

本資料は2000年 3月 31日付けで登録区分
変更する。

東濃地科学センター【研究調整グループ】

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への適用試験

(その1)

(共同研究報告書)

1995年

地質調査所

動燃事業団東濃地科学センター

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部又は一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせ下さい。

〒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

~~この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついで
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。

〒509-51
岐阜県土岐市泉町定林寺959-31
動力炉・核燃料開発事業団
東濃地科学センター
技術開発課

平成12年3月31日付けで登録区分
変更する。
東濃地科学センター 〔研究開発グループ〕

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への適用試験
(その1)

(共同研究報告書)

1995年

地質調査所

動燃事業団東濃地科学センター

「マルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の
亀裂性岩盤への適用試験（その1）」



要 旨

正馬様洞に掘削されている試錐孔（AN-1号孔）を用いて、マルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の適用試験を実施した。本実験の目的は、チューブ波の発生の確認およびチューブ波の発生深度と亀裂に関する既存情報を対比することにより、マルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の透水性亀裂の検出法としての適用性を検討することにある。

試験の結果、深度20mから409mの区間で23のチューブ波の発生が確認された。大部分のチューブ波は、物理検層結果が異常を示す深度や、水理試験によって比較的高い透水係数が得られている深度から発生しており、これらのチューブ波は透水性亀裂から発生したものであると考えられた。また、いくつかのチューブ波はある1つの深度から発生しているのではなく、2つの発生深度に挟まれた区間全体からチューブ波が発生しているように見られるデータが取得された。これは、ハイドロフォンVSP調査で、割れ目帯全体の透水性を推定できる可能性があることを示しており、今後の検討が必要である。

なお、本報告書は検出されたチューブ波の発生深度を中心にまとめたものであり、チューブ波を発生させた亀裂の透水性の解析等の結果については、「その2」として報告書をまとめる予定である。

Detection of Permeable Fractures in Granitic Rock by Hydrophone VSP
- Case Study for Granitic Rock, Gifu Prefecture, Japan - (part 1)

ABSTRACT

The multi-offset hydrophone VSP experiment was carried out at Shomasama site in order to estimate the capability of this method to detect permeable fractures.

The 23 tube waves were observed in VSP sections. Tube waves are generated at the depths where well loggings detect anomalies or hydraulic testing shows rather high permeability. It is confirmed that tube waves are generated from permeable fractures.

The VSP section shows that some tube waves are generated from relatively wide zone, and this indicates that the hydrophone VSP has a potential to estimate the permeability of fracture zones.

目 次

1. はじめに***	1-1
2. 適用試験の目的***	2-1
2-1 試錐孔を利用した地下亀裂調査技術の現状と問題点	2-1
2-2 ハイドロフォンVSP調査法の現状と新たな調査の目的	2-2
3. ハイドロフォンVSP調査法について*	3-1
3-1 ハイドロフォンVSP調査法の原理	3-1
3-2 チューブ波発生と透水性亀裂	3-2
3-3 亀裂の透水係数の推定	3-2
3-4 透水性亀裂の走向・傾斜の推定	3-4
4. AN-1号孔における適用試験***	4-1
4-1 東濃地域の地質概要**	4-1
4-2 AN-1号孔におけるデータ取得*	4-1
4-2-1 測定概要	4-1
4-2-2 発震孔	4-2
4-2-3 震源	4-4
4-2-4 データ収録	4-4
4-2-5 データ取得結果	4-5
4-3 データ処理・解析*	4-5
5. AN-1号孔における割れ目の特性**	5-1
5-1 岩心結果結果	5-1
5-2 物理検層	5-8
5-3 ボアホールレーダー調査結果	5-10
6. 検討（総合解析）***	6-1
7. まとめと今後の課題***	7-1

参考文献

執筆分担 * : 地質調査所
** : 動燃事業団
*** : 両者

1. はじめに

地下の亀裂は熱水や石油といった流体の貯留層やそれらの流路となることから、地熱や石油等の資源の探査において、地下の亀裂に関する情報を的確に把握することが近年重要な課題となりつつある。このニーズに応えるべく、地質調査所をはじめとして幾つかの機関で地下亀裂の調査技術の研究開発が実施されてきている。

一方、動力炉・核燃料開発事業団（動燃）が実施している地層科学研究では、広域の地下水の流動を解明することが重要な課題となっており、結晶質岩では地下水は主に亀裂にそって流動すると考えられることから、やはり地下の亀裂に関する情報を的確に把握する技術を必要としている。

地質調査所では、地表と地表から掘削された試錐孔を利用して地下の亀裂に関する情報を得る技術であるVSP調査法の技術開発を実施しているが、開発された技術の適用性を評価するためには、色々な岩種での適用試験が必要であり、新しい適用試験場所を求めている。これに対し動燃は、地球物理学的手法を用いた地下の亀裂調査に関して、まず既存の調査技術の現状を把握し、地層科学研究への適用性を評価することを計画していたことから両者の研究目的が一致し、VSP調査技術について平成5年度から3か年計画で共同研究を実施することになった。

共同研究では、先ず、1年目にS波VSP調査法の適用試験、2年目にハイドロフォンを用いたVSP調査法の適用試験を実施する事とし、地質調査所が測定に必要な機器及びデータ解析技術を提供し、動燃が試験サイト及びその地域の地質（主に亀裂）に関する情報を提供することになった。また、動燃・東濃地科学センターの正馬様洞試験サイトには深度1,000mの試錐孔（AN-I号孔）が土岐花崗岩中に掘削されていることから、正馬様洞試験サイトが本共同研究の試験場所として選定された。

本報告書は、共同研究の2年目に実施したハイドロフォンVSP調査法の適用試験結果のうち、その1としてハイドロフォンVSP調査法で検出されたチューブ波の発生深度を中心にまとめたものである。チューブ波の振幅を用いた解析による亀裂の透水性評価などについてはその2としてまとめる。

なお、本研究は以下の者が担当した。

地質調査所	動燃事業団
伊藤 久男	青木 和弘
大湊 隆雄	大澤 英昭
木口 努	長谷川 健
桑原 保人	三戸 嘉之
中尾 信典	藪内 聡
宮崎 光旗	

2. 適用試験の目的

2-1 試錐孔を利用した地下亀裂調査技術の現状と問題点

地下亀裂の分布は地下岩盤の力学的・水理学的性質を規定する重要な要素である。地下における亀裂の3次元分布あるいはその性質の把握は地表からの調査だけでは必ずしも十分でない。試錐孔を利用した地下亀裂の分布・性質の把握についての技術開発、評価が必要とされている。直接地下にアクセスしてデータ取得を行うことのできる試錐孔を利用した調査としては、(1)コアの記載及び解析、(2)孔内検層、(3)VSP (Vertical Seismic Profiling: 鉛直地震探査法)等の試錐孔を利用した調査、(4)水理試験等が行われている。亀裂観察手法について表-2-1にまとめた。

