -

Takeshi SEMBA*¹, Nobuhisa OGATA*² and Ken HASEGAWA*¹

ABSTRACT

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC) has been developing techniques for evaluation of the spatial extent and dimension of fracture zones in rock mass. In a link of this purpose, PNC introduced the borehole radar system (RAMAC) which was developed in Stripa Project by OECD/Nuclear Energy Agency.

This report describes the results of singlehole measurements which were conducted in various rock masses in order to confirm the applicability of RAMAC system in Japan.

The results are summarized as follows;

- (1) For each borehole, we made radar reflection map, and interpreted reflectors from the map.
- (2) The propagation distance of electromagnetic waves through rock masses is determined by electric resistivity of rock masses.

In the rock mass which resistivity is $100\Omega\text{m}$, propagation distance is less than 5m from a borehole with 20 MHz antenna. In the rock mass which resistivity is $10,000\Omega\text{m}$, propagation distance is at least 100m from a borehole with the same antenna.

*1 Exploration and Mining Technology Development Section, Chubu Works

*2 Waste Isolation Research Section, Chubu Works

目 次

1. はじめに	1
2. シングルホール調査の測定法および抽出法	1
3. 岩盤中を伝播する電磁波の一般的特性について	3
4. 調査結果	4
4. 1 A地区	5
4. 1. 1 測定仕様	5
4. 1. 2 測定結果	5
4. 2 T地区	8
4. 2. 1 測定仕様	8
4. 2. 2 測定結果	8
4. 3 O地区	15
4. 3. 1 測定仕様	15
4. 3. 2 測定結果	15
4. 4 D地区	19
4. 4. 1 測定仕様	19
4. 4. 2 測定結果	19
4. 5 K地区	23
4. 5. 1 測定仕様	23
4. 5. 2 測定結果	23
4. 6 H地区	27
4. 6. 1 測定仕様	27
4. 6. 2 測定結果	27
5. まとめ	33
参考文献	35

図 目 次

図-1	シングルホール調査模式図	2
図-2	レーダー反射図（A地区、60MHzアンテナ）	6
図-3	レーダー反射図（T地区、20MHzアンテナ）	9～10
図-4	レーダー反射図（T地区、60MHzアンテナ）	11～12
図-5	レーダー反射図（O地区、20MHzアンテナ）	16
図-6	レーダー反射図（O地区、60MHzアンテナ）	17
図-7	レーダー反射図（D地区、20MHzアンテナ）	20～21
図-8	レーダー反射図（K地区、20MHzアンテナ）	24
図-9	レーダー反射図（K地区、60MHzアンテナ）	25
図-10	レーダー反射図（H地区、20MHzアンテナ）	28～29
図-11	レーダー反射図（H地区、60MHzアンテナ）	30～31

表 目 次

表-1	試錐孔概況	4
表-2	測定仕様（A地区）	5
表-3	反射面抽出結果（A地区、60MHz アンテナ）	7
表-4	測定仕様（T地区）	13
表-5	反射面抽出結果（T地区、20MHz アンテナ）	13
表-6	反射面抽出結果（T地区、60MHz アンテナ）	14
表-7	測定仕様（O地区）	18
表-8	反射面抽出結果（O地区、60MHz アンテナ）	18
表-9	測定仕様（D地区）	22
表-10	反射面抽出結果（D地区、20MHz アンテナ）	22
表-11	測定仕様（K地区）	26
表-12	反射面抽出結果（K地区、20MHz アンテナ）	26
表-13	反射面抽出結果（K地区、60MHz アンテナ）	26
表-14	測定仕様（H地区）	32
表-15	反射面抽出結果（H地区、20MHz アンテナ）	32
表-16	反射面抽出結果	33
表-17	岩盤の比抵抗値に対する、シングルホール調査における RAMACシステムの適用性	34

1. はじめに

動燃事業団では岩盤内の割れ目帯の位置・規模・その透水性を非破壊でかつ3次元的に把握するための調査技術開発の一環として、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ーシステム（RAMAC）を1988年度に導入し、日本の岩盤に対する適用性を把握するために、様々な岩種を対象として適用試験を実施してきた。

レーダー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特性の変化に着目して、非破壊で岩盤の不均質性や不連続面等を調べる手法である¹⁾。レーダー法で得られる情報は岩盤の電気的な特性に関するものであるが、岩盤の電気的な特性は岩盤の含水量や水の電気比抵抗と密接な関係があり、例えば岩盤中に割れ目等が発達していると、その部分の含水量が多くなり、含水量が多くなると電磁波の速度は遅くなり、減衰は大きくなる。このような含水量の違いに起因する電磁波の速度や減衰の特性の変化から、岩盤の水理地質特性に深く関連している、割れ目や割れ目帯の3次元的分布を推定することが可能となる。

本稿では、日本の岩盤を対象に実施したレーダー法シングルホール（反射法）調査結果について報告する。

シングルホール調査は、電磁波が含水量が変化する部分で反射する現象を利用して、岩盤内の割れ目帯の位置・傾斜角度・連続性を調べる方法である。

2. シングルホール調査の測定法および反射面の抽出法

図-1の左図はシングルホール調査の測定を模式的に表したもので、シングルホール調査の場合はトランスマッタとレシーバを同一孔に一定間隔で挿入し、一定間隔で下降あるいは上昇させ、それぞれの点で測定を行う²⁾。次に、このようにして得られたデータにフィルター処理を施し、レーダー反射図を求める。今回は、鮮明なレーダー反射図を求めるために、データにデコンボリューション・フィルター³⁾処理を施した。ただし、T地区の20MHzアンテナの結果は、S/N比の良いデータが無かったためバンドパス・フィルターを施した（デコンボリューション・フィルター処理にはS/N比の良いデータが必要である）⁴⁾。

図-1の右図はシングルホール調査の測定結果の模式図で、この図に示すように、試錐孔と割れ目帯等の電磁波を反射させる面（以下、反射面とする）が交差していれば、反射面はレーダー反射図においてハの字型となって現れ、空洞等の電磁波を反射させる点状のもの（以下、反射体とする）があれば山型となって現れる。このような特徴を利用して、レーダー反射図から反射面や反射体を抽出する。

次に、抽出した反射面について、それらが実際の岩盤のどのような割れ目（帯）に対応しているかを明らかにする必要があるが、現在のところ、抽出した反射面とBTB等で確認された割れ目（帯）を関係づける手法が確立されていないので、本報告書では反射面の抽出結果のみを示した。

反射面には試錐孔浅部に向かうものと試錐孔深部に向かうものがあるが、本報告書では

前者を「上向」、後者を「下向」と表現する。

反射面の傾斜角度を求めるには岩盤内の電磁波の伝播速度が必要となる。シングルホール調査からは伝播速度を求めることができないので、伝播速度は文献に記載されている比誘電率値などをもとに決定した（求め方は次章に示す）。

なお、動燃事業団の所有するRAMACシステムには、中心周波数が20MHzのアンテナと60MHzのアンテナがある。このうち20MHzアンテナは分解能は低いが比較的遠くまで調査を行うことができ、60MHzアンテナは比較的狭い範囲であるが詳細な調査を行うことができる³⁾。

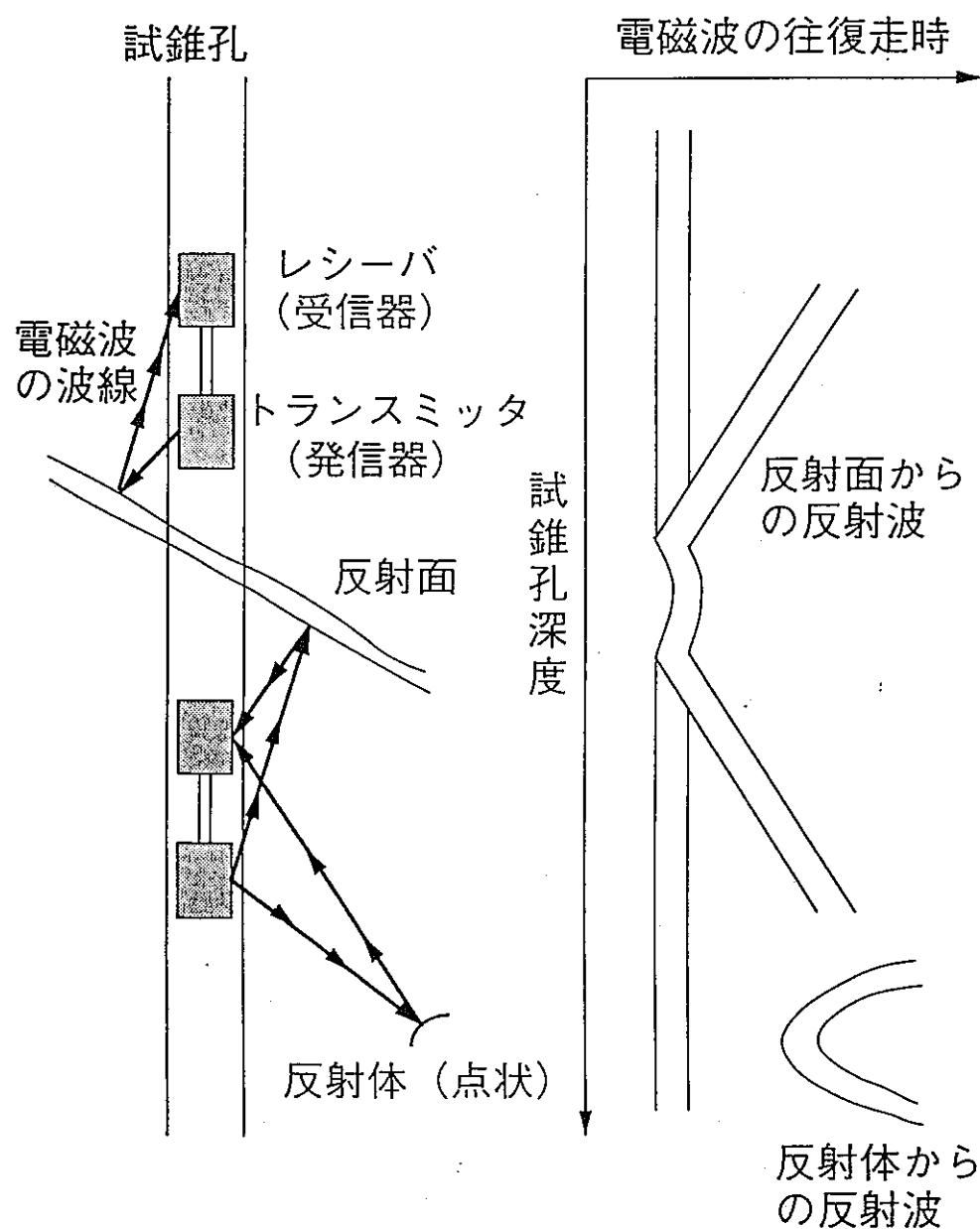


図-1 シングルホール調査測定模式図

3. 岩盤中を伝播する電磁波の一般的特性について

本章では、岩盤中を伝播する電磁波の一般的特性について簡単に説明する。

まず、電磁波の振幅の減衰について説明する。

岩盤中を伝播する電磁波は伝播するにしたがい減衰する。このときの減衰定数を α とすると、岩盤中では一般に下式が成り立つ⁴⁾。

$$\alpha = \sigma / 2 \times (\mu / \varepsilon)^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

