

試錐孔内用震源（スパーカー）の適用試験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年2月

地熱技術開発株式会社

この資料は、核燃料サイクル開発機構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。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い合わせは下記に願います。

〒509-5102

岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

東濃地科学センター

調査技術研究グループ

試錐孔内用震源（スパーカー）の適用試験

篠原 信男*

要 旨

1. 目的

岐阜県瑞浪市明世町月吉東濃地科学センター正馬様洞鉱業用地内において、試錐孔内用震源（スパーカー）を用いて弾性波トモグラフィを実施し、データ取得並びにデータ解析を行い、試錐孔間の地質構造を推定すると共に、取得データの品質や認識できる割れ目帯の規模や分解能などについて弾性波トモグラフィ調査技術開発の観点からスパーカーの適用性を評価する。

2. 方法

正馬様洞鉱業用地敷地内のAN-1孔及びAN-3孔を利用して、弾性波トモグラフィを実施した。

AN-1孔には試錐孔内用震源（スパーカー）を降下し、AN-3孔には受信器（ハイドロフォン）を降下して測定を行った。

3. 結果

試錐孔内用震源（スパーカー）は、少なくとも花崗岩のような高速度分布を有する地域においては、十分なエネルギー伝播を示し、弾性波トモグラフィの震源として十分機能することを確認した。

トモグラフィ解析から両孔間の速度構造の特徴をまとめると、以下のようなものである。

- ・表層付近でAN-3孔に対し45度の傾斜角をもつ低速度異常帯が認められる。
- ・165m付近に約10m幅の低速度異常帯が認められる。
- ・320m以深にAN-1孔から約60度傾斜の境界を持った低速度異常帯が認められる。

また、波動場の解析も実施し、チューブウェーブの抽出も行った。これらの結果も上記の結果を支持するものであった。

本報告書は、地熱技術開発株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号 10C0668

機構担当部課室

東濃地科学センター 調査技術研究グループ 藪内 聡

*：地熱技術開発株式会社 技術部

Nobuo SHINOHARA*

Field Application of the Borehole Sparker Source

Abstract

1. Purpose

The objectives of the survey are to evaluate the capability of borehole sparker source, and carry out a cross-hole seismic survey between two boreholes. The geology is granite and the aim is to detect and locate fracture zones.

2. Methods

The source and receiver are the sparker as a seismic source and 24 channel hydrophone with 2m hydrophone spacings as a receiver string, respectively. The sparker had been run into AN-1 borehole and hydrophone had been run into AN-3 borehole.

3. Result

The borehole sparker source works effectively under the granite area. Anisotropic effects are found and corrected. There are some features about the velocity.

- The feature correspond to a low velocity near surface anomaly dipping at 45 degrees or more towards AN-3.
- A 10 m band of lower velocity around a depth of 165 m
- A low velocity anomaly beneath a depth of 320 m in the receiver borehole with an upper boundary dipping at around 60 degrees towards the source borehole.

Work performed by Geothermal Energy Research & Development Co., Ltd. Under the contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Characterization Technology Development Group, Tono Geoscience Center.

*: Geothermal Energy Research & Development Co., Ltd.

目次

1. 概要	
1.1 件名	1
1.2 目的	1
1.3 試験期間	1
1.4 試験位置	1
1.5 調査員	1
2. 試験内容	
2.1 測定概要	3
2.2 計測システム	3
2.3 データ取得	7
2.4 スパーカ保守作業	7
3. 速度構造解析	
3.1 データ処理	15
3.2 速度構造イメージング (走時トモグラフィ)	15
3.3 解釈及びモデリング	16
4. 波動場解析	
4.1 トレース処理	26
4.2 マイグレーション	27
4.3 チューブウェーブ抽出	29
5. 結論	40
謝辞	41

1. 概要

1. 1 件名

試錐孔内用震源（スパーカー）の適用試験

1. 2 目的

岐阜県瑞浪市明世町月吉正馬様洞鉦業用地におけるAN-1孔及びAN-3孔を用いて、弾性波トモグラフィを実施することにより、試錐孔内用震源（スパーカー）の有効性について検討すると共に、AN-1/AN-3両孔周辺の地質構造を推定して、割れ目等の分布を把握する。

1. 3 試験期間

現地作業	自	平成10年11月 9日
	至	平成10年11月17日
現地作業	自	平成10年12月 9日
	至	平成10年12月21日
解析作業	自	平成10年12月22日
	至	平成11年 2月26日

1. 4 試験位置

試験場所：岐阜県瑞浪市明世町月吉正馬様洞鉦業用地（図1.1参照）。

試錐孔：AN-1号孔，AN-3号孔

1. 5 調査員

技術責任者	篠原 信男	地熱技術開発(株)技術部部长
現場代理人	山根 一修	同 技術部
現場技術員	大久保 覚	同 盛岡事務所
同	Ben Dyer	CSM Associates Limited
同	Jonathan Nicholls	CSM Associates Limited
同	Andy Jupe	CSM Associates Limited

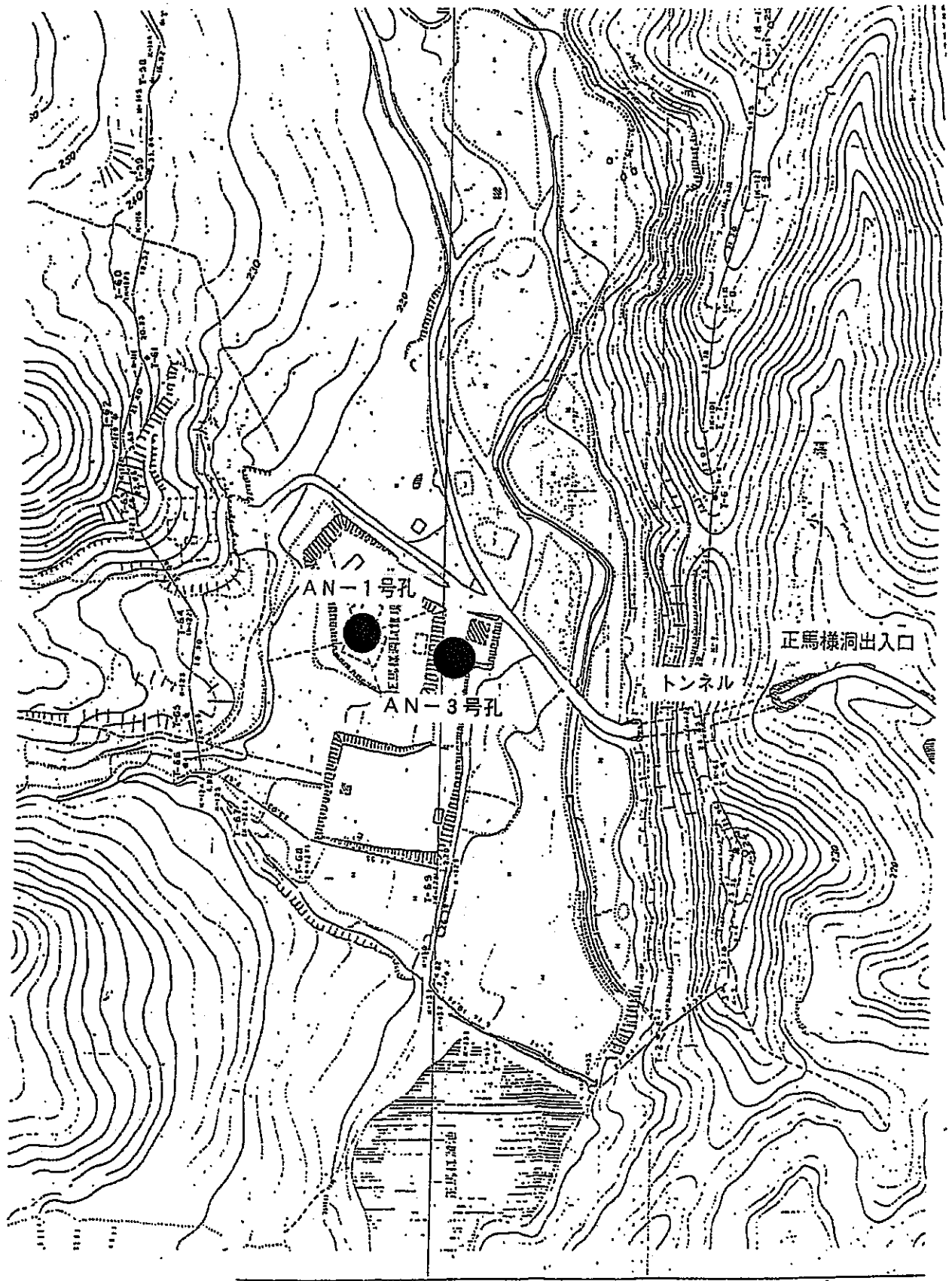


図1. 1 現地試験実験位置図

2. 試験内容

2. 1 測定概要

本試験は核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター（以下サイクル機構と略す）の正馬様洞鉦業用地内で実施された。測定作業は、地熱技術開発㈱及びCSMA社によってなされた。

震源にはサイクル機構所有の試錐孔内用震源（以下スパーカーと称する）を使用した。AN-1孔のリグ頂上にトップシーブを設置し、スパーカーを吊り下げた。スパーカーの昇降やトリガー信号の伝送は、AN-1孔から北へ約20m離れた地点に置いたエンジン駆動のウインチから伸びる7芯のアーマードケーブルによってなされた。尚、AN-1孔は裸孔であり、測定区間は地下水で満たされている。

AN-1孔とAN-3孔の孔口の標高差は2.2mで、AN-1孔のほうが高い。スパーカー深度はAN-1孔の孔口を0mとし、当該箇所のアーマードケーブルにマークを着けた。その後、各深度の計測はウインチのケーブルカウンターで測定を行った。毎日の測定の終了時にマークとウインチのケーブルカウンターの差異を検査したが、誤差は認められなかった。

スパーカーはケーブルヘッドと呼ばれる接続アダプターによりアーマードケーブルと結合される。このケーブルヘッドはアーマードケーブルの芯線とスパーカーの結合部に外部からの流体が侵入することを防ぎ、スパーカーの重量を支える役割を果たしている。アーマードケーブルの先端に接続されたスパーカーはウインチを搭載したワイヤーラインスキッドによって孔内に降下される。アーマードケーブルのテフロン被覆された7芯の導電線により、地上コントロールユニットからスパーカーに電力を送る。

(図2.1)

スパーカーからの各ショットは、同敷地内にあるAN-3孔に設置した24連ハイドロフォン（2m間隔）によって受振された。このハイドロフォンは、軽量であり、昇降は人力で行った。ハイドロフォンの設置深度は孔口を0mとした。また、ハイドロフォン・ケーブルに各ポジション毎にテープでマークを着けることで設置深度の確認を行った。

AN-3孔で受振され地震波形は、ハイドロフォンケーブルを通じて、敷地内に設置した計測車内の24チャンネル地震探鉦器に繋がれ、増幅後にハードディスクにデジタル記録される。地震探鉦器は、スパーカー用地上コントロールユニットから出されるトリガー信号によって記録を開始する。

AN-1孔及びAN-3孔の平面投影図を図2.2に示した。解析に使用した平面は真北から72度Eの平面である。図2.2の縮尺は1/500で、以後解析に使用する図面は1/2000とした。

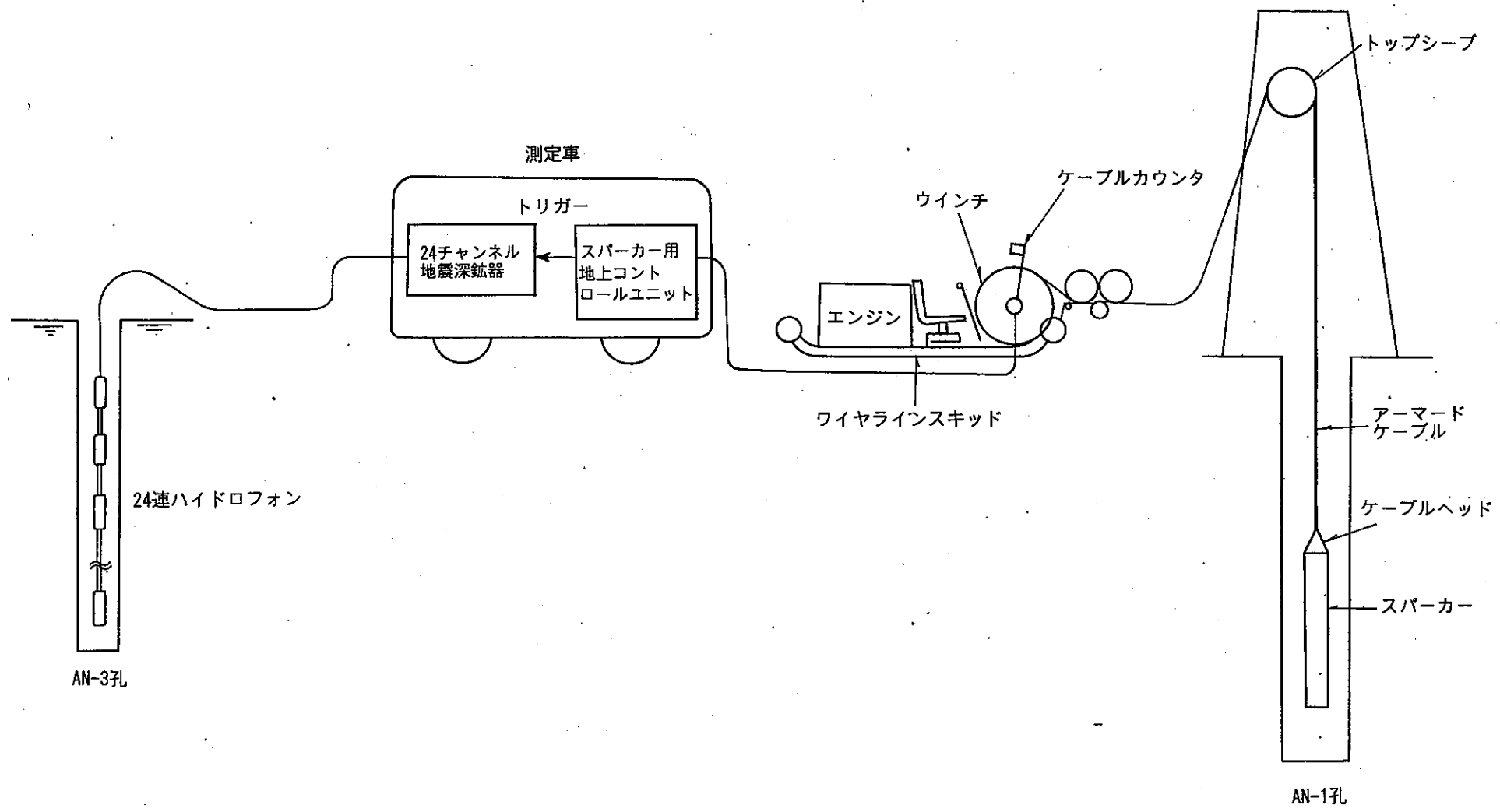
2. 2 計測システム

本システムは、スパーカー、孔内用ハイドロフォン、スパーカー用地上コントロールユニット及び地震探鉦器より構成される。

2. 2. 1 スパーカー及びスパーカー用地上コントロールユニット

スパーカー及びスパーカー用地上コントロールユニット（両者ともCSMA社製）は核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター所有のものを使用した。