孔内検層の内容

孔内検層としては、スタンダードな検層に加えて、ボアホールテレビュアー (BHTV)、フォーメーションマイクロスキヤナー/フルボアフォーメーションマイクロイメージャー (FMS/FMI)、ボアホールテレビ (BTV)等の孔内イメージングツールが利用されている。BHTVは超音波を孔壁に発射し孔壁からの反射を記録する装置である。超音波振動子は内蔵のモータにより回転する。またBHTVをケーブルで引き上げながら測定することにより、孔井内を3次元的に走査する。FMS/FMIはいくつもの電極をもつパッドを孔壁に押しつけ、孔壁の比抵抗値分布を記録することにより、亀裂を推定する。またボアホールテレビは光学的に孔井内を観察する。

これらのイメージングツールにより、孔内での亀裂の直接観察を行い、亀裂の走向・傾斜角・開口幅を決定することが可能になってきた。さらにPTS検層 (Pressure - Temperature - Spinner Log)あるいはハイドロフォンVSP調査法など他の孔内データと比較することにより、透水性亀裂の把握が可能になりつつある。例えば、山形県肘折地域でNEDOが高温岩体研究計画の一環として掘削した試錐孔でのBHTV測定では、PTS検層等で確認された透水性亀裂を検出することができた。この結果、試錐孔を横切る平板状の亀裂が透水性に寄与していることが示された。

孔内検層の問題点

ボアホールテレビやテレビュアーといった現存するイメージングツールにより、孔壁における亀裂のマッピングは極めて高精度、高分解能で行うことができるが、以下のような問題点がある。

(1) イメージングツールによる亀裂の検出限界

BHTV、FMS/FMI、BTVとも検出できる亀裂の開口幅には限界がある。FMS/FMI、BTVはBHTVに比べ解像度が良いとされているが、それでも幅0.1mm程度の亀裂の検出までで、それ以下

のマイクロクラックレベルの亀裂の検出は不可能である。更に開口幅の大きな亀裂の検出についても限界がある（例えばBarton and Zoback, 1992）。

また、垂直亀裂が試錐孔に遭遇する確率は非常に低いため、孔内でのイメージングツールによる検出は極めて困難である。

(2) 亀裂の長さ

亀裂を平行平板、あるいはペニー型（楕円体）とすると亀裂は幅と長さ／半径で表現される。しかし、孔内イメージングツールでは、直接亀裂半径を知ることはできない。

(3) 孔壁からの広がり

いずれも孔壁での観察であり、孔壁から先については知ることは困難である。ボアホールレーダーを用いれば、孔井掘削方向と平行に近い亀裂は、把握可能であるが、掘削方向と垂直に近いものは、把握が困難である。また、岩石の物性により、探査範囲が大きく異なる。

(4) 亀裂の開口性、透水性亀裂の検出

BHTVでは、亀裂が開口性あるいは充填されているかについてはわかりにくい。FMS/FMIでは孔壁の比抵抗分布を計測しており、亀裂内の状態（開口性あるいは充填物）に敏感である。

BTVでは開口性あるいは充填物の状況を見ることができ、しかし、以上の方法では孔壁から少し奥がどうかについては情報を与えてくれない。さらにイメージングツールで観測された亀裂が透水性であるかについては、イメージングツールだけの結果からはわからない。

2-2 ハイドロフォンVSP調査法の現状と新たな調査の目的

地質調査所では、以上の問題点を解決するために、試錐孔を利用した弾性波調査の研究を進めている。調査法としては、S波-VSP調査法とハイドロフォンVSP調査法である。S波-VSP調査法の原理、手法については平成5年度の報告書で述べた（工業技術院地質調査所、動力炉・核燃料開発事業団、1994）。ハイドロフォンVSP調査法はチューブ波の発生により、透水性亀裂を把握し、透水性亀裂の亀裂透水係数および透水性亀裂の走向・傾斜角を推定する手法である。その原理、手法の詳細については第3章で述べる。

地質調査所ではすでにいくつかの場所での実験を通じて、データ取得、解析の技術開発を行い、

孔内検層・イメージングツールによる結果との比較を行ってきた。熔結凝灰岩である秋田県田沢湖町の孔井（木口他, 1995）、花崗岩である福島県飯館町の孔井（Kiguchi et al., 1995）において適用試験を既に実施しており、ハイドロフォンVSP調査法によるチューブ波解析により、透水性亀裂の検出、透水性亀裂の透水係数の推定が可能であることを確認している。さらに、マルチオフセットハイドロフォンVSP調査法により透水性亀裂の走向・傾斜角を推定することにより、近接して多くの亀裂が存在する場合での透水性亀裂とそうでないものとを区別できる可能性も示している（Kiguchi et al., 1995）。

一方、動力炉・核燃料開発事業団（動燃）が実施している地層科学研究では、広域の地下水の流動を解明することが重要な課題となっており、その一環として大深度の試錐孔を用いて深部岩盤の水理定数の測定を行っている。この際、通常の水理試験ではバッカーで試錐孔を区切って測定を行うため、得られる情報はそのバッカー区間全体の総合的な情報であり、ボアホールテレビ等でバッカー区間に多数の亀裂が確認されていても、個々の亀裂の水理特性を評価することはできない。従って、岩盤の透水性を評価するためには、どの亀裂がそのバッカー区間の透水性を支配しているのかという情報を何らかの手段で取得する必要がある。動燃では透水性亀裂の抽出とその透水性を評価できる調査技術の開発に迫られている。また、水理試験にはかなり大がかりな装置と少なからずの計測時間・経費を要することから、地層科学研究に係る水理学的調査をさらに効率的に進めるという観点からも、さらに簡便な測定技術 - その技術の適用範囲が比較的大きな透水性に限られるとしても - の開発は動燃にとって必要不可欠である。

以上のように、ハイドロフォンVSP調査法は亀裂透水性評価の有力な手法を考えられるが、実用化にあたってはいくつかの問題点があることがわかってきた。その内のひとつがチューブ波解析によって得られる亀裂透水係数の評価である。地質調査所のいままでの実験では、ハイドロフォンVSP調査法による亀裂透水性と水理テストの結果を直接比較をする機会がなかった。今回の実験では水理的な透水係数の測定結果との直接比較が可能ができることが期待される。チューブ波が検出された場合は、AN-1号孔で実施された水理試験による透水係数測定結果およびボアホールテレビ（BTV）等による亀裂調査結果との対比を行うことにより、解析結果の妥当性を検証することとした。