σ ：岩盤の導電率（電気比抵抗の逆数、電気比抵抗については以下、比抵抗とする）

μ : 岩盤の透磁率

ε : 岩盤の誘電率

真空中の透磁率と誘電率をそれぞれ μ_0 , ϵ_0 、岩盤の比誘電率を ϵ_r とすると、

であるから、(1)式は次式のようになる。

$$\alpha = (\mu_0 / 4 \times \varepsilon_0)^{1/2} \times \{\sigma / (\varepsilon_r)^{1/2}\} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここで、

$$(\mu_0 / 4 \times \epsilon_0)^{1/2} = \text{一定} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

であるから、減衰定数 α は σ と ε で決定され、導電率が大きく（以下、比抵抗が低いと記述する）比誘電率が小さくなるほど減衰が大きく、逆に、導電率が小さく（以下、比抵抗が高いと記述する）比誘電率が大きくなるほど減衰は小さくなる。一般に堅硬な岩盤の比抵抗と比較して水の比抵抗は低く、さらに岩盤の比誘電率が5～10であるのに対し、水の比誘電率は約80と大きい。このことから、比抵抗が低く比誘電率が大きい部分は岩盤の含水量が多くなった部分であると考えられ、このような部分は割れ目帯や変質帯が発達している部分と対応するものと考えられる。

ところで、比誘電率は一般的に5～80であるのに対し、比抵抗は岩種や岩盤内の含水量により数Ωm～数十万Ωmと非常に幅広い値をとる⁵⁾ため、減衰定数 α の値は比抵抗値でほぼ決定されることになる。このことは、比抵抗が低いほど減衰が大きく、電磁波の岩盤内透過距離が短くなり、逆に、比抵抗が高いほど減衰が小さく、電磁波の岩盤内透過距離が長くなることを意味している。

次に、電磁波速度について説明する。

岩盤内を伝播する電磁波の速度を V_p 、真空中を伝播する電磁波の速度を V_0 。とすると以下の式が成り立つ⁴⁾。

$$V_p = V_c / (\varepsilon_r)^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

(5)式に示す通り、岩盤内を伝播する電磁波の速度は岩盤の比誘電率によって決定され、含水量が多い部分は電磁波速度が遅くなる。

傾斜角度を求める際に必要な電磁波速度は(5)式を用いて計算した。ただし、 ε_r は文献等で示される平均的な値とした。

4. 調査結果

調査は6つの地区で計6本の試錐孔を利用して行った。試錐孔の掘削深度や周囲の地質などを表-1に示す。以下、それぞれの試錐孔を利用して行ったシングルホール調査の結果について述べる。

表一 試錐孔概況

地区	試錐孔深度 (m)	孔内水位 (m)	ケーシング保孔 (m)	地質
A	221	1.9	6.0	斑れい岩
T	325	0.3	40.0	花崗閃綠岩
O	222	25.7	20.0	石英安山岩
D	410	180.0	71.0	石灰岩
K	302	48.0	180.0	砂岩
H	323	8.0	16.0	玄武岩

4. 1 A地区

4. 1. 1 測定仕様

対象岩盤は斑れい岩である。測定に使用したアンテナの中心周波数は60MHzで、測定は深度20m～200mまで1m毎に行った。

測定区間内の岩盤は良好で、測定に支障となるような崩壊などは認められなかった。表-2に測定仕様を示す。

4. 1. 2 測定結果

測定結果（レーダー反射図）を図-2に示す。図で縦軸は深度を、横軸は電磁波の往復伝播時間（電磁波がトランスマッタで発信されてから反射面で反射しレシーバで受信されるまでの時間）を示している。

図-2から19本の反射面が抽出できた。

表-3に、それぞれの反射面が試錐孔と交差する深度、傾斜角度、レーダー反射図において認められる反射面の長さを示す。なお、この地区の岩盤中を伝播する電磁波の速度は斑れい岩の比誘電率値（7程度⁶⁾）を(5)式に代入し、113m/μsecとした。

この地区の電磁波の岩盤内伝播速度を113m/μsecと仮定すると、電磁波伝播距離は平均して4m程度であった（図-2）。一方、同一試錐孔で実施された電気検層（電極間隔100cm）の結果によれば、この岩盤の比抵抗の平均値は950Ωm程度であった⁷⁾。このように、岩盤の比抵抗が950Ωm程度であればRAMACシステムにより試錐孔から4m程度の範囲の調査が可能であることがわかった。

レーダー反射図で、特に電磁波の振幅の減衰が大きい場所として、深度30m～40mがある（図-2）、同一試錐孔で行われたコア観察・ボアホールテレビの結果、この場所は派生を伴う割れ目・開口割れ目の多い部分に対応した⁷⁾。

表-2 測定仕様（A地区）

サンプリング周波数	6 3 0 . 7 0 8 8	MHz
サンプル数	5 1 2	
スタック数	2 5 6	
トランスマッタとレシーバの間隔	9. 3	m
測定間隔	1. 0	m
測定深度	2 0 ~ 2 0 0	m
測定点数	1 8 1	

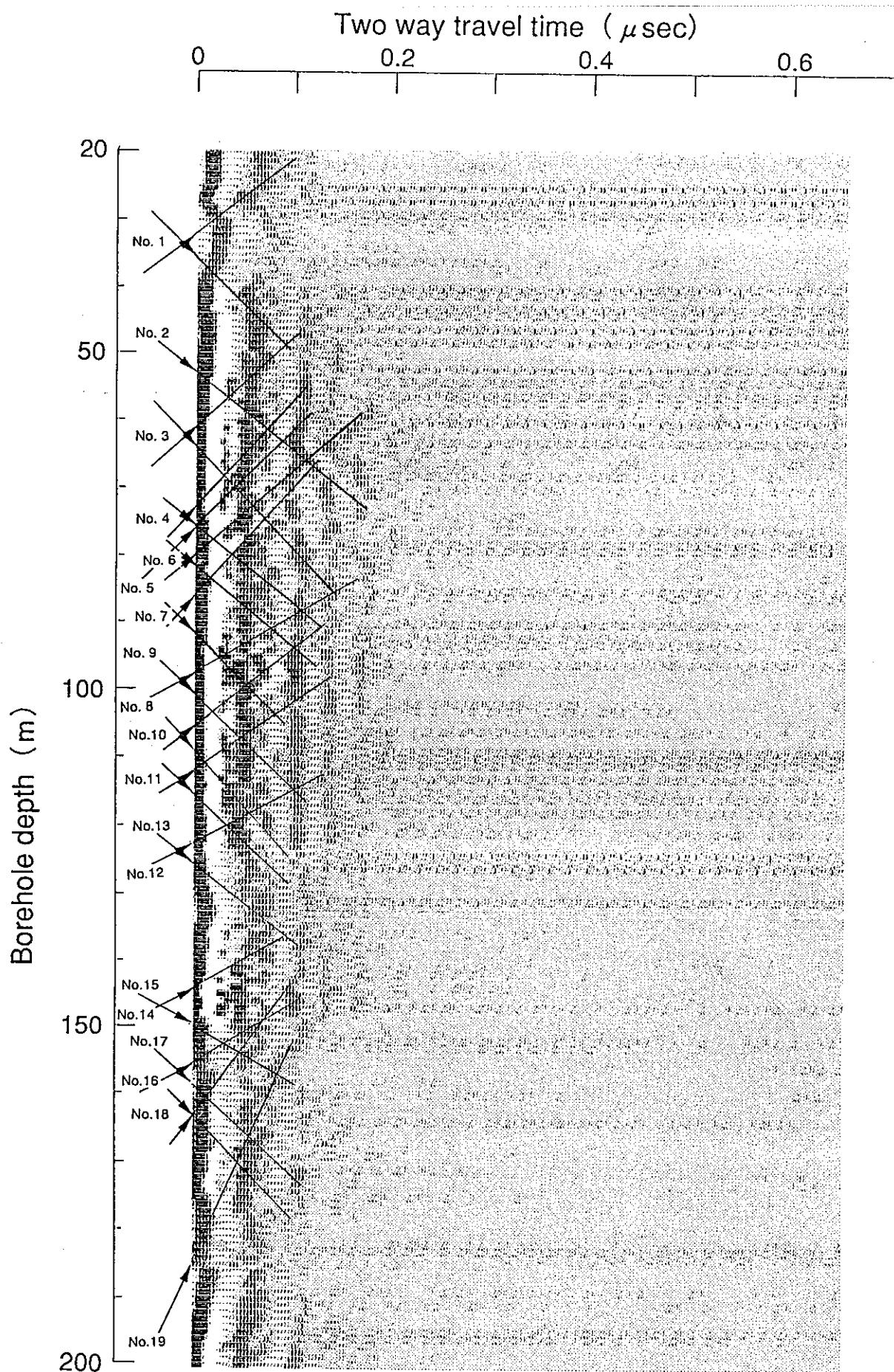


図-2 レーダー反射図 (A地区、60 MHzアンテナ)
深度：20m～200m

表-3 反射面抽出結果 (A地区、60MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	3 3	2	1 3	1 7
2	5 2		1 9	1 6
3	6 3	1 3	8	3 4
4	7 5	6	1 7	3 1
5	7 7	7		1 7
6	8 1	1 4	2 4	3 4
7	9 0	1 0	9	3 4
8	9 8	5 2		1 0
9	1 0 1		1 2	1 3
10	1 0 8	2 0	9	2 4
11	1 1 4	1 3	1 4	2 9
12	1 2 2	7 1		6
13	1 3 8		5 0	7
14	1 4 4	3 5		9
15	1 4 9		8 7	2
16	1 5 5	6 1		8
17	1 5 8		2 9	1 1
18	1 6 3	3	9	3 1
19	1 8 5	2		5 5

4. 2 T地区

4. 2. 1 測定仕様

対象岩盤は花崗閃緑岩である。測定に使用したアンテナの中心周波数は20MHzと60MHzで、測定はどちらのアンテナとも試錐孔深度45mから310mまで1m毎に行った。

測定区間内の岩盤は良好で、測定に支障となるような崩壊などは認められなかった。表-4に測定仕様を示す。

4. 2. 2 測定結果

測定結果（レーダー反射図）を図-3と図-4に示す。図-3は20MHzアンテナの、図-4は60MHzアンテナの結果である。どちらの図とも縦軸は深度を、横軸は電磁波の往復伝播時間を示している。

図-3から18本の反射面が、図-4から42本の反射面がそれぞれ抽出できた。

表-5と表-6に、それぞれの反射面が試錐孔と交差する深度、傾斜角度、レーダー反射図において認められる反射面の長さを示す。表-5は20MHzアンテナ、表-6は60MHzアンテナの結果である。この地区の岩盤中を伝播する電磁波の速度は、釜石鉱山で行ったクロスホール調査（対象岩盤は花崗閃緑岩）から求めた値の平均値とした⁸⁾（108m/ μ sec）。

この地区は、電磁波の岩盤内伝播速度を108m/ μ secと仮定すると電磁波伝播距離は20MHzアンテナで平均して20m程度、60MHzアンテナで平均して10m程度であった（図-3および図-4）。一方、同一試錐孔で実施された電気検層（電極間隔100cm）の結果によれば、この岩盤の比抵抗の平均値は2,200Ωm程度であった⁹⁾。このように、岩盤の比抵抗が2,200Ωm程度であればRAMACシステムにより試錐孔から20MHzアンテナで20m程度、60MHzアンテナで10m程度の範囲の調査が可能であることがわかった。