図 2. 1 測定システム概要



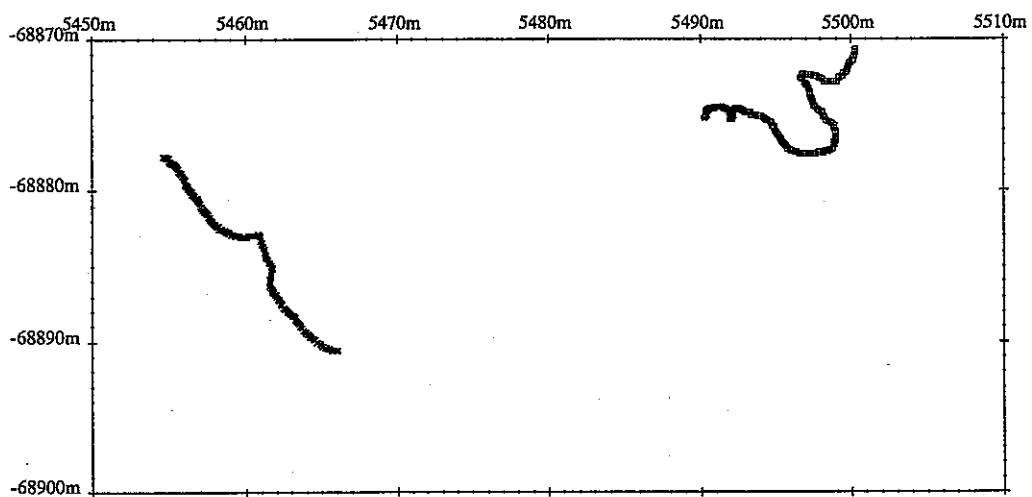


図2. 2 AN-1孔(左側)とAN-3孔(右側)の孔跡平面図(縮尺 1:500)

(寸法)

外径	80mm
全長	4,370mm

(使用環境)

耐圧	200bar
温度	10~70°C
使用ワイヤライン	7芯アーマードケーブル

(性能)

弾性波周波数帯域	100~2,000Hz
弾性波の圧力レベル	震源から1mの距離で1.5bar ±10%
キャパシタ容量	126μF ±10%
発信レート	2回/分以内

2. 2. 2 地震探鉱器

Geometrics社のSmartseisを使用した。当該機器の概要を示す。

Low cut Fil.,	25,25,50,70,100,140,200,280,400 (Hz)
High cut Fil.,	250,500,100 (Hz)
Power Notch Fil,	50,60,150,180
Anti-alias Fil,	automatic
A/D conversion	20bit

今回のデータ取得仕様（地震探鉱器の設定パラメータ）を以下に記す。

サンプリング間隔：0.125ms (=8kHz)

サンプル数：1536 (=192ms)

プレトリガー：10ms

フィルタ：Anti-aliasのみ

トリガー：スパーカ用地上コントロールユニットからのopto-isolateシグナル

2. 2. 3 孔内用ハイドロフォン

Innovative Transducers社のDH-5を使用した。

重量（地上）	178kg/km
重量（水中）	51kg/km
ケーブル外径	14mm
ハイドロフォン外径	38mm
ハイドロフォン長さ	200mm
稼動温度	-2~70°C
加速度分解能	70dB
加速度感度	1volt/gal
ハイドロフォン数	24連

2. 3 データ取得作業

本試験における発振及び受振位置は下記の通りである。

- ・ スパーカー (AN-1孔) : 深度30~364m ショット間隔1m
- ・ ハイドロフォン (AN-3孔) : 深度30~364m ハイドロフォン間隔2m

Position 1	30m - 76m (2m×24チャンネル)
Position 2	78m - 124m (同 上)
Position 3	126m - 172m (同 上)
Position 4	174m - 220m (同 上)
Position 5	222m - 268m (同 上)
Position 6	270m - 316m (同 上)
Position 7	318m - 364m (同 上)

総測定数は 168 (受信点) × 335 (ショット点) = 56,280点 であった。

測定においては、ハイドロフォンを所定のポジションに固定して、スパーカを最深深度 (364m) から1m毎にショットを行った。こうしてスパーカを30mまで引き上げて、ハイドロフォンの1ポジションの測定を終了し、次のポジションへと引き上げて固定して、同様にして測定を行った。ハイドロフォンの1ポジションあたりに要した測定時間は約3時間であった。スパーカのメンテナンスのため、ハイドロフォン2ポジション毎にスパーカを地上に回収して、電極交換等を行った。メンテナンスには1回あたり約3~4時間を要した。

試験開始前に、スパーカ及びハイドロフォンとも最深部 (364m) に降下して、テストを行った。スパーカ発振時 (shot-instant) と記録された時系列との間により再現性が認められたことから、トリガーが問題なく作動していること及び各発振毎の震源波形、エネルギーに大きなばらつきがないことを確認できた。

また、ワイヤーラインスキッドからの漏洩電流などエンジン回転に伴うデータへのノイズの混入は、エンジンのON/OFFをすることで確認したが、干渉は認められなかった。このことにより、測定時にエンジンを止めることなく、データ取得を行うことを決定した。

データの取得作業においては、孔内に破損などを生じないように充分注意を払い作業を実施した。作業全体を通じて、スパーカと地震探鉱器間で同期の異常などの測定上の問題は生じず、質の良いデータが取得できた。

また、毎作業日ごとに作業の内容を記した作業日報を提出した。

2. 4 スパーカー保守作業

データ取得作業において、高電圧キャパシタンスに接続されるダイオードが故障したため作業を中断した。この際、2つのキャパシタンスの破損が合わせて確認された。その後スパーカーの製造元であるCSMA社により修理及び点検がなされた、約1月後にデータ取得作業を再開した。

キャパシタンスの破損の原因は、ダイオードが故障し、キャパシタンスに対して規定以上の電流が流れたためである。ダイオードの故障の原因に関しては、設計上問題のない規格の製品を使用しており、故障原因の特定はできなかった。

その他、スパーカー内の電極は消耗部品であるため、消耗程度から判断して、全データ取得作業を通じて、ハイドロフォン2ポジション分の測定終了毎に電極の交換を行った (交換時間約3~4

時間)。また、同様にキャパシタンスも消耗部品であり、データ取得作業中に1個を交換した。

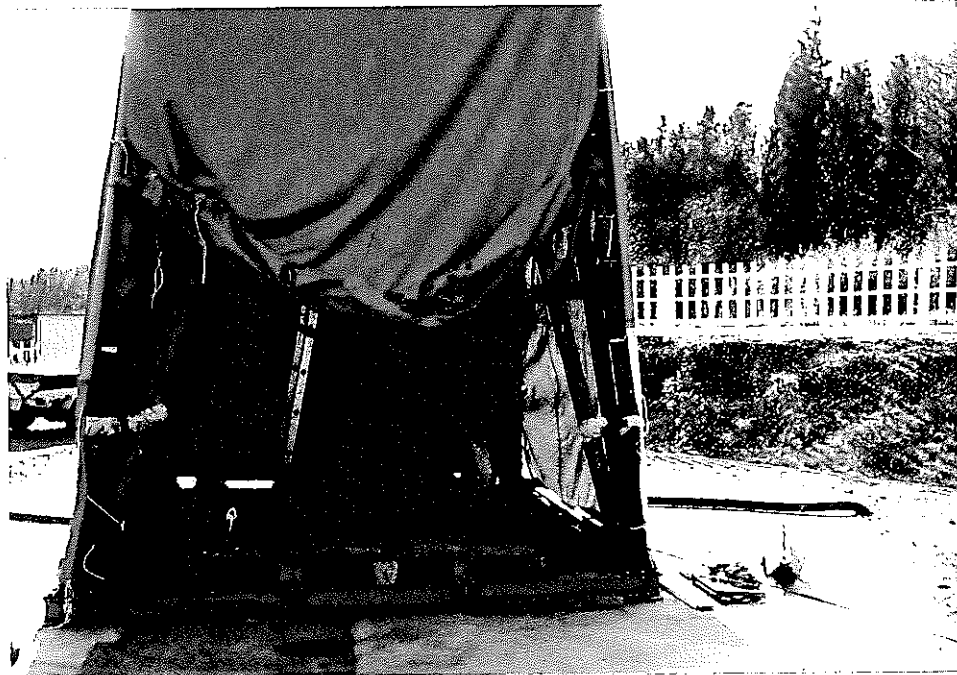


写真 2. 1 AN-1孔でのスパーカ昇降作業 (1)

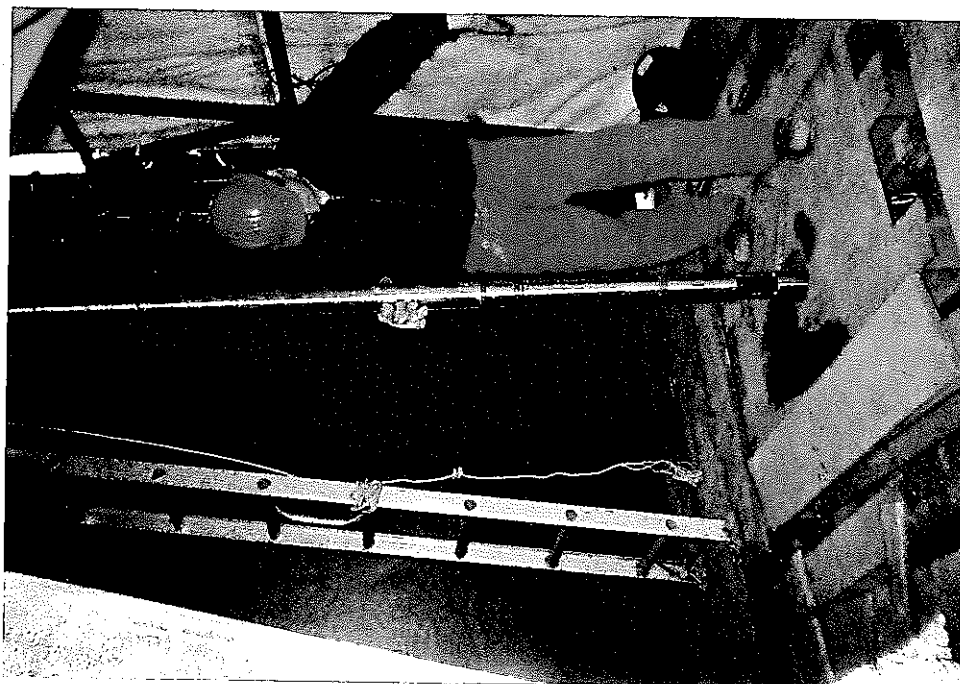


写真 2. 2 AN-1孔でのスパーカ昇降作業 (2)