以上のように、ハイドロフォンVSP調査法によるチューブ波の解析を行い、AN-1号孔における水理試験、亀裂調査結果との対比を行うことにより、ハイドロフォンVSP調査法の透水性亀裂を評価することを目的として、AN-1号孔を受震井としたマルチオフセットハイドロフォンVSP調査法適用試験を行った。

表2-1 亀裂観察各手法の比較

方法	亀裂形態			試錐孔からの広がり	透水性評価
	走向・傾斜	開口幅	開口性		
コア	○ ¹⁾	○	○		
孔検層					
FMS/FMI	○	○	○		
BHTV	○	○	○		
BTV	○	○	○		
ホアホルムラー	○			○	△
VSP					
チューブ波解析	○ ²⁾	△	○	△	○
VSP-CDP				・ VSP-CDP解析による 反射面のイメージング*	
S波-VSP				・ S波異方性解析による 亀裂の配向、密度	

¹⁾ 定方位コア

²⁾ マルチオフセット

3. ハイドロフォンVSP調査法について

ここでは今回行ったハイドロフォンVSP調査法による透水性亀裂評価の原理、実際の探査法、解析法の簡単なレビューを行い、ハイドロフォンVSP調査法の可能性と問題点を明らかにしたい。

3-1 ハイドロフォンVSP調査法による解析の原理

亀裂を検出・評価するために孔井を利用した様々な探査法が開発されている。例えば、孔壁に現われる亀裂を直接観察する方法として、超音波を孔壁に発射し反射波の強度や到達時間を測定するボアホールテレビュアー（BHITV）がある。BHITVは孔壁に現われる亀裂を検出し、走向・傾斜角・亀裂幅等をマッピングできる長所があるが、透水性亀裂と透水性のない亀裂を区別することは困難である。破碎帯では孔径が拡大することが多く、この孔径拡大はキャリパー検層で検出できるが、キャリパー検層は亀裂以外の原因で孔径が変化する場合にも亀裂が存在するときと同じように検出し、孔径変化の原因を特定できない。注水テストあるいはトレーサー試験は孔井のある区間に水を圧入することにより亀裂の透水性やその広がり調べのために有効な方法であるが、加圧する場合があるため孔井内の状態を変えることがあり、また、透水性亀裂がどこに存在するかを事前に行うことが必要である。このように、現在用いられている手法だけでは、地下に存在する透水性亀裂を検出し、その特性を評価することは困難であり、新たな探査法の開発が望まれている。

その新しい探査法の1つとして、ハイドロフォンVSP調査法を利用することが試みられている。この方法は、ハイドロフォンVSP調査法により観測される初動P波とそれから発生するチューブ波を利用するものである。Kitsunozaki (1971)は、ハイドロフォンVSP実験において、初動P波から発生するチューブ波が観測されることから、チューブ波が発生する深度には透水性亀裂が存在し、P波の入射がその亀裂を圧縮することにより亀裂内の流体が孔井内に押し出され、チューブ波が発生しているとするモデルを提案した。Huang and Hunter (1981,1984)は、VSP調査法で観測されるチューブ波の発生深度とボアホールテレビ（BTV）及びコア観察の結果より求めた亀裂の深度とは対応する傾向にあることを示し、また、注水テストより求めた透水係数と発生したチューブ波の振幅を比較することにより、チューブ波の振幅は亀裂の透水性と関係があることを示した。Beydoun et al. (1985)は、チューブ波の発生深度に平行平板形状の亀裂が存在するとし、入射P波と発生したチューブ波の振幅比から亀裂の透水係数を求める理論式を導いた。Hardin et al. (1987)はBeydoun et al. (1985)のモデルを用い、3つ以上の震源を設置したマルチオフセットハイドロフォンVSP記録のチューブ波とP波の振幅比から、亀裂の透水係数、走向、傾斜角を求める方法を示し、検層から求めた亀裂のパラメータと比較している。また、Li et al. (1994)は破碎帯をモデル化し、チューブ波を用いて破碎帯の透水係数を求

める式を示している。このように、ハイドロフォンVSP調査法でP波とP波から発生するチューブ波を孔井内で観測することにより透水性亀裂を検出し、亀裂の透水性や走向・傾斜角を定量的に評価する研究が行われている。

これまで報告されているハイドロフォンVSP調査法による透水性亀裂の解析の内容を表3-1に示す。表3-1でゼロオフセットとは震源が孔井近傍の(1点)の場合を、マルチオフセットとは震源が孔井から離れた複数点の場合を示す。以下3-2で述べるチューブ波の発生深度からの透水性亀裂の深度の推定、亀裂の透水係数の推定はゼロオフセットでも可能である。しかしマルチオフセットVSP調査を行うことにより、3-4に述べる透水性亀裂の走向・傾斜角の推定が可能になる。

3-2 チューブ波発生による透水性亀裂の検出

図3-2-1に、P波が入射することにより透水性亀裂からチューブ波が発生するメカニズムを模式的に表す。震源から発生したP波が地層中を伝播し、受振孔井を横切る透水性亀裂に入射する。P波の入射により亀裂が圧縮されて、亀裂内に含まれる流体が孔井内に押し出される。孔井内に押し出された流体によりチューブ波が励起され、チューブ波は透水性亀裂の深度から上方及び下方に伝播し、ハイドロフォンで観測される。

ハイドロフォンVSP記録において初動P波からチューブ波が発生している深度を求めることにより、透水性亀裂の深度が得られる。

3-3 亀裂の透水係数の推定

P波の入射により透水性亀裂からチューブ波が発生することを用いて、亀裂の透水係数を求める研究が行われている。透水係数を求める方法には、Beydoun et al.(1985)が示した平行平板の亀裂モデルを適用する方法とLi et al.(1994)が示した破碎帯モデルを適用する方法がある。両者のモデルの最も大きな違いは、P波の入射による亀裂幅または破碎帯幅の変化量の与え方である。図3-3-1に示すように、Beydoun et al.(1985)の亀裂モデルはP波の振動変位と同じ量だけ亀裂幅が変化するという、非常に変形しやすい亀裂モデルであると言える。一方、Li et al.(1994)のモデルは破碎帯幅の変化量は破碎帯を伝播するP波の位相差だけで与えられ破碎帯自身の変形は微小である変形しにくい亀裂モデルであると言える。Beydoun et al.(1985)とLi et al.(1994)の示す亀裂の透水係数の求め方は、亀裂のモデル化の他はほぼ共通している。ここではBeydoun et al.(1985)の方法による亀裂の透水係数の求め方を示す。

Beydoun et al.(1985)のP波から発生するチューブ波を利用して透水係数を求める考え方の基本は、チューブ波の相対的な振幅は亀裂の透水係数に比例し、チューブ波の振幅をそれを発生させたP波の