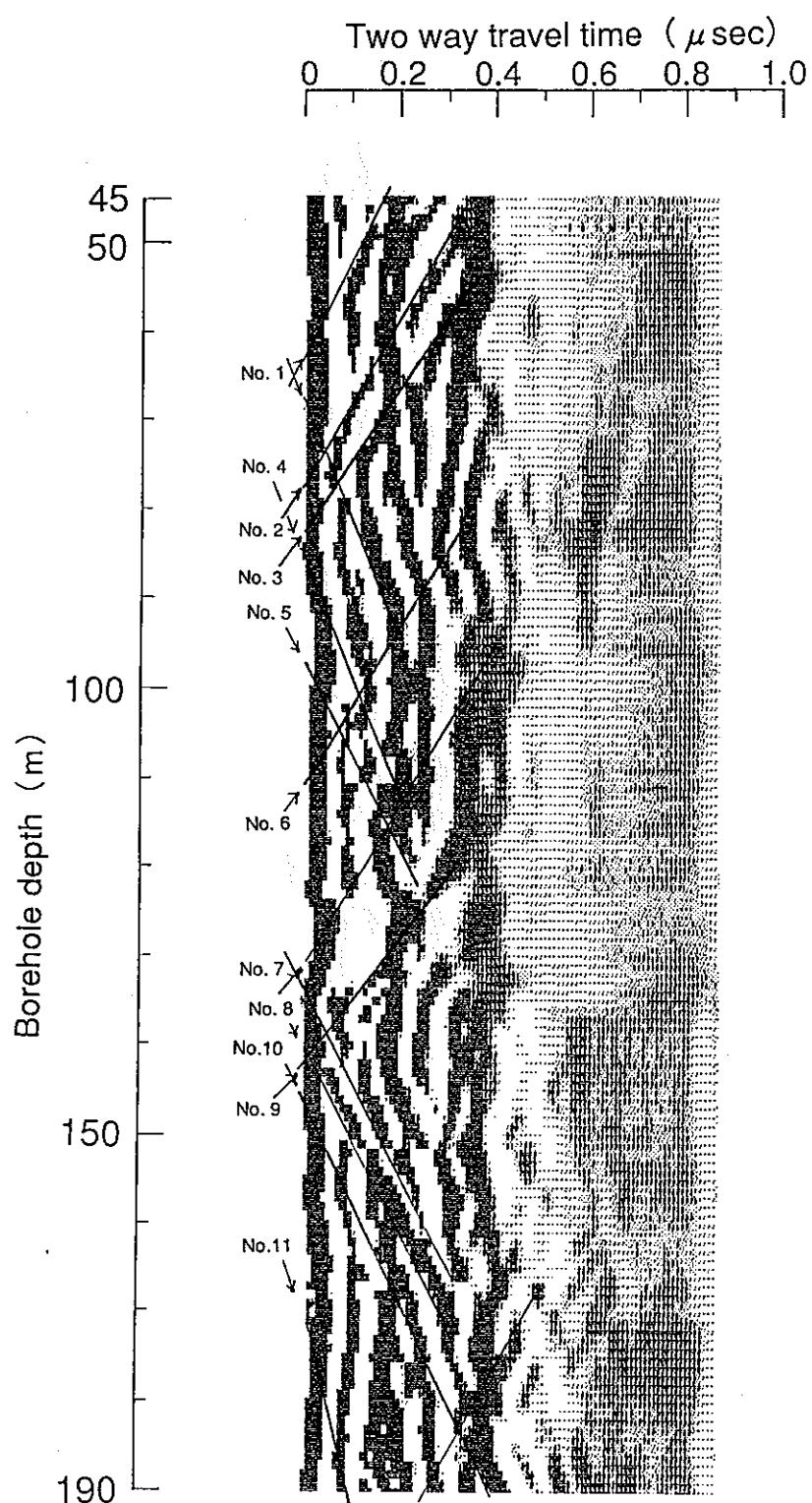


図-3 (a) レーダー反射図 (T地区、20 MHzアンテナ)
深度：45 m～190 m

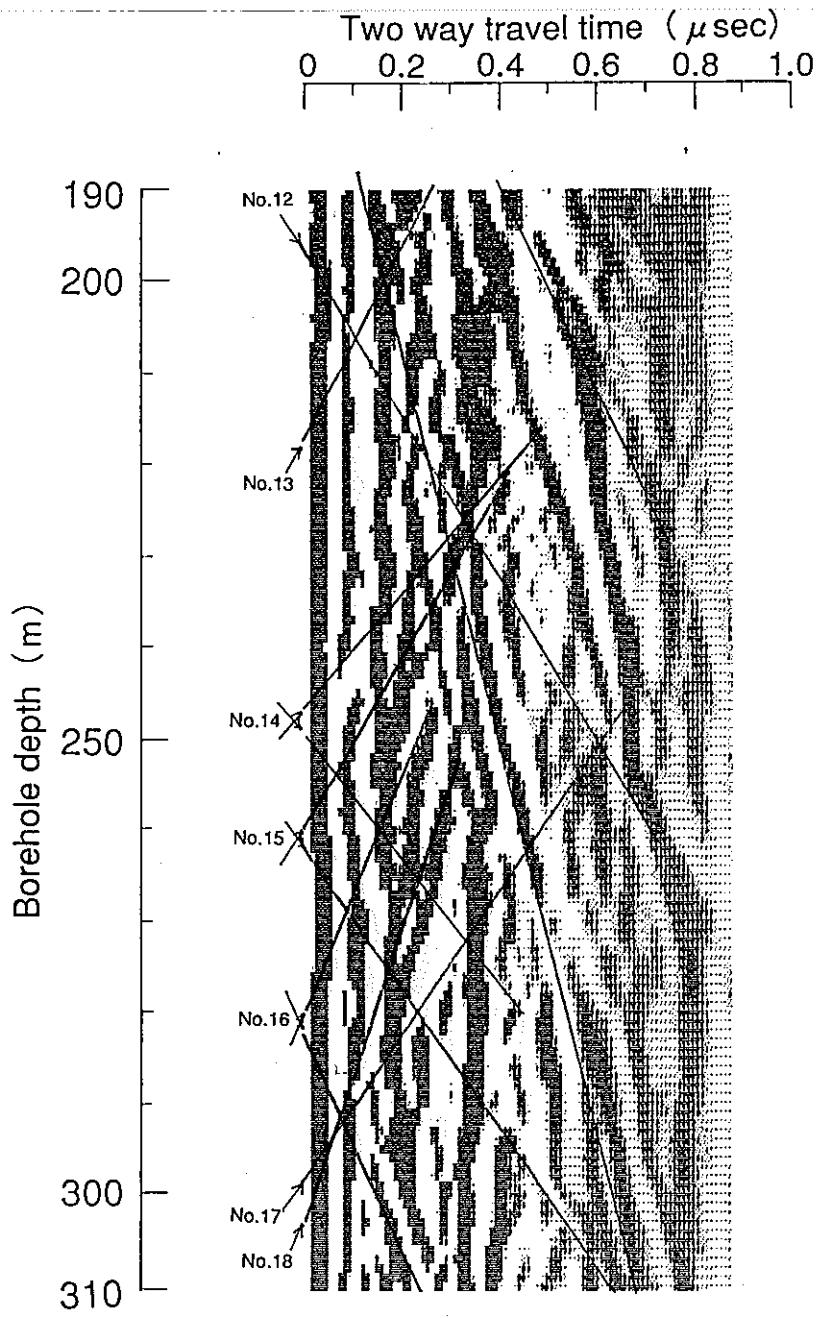


図-3 (b) レーダー反射図 (T地区、20 MHzアンテナ)
深度：190m～310m

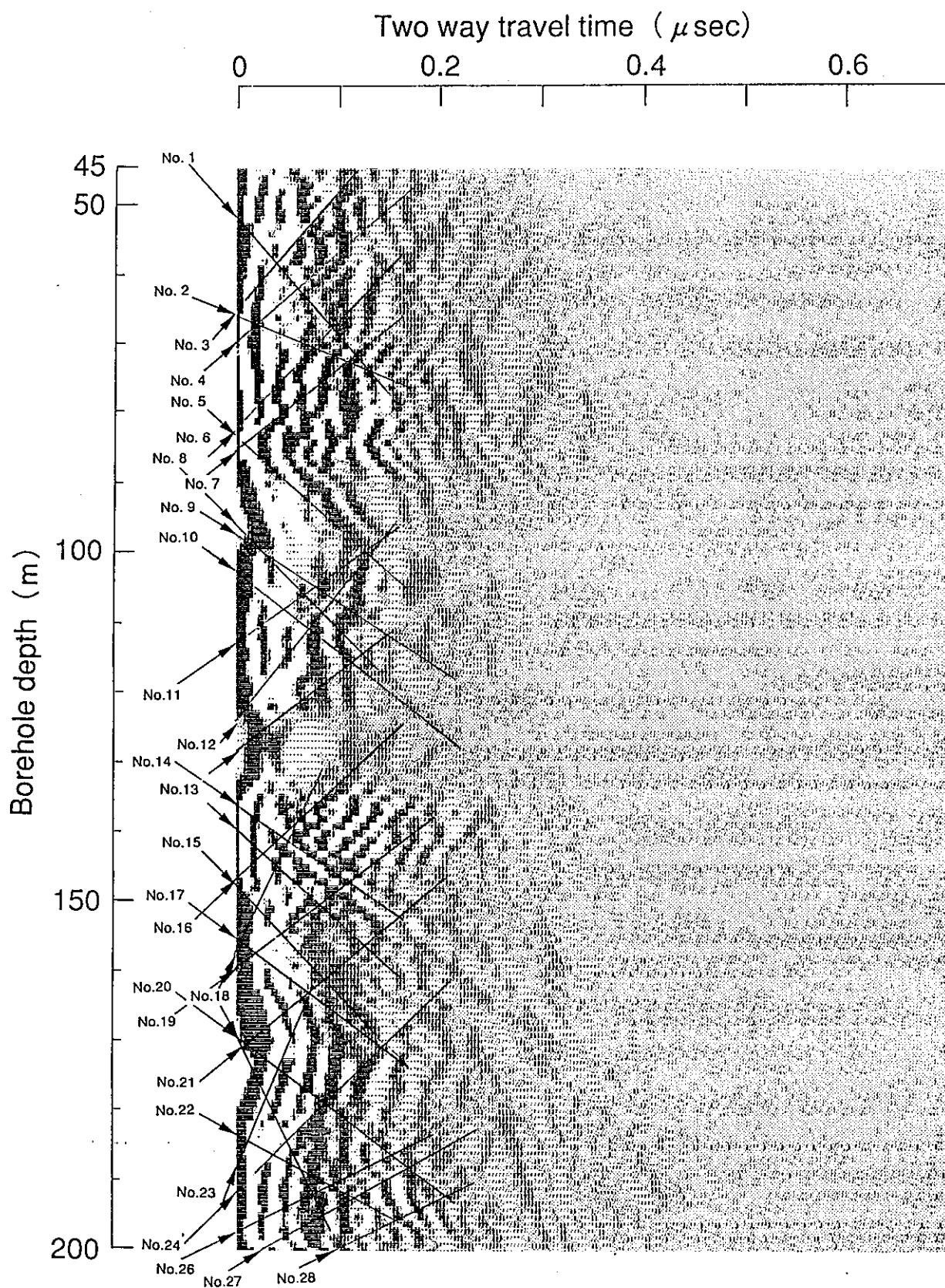


図-4 (a) レーダー反射図 (T地区、60 MHzアンテナ)
深度：45m～200m

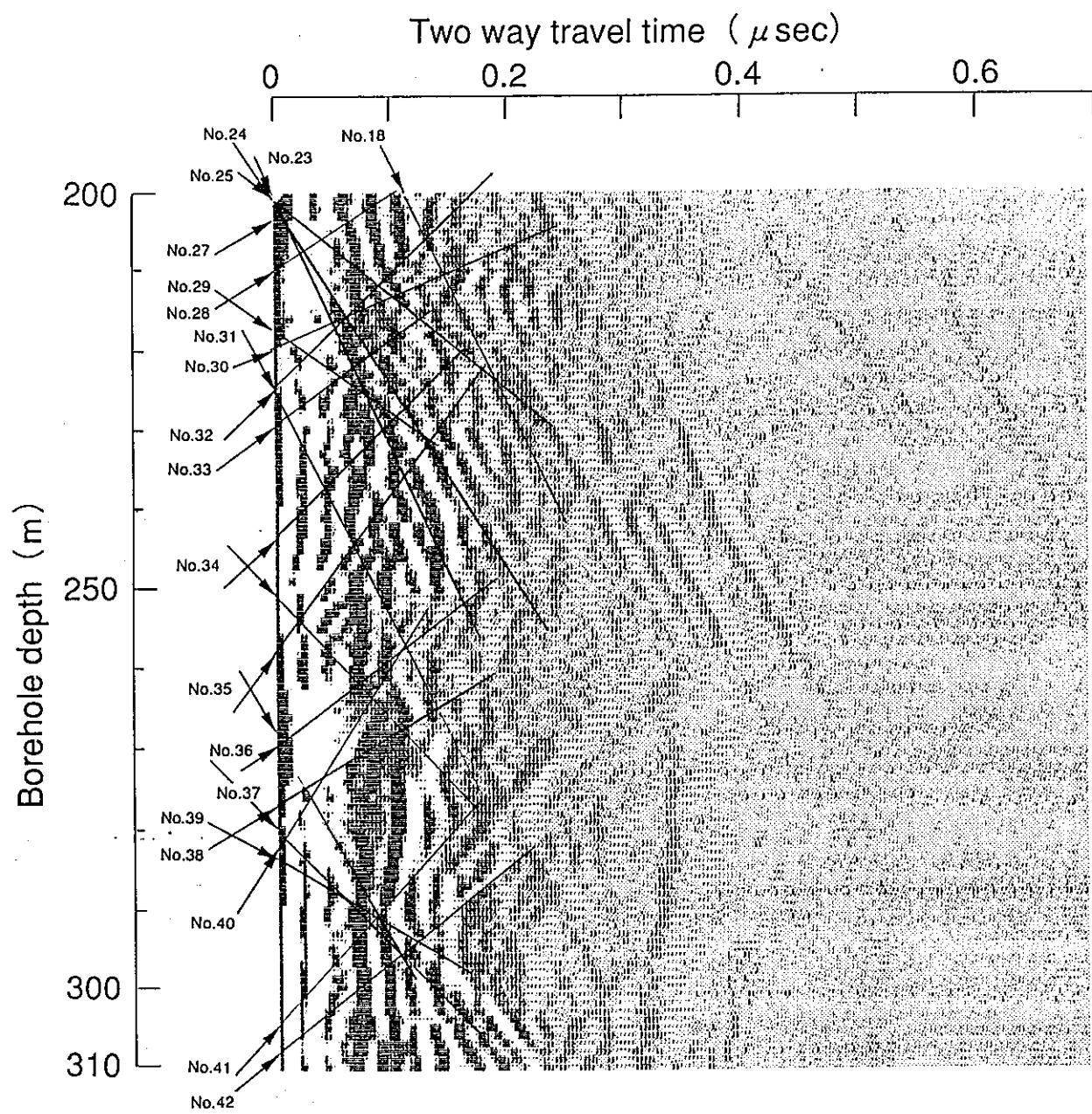


図-4 (b) レーダー反射図 (T 地区、60 MHzアンテナ)
深度：200m～310m

表-4 測定仕様 (T地区)

20MHzアンテナ	
サンプリング周波数	230.0386 MHz
サンプル数	512
スタック数	256
トランスマッタとレシーバの間隔	9.3 m
測定間隔	1.0 m
測定深度	45~310 m
測定点数	266

60MHzアンテナ	
サンプリング周波数	632.4526 MHz
サンプル数	512
スタック数	256
トランスマッタとレシーバの間隔	9.3 m
測定間隔	1.0 m
測定深度	45~310 m
測定点数	266

表-5 反射面抽出結果 (T地区、20MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	6.6	14	13	107
2	7.8	35		25
3	8.3	57		24
4	8.4		19	68
5	9.6		28	55
6	11.2	67		47
7	13.3	29	32	130
8	14.0		27	69
9	14.4	50		46
10	14.5		23	74
11	16.9		4	136
12	19.5		40	55
13	21.7	34		64
14	24.7	84	78	38
15	26.1	45	46	83
16	28.1	11	12	140
17	29.9	60		38
18	30.3	20		83

表-6 反射面抽出結果 (T地区、60MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	5 0		9	4 5
2	6 5		4 8	1 9
3	6 8	6		2 1
4	7 2	1 4		2 3
5	8 1		2 1	3 0
6	8 4	8		3 6
7	8 7	1 5		3 2
8	9 3		9	4 6
9	9 6		3 0	2 2
10	1 0 1		1 0	3 8
11	1 1 5	2 6		2 6
12	1 2 8	1 3		4 2
13	1 3 3	1 9	1 8	8 7
14	1 3 3		3 0	2 8
15	1 4 4		9	9 5