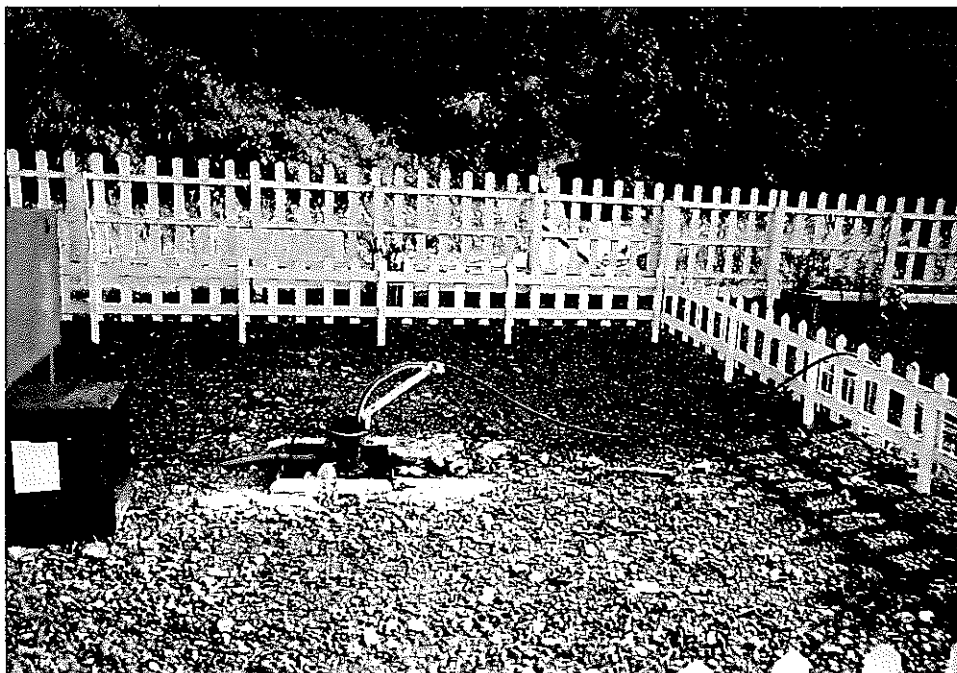


写真 2. 3 AN-3孔でのハイドロフォン設置作業

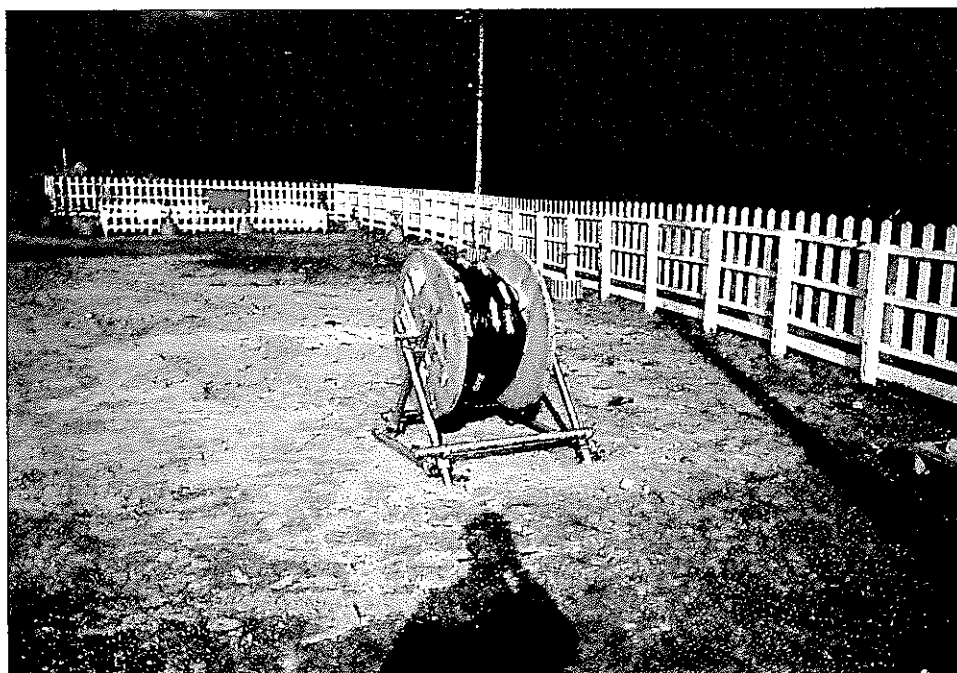


写真 2. 4 ドラムに巻き付けたハイドロフォン及びケーブル

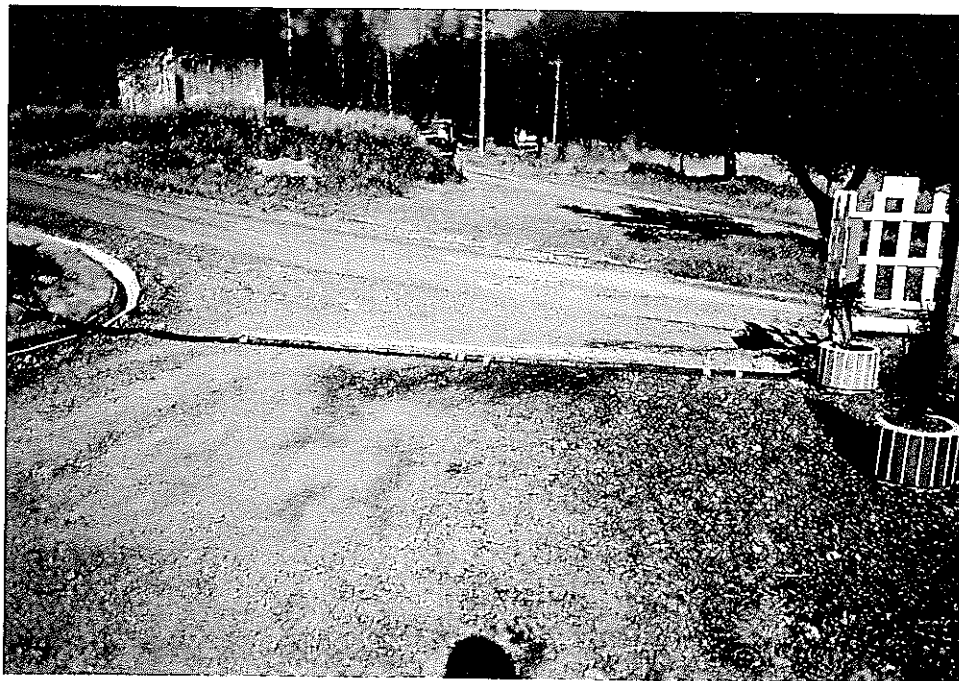


写真 2. 5 ハイドロフォンケーブル敷設状況

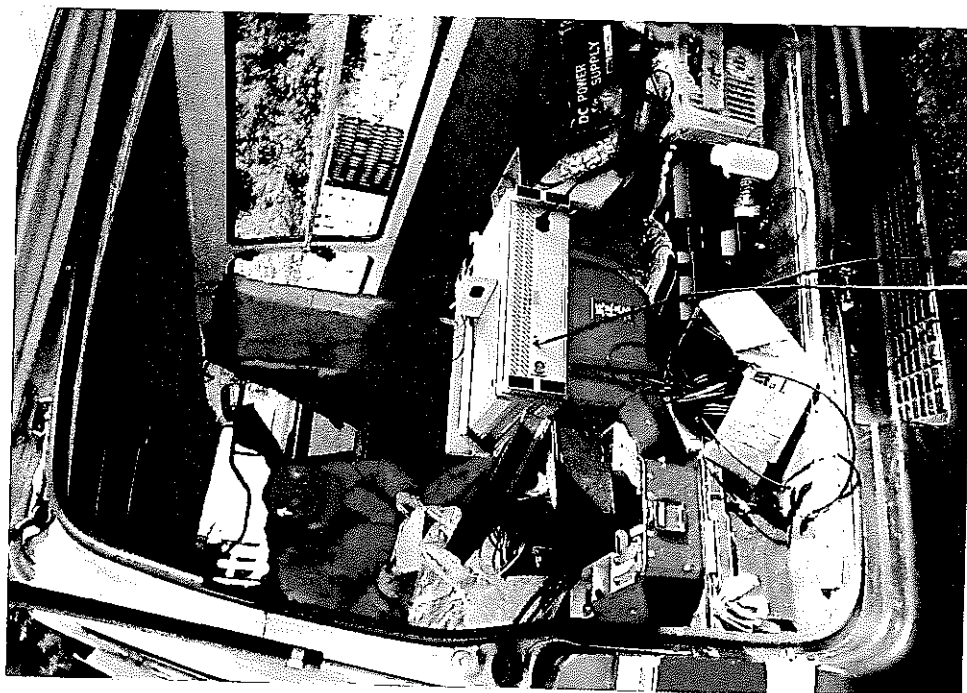


写真 2. 6 測定作業



写真 2. 7 ウィンチ操作作業

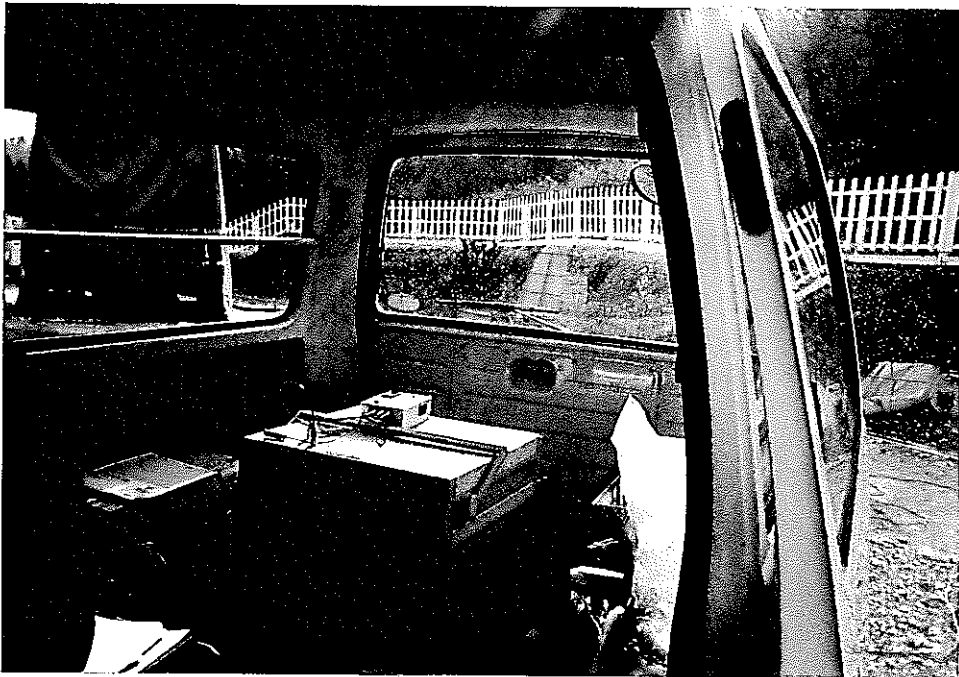


写真 2. 8 スパーカー用地上コントロールユニット

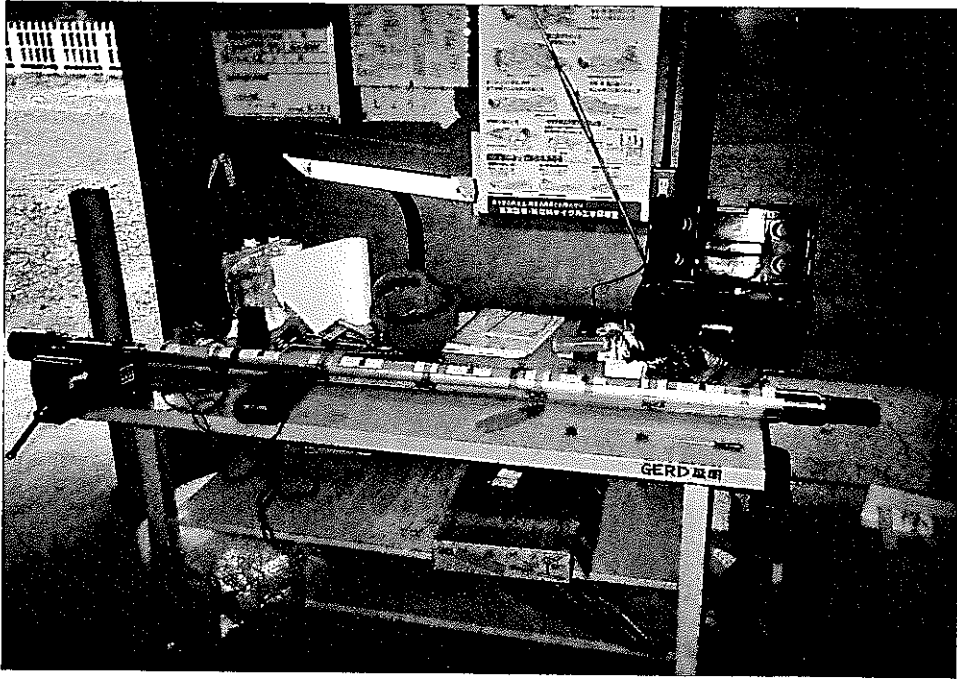


写真 2. 9 スパークー保守作業 (1)