振幅で規格化するということである。

Beydoun et al.(1985)の理論を適用するときに、計算を単純化するために下に述べる仮定を行なう。

- 1) 亀裂は等方均質な媒質中に存在し、亀裂内には流体が飽和しており、亀裂の形状はある開口幅を持った平行な面である。
- 2) 孔井内の流体と亀裂内の流体は、P波が入射するまで平衡状態にあり、亀裂と孔井との間に流体の流れを生じさせる圧力差はない。
- 3) P波の入射により発生する亀裂幅は振動する。亀裂幅の変化量 ξ は入射P波の変位 u と次の関係がある。

$$\xi = u \cdot \cos \theta$$

ここで θ はP波の亀裂への入射角である。また、亀裂幅の変化量は亀裂の開口幅に比べて十分小さい。

- 4) 入射するP波は平面波で、その波長は孔径や亀裂の開口幅に比べて十分大きい。
- 5) 亀裂内の水の流れは1次元の線形薄流で、Stokesの法則を満たす。
- 6) 亀裂から孔井内に押し出される流体によって、孔井内のその亀裂がある位置の圧力が大きく乱されることはない。
- 7) 1つの亀裂内の透水係数は時間的空間的に変化しない。

このような仮定を行なうことにより、a) 入射P波による亀裂幅の変化量、b) 亀裂幅の変化量と亀裂内の透水係数から求まる、亀裂から孔井内に押し出される流体の量、c) 亀裂から押し出された流体により励起されるチューブ波の振幅を順に求めることができる。その結果、チューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を表す理論式が求まる。

その理論式は

$$P^T/P^0 = C(k,f) \times D(\phi,f) \times \cos \theta \quad (3-1)$$

と表すことができる。

ここで

P^T/P^0 : チューブ波とP波の振幅比

k : 亀裂の透水係数

f : P波 (チューブ波) の周波数

ϕ : 入射P波と孔井軸のなす角度

θ : 入射P波と亀裂面の法線のなす角度

$C(k,f)$: チューブ波の圧力に関する関数

$D(\phi, f)$: P波の圧力に関する関数

である。

関数 $C(k,f)$ と $D(\phi, f)$ には地層中のP波、S波及びチューブ波の伝播速度、坑井の半径、坑内流体の圧縮率、坑内流体の粘性係数が代入される。

この理論式から、チューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を示す理論曲線を求めることができる。理論曲線の例を図3-3-2と図3-3-3に示す。図3-3-2は、震源がゼロオフセット、坑井が鉛直であり、亀裂が水平（傾斜角 $\theta = 0^\circ$ ）であるときに、亀裂の透水係数を10md, 50md, 100md, 200mdと変化させた場合の理論曲線である。図3-3-3は震源がゼロオフセット、坑井が鉛直であり、亀裂の透水係数を50mdとしたときに、亀裂の傾斜角 θ を 0° 、 20° 、 40° 、 60° 、 80° と変化させた場合の理論曲線である。

この理論曲線を用いて亀裂の透水係数を求めるために、まず、チューブ波の発生深度にある亀裂の傾斜角をBHITVの記録から求め、(1)式に示す理論曲線を得る。そして、VSP記録からチューブ波とそれを発生させたP波の振幅比を各周波数について求め、振幅比を理論曲線上にプロットすることにより亀裂の透水係数を得る。

3-4 透水性亀裂の走向・傾斜の推定

前節でシングルオフセットVSP記録から亀裂の透水係数を求める方法について説明した。この方法では、理論曲線を求める前に、チューブ波の発生深度の亀裂の傾斜角をBHITVの記録から求める必要がある。しかし、震源が3点以上あるマルチオフセットVSP記録を用いれば、VSP記録から透水性亀裂の走向と傾斜角を求めることができる。

シングルオフセットVSP記録の場合の、チューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を示す理論式は(3-1)式に示すとおりである。

3つの震源をもつマルチオフセットVSP記録の場合、(3-1)式は(3-2)式のように書ける。

$$\begin{pmatrix} (P^T/P^\alpha)_{SH-1} \\ (P^T/P^\alpha)_{SH-2} \\ (P^T/P^\alpha)_{SH-3} \end{pmatrix} = C(k,f) \times \begin{pmatrix} D(\phi_{SH-1},f) & 0 & 0 \\ 0 & D(\phi_{SH-2},f) & 0 \\ 0 & 0 & D(\phi_{SH-3},f) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \rho_{x,SH-1} & \rho_{y,SH-1} & \rho_{z,SH-1} \\ \rho_{x,SH-2} & \rho_{y,SH-2} & \rho_{z,SH-2} \\ \rho_{x,SH-3} & \rho_{y,SH-3} & \rho_{z,SH-3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad \dots (3-2)$$

ここで

$(P^f/P^o)_{SH-i}$: 震源位置がSH-i($i = 1, 2, 3$)であるVSP記録から求めたチューブ波とP波の振幅比

$(P_{x,SH-i}, P_{y,SH-i}, P_{z,SH-i})$: 震源位置がSH-i ($i = 1, 2, 3$)のときの孔井に入射するP波のベクトルの成分

(n_x, n_y, n_z) : 亀裂面の単位法線ベクトルの成分

$C(k, f)$: チューブ波の圧力に関する関数

$D(\phi_{SH-i}, f)$: 震源位置がSH-i($i=1,2,3$)のときに発生するP波の圧力に関する関数

ϕ_{SH-i} : 震源位置がSH-i($i=1,2,3$)のときの入射P波と孔井軸のなす角度

である。

(3-2) 式で、 $(P_{x,SH-i}, P_{y,SH-i}, P_{z,SH-i})$ と ϕ_{SH-i} は、速度検層の結果を用いてレイトレースを行うことやVSP記録の初動P波の見掛け速度を求めること等から決めることができる。また、(3-2)式の周波数 f をある値に決めると、 $D(\phi_{SH-i}, f)$ は各オフセットVSP記録について求めることができる。従って、周波数 f をある値に決め、その周波数におけるチューブ波と初動P波の振幅比を各オフセットについて求めて(3-2)式の左辺に代入すると、(3-2)式と

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1 \quad (3-3)$$

から、 (n_x, n_y, n_z) について解くことができ、亀裂の走向と傾斜角が求まる。亀裂の走向と傾斜角が求まれば、(3-1)式の θ が決まり(3-1)式からチューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を表す理論曲線が得られる。理論曲線とVSP記録から求めた振幅比を比較することにより、透水係数を求めることができる。