16	1 5 0	1 1		4 2
17	1 5 2		2 8	3 1
18	1 6 3	3	3	1 6 2
19	1 6 3	4 0		2 1
20	1 6 6		2 8	2 8
21	1 7 4	2 3		3 1
22	1 8 1		5 5	1 9
23	1 9 3	2	2	1 7 5
24	1 9 4	9	5	1 2 2
25	1 9 6		1 8	4 8
26	1 9 7	4 3		1 6
27	2 0 3	2 7		3 1
28	2 1 0	3 1		2 5
29	2 1 4		1 7	3 5
30	2 1 8	3	2	1 7 1
31	2 2 0	7 6		9
32	2 2 6	2 1		2 5
33	2 3 0	2 2		2 8
34	2 4 6	1 2	1 1	8 9
35	2 6 2	5	3	9 3
36	2 7 1	3 0		3 6
37	2 7 6		1 5	3 0
38	2 7 9	3 9		1 7
39	2 8 2		2 9	2 2
40	2 8 4	3		1 0 4
41	3 0 7	7		7 3
42	3 1 1	1 1		4 8

4. 3 O地区

4. 3. 1 測定仕様

対象岩盤は石英安山岩である。測定に使用したアンテナの中心周波数は20MHzと60MHzで、測定はどちらのアンテナとも試錐孔深度20mから207mまで1m毎に行った。

測定区間内の岩盤は良好で、測定に支障となるような崩壊などは認められなかった。表-7に測定仕様を示す。

4. 3. 2 測定結果

測定結果（レーダー反射図）を図-5と図-6に示す。図-5は20MHzアンテナの、図-6は60MHzアンテナの結果である。どちらの図とも縦軸は深度を、横軸は電磁波の往復伝播時間を示している。

図-6から6本の反射面が抽出できたが、図-5からは反射面を抽出することはできなかった。

表-8に図-6から抽出したそれぞれの反射面が試錐孔と交差する深度、傾斜角度、レーダー反射図において認められる反射面の長さを示す。なお、この地区の岩盤中を伝播する電磁波の速度は、石英安山岩の比誘電率値（8程度⁵⁾）を(5)式に代入し、 $106\text{m}/\mu\text{sec}$ とした。

この地区の電磁波の岩盤内伝播速度を $106\text{m}/\mu\text{sec}$ と仮定すると、電磁波伝播距離は20MHzアンテナで平均して5m程度、60MHzアンテナで平均して2.5m程度であった（図-5および図-6）。一方、同一試錐孔で実施された電気検層（電極間隔100cm）の結果によれば、この岩盤の比抵抗の平均値は $180\Omega\text{m}$ 程度であった¹⁰⁾。

以上のように、岩盤の比抵抗が $180\Omega\text{m}$ 程度であればRAMACシステムにより試錐孔から20MHzアンテナで5m程度、60MHzアンテナで2.5m程度の範囲の調査が可能であることがわかった。