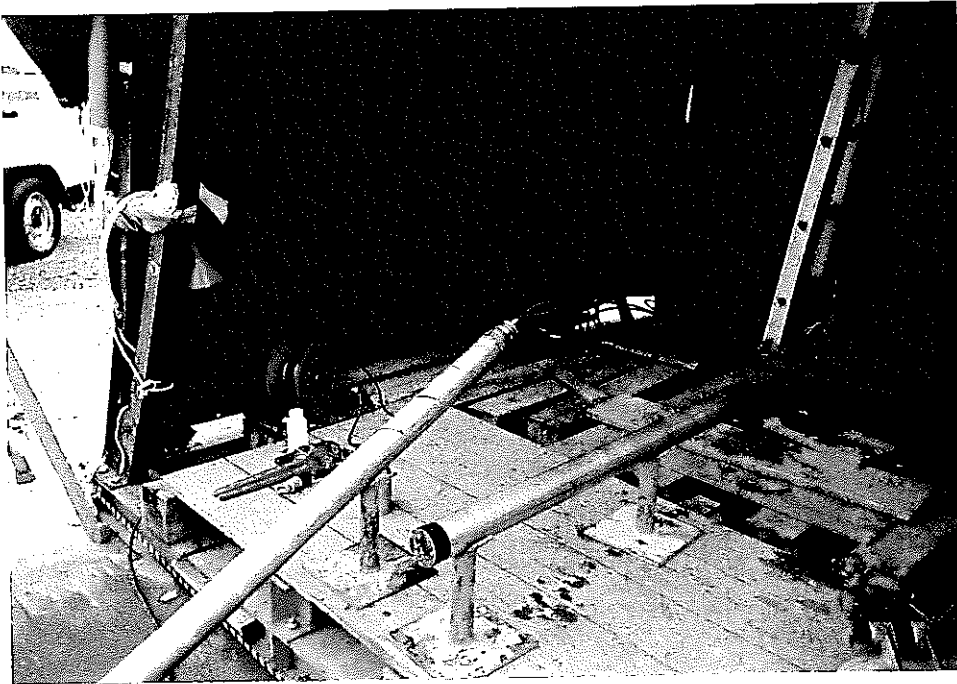


写真 2. 10 スパークー保守作業 (2)

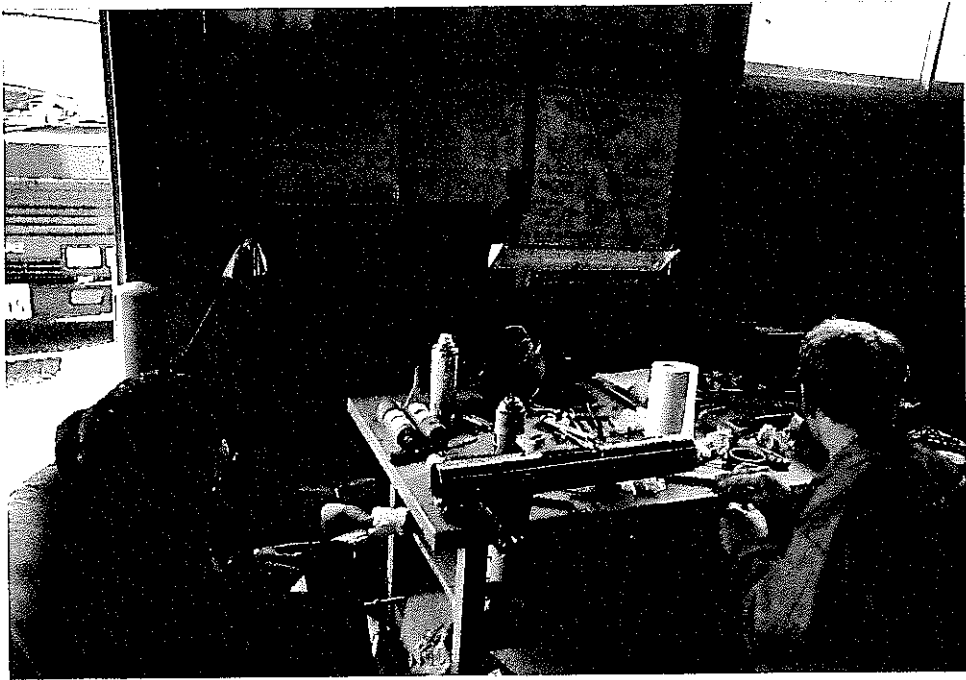


写真 2. 1 1 スパーク-電極交換作業

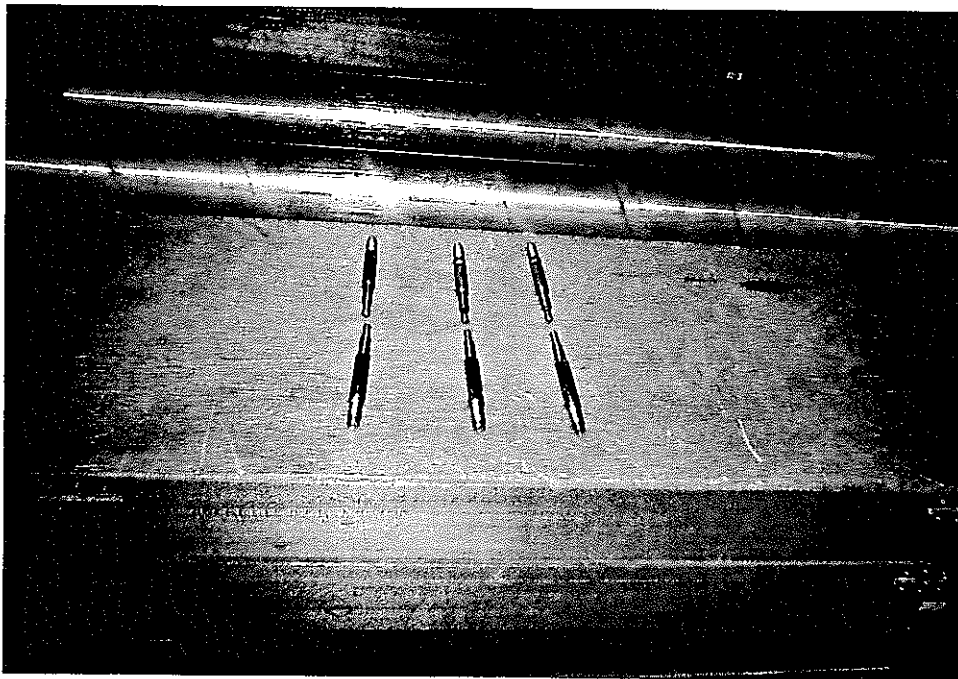


写真 2. 1 2 交換されたスパーク-電極

3. 速度構造解析

3.1 データ処理

まず、取得した生のトレースデータを、ASCIIフォーマットに変換した。これらのデータを速度及び波動場イメージングのためにDevine V2.6を用いて処理を行った。各ソース（スパーカー）位置に対するハイドロフォンのデータは、トレース処理のためにショット毎にまとめられた。生のトレースデータのS/N比は、最も近いオフセットでは10:1以上である。しかし、最も長いオフセットでは信号えお読みとることができなかった（図3.1）。オフセットとは各ソースとレシーバ（ハイドロフォン）の距離を意味する。

P波の初動到着時間を、生のデータから読み取った。データ品質が良かったため、大部分のデータセット上で単純かつ正確に処理ができた。考えられる読み取り誤差は、標準的な例ではプラスマイナス1サンプル（0.125ms）であるが、長いオフセットではプラスマイナス2サンプル（0.25ms）となった。読み取り結果は、各ソースに対してのトレースの集合と各レシーバに対してのトレースの集合の両方から、近傍のオフセットとの整合性を考慮してクロスチェックを行った。

速度構造のイメージは、AN-1及びAN-3両試錐孔を通る垂直断面で作成した。観測走時、ソースとレシーバ位置関係をこの断面に投影して2次元平面におけるデータセットとした。このような走時データの平面への投影は、対象とする範囲内において、投影した平面に垂直な方向の速度構造の変化（3次元効果）が無視し得ると仮定したことになる。投影した平面と実際の孔跡（孔曲がり）の測定が数mしか離れていないことから、この仮定は妥当なものと考えられる。

3.2 速度構造イメージング（走時トモグラフィー）

速度イメージング処理の初期モデルは、初動の読み取り値と直線と仮定した波線（レイパス）を用いて作成した（図3.2）。ここでは、速度セルの大きさを $2\text{m} \times 2\text{m}$ とし、セル内の速度は一様であるとした。速度イメージは、まず、単純な逆投影法（BPT法）による計算を行い、次に同時反復法（SIRT法）による20回の収束計算を行って、作成した。イメージング処理に際しては、速度は2.0から6.5km/sの範囲の中におさまるように制限を加えている。これは偽像の出現を最小とするためである。得られた速度イメージの走時のRMS（残差2乗和の平方根）は0.24msであり、走時の読み取り誤差の範囲と考えられる0.125msより大きい。これは、全体的に速度構造イメージの観測データへのフィッティングをより改善できる可能性があることを示している。

速度構造イメージから求めた理論走時と観測走時の残差を図3.3に示す。この図では各々の走時データを一对のソース/レシーバ番号で表し、走時残差をコンターで示してある。図面の対角線方向に誤差の大きい領域が広がっていることがわかる。これは、各走時の残差が鉛直方向より水平方向で大きいことを示している。つまり、水平方向に近いパスの観測走時はイメージ処理によって得られた走時より小さいことがわかる。

第二の速度構造イメージ（図3.4）は、残差分布で明らかとなった見掛けの速度異方性を取り除くために速度が楕円状の異方性をもつものとしてイメージング処理を行ったものである。使用した

パラメータは速度の異方性以外は第一のイメージと同じである。この補正では、走時のRMSが最小となるように異方性を決定している。その結果、第1のイメージと比較して、全体的に観測走時と理論走時の残差が小さくなっている（RMS誤差=0.19ms）。また、使用した最大と最小の速度の差は5%であり、最大速度の方向はAN-1孔に対して下向きに25度の方向であった。

このように、観測走時に幾何学的補正を行って見掛けの速度異方性を取り除いたイメージを作成できた。これを、異方性速度構造イメージと呼ぶこととする。異方性補正によって、全体的な速度は若干大きくなったが、これは、走時が最大速度の方向に沿って計測されたように補正されたためと考えられる。

異方性補正を適用することによって走時の残差（図3.5）に関しては、残差分布の広がりを中心に小さくすることができた。まだ残っている残差分布は、局所的な見掛けの異方性が調査エリア内に存在することを示している。

この見掛けの異方性は地質的原因に起因することを必ずしも意味する訳ではない。例えば、観測走時に含まれる誤差は、試錐孔の孔跡（位置座標）の誤差によっても生じる可能性があり、この効果は地質状況による異方性の効果と区別できない。今回の局所的な見掛けの異方性は、例えば1-2mの試錐孔の孔跡の誤差によっても起こり得るレベルのものである。

3.3 解釈及びモデリング

前節で得られた速度構造イメージにはいくつかの明瞭な特徴がある。次に、フォワードモデリングによって、これらの特徴が偽像の可能性があるかどうかテストした。このアプローチは、間違っ

て解釈されるかもしれない偽像の出現の可能性を確認することによって、解釈に対する信頼性を向上させるものである。

フォワードモデリングに先立って、異方性速度構造イメージ（図3.4）に基づいて解釈を行った。このイメージの主要な特徴は、浅部から順に以下のようにまとめられる。

- (1) 左上部分。 5.2から6.0km/sまで速度範囲でAN-3孔の方へ45度程度で傾斜している細長い高速度異常域が認められる。
- (2) 右上部分。 3.2 km/s以下の速度を有するの三角形状の低速度異常域が認められる。
- (3) 60 - 150m区間。 4.8から5.2km/sの速度分布である。
- (4) 150 - 170m区間。 4.6から4.8km/sの水平方向の低速度域が認められる。
- (5) 170 - 320m区間。 5.2から5.6km/sの速度分布である。
- (6) 左下と右下部分。 調査地域の中心に向かって、約70度で延びている高速度異常域が認められる。左の異常域は、5.4から6.0 km/s以上の速度でおよそ320mまで及ぶ。右側の異常域は、5.0から6.0のkm/sの速度でおよそ330mまで及ぶ。

(7)中心底部。 三角形の低速度異常域が、(6)において記述した2つの急傾斜の高速度異常域に挟まれている。これは4.0から5.0km/sの速度である。

これらの特徴的なイメージの解釈のためフォワードモデリングにより2つのモデルを作成した。モデルの概要は上述した特徴を各々単純化したものである。速度に関しては異方性速度イメージ結果をそのまま用いた。理論走時は、各構造の境界面での屈折を考慮したモデルからレイ・トレーシングによって求め、レイパスは直線であると仮定した。モデルと速度構造イメージの比較によって、上述した特徴が偽像の可能性はあるか実像であるかを検討した。

最初のモデル（モデル1（図3.6））は、高速度異常（(1)と(6)）は、速度構造イメージング処理による偽像であると仮定して作成したものである。残りの5つの構造に関して、与えた速度構造の境界を直線の実線で図3.6のモデルの中に記載してある。また、与えた速度を表2.1に示す。これらは、異方性速度構造イメージに基づく速度である。表2.1における『-』は、モデルに組み入れられなかったことを示している。

モデル1は、先の速度構造イメージング処理から確認した総ての特徴を備えている。特に高速度異常に関連した(1)と(6)の偽像にも対応している。上記の(1)で述べた高速度異常域の左側の低速度異常域の伸びがモデルの計算結果に示されている。またさらに(4)で述べた垂直方向への広がりもモデルに示されている。この結果は、(1)と(6)の特徴を持たない速度構造であっても、(1)から(7)までの特徴を有する速度構造イメージが出現する可能性のあることを示している。

また、上述の(1)と(6)の高速度異常を考慮したモデル2（図3.7）を作成した。モデル1と同様に、与えた速度構造境界と速度値をそれぞれ図3.7、表2.1にしめす。モデル2も、上述した特徴をよく説明できる結果を示しているものと考えられる。しかし、全体的には、モデル1の結果の方が異方性速度構造イメージの速度分布に、より適合しているように見える。

以上のモデル解析は、実像が単に(2)、(4)と(7)によって解釈され得る可能性のあることを示している。これらの特徴をまとめると、表層付近でAN-3孔に向かって45度の傾斜角をもつ低速度異常域、165m付近の約10m幅の低速度異常帯、及び320m以深に認められるAN-1孔から約60度傾斜の境界を持った低速度異常域である。今回の調査では、特徴の(1)及び(6)に関しては、偽像である可能性が指摘できるが、実像である可能性も否定できなかったため、他の地質的な情報から更に検討を加える必要がある。