震源が4点以上ある場合には、最小二乗法を用いて、 (n_x, n_y, n_z) について解けばよい。

表3-1 ハイドロフォンVSPで観測されるチューブ波を用いた透水性き裂に関する解析の例

	year	Lithology	offset	source	depth	frequency	permeability	other data
Kitunezaki	1971	—	zero	—	50m	1 KHz	—	—
Huang 他	1984	igneous/ metamorphic	zero	dynamite (150g)	1100m	200Hz	—	TV log, core
Beydoun他	1985	metamorphic	—	weight drop	150m	150Hz	0.1~0.5d	—
Hardin他	1987	metamorphic	4 offset	dynamite	225m	100Hz	5~70d	BHTV, sonic log, pump test, caliper
木口他	1990	welded tuff	zero	dynamite (50~150g)	660m	200Hz	5md~1.2d	BHTV,sonic log caliper, electric log
Toksöz他	1992	metamorphic	3 offset	dynamite	980m	100Hz	0.1~10d	BHTV
		—	3 offset	dynamite (200g)	500m	200Hz	2.0~5.0d	BHTV
Li他	1994	granite	5 offset	weight drop	260m	100Hz	9~55 d	BHTV, sonic log pump test
木口他	1995	granite	3 offset	electric detonator	110m	400Hz	20~210md	BTV, BHTV,caliper hydrofracturing

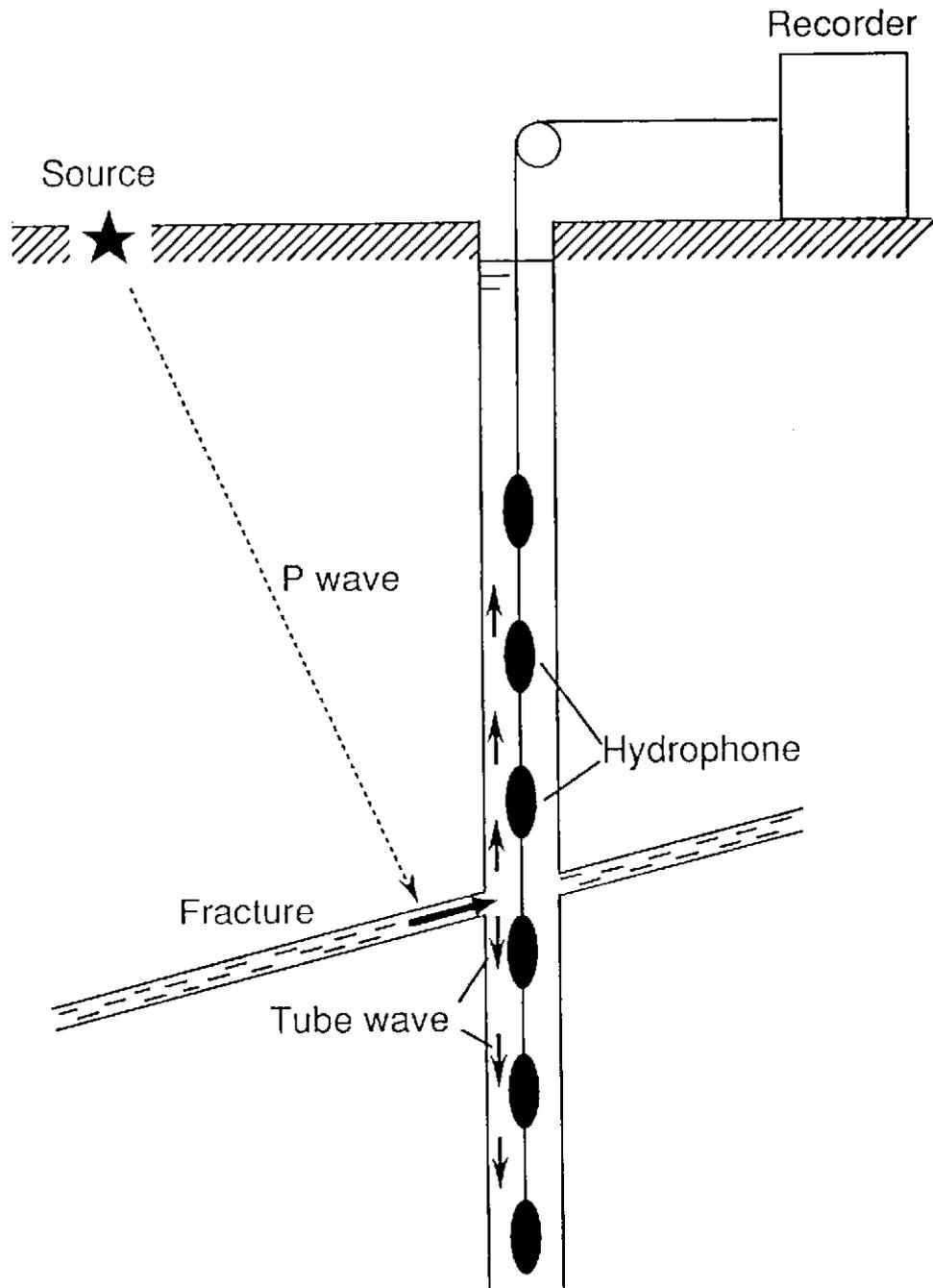
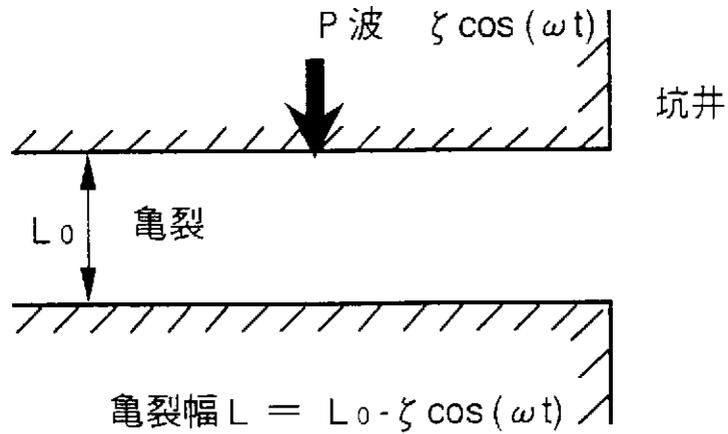
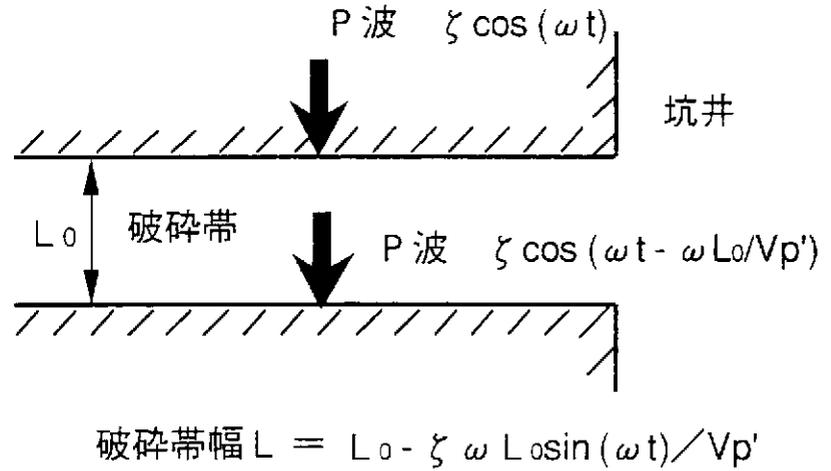