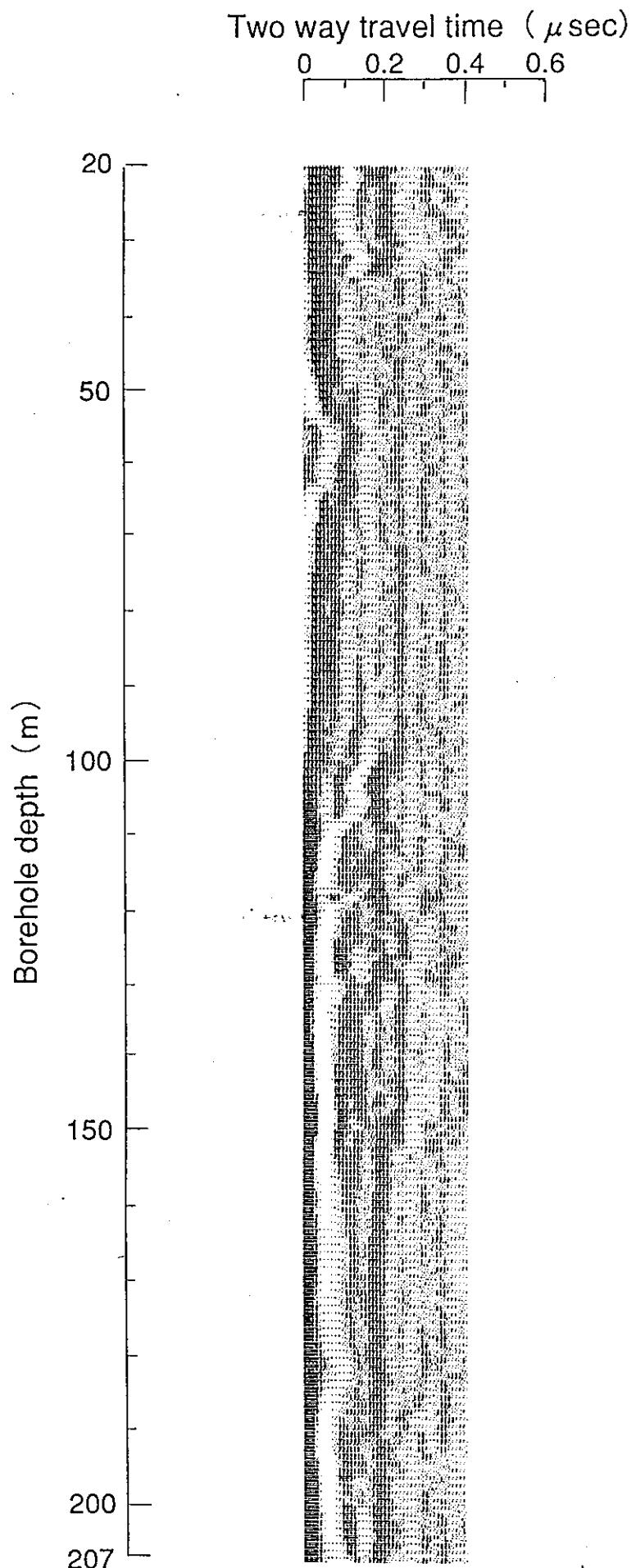


図-5 レーダー反射図 (O地区、20 MHzアンテナ)
深度：20m～207m

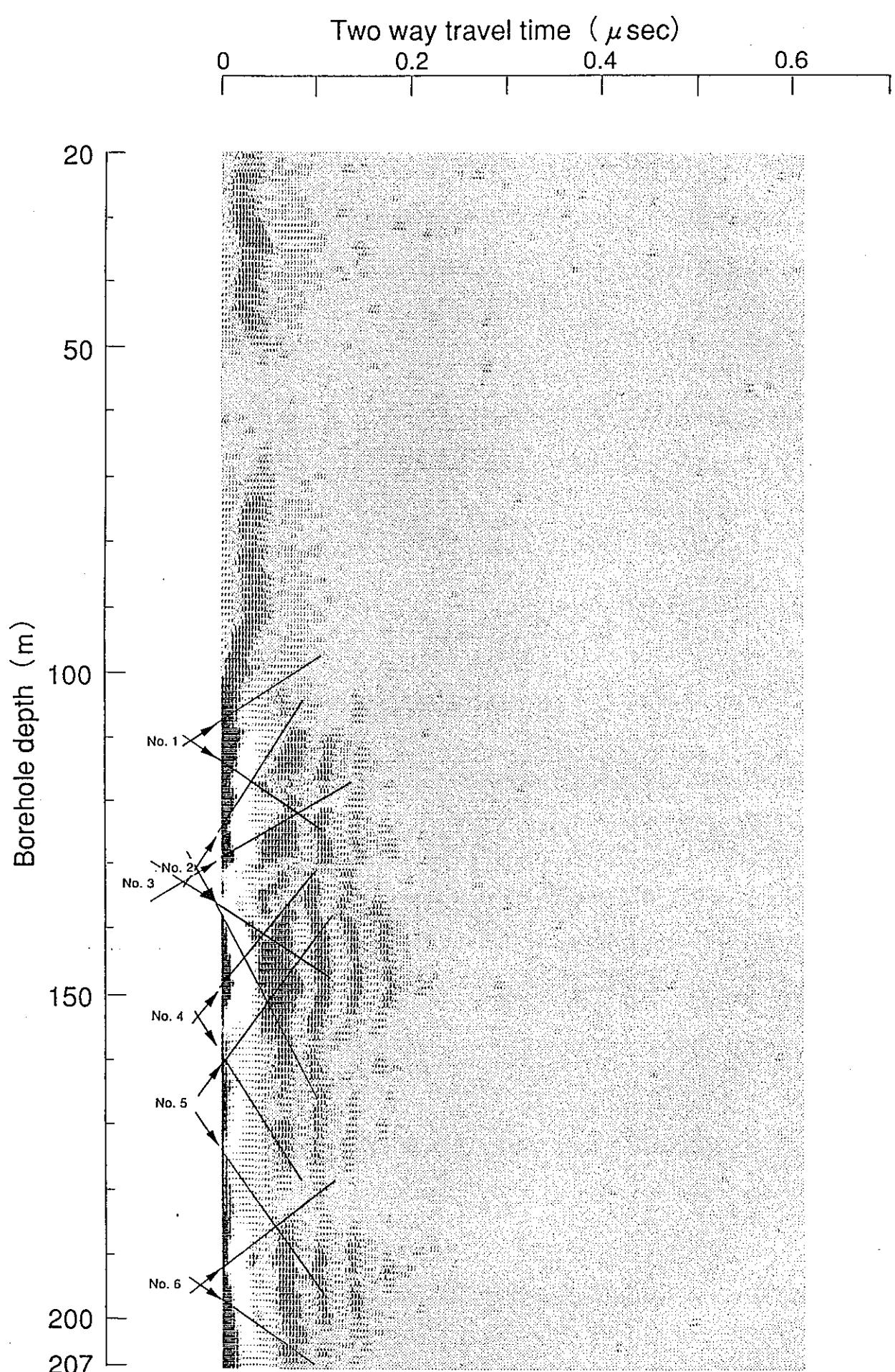


図-6 レーダー反射図（O地区、60 MHzアンテナ）
深度：20m～207m

表-7 測定仕様 (O地区)

20MHzアンテナ	
サンプリング周波数	230.0386 MHz
サンプル数	512
スタック数	256
トランスマッタとレシーバの間隔	9.3 m
測定間隔	1.0 m
測定深度	20~207 m
測定点数	188

60MHzアンテナ	
サンプリング周波数	632.4526 MHz
サンプル数	512
スタック数	256
トランスマッタとレシーバの間隔	9.3 m
測定間隔	1.0 m
測定深度	20~207 m
測定点数	188

表-8 反射面抽出結果 (O地区、60MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	111	29	27	28
2	131	2	2	123
3	132	31	25	31
4	153	3	3	85
5	166	8	4	67
6	194	11	6	23

4. 4 D地区

4. 4. 1 測定仕様

対象岩盤は石灰岩である。測定に使用したアンテナの中心周波数は20MHzで、測定は試錐孔深度80mから402mまで1m毎に行った。

測定区間内の岩盤は良好で、測定に支障となるような崩壊などは認められなかった。表-9に測定仕様を示す。

4. 4. 2 測定結果

測定結果（レーダー反射図）を図-7に示す。図は、縦軸が深度を、横軸が電磁波の往復伝播時間を示している。

図-7から23本の反射面が抽出できた。

表-10に図-7から抽出した反射面が試錐孔と交差する深度、傾斜角度、レーダー反射図において認められる反射面の長さを示す。なお、この地区の岩盤中を伝播する電磁波の速度は、石灰岩の比誘電率値（9程度¹¹⁾）を(5)式に代入し、 $100\text{m}/\mu\text{sec}$ とした。

この地区の電磁波の岩盤内伝播速度を $100\text{m}/\mu\text{sec}$ と仮定すると、電磁波は100m以上伝播している（図-7）。一方、同一試錐孔で実施された電気検層（電極間隔100cm）の結果によると、この岩盤の比抵抗の平均値は $8,500\Omega\text{m}$ 程度であった¹²⁾。このように、岩盤の比抵抗が $8,500\Omega\text{m}$ 程度であればRAMACシステムにより試錐孔から100m以上の範囲の調査が可能であることがわかった。

また、この地区では点状の反射体からの反射が多く認められる。地質調査の結果、この地区では多数の鍾乳洞や洞穴が発見されていることから¹²⁾、この反射体は岩盤中の空洞であると考えられる。

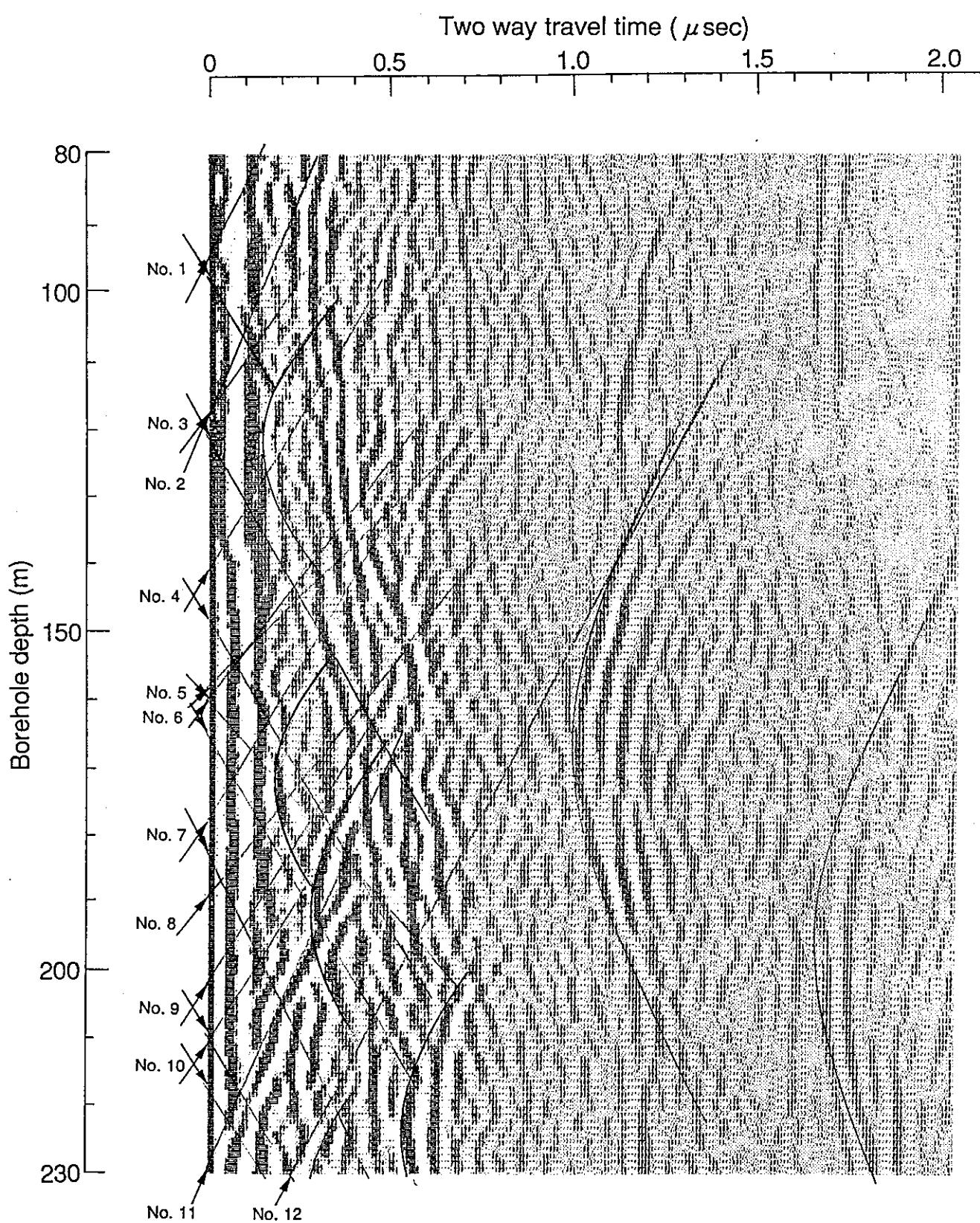
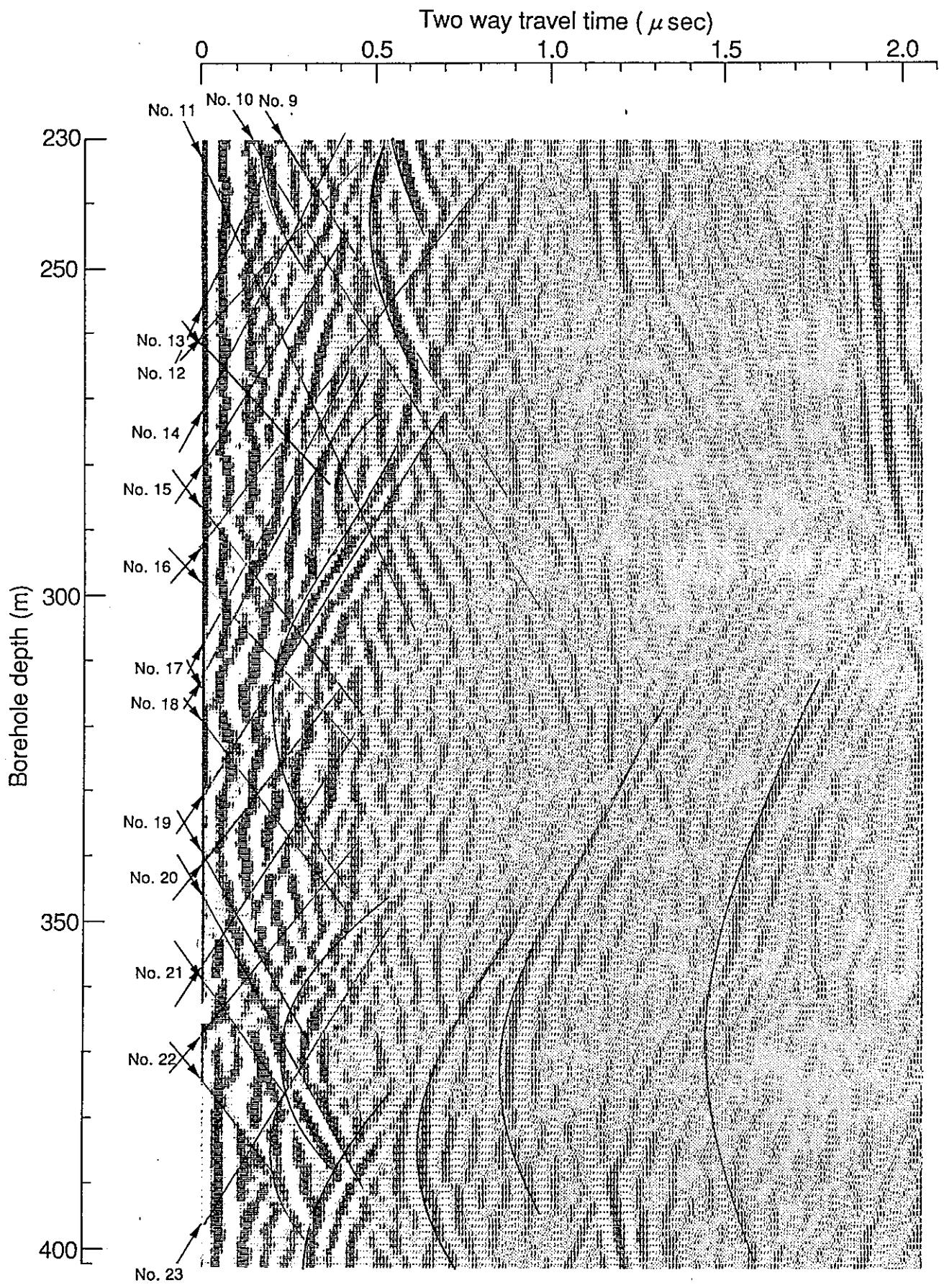