表 2.1 モデル1と2における設定した速度 (km/sec)

特 徴	1	2	3	4	5	6	7
モデル 1	-	3.0	5.1	4.7	5.4	-	3.2
モデル 2	6.0	3.0	5.1	4.7	5.4	6.0	-

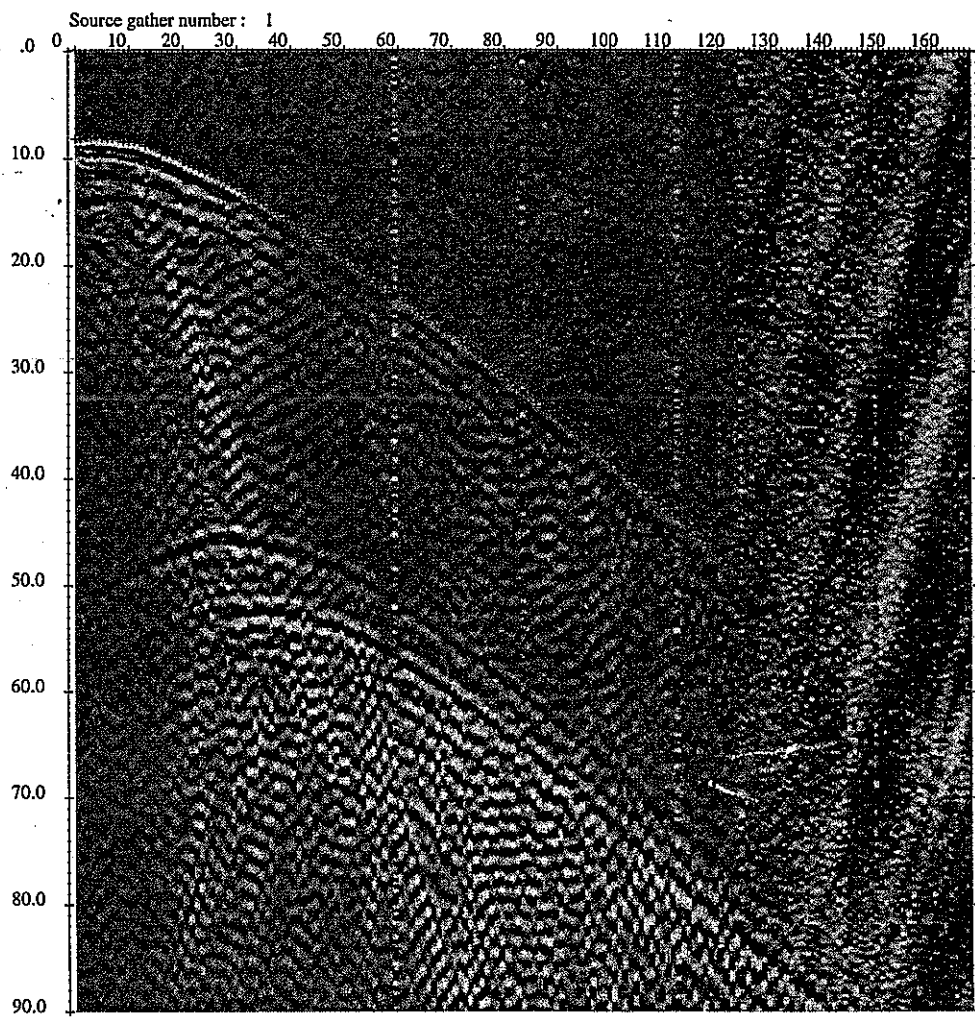


図 3. 1 AN-1孔からAN-3孔の孔間トレース ソース364m、レシーバ364-30m
(時間:ms、バンドパスフィルタ100-1500Hz)

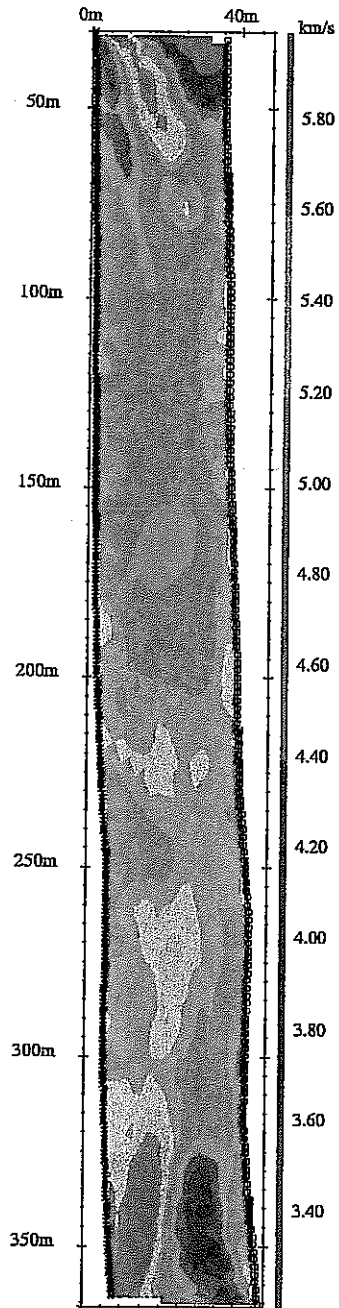


図 3. 2 均質速度イメージ処理結果 (左:AN-1孔、右:AN-3孔)

Shot line no : 1 Shots : 1 to 335
Rec line no : 2 Recs : 1 to 168
Ray set no : 1 Ray code : -1
Mean variance : .06 Av error : .00

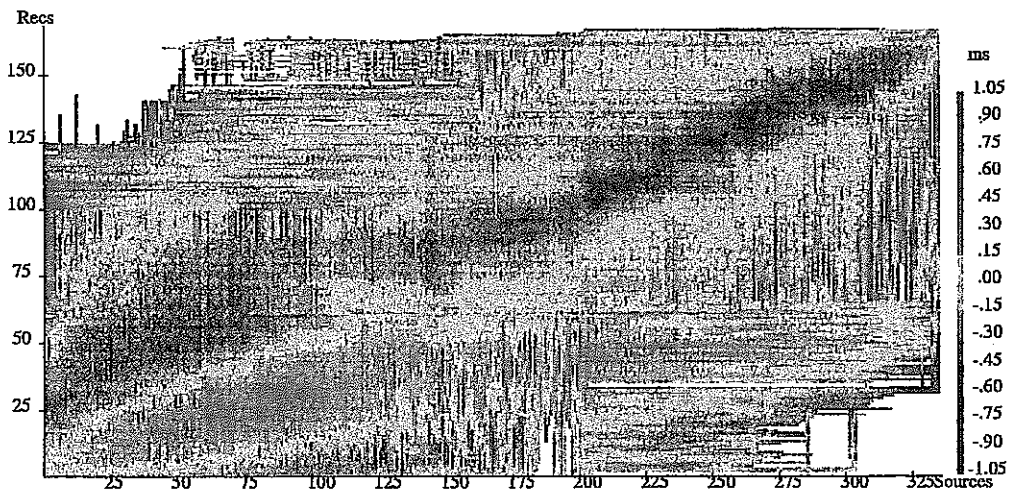


図 3. 3 均質速度イメージ処理残差分布図
(残差=観測走時-計算走時)

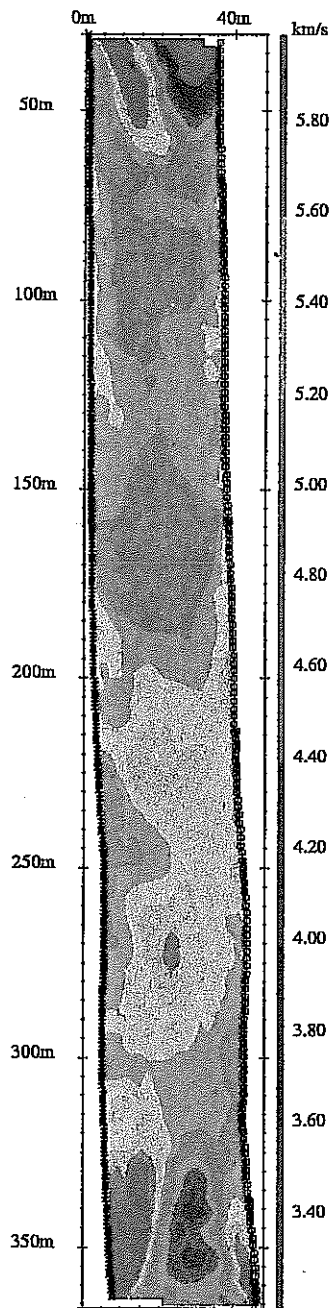


図 3. 4 異方速度イメージ処理結果 (左:AN-1孔、右:AN-3孔)

Shot line no : 1 Shots : 1 to 335
Rec line no : 2 Recs : 1 to 168
Ray set no : 1 Ray code : -1
Mean variance : .04 Av error : .00

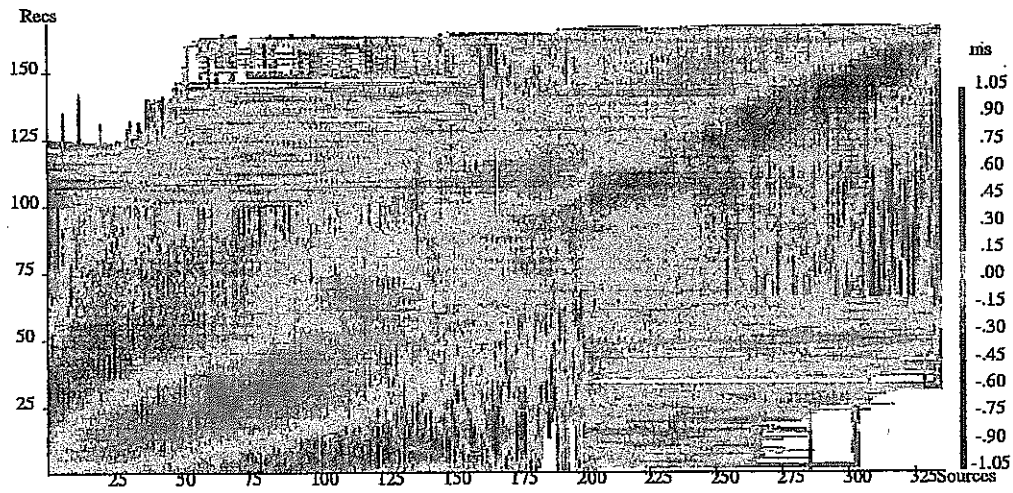


図 3. 5 異方速度イメージ処理残差分布図
(残差=観測走時-計算走時)

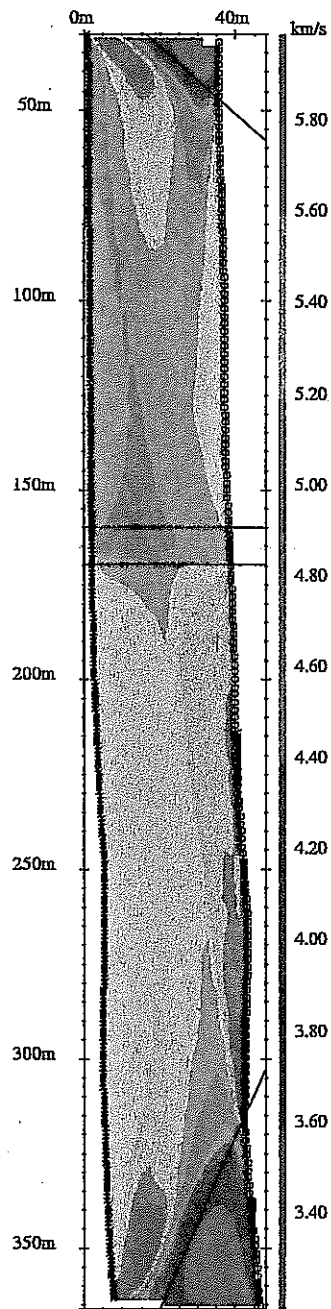


図 3. 6 モデル1と速度イメージ (左:AN-1孔、右:AN-3孔)

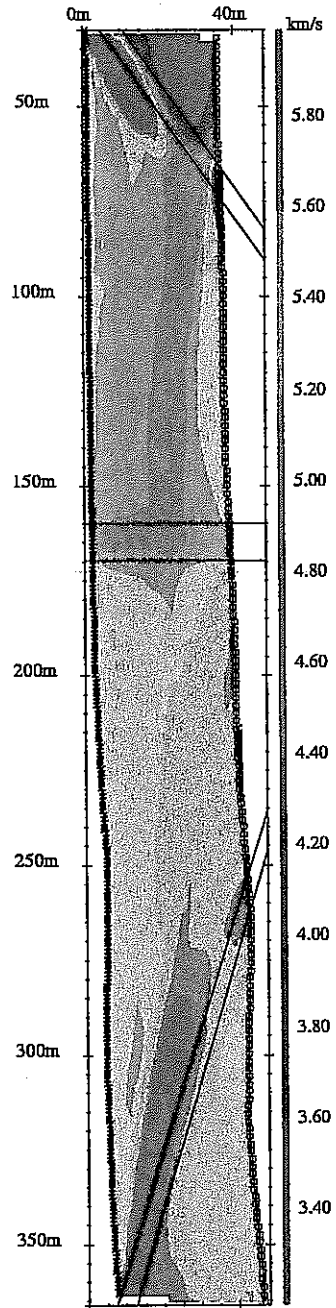


図 3. 7 モデル2と速度イメージ (左:AN-1孔、右:AN-3孔)