図3-2-1 透水性亀裂においてP波からチューブ波が発生するメカニズム。

Beydoun et al. (1985) モデル



Li et al. (1994) モデル



($V_{p'}$: 破砕帯中を伝播するP波速度)

図-3-3-1 Beydoun et al.(1985)のP波の入射による亀裂幅の変化量の与え方と Li et al.(1994)のP波の入射による破砕帯幅の変化量の与え方の比較.

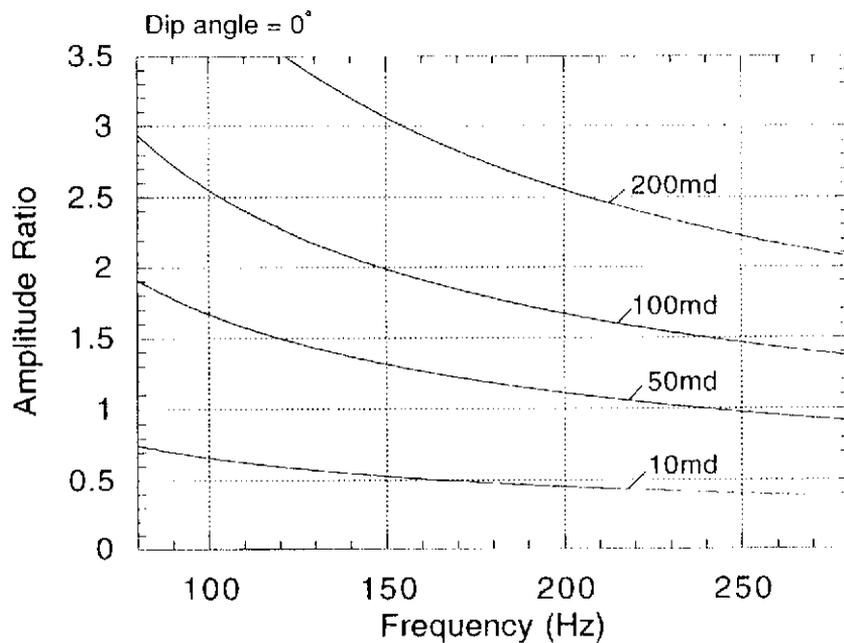


図3-3-2 チューブ波とP波の振幅比，P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を示す理論曲線。ゼロオフセットで亀裂の傾斜角が 0° の場合に，亀裂の透水係数を10md, 50md, 100md, 200mdと変化させたときの理論曲線を示す。

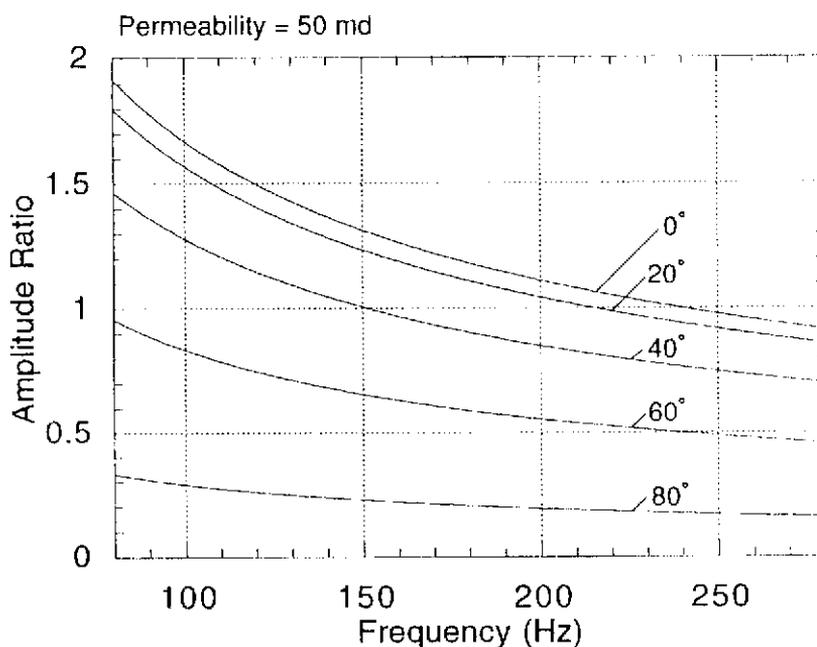


図3-3-3 チューブ波とP波の振幅比，P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を示す理論曲線。ゼロオフセットで亀裂の透水係数が50mdの場合に，亀裂の傾斜角を 0° から 80° まで変化させたときの理論曲線を示す。

4. AN-1号孔における適用試験

4-1 東濃地域の地質概要

本地域の地質は、中・古生層および花崗岩類を基盤岩として、それを覆って新第三系と第四系が分布する（尾方ほか、1992）。新第三系瑞浪層群は、基盤花崗岩を不整合で覆って分布する。その上位には瀬戸層群が、これらを明瞭な不整合で覆って分布する。

(1) 基盤花崗岩類

東濃地域には、中世代～古第三紀の花崗岩が広く分布する（図-4-1-1）。土岐花崗岩と呼ばれる本花崗岩は岩相変化があまり大きくなく、中粒～粗粒黒雲母花崗岩・斑状黒雲母花崗岩・中粒角閃石黒雲母花崗岩・閃緑岩などから成り、板状の節理が発達する。

(2) 堆積岩

この地域の堆積岩は、中新世の瑞浪層群および鮮新世～更新世の瀬戸層群から成り、瑞浪層群はさらに下位より土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層に区分される（図-4-1-2）。

(a) 瑞浪層群

瑞浪層群の岩相は、主として火山碎屑物と花崗岩碎屑物によって構成されており、ケイ化木と生物遺骸（貝化石、植物化石などの大型化石など）が部分的に出現する。一般には、下位ほど粒度が粗く、最上部ではシルト質になっている。土岐夾炭累層は、アルコース質砂岩（花崗岩碎屑物を多く含む砂岩）、角礫の花崗岩を含む巨礫～大礫岩から構成され、明世累層は凝灰質中粒砂岩を主体とする。生俵累層は凝灰質細粒砂岩、シルト岩を主体とする。