図-7 (a) レーダー反射図 (D 地区、20 MHzアンテナ)
深度：80m～230m



図一7 (b) レーダー反射図 (D地区、20 MHzアンテナ)
深度：230m～402m

表-9 測定仕様 (D地区)

サンプリング周波数	2 3 0 . 0 3 8 6	M H z
サンプル数	5 1 2	
スタック数	2 5 6	
トランスマッタとレシーバの間隔	7 . 3	m
測定間隔	1 . 0	m
測定深度	8 0 ~ 4 0 2	m
測定点数	3 2 3	

表-10 反射面抽出結果 (D地区、20MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	9 7	2 0	1 8	8 4
2	1 1 9	3 7		2 9
3	1 2 1	1 0	1 1	1 2 5
4	1 4 6	3 1	2 7	1 4 1
5	1 6 0	8 7	7 9	2 7
6	1 6 3	3 8	3 1	9 5
7	1 8 1	3 0	2 3	7 5
8	1 9 0	5 4		3 7
9	2 0 8	3 1	3 0	8 9
1 0	2 1 6	2 7	3 3	9 9
1 1	2 3 2	8	1 4	1 0 0
1 2	2 5 7	1 8		1 1 4
1 3	2 6 1	5 3	4 7	2 6
1 4	2 7 3	2 5		3 4
1 5	2 8 4	3 3	3 3	5 8
1 6	2 9 6	5 3	5 9	3 7
1 7	3 1 3	1 4	1 0	9 5
1 8	3 1 7	3 9	4 6	5 4
1 9	3 3 7	2 0	2 1	9 7
2 0	3 4 6	3 1	2 2	6 0
2 1	3 6 0	3 1	2 5	4 5
2 2	3 7 3	5 3	4 3	3 7
2 3	3 9 8	2 4		5 0

4. 5 K地区

4. 5. 1 測定仕様

対象岩盤は砂岩である。測定に使用したアンテナの中心周波数は20MHzと60MHzで、測定はどちらのアンテナとも試錐孔深度180mから287mまで1m毎に行った。

測定区間内の岩盤は良好で、測定に支障となるような崩壊などは認められなかった。表-11に測定仕様を示す。

4. 5. 2 測定結果

測定結果（レーダー反射図）を図-8と図-9に示す。図-8は20MHzアンテナの、図-9は60MHzアンテナの結果である。どちらの図とも縦軸は深度を、横軸は電磁波の往復伝播時間を示している。

図-8から3本の反射面が、図-9から4本の反射面がそれぞれ抽出できた。

表-12と表-13に、それぞれの反射面が試錐孔と交差する深度、傾斜角度、レーダー反射図において認められる反射面の長さを示す。表-12は20MHzアンテナ、表-13は60MHzアンテナの結果である。なお、この地区の岩盤中を伝播する電磁波の速度は、砂岩の比誘電率値（9程度⁵⁾）を(5)式に代入し、 $100\text{m}/\mu\text{sec}$ とした。

この地区的電磁波の岩盤内伝播速度を $100\text{m}/\mu\text{sec}$ と仮定すると、電磁波伝播距離は20MHzアンテナで平均して7.5m程度、60MHzアンテナで平均して3.5m程度であった（図-8および図-9）。一方、同一試錐孔で実施された電気検層（電極間隔100cm）の結果によると、この岩盤の比抵抗の平均値は $600\Omega\text{m}$ 程度であった¹³⁾。

以上のように、岩盤の比抵抗が $600\Omega\text{m}$ 程度であればRAMACシステムにより試錐孔から20MHzアンテナで7.5m程度、60MHzアンテナで3.5m程度の範囲の調査が可能であることがわかった。

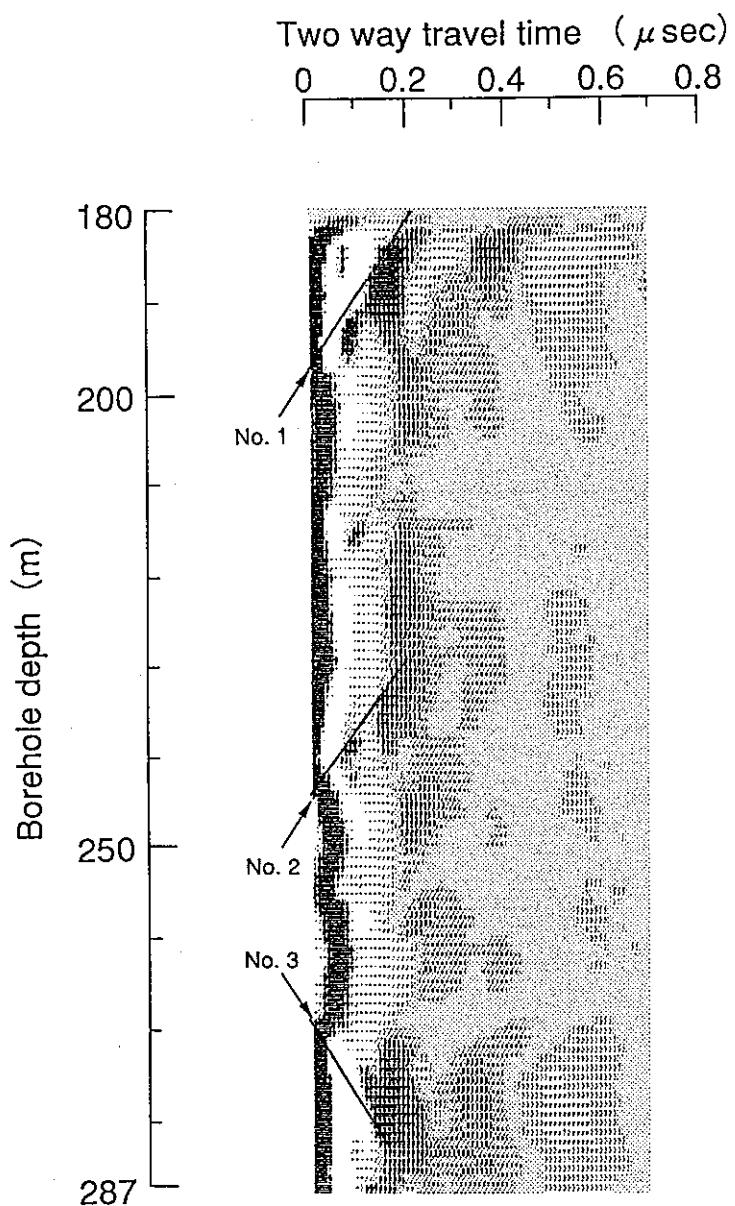


図-8 レーダー反射図 (K地区、20MHzアンテナ)
深度：180m～287m

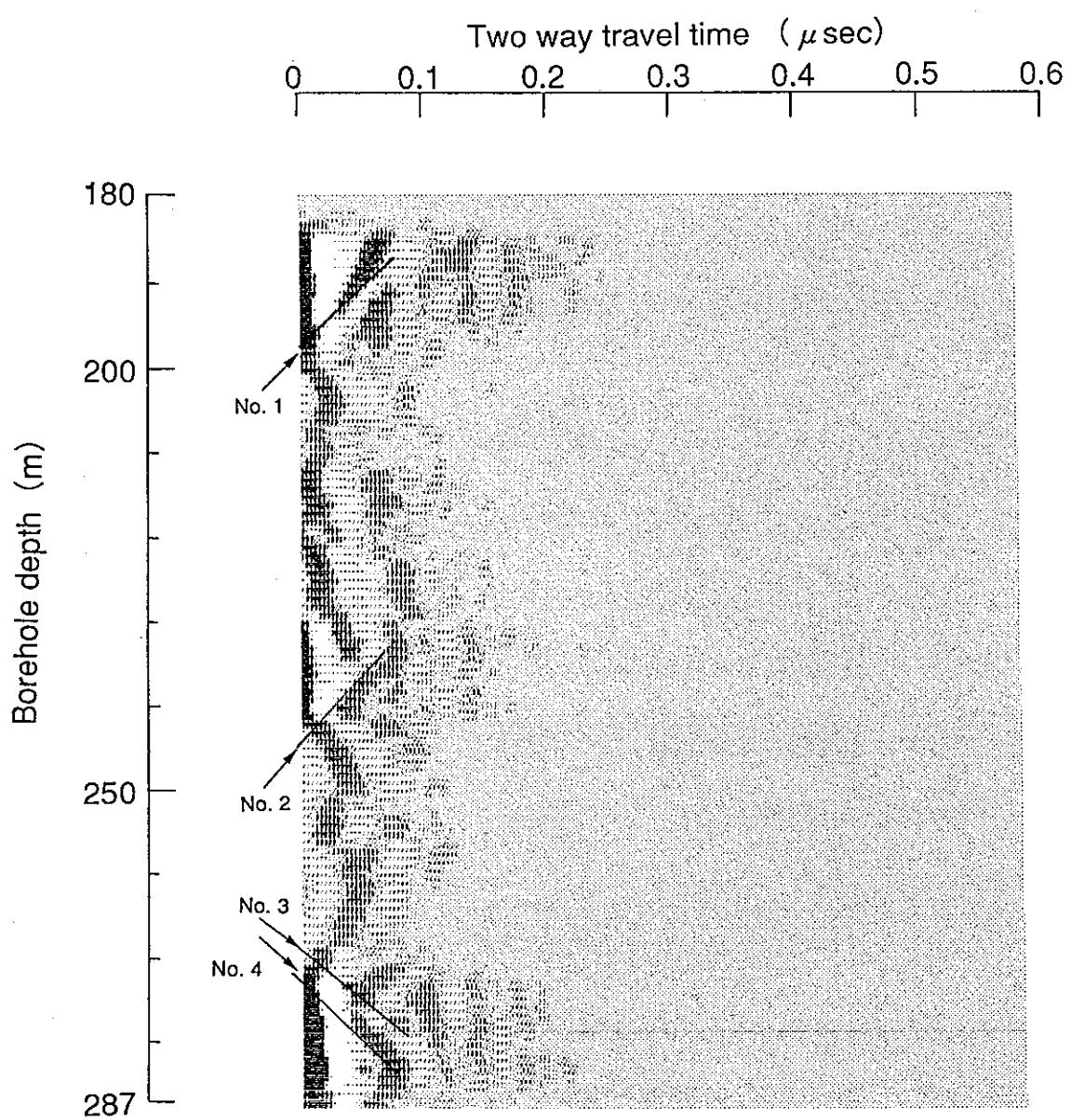


図-9 レーダー反射図 (K地区、60MHzアンテナ)
深度：180m～287m

表-11 測定仕様 (K地区)