4. 波動場解析

波動場処理の目的は、反射P波及び回折P波の深度マイグレーションのイメージを作成することである(4.2)。4.1では、深度マイグレーションに先立って実施する、反射P波及び回折P波を強調するために、卓越してみられる他の波形成分（チューブウェーブと直接P波）を最小にする処理について述べる。

4.1 トレース処理

トレースデータの処理において、トレースをまずソースの周波数帯域より上の高周波数ノイズ（ $>2000\text{Hz}$ ）及び試錐孔の影響（坑井の共振や坑壁からの岩屑の落下などが見られた）と考えられる低周波数ノイズ（ $<200\text{Hz}$ ）を除去するために帯域通過フィルタで処理した。引き続き、チューブウェーブを除去するためにメディアンフィルタを使用してディップフィルタ処理を行った。

フィルタリングは先にレシーバのギャザーに対して適用した。これはソース間隔は 1m で、レシーバは 2m 間隔であり、レシーバの方がより精度の良い空間サンプリングとなっていることから、レシーバ間隔によるエイリアシング効果が、レシーバ・ギャザー処理に影響を及ぼさないようにするためである。

処理のシーケンスは以下のようなものである。

200Hzから2000Hzの帯域通過フィルタ。

①レシーバ・ギャザーに対するディップ・フィルタ（下方進行チューブ波（ $+1.39\text{km/s}$ ）を除くため、原記録が同一時間に並ぶようにタイムシフトを行う。次に深度軸方向（同一時間で）7トレースを使ってメディアンフィルタをかける。これにより、下方進行波はスムージングされ、上方進行波は減衰する。次に記録は最初の時間位置にシフトされ戻される。これを原記録から差し引くことで、下方進行波は除去される）

200Hzから2000Hzの帯域通過フィルタ

②レシーバ・ギャザーに対するディップ・フィルタ（上方進行チューブ波（ -1.39km/s ）を上と同じ様に7トレースに対しフィルタリングする）

200Hzから2000Hzの帯域通過フィルタ。

③ソース・ギャザーに対するディップ・フィルタ（下方進行チューブ波（ $+1.39\text{km/s}$ ）に対し7トレースを用いた上記フィルタリング）

200Hzから2000Hzの帯域通過フィルタ。

④ソース・ギャザーに対するディップ・フィルタ（上方進行チューブ波（ -1.39km/s ）に対し7トレースを用いた上記フィルタリング）

P波到着時刻から2.0msまでをミュート補正（振幅値を0.0とする）。

ディップフィルタによって発生・強調されるノイズを除去するため、毎ディップフィルタリングの後に帯域通過フィルタを適用した。ミュートは、直接波を除去するために適用した。代わりに、ディップフィルタを使って除去することも可能であるが、これはトレース中にノイズを誘導する可能性があり、かつ、波形が明瞭なリッカー型P波であることから、ミュートが最も適当であると考えた。

処理データの例を図4.1に示した。ノイズ（チューブウェーブ成分）を除去する前の記録を図4.2に示した。チューブ波は±1.39kmの勾配で記録に表れ、大きな振幅を有している。また、表面波としての性質から、伝播過程においても減衰が小さく、反射波などの抽出を難しくしている。図4.1における振幅は、P波到達後のイベントを強調するために250%拡大してある。図4.1は、チューブウェーブ到達の明瞭な減衰特性を示している。しかし、処理されたデータにおいてさえ反射波の抽出が容易ではないことを示している。

4.2 深度マイグレーション

フィルターされたデータに対して、diffraction stack 法よって深度マイグレーションを行った。以下にマイグレーションの原理について記述する。

地下に一枚の反射面が存在するときに、震源から発生した弾性波は地下の反射面に垂直入射した場合に限り、震源から反射面までの経路と反射面から受振点までの経路が一致し、反射波はもとの震源の位置で観測される。

こうしたゼロオフセットセクションでの挙動を念頭においてマイグレーションを考えて行く上では、仮想モデル（爆発反射面モデルexploding reflector modelという）を考えるのが便利である。すなわち、往復走時を半分にして片道走時にし、反射面上の全ての点に震源があつて、それらが同時に発震され、時間と共に次々に地表に到達して地表においた受振器で観測されるというモデルである。それぞれの点から発震された球面波は、ホイヘンスの原理に従って次々に2次波面を形成して伝播する。

次に爆発反射面モデルにおいてある一つの点から時刻 p (x_0, z_0) から時刻 $t=0$ で発生した波の挙動について考える。簡単のため、速度 V は一定とする。 x 軸を地表に沿ってとり、 z 軸を深度方向に正にとる。ある点 p (x_0, z_0) で時刻 $t=0$ に発生した波は時刻 t が増加すると共に円形に広がる。このときの波面は

$$(x-x_0)^2+(z-z_0)^2=V^2 t^2$$

で表される。この波面を $t=t_1$ =一定、すなわちある時間 t_1 でのスナップ写真を見ると

$$(x-x_0)^2+(z-z_0)^2=\text{一定}$$

となり、上式は x - z 平面上で円を描く。

次に $z=z_1$ =一定、すなわち受振器を深度 z_1 に並べて観測を行うと

$$(x-x_0)^2-V^2 t^2=\text{一定}$$

となり、上式は x - t 平面上で双曲線を描く。この双曲線走時を描く波動は、回折波と呼ばれている。

通常、我々が観測を行うのは地表面に沿ってであるから($z=0$)、記録される時間断面図は

$$(x-x_0)^2 - V^2 t^2 = z_0^2$$

のような双曲線となる。

マイグレーションとは、 $z=0$ で観測された時間断面図における双曲線走時(回折波)を、点 (x_0, z_0) にfocusingさせる操作である。これらをスカラー波動場 $\psi(x, z, t)$ (ψ は例えば圧力場)を用いて一般的に表現すると以下ようになる。

$\psi(x, z, t)$ を時刻 $t=c$ における点 (x, z) での波の動きとする。ゼロオフセットセクションは、地表 $z=0$ で、各点 x で記録された時間記録であるから、 $\psi(x, 0, t)$ と表現される。我々が求めたいのは、地下の真の形 $\psi(x, z, 0)$ である。すなわち、 $\psi(x, 0, t)$ から $\psi(x, z, 0)$ を求める操作がマイグレーションである。

時間断面に対する時間マイグレーションに用いた近似は速度変化がない、あるいは緩やかな場合のみに妥当する。媒質の伝播速度の変化が大きい場合はより複雑な近似波動方程式を解かなければならない。そして、この大きな速度変化の影響を脱するにはもはやその出力は時間軸での表現でなく、深度軸での表現にならざるを得ない。これを深度マイグレーションという。深度マイグレーションには正確な速度構造が不可欠であり、解釈者との緊密な連携が必要である。

3章の速度構造解析結果より5000m/sの標準的な速度及び約1000Hzの卓越周波数を基準として、5mの波長が期待される。格子間隔は深度マイグレーションに対して適切なサンプリングを保證するように水平、垂直ともに1.0 mとした。

最も長いレイパスに対応しているトレースは、ノイズが卓越しており、走時はこれらのノイズの多いトレースでは読みとれなかった。走時の読みとれなかったトレースは、波動場のイメージに不必要なノイズを付加することを避けるため使用しなかった。格子点への全ての可能なレイパスが、diffraction stack 時間の計算に使われた。また、以下の重みづけが、トレース振幅のスタッキングに適用された。

- (1) 球形補正。(波動が伝播する際、波面の幾何学的な面積拡大による波面の単位面積あたりのエネルギーは減少していく。スパーカーから出る球面波のエネルギーは震源からの距離に反比例する。)
- (2) 反射パス長の平方の減衰補正。(反射波の振幅の減衰も同様に、距離の2乗に反比例するものとして補正を行う。)
- (3) 直接波と反射波の角度の2分1の平方根のコサインによって定義される反射角度補正。

マイグレーション格子の回折時間を異方性速度構造イメージを用いて計算した。調査エリアは2次元であるものと仮定した。2つの波動場イメージを作成した。一方をLOOKING UP(図4.3)と呼び、もう一方をLOOKING DOWN(図4.4)と呼ぶ。LOOKING UPは回折点をソース・レシーバー対より上に置いたイメージであり、LOOKING DOWNは回折点をソース・レシーバー対の下に置いたイメージである。

反射波が示すイメージは、通常水平方向の反射面を示している。回折波の合成等に依存する卓越した見掛上の反射面以上の反射面はほとんど認められない。しかしながら、両方のイメージは230m

以下で反射のエネルギーがより小さいことを示しており、これは調査エリアのこの部分の反射強度が実際に小さいことを示していると考えられる。チューブウェーブの特徴と、反射の一部を相関させ解釈することも可能であり、これについては後述する。

若干の反射面が、左上の低速度域と調査エリアの右下の境界に沿って認められる。図4.3の330-340mの間の反射面の傾斜は、速度構造イメージングのモデル1で示した両孔間の速度構造イメージに対応しているものと考えられる。

4.3 チューブウェーブ抽出

チューブウェーブは、ソース・ギャザーとレシーバー・ギャザーの両方（図4.5～4.8）において認められた。ソース・ギャザーについては、レシーバー・ギャザーと同じトレース間隔とするために内挿を行った。2mのソース間隔と1mのレシーバー間隔であるため、これを同じ間隔とするためである。これにより、ギャザーに沿ったチューブウェーブの位置を容易に比較することができた。

チューブウェーブは、試錐孔の直径の変化、岩相の変化、または破碎帯の存在などによって発生する可能性がある。今回の適用試験では、岩相の変化は小さく、また試錐孔の直径もほぼ一定と考えられるので、チューブウェーブの発生は破碎帯によるものと解釈できる。チューブウェーブの発生深度を、表4.1にまとめて示した。表中にチューブウェーブの強弱の分類も合わせて示した。強いチューブウェーブの定義を、それが通過するトレースで最大振幅を持ち、かつ、図4.9に例示した様に、白黒のストライプが図の全部の時間窓を横切って出現する場合に強いチューブウェーブとした。

チューブウェーブと反射の間のなんらかの相互関係が、4.2の波動場マイグレーション結果において認められる。例えば、AN-1におけるトレースナンバー60とAN-3におけるトレースナンバー31でのチューブウェーブは、下方へのマイグレーション（図4.3）結果に見られる300m付近での強いイベントと相関する。これらの相互関係は、チューブウェーブの抽出と波動場のマイグレーションが破碎帯のような不連続面の検出およびマッピングに有効であることを示している。

表 4.1 チューブウェーブ発生位置

AN-1 (PICKED FROM THE RECEIVER GATHERS)			
TRACE NUMBER	MD (m)	TVD (m)	STRENGTH
60	303	303	Strong
98	265	265	Strong
143	220	220	Strong
190	173	173	Weak
199	164	164	Strong
262	101	101	Weak
285	78	78	Weak
310	54	54	Weak

AN-3 (PICKED FROM THE SOURCE GATHERS)			
TRACE NUMBER	MD (m)	TVD (m)	STRENGTH
31	300	302	Strong
44	274	276	Weak
51	260	262	Weak
62	238	240	Weak
71	220	222	Weak
95	172	174	Weak
105	152	154	Strong
162	38	40	Weak

MD : 測深

TVD : 垂直深度

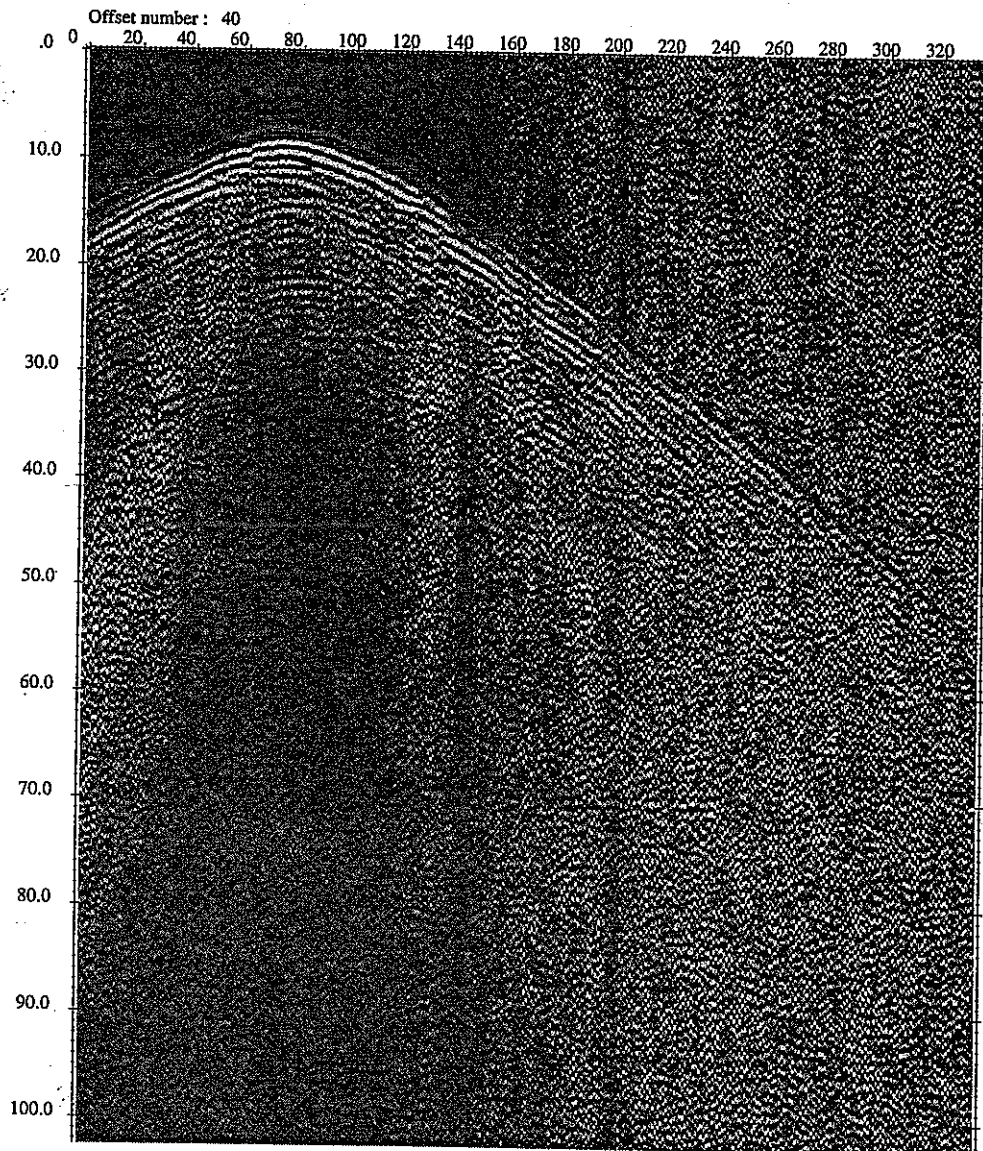


図 4. 1 AN-3孔からAN-1孔の孔間トレース レシーバ286m、ソース364-30m
 (時間:ms、バンドパスフィルタ200-2000Hz、250%ゲイン)