(b) 瀬戸層群

瀬戸層群は、下位の瑞浪層群や花崗岩とは不整合の関係を示しており、瑞浪層群がほぼ固結した後には調査地域を覆った堆積物である。細礫～大礫から成る円礫岩を主体とし、下位に粘土層や砂質粘土層の薄層（厚さ1～3 m）を1～2層挟んでいる。その礫種は花崗岩・チャート・流紋岩・泥岩・火山岩で、基質は白色極細粒凝灰質ないしはアルコース質である。

4-2 AN-1号孔におけるデータ取得

4-2-1 測定概要

AN-1号孔を受振孔に、AN-1号孔を取り囲む4本の孔井を発震孔としてマルチオフセットハイドロフォンVSP実験を行った(図-4-2-1)。4本の発震孔のうち3本は新たに掘削した。震源はダイナマイトの孔井内発震である。AN-1号孔にハイドロフォンを入れて測定した。データ収録はAN-1号孔敷地内の観測小屋で行った。発破信号補正用の地上地震計の記録と各発破孔からのトリガー信号はAN-1号孔敷地内の観測小屋まで敷設したケーブルにより伝送した。収録したデータはワークステーションに転送し、フィールドで予備的な解析を行った。

4-2-2 発震孔

発震孔は図-4-2-1に示す4孔を用いた。SH-1、-2、-3の3孔についてはあらたに掘削した。SH-4は既存孔を使用した。

(発震孔の掘削)

掘削：

各発破孔の深度、地質柱状を図-4-2-2に示す。

SH-1、SH-2、SH-3の3孔はNQビット(SH-1: 75.3 mm, SH-2、-3: 76.5 mm)で掘削し、50A STPG Sch 80ケーシング(O.D. 60.5 mm, I.D. 49.5 mm)を孔底まで挿入し、フルホールセメンティングした。ただしSH-4孔は孔径86 mmで掘削され、ケーシング挿入及びセメンティングは行っていない。

花崗岩内掘削長は以下の通りである。

SH-1	20 m
SH-2	15 m
SH-3	10 m
SH-4	5.5 m

セメンティング：

方法

セメンティングは一栓式で、以下の手順で行った。

- * ケーシングの先端に逆流防止弁をつけて降下する。
- * ケーシングの上端部よりケーシング内へセメントスラリーを圧送する。
- * 所定量のセメントスラリーがケーシング内へ圧送された時点で後押しプラグをセットする。

*さらに清水を圧送して後押しプラグを押し下げてセメントスラリーをケーシングの外側へ押し上げる。

*後押しプラグがケーシング先端の逆止弁に接着すると、水圧が急上昇してセメントスラリーが全部ケーシングの外側へ押し上げられたことが確認される。

結果：

SH-1

セメントスラリー量130ℓを圧入し、さらに清水で後押しを行った。後押し圧力が4 kg/cm²でセメントスラリーの地上への上昇を確認した。後押しプラグが逆止弁に到達した最終圧力は6 kg/cm²となり、管内のセメントスラリーがすべて管外へ押し上げられたことを確認した。

セメント硬化後ケーシング内に40.50 mmのロッドを降下して管内セメントをチェックするとともに、管内洗滌を逆止弁の頭部31.90 mmまで行った。

SH-2

セメントスラリー量340ℓを圧入し、さらに清水で後押しを行ったが、後押し40ℓのところまで水圧が上昇しはじめ60ℓのところまで水圧10 kg/cm²に達した。さらに後押しを続行しようとしたが、水圧ポンプの限界圧力となり、圧送を中止した。結局最終後押し量は70ℓとなり、ケーシング内にセメントスラリーを133.5ℓ残した。管外にまわったセメントスラリー量は206.5ℓとなり、セメンティング容積（182.66ℓ）以上となったが、地上までのセメントスラリーの上昇は確認されなかった。

セメント硬化後ケーシング内に46 mmのロッドクラウンで孔内洗滌およびセメント切り下げを106.00 mまで行った。

SH-3

セメントスラリー量260ℓを圧入し、さらに清水で後押しを行った。後押し圧力が4 kg/cm²でセメントスラリーの地上への上昇を確認した。後押しプラグが逆止弁に到達した最終圧力は6 kg/cm²となり、管内のセメントスラリーがすべて管外へ押し上げられたことを確認した。

セメント硬化後ケーシング内に40.50 mmのロッドを降下して管内セメントをチェックするとともに、管内洗滌を逆止弁の頭部76.10 mmまで行った。

セメンティングの結果を表-4-2-1にまとめた。

測量：

測量はトランシットを用いた開放トラバースによる。結果を表4-2-2、図4-2-3に示す。

4-2-3 震源

震源として雷管（地震探査用電気雷管，全発火時間 0.4 ms）およびダイナマイト（深海用桐ダイナマイト，25g単位，外径30 mm，水深500 mまで完爆）を用いた。

発震孔内に爆薬を所定の深度まで吊り下ろし，孔内にケーシング口まで注水して発破した。吊り下ろし方法は，発破母線とメジャーテープをワイヤーロープに沿わせて一体化したものの先に，鉄筋棒を加工した重りと雷管およびダイナマイトをつけて行った（図4-2-4）。発破深度はGLを基準とした。

発破の指揮は計測担当責任者から発破作業総括責任者に発破孔井，発破深度，薬量等を指示し，発破作業総括責任者が無線によって各発破技士に発破準備，点火を指示し，完爆の報告を受け取った。

4-2-4 データ収録

ハイドロフォン：

マークプロダクツ社製ハイドロフォンP-27-12C（図4-2-5）を使用した。テンションメーターにより（図4-2-6），ハイドロフォン移動の際のテンションをモニターした。今回の測定ではハイドロフォン間隔は1mとし，10連のアレイで行った。深度基準はGLとした。ハイドロフォンは毎日測定後に引き上げた。その際に深度のチェックを行ったが，降下前との差は10 cm程度であった。ハイドロフォンウインチとしては電動のものを用い，ケーブル長は1,000 mである（図4-2-7）。

地上地震計

発破信号の振幅補正及びトリガー時刻補正のために，図4-2-1に示す位置に地上地震計（マークプロダクツ社製 L-22）を設置し，発震波形をプリアンプで増幅し，ケーブルでAN-1号孔敷地内の観測小屋まで伝送した。

データ収録

入力チャンネル：ハイドロフォンからの信号はOYO GEOSPACE社製DAS-1（図4-2-8）の入力チャンネルに入力し，アップホール地震計の信号はDAS-1のAUX入力チャンネルに入力した。