20MHzアンテナ			
サンプリング周波数	2 3 0.	0 3 8 6	MHz
サンプル数	5 1 2		
スタック数	2 5 6		
トランスマッタとレシーバの間隔	9. 3	m	
測定間隔	1. 0	m	
測定深度	1 8 0 ~ 2 8 7	m	
測定点数	1 0 8		

60MHzアンテナ			
サンプリング周波数	6 3 2.	4 5 2 6	MHz
サンプル数	5 1 2		
スタック数	2 5 6		
トランスマッタとレシーバの間隔	9. 3	m	
測定間隔	1. 0	m	
測定深度	1 8 0 ~ 2 8 7	m	
測定点数	1 0 8		

表-12 反射面抽出結果 (K地区、20MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	1 9 8	2 2		7
2	2 4 5	1 7		1 0
3	2 6 8		2 2	7

表-13 反射面抽出結果 (K地区、60MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	1 9 8	2		6
2	2 4 5	3		7
3	2 6 9		9	5
4	2 7 2		3	6

4. 6 H地区

4. 6. 1 測定仕様

対象岩盤は玄武岩である。測定に使用したアンテナの中心周波数は20MHzと60MHzで、測定はどちらのアンテナとも試錐孔深度16mから313mまで1m毎に行った。

測定区間内の岩盤は良好で、測定に支障となるような崩壊などは認められなかった。表-14に測定仕様を示す。

4. 6. 2 測定結果

測定結果（レーダー反射図）を図-10と図-11に示す。図-10は20MHzアンテナの、図-11は60MHzアンテナの結果である。どちらの図とも縦軸は深度を、横軸は電磁波の往復伝播時間を示している。

図-10から1本の反射面が抽出できたが、図-11からは反射面を抽出することができなかった。

表-15に図-10から抽出した反射面が試錐孔と交差する深度、傾斜角度、レーダー反射図において認められる反射面の長さを示す。なお、この地区の岩盤中を伝播する電磁波の速度は、玄武岩の比誘電率値を9程度と仮定し、その値を(5)式に代入し、 $100 \text{ m}/\mu\text{sec}$ とした。

この地区の電磁波の岩盤内伝播速度を $100 \text{ m}/\mu\text{sec}$ と仮定すると、電磁波伝播距離は20MHzアンテナで平均して3.5m程度で、60MHzアンテナではほとんど伝播していない（図-10および図-11）。一方、同一試錐孔で実施された電気検層（電極間隔100cm）の結果によると、この岩盤の比抵抗は $50\Omega\text{m}$ 程度であった¹⁴⁾。

以上のように、岩盤の比抵抗が $50\Omega\text{m}$ 程度であればRAMACシステムにより試錐孔から20MHzアンテナで3.5m程度の調査が可能であり、60MHzアンテナではほとんど調査ができないことがわかった。