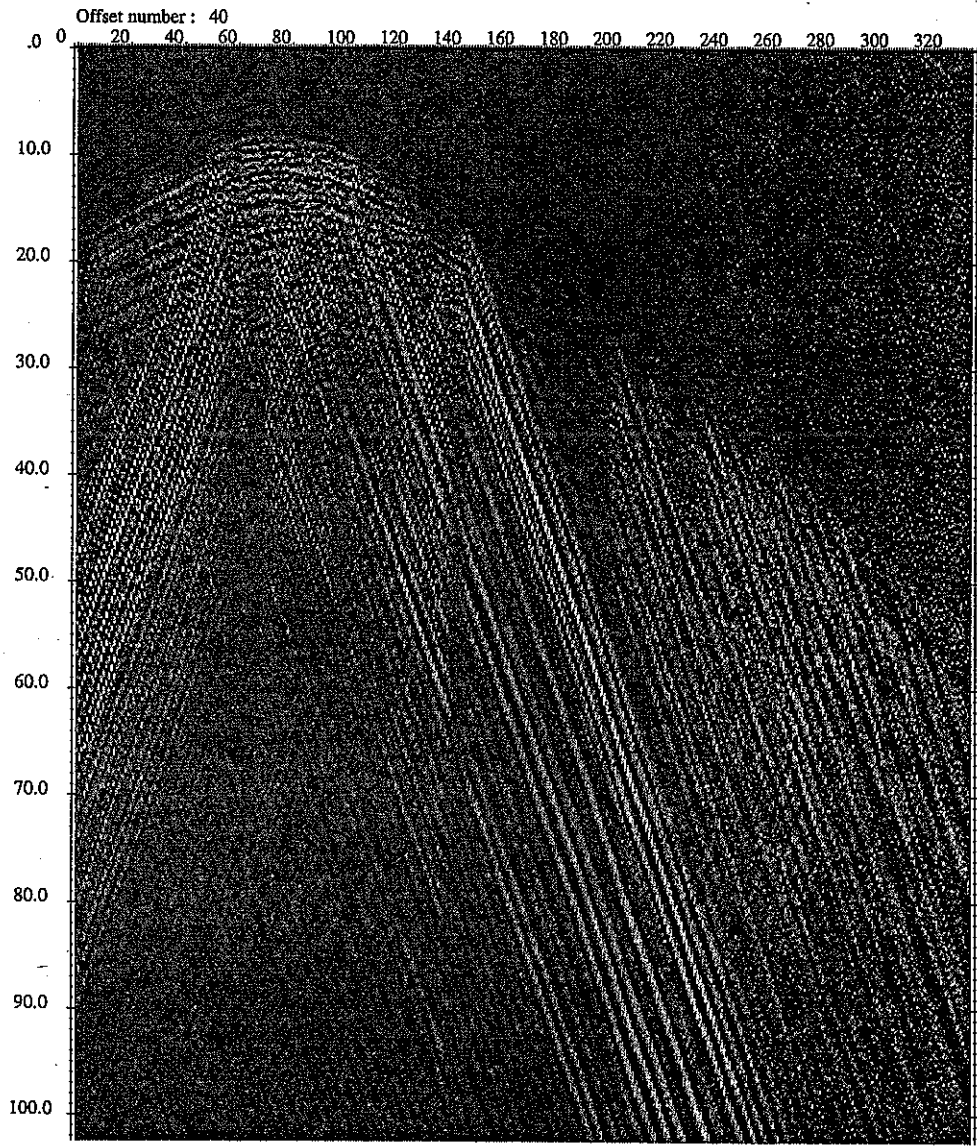


図 4.2 AN-3孔からAN-1孔のチューブウェーブ レシーバ286m、ソース364-80m
(時間:ms、バンドパスフィルタ200-2000Hz)

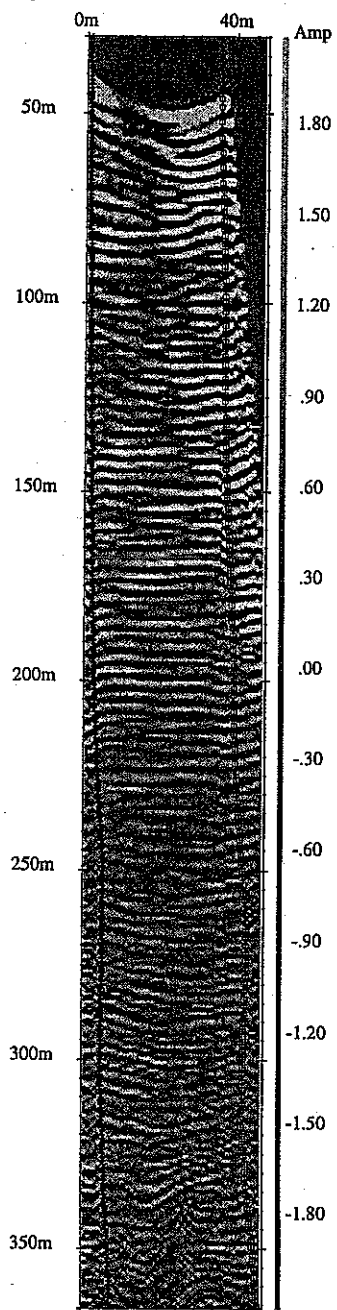


図 4. 3 Diffraction Stack 法による深度マイグレーション結果
(Looking Down)

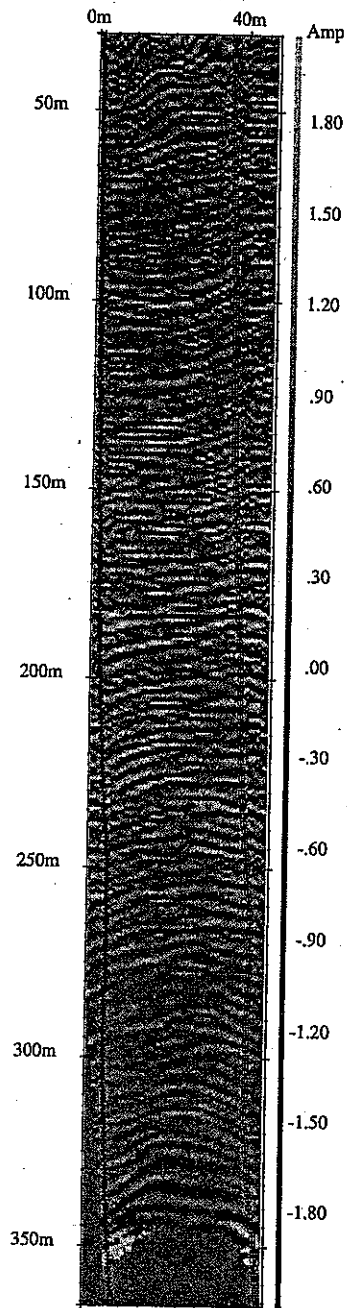


図 4. 4 Diffraction Stack 法による深度マイグレーション結果
(Looking Up)

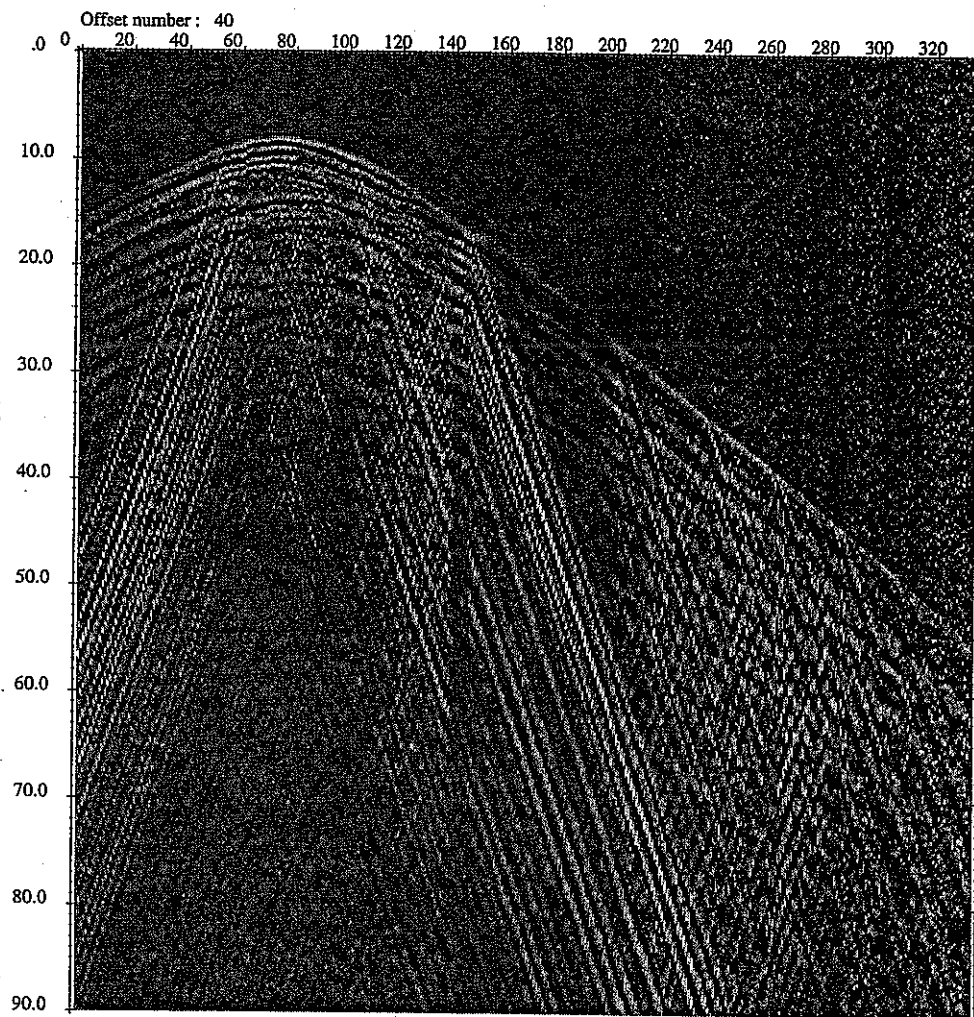


図 4. 5 AN-3孔からAN-1孔の孔間トレース レシーバ286m、ソース364-30m
(時間:ms、バンドパスフィルタ200-2000Hz、250%ゲイン)

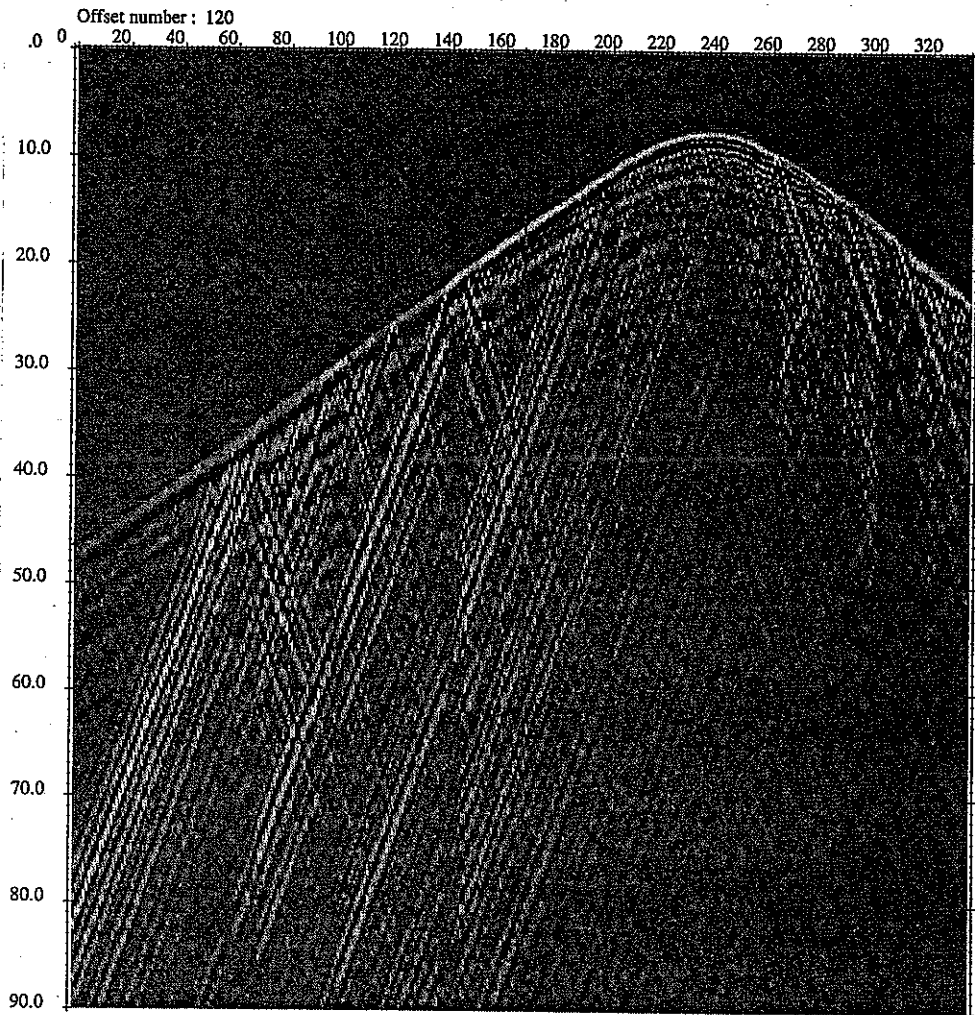


図 4. 6 AN-3 孔から AN-1 孔の孔間トレース レシーバ126m、ソース364-30m
 (時間:ms、バンドパスフィルタ200-2000Hz)

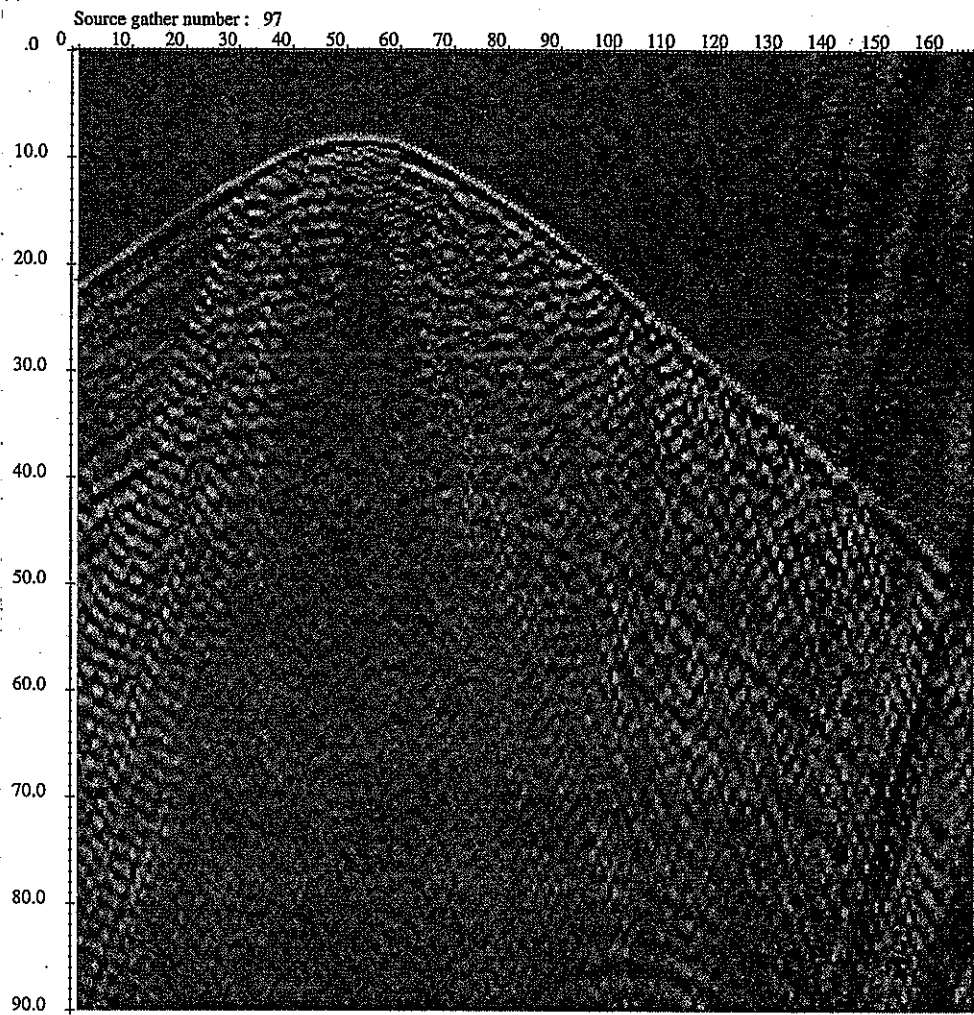


図 4. 7 AN-1 孔から AN-3 孔の孔間トレース ソース286m、レシーバ364-30m
(時間:ms、バンドパスフィルタ200-2000Hz)

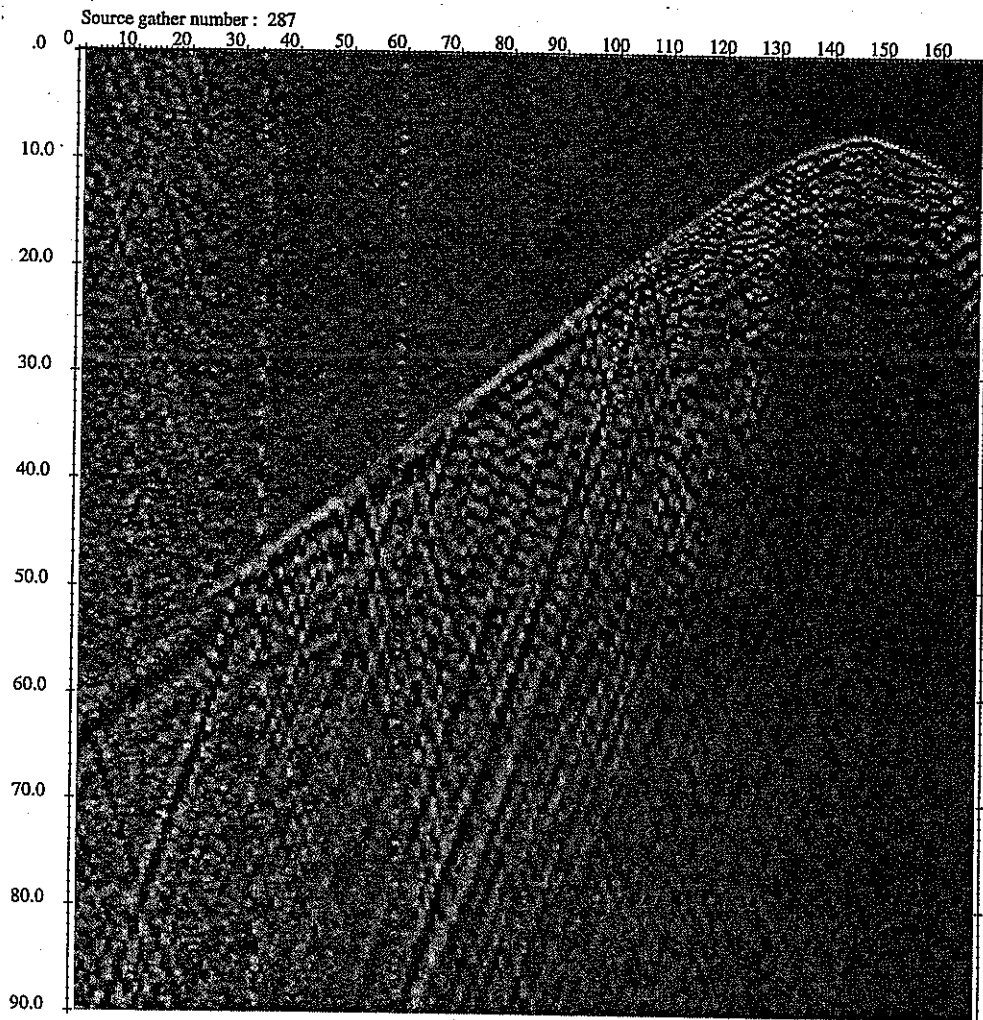


図 4. 8 AN-1 孔から AN-3 孔の孔間トレース ソース268m、レシーバ364-30m
(時間:ms、バンドパスフィルタ200-2000Hz)

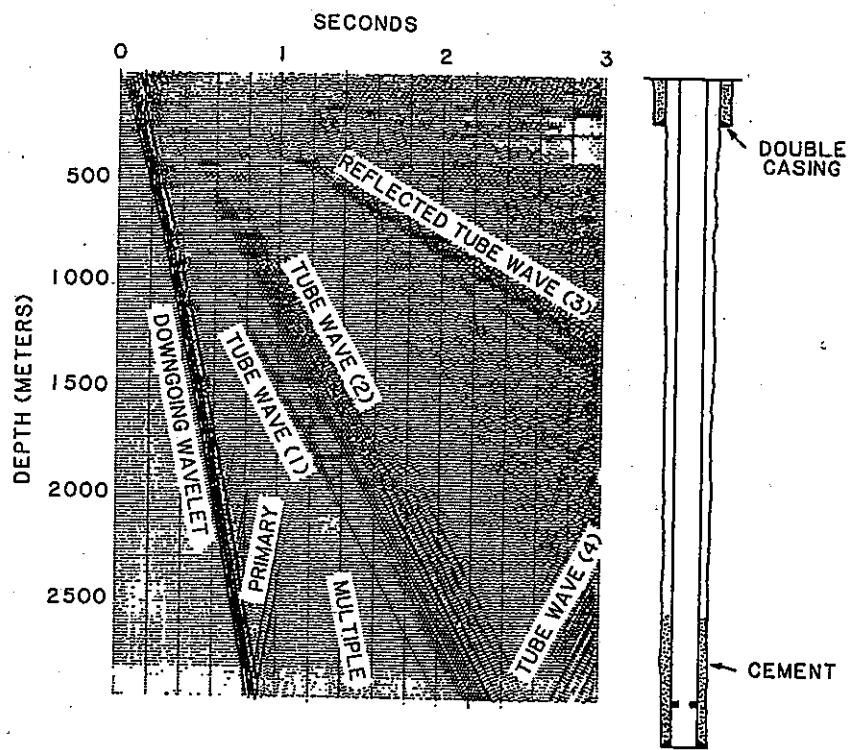


図 4. 9 VSP記録上のチューブ波(Hardage, 1983)

5. 結論

試錐孔内用震源（スパーカー）の適用試験をサイクル機構東濃地科学センターの正馬様洞鉦業用地内で実施した。AN-1孔に震源をセットし、AN-3孔に受信器（ハイドロフォン）をセットしてトモグラフィデータの取得及び処理を行った。取得したデータセットは、AN-1孔の30mから364m、AN-3孔の30mから364m区間における、335のソース位置と168のレシーバー位置のそれぞれで取得した56280本の波線（2345のスパーカショット）である。

データ品質は、ほとんどの波線で良いS/N比を有していた。結果として、ほぼ垂直の配置のオフセット距離で約260mまでP波到着時間を読み取ることが可能であった。P波走時は、できる限り数多くのトレースから処理して、トモグラフィイメージを作成した。速度構造イメージに見られる異方性の効果に関しては、観測走時データに楕円補正を適用することによってこれを可能な限り最小にした。しかし、それでもなお小さな異方性の効果が速度構造イメージにおいて認められた。この異方性の原因は速度構造解析から決定することはできなかった。

速度構造イメージの解釈のため、2つのフォワードモデリングによる検討を行った。この結果、AN-3孔の表層50m付近で、45度の傾斜を有する低速度異常域が認められた。また、150-170mの間で低速度域が両孔の間に広がっていること、AN-3孔の320mから下方へ低速度地帯が伸びていることがわかった。低速度異常域と付随する高速度異常は、フォワードモデルによって偽像である可能性が指摘されたが、モデル解析から断定はできなかった。

トレースデータから、チューブウェーブ及び試錐孔ノイズを取り除くために帯域通過フィルタとディップフィルタによってデータ処理を実施した。明瞭な反射イベントは、波動場マイグレーション解析結果から確認することができなかった。しかし、強調された反射振幅と、最も強いチューブウェーブが、AN-3孔の底部付近の低速度域の境界付近で認められ、破碎帯の存在と速度構造の間に関連があると考えられている。

今回の測定によって、以下のことが明らかとなった。

- ・試錐孔内用震源（スパーカー）は、今回の調査地域内に存在する花崗岩のような高速度分布を示すような地域においては、十分なエネルギー伝播の性能を有している。
- ・また、震源の周波数特性に関しても、弾性波トモグラフィ調査の震源として十分な性能を有している。

これらの性能から評価して、同様な岩種においては弾性波トモグラフィ調査に本スパーカーを震源として使用可能と判断できる。

謝辞

本適用試験に際し、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターより、機器並びに敷地の使用の御許可を頂いた。また、当該試験に際して多岐にわたる便宜を頂戴した。ここに深甚の感謝の意を表する次第である。