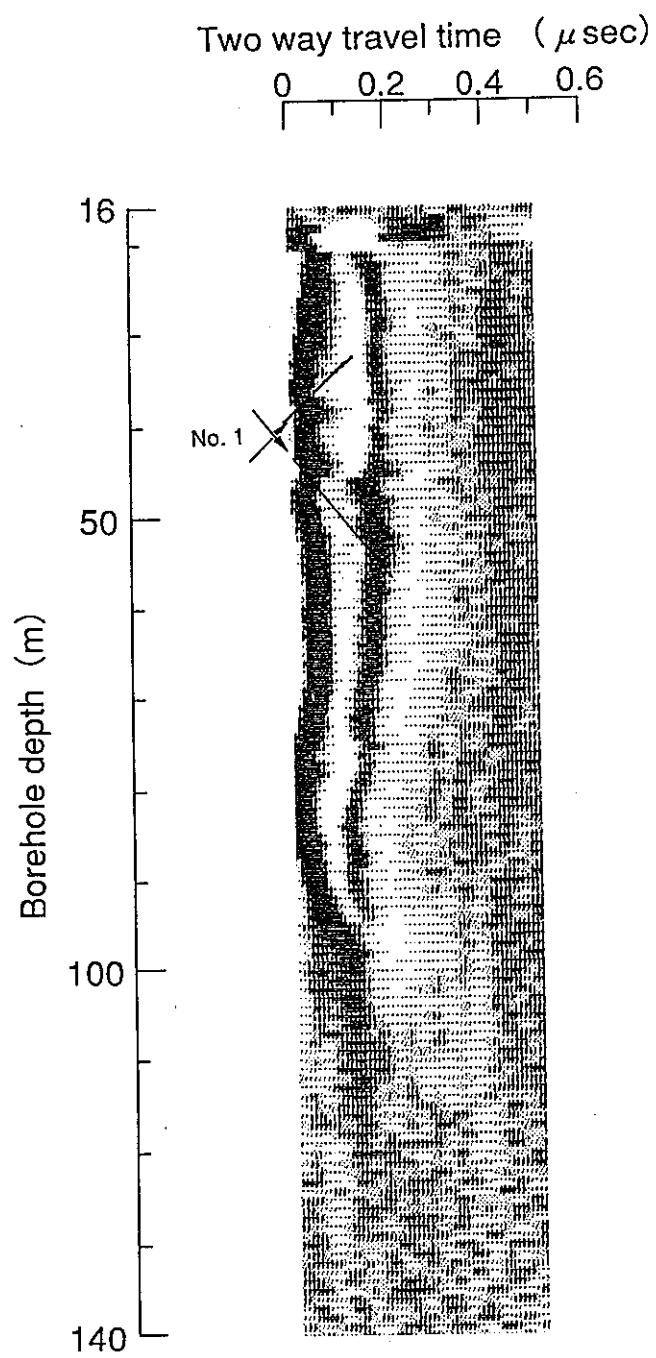


図-10 (a) レーダー反射図 (H地区、20 MHzアンテナ)
深度：16m～140m

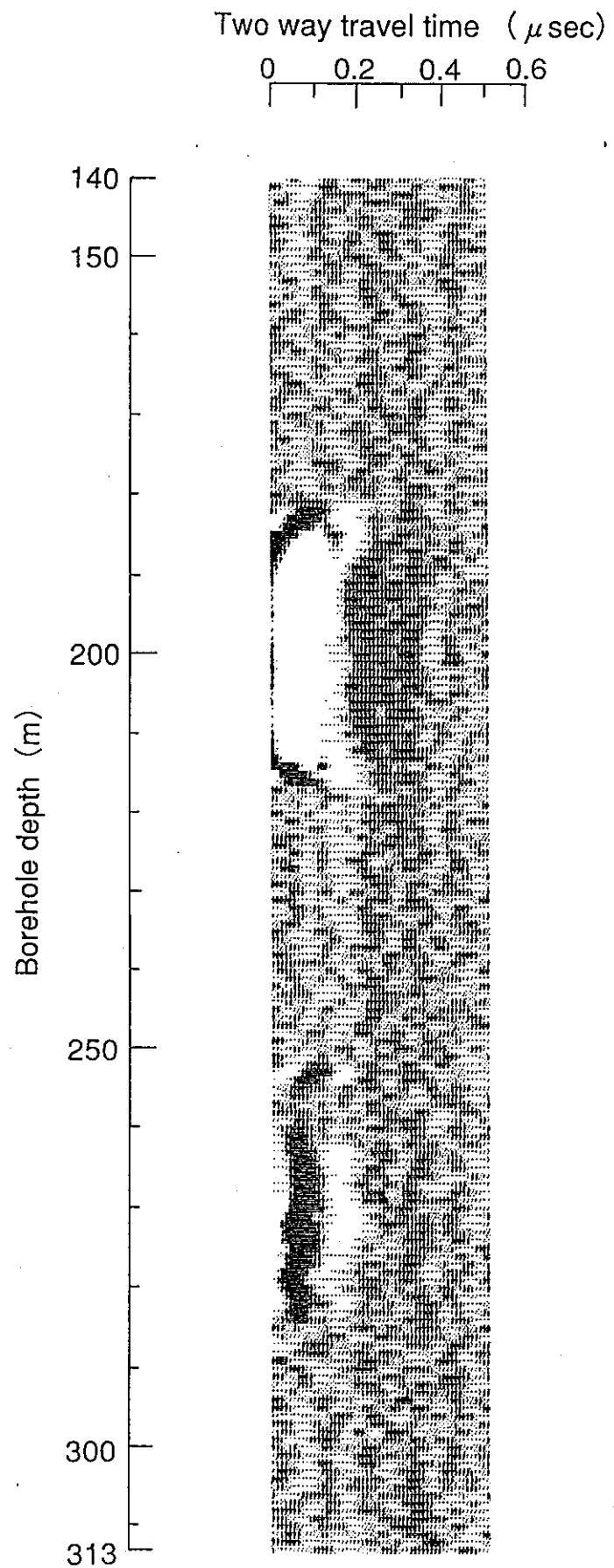


図-10 (b) レーダー反射図 (H地区、20 MHzアンテナ)
深度：140m～313m

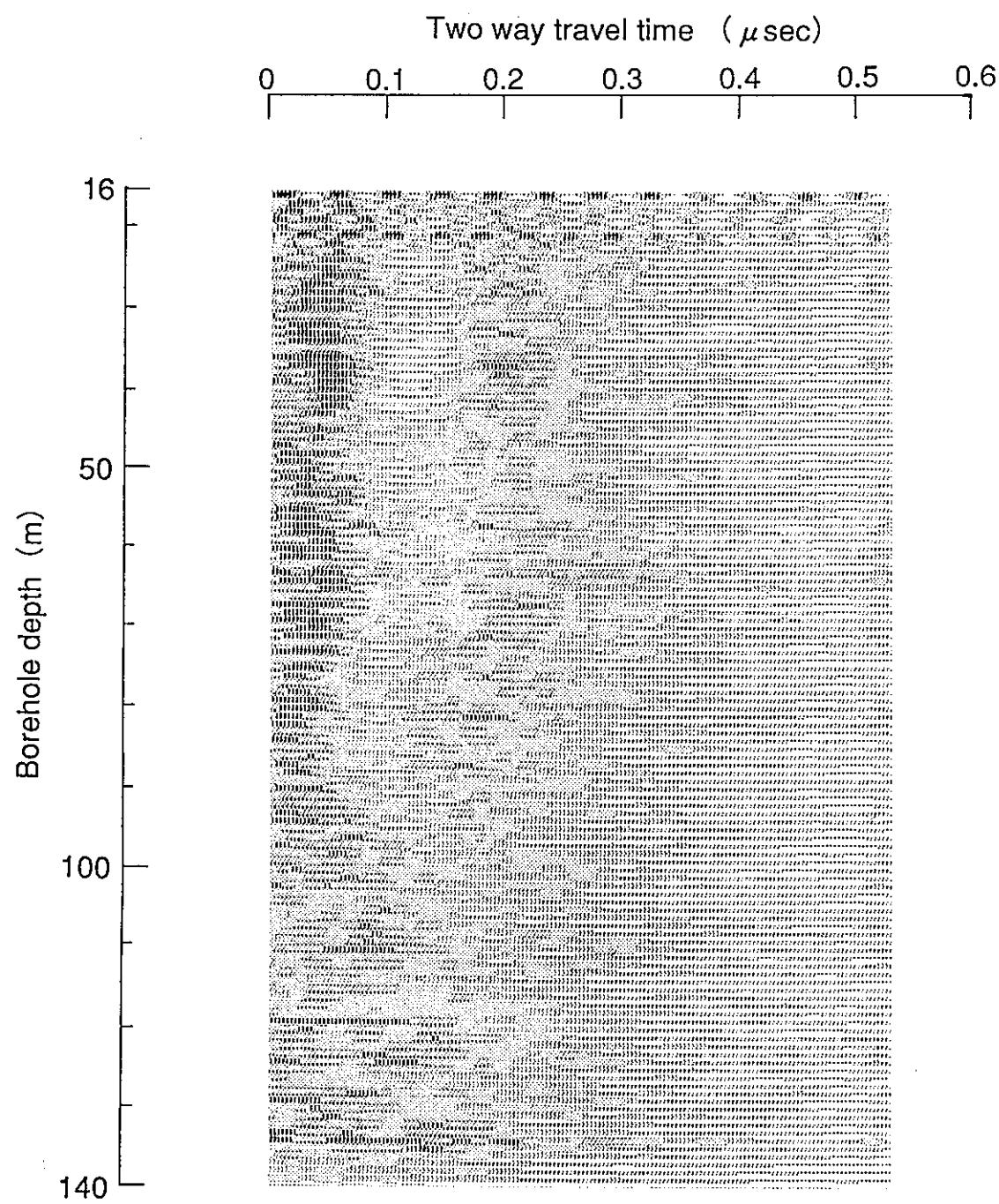


図-11 (a) レーダー反射図 (H地区、60 MHzアンテナ)
深度：16m～140m

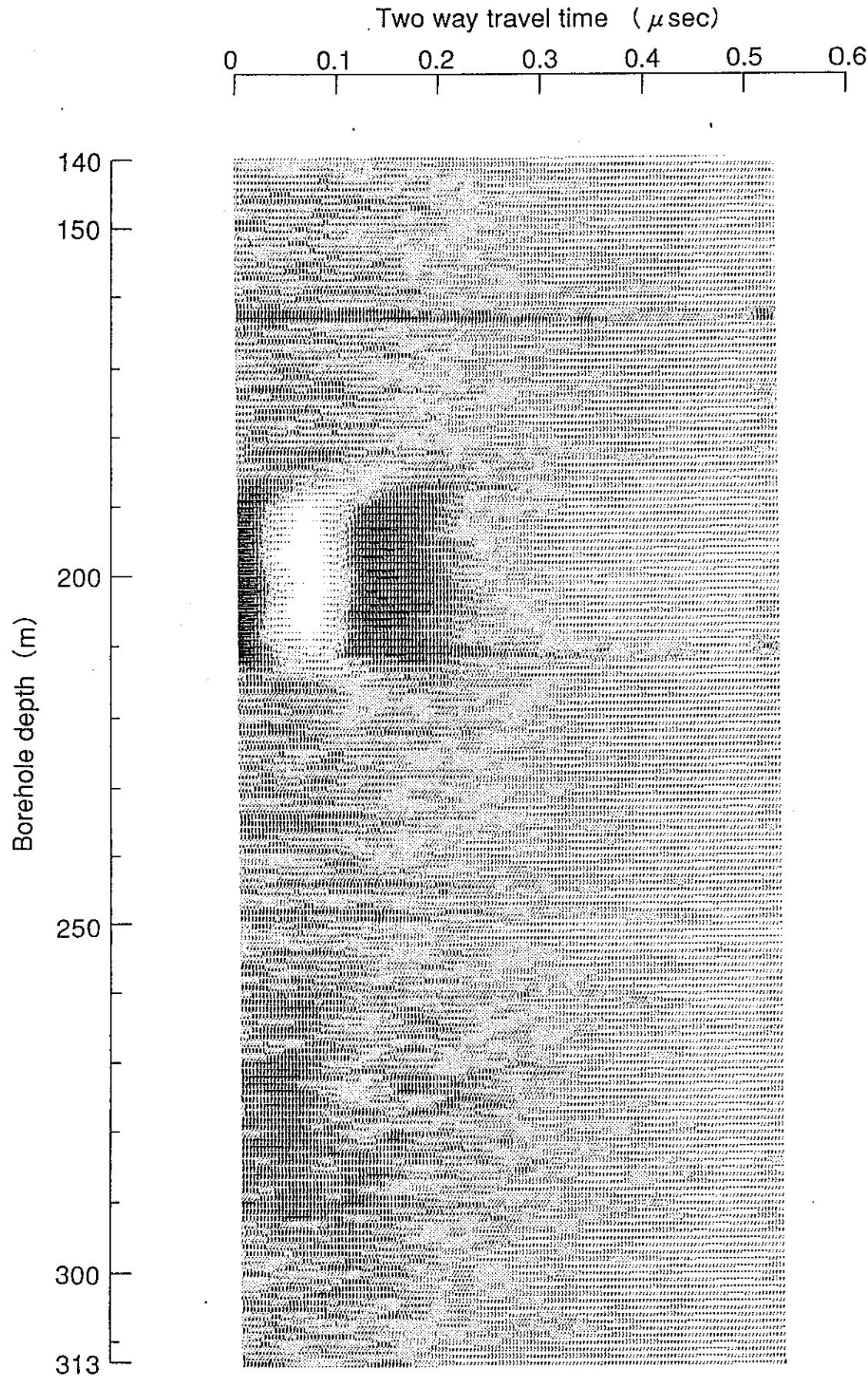


図-11 (b) レーダー反射図 (H地区、60 MHzアンテナ)
深度：140m～313m

表-14 測定仕様 (H地区)

20MHzアンテナ	
サンプリング周波数	230.0386 MHz
サンプル数	512
スタック数	256
トランスマッタとレシーバの間隔	9.3 m
測定間隔	1.0 m
測定深度	16~313 m
測定点数	298

60MHzアンテナ	
サンプリング周波数	632.4526 MHz
サンプル数	512
スタック数	256
トランスマッタとレシーバの間隔	9.3 m
測定間隔	1.0 m
測定深度	16~313 m
測定点数	298

表-15 反射面抽出結果 (H地区、20MHzアンテナ)

反射面 No.	交差深度 (m)	傾斜角度 (degree)		反射面長さ (m)
		上向	下向	
1	42	41	50	6

5. まとめ

日本の岩盤を対象に、6本の試錐孔を用いてレーダー法シングルホール調査を行った結果、

- ①レーダー反射図を求めた結果から表-16に示す反射面をそれぞれ抽出した。
- ②岩盤内を伝播する電磁波は岩盤の比抵抗が低いほど減衰が大きくなるため、電磁波の岩盤内伝播距離が短くなる。すなわち、岩盤の比抵抗が $50\Omega\text{m}$ 程度であれば、 20MHz アンテナで試錐孔から 3.5m 程度の範囲しか調査ができず、 60MHz アンテナではほとんど調査を行うことができないが、岩盤の比抵抗が $8,500\Omega\text{m}$ 程度であれば、 20MHz アンテナで試錐孔から 100m 以上の範囲まで調査を行うことができる事がわかった。この結果を表-17に示す。

以上、本稿においてRAMACシステムの日本の岩盤に対する適用試験結果を示した。今後は、レーダー法で抽出した反射面とBTV結果や岩芯観察結果と比較することにより反射面と岩盤内の割れ目（帯）を関係づける手法を確立することが重要となる。また、シングルホール調査におけるRAMACシステムの適用性を定量的に評価するために、岩盤の比抵抗と電磁波の岩盤内透過距離の関係を明らかにする。

表-16 反射面抽出結果

地 区	A		T		O	
アンテナの周波数 MHz	20	60	20	60	20	60
反射面の本数	—	19	18	42	0	6
地 区	D		K		H	
アンテナの周波数 MHz	20	60	20	60	20	60
反射面の本数	23	—	3	4	1	0

表中 —— は調査を行っていないことを示す。

表-17 岩盤の比抵抗値に対する、シングルホール
調査におけるRAMACシステムの適用性

地 区	A		T		O	
比抵抗平均値 ($\Omega \text{ m}$)	950		2, 200		180	
アンテナの周波数 (MHz)	20	60	20	60	20	60
電磁波透過距離平均値 (m)	-	4	20	10	5	2.5
適用性	-	△	○	○	×	×
地 区	D		K		H	
比抵抗平均値 ($\Omega \text{ m}$)	8, 500		600		50	
アンテナの周波数 (MHz)	20	60	20	60	20	60
電磁波透過距離平均値 (m)	100 <	-	7.5	3.5	3.5	1 >
適用性	○	-	△	△	×	×

表中、-は調査を行っていないことを示す。

表中、適用性はレーダー反射図により、

○ : RAMACシステムが十分適用可能

△ : RAMACシステムが適用可能

× : RAMACシステムが適用不可能
であることを示す。

参考文献

- 1) OLSSON, O., FALK, L., FORSLAND, O., LUNDMARK, L., SANDBERG, E. (1987) : Crosshole Investigations -Results from Borehole Radar Investigations, Stripa Project TR 87-11, SKB, Stockholm, Sweden
- 2) 佐久間秀樹, 坪田浩二 (1988) : 土岐花崗岩におけるRAMACシステムの適用試験について、物理探査学会第78回学術講演論文集、pp. 305-309
- 3) 仙波毅, 尾方伸久, 坪田浩二 (1989) : ボアホールレーダの我が国における花崗岩盤への適用試験、PNC TN7410 90-003
- 4) 安達三郎, 米山務 (1981) : 電波伝送工学、コロナ社、東京
- 5) 物理探査学会 (1989) 、図解物理探査、p. 216
- 6) 動燃事業団, 川崎地質㈱: レーダー法に関する岩盤特性試験岩盤物性測定結果報告書、PNC SJ7374 89-001
- 7) 三菱金属株式会社 (1990) : 西南・中部日本内帯斑レイ岩類の地質環境モデルデータセット整備のための深部地質環境データ、PNC ZJ4211 90-001
- 8) 仙波毅, 尾方伸久, 長谷川健, 岩崎浩, 渡辺邦夫 (1992) : ボアホールレーダによる花崗岩岩盤特性調査－釜石原位置試験場における調査結果について－、応用地質、32巻、6号、pp. 34-42
- 9) 三井金属株式会社 (1990) : 西南日本非グリーンタフ地域花崗岩類の地質環境モデルデータセットのための深部地質環境データ、PNC ZJ4174 90-001
- 10) 同和鉱業株式会社 (1990) : 東日本グリーンタフ地域流紋岩類の地質環境モデルデータセット整備のための深部地質環境データ、PNC ZJ4303 90-001
- 11) 物理探査学会 (1979) 、物理探査用語辞典、p. 391
- 12) 日鉄鉱業株式会社 (1991) : 北日本中・古生代石灰岩の深部地質環境データの購入、PNC ZJ4380 90-004
- 13) 日本鉱業株式会社 (1992) : 西南・中部日本外帯中・古生代堆積岩類の深部地質環境データの購入、PNC ZJ1117 92-001
- 14) 同和鉱業株式会社 (1992) : 東日本グリーンタフ地域新第三紀玄武岩類の地質環境モデルデータ、PNC ZJ1303 92-003