DAS-1をトリガー待ちの状態にし，発破作業総括責任者に発破の指示をし，発破作業総括責任者が

無線によって各発破技士に発破準備、点火を指示した。発破信号はトリガー信号として有線でAN-1号孔脇の収録装置まで引かれ、収録装置に人力した。データ収録条件を表-4-2-3に示す。

フィールドにおける予備的解析

収録したデータは適宜フィールド解析用のワークステーションに転送し、データのチェックとフィールドにおける予備的解析を行った。予備的解析の内容はデータの編集と波形の表示、プリントアウトである。

図-4-2-9にデータ収録の概要を示す。また使用機材を表-4-2-4に示す。

4-2-5 データ取得結果

平成6年11月30日より12月3日までの4日間にわたり、AN-1号孔においてハイドロフォンVSPデータを取得した。表4-2-5に示す様にハイドロフォン深度は20.0 m～409.0 mである。

ダイナマイト量はSH-4孔では25 gであったが、他の発震孔ではハイドロフォン深度の増加とともに50 gあるいは100 gへ増加した。いずれの場合もスタックは1回のみとした。測定の後半になり発破回数が重なると、発震孔へのダイナマイトの挿入が困難になることがあった。SH-1, SH-3, SH-4孔については最後まで同一深度で発震することができた。しかしSH-2では実験の早い段階から発震孔へのダイナマイトの挿入が困難になり、発震深度を何回も変更した。

4-3 データ処理・解析

チューブ波の発生深度を求めるために、次の処理を行った。

- 1) トレース編集（深度順に並べる）。
- 2) チューブ波（上方進行）の抽出。
 - ・ 下方進行チューブ波の並列化（時間シフト+0.75ms/trace）。
 - ・ メディアンフィルター処理による下方進行チューブ波の強調。
 - ・ 下方進行チューブ波の減算。
 - ・ 上方進行チューブ波の並列化（時間シフト）。
- 3) チューブ波（下方進行）の抽出。
 - ・ 上方進行の抽出と同様の処理。

トレース編集としてまず、取得したショット記録を深度順に編集した。1 m間隔の10連のハイドロフォンアレイでデータ収録したので、各ショット記録は1 m間隔の10トレースからなる。各ショット記録を発震孔ごとに分け、それぞれ深度順に編集した。

図4-3-1、-2、-3、-4にそれぞれSH-1、SH-2、SH-3、SH-4号孔発震によるVSP記録（全深度）を示す。ただし、これらの図では各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。また、アップホール地震計の記録を用いた振幅の補正とトリガー時刻のずれの補正は行っていない。図4-3-2に示すSH-2号孔発震による記録では、発震深度を変更したために初動走時は揃っていない。

図4-3-5～図4-3-16にSH-4、SH-1号孔発震による記録について、深度方向を拡大したVSP記録を示す。

図4-3-17はSH-4号孔発震のVSP記録から0.75ms/traceで各トレースを時間シフトし、下方進行チューブ波の並列化を行った記録である。図4-3-18では図4-3-17にメディアンフィルター処理を行い、下方進行チューブ波を強調した。図4-3-19は図4-3-17から図4-3-18を減算し、下方進行チューブ波を除去し、上方進行チューブ波のみを残した記録である。さらに図4-3-20は時間シフトをもとに戻したものである。

図4-3-21はSH-4号孔発震のVSP記録から0.75ms/traceで各トレースを時間シフトし、上方進行チューブ波の並列化を行った記録である。図4-3-22では図4-3-21にメディアンフィルター処理を行い、上方進行チューブ波を強調した。図4-3-23は図4-3-21から図4-3-22を減算し、上方進行チューブ波を除去し、下方進行チューブ波のみを残した記録である。さらに図4-3-24は時間シフトをもとに戻したものである。

以上の処理からチューブ波の発生深度を読みとった。今回の記録では初動P波からのチューブ波の発生が明白であり、上方・下方進行チューブ波を強調した結果と現波形によるチューブ波の発生深度の読みとりには、差がなかった。

すべての発震孔によるVSP記録から、上方進行あるいは下方進行のチューブ波の発生が確認された深度は、図4-3-25に実線矢印で示す次の13深度である。

51m, 60m, 79m, 103m, 121m, 123m, 164m, 219m, 224m, 264m, 270m, 297m, 305m.

また、一部のVSP記録でチューブ波の発生が確認された深度は、図4-3-25に点線矢印と括弧で

示す次の10深度である。

39m, 130m, 150m, 155m, 200m, 209m, 254m, 280m, 313m, 357m.

これら深度から発生するチューブ波の中には、ある1つの深度から発生しているのではなく、2つの発生深度に挟まれた区間全体からチューブ波が発生しているように見られるものもある。区間全体からチューブ波が発生している可能性があると考えられる理由は2つある。1つは、初動P波の振幅が区間全体で大きくなっていることである。チューブ波が発生する深度では初動P波とチューブ波が重なるため、初動P波の振幅はその前後の深度に比べて大きくなる。チューブ波がある1つの深度から発生しているならば、初動P波の振幅が大きくなるのは1～2トレースであるが、ある区間全体で初動P波の振幅が大きくなっている場合がある。2つめの理由は、区間の上端から発生する上方進行のチューブ波と区間の下端から発生する下方進行のチューブ波が、その区間全体から発生する1組のチューブ波であるように見えることである。これらの理由により、ある1つの深度ではなく区間全体からチューブ波が発生している可能性のある深度は、次の4区間である。

121m～123m, 219m～224m, 264m～270m, 297m～305m.

区間全体からチューブ波が発生している可能性がある深度は、図4-3-25で斜線部として示している。チューブ波の発生深度の結果を図4-3-25にまとめた。実線矢印はすべてのVSP記録からチューブ波の発生を確認した深度を示し、点線矢印（深度をかつこ内に示す）は一部のVSP記録でチューブ波の発生を確認できなかった深度を示す。

チューブ波の発生深度では初動P波とチューブ波が重なるため、見かけ上、初動P波の振幅が大きくなる。図4-3-26～図4-3-28にS11-2号孔発震以外の各VSP記録から求めた全深度の初動P波の振幅値とチューブ波発生深度を比較した。図4-3-26, -27, -28は初動P波の振幅値として、それぞれ1深度ごとの値, 3深度ごとの移動平均値, 5深度ごとの移動平均値を用いた。S11-2号孔発震では発破深度を変更しているため、全深度の振幅値は求めなかった。図4-3-26～図4-3-28から、チューブ波の発生深度と初動P波の振幅が増加する深度はほぼ対応していることがわかり、初動P波の振幅を用いてチューブ波の発生深度を求めることができる可能性を示している。VSP記録においてある区間全体からチューブ波が発生している可能性があると考えられた深度では、初動P波の振幅もその区間全体で増加する傾向にある。



図-4-1-1 調査地域の表層地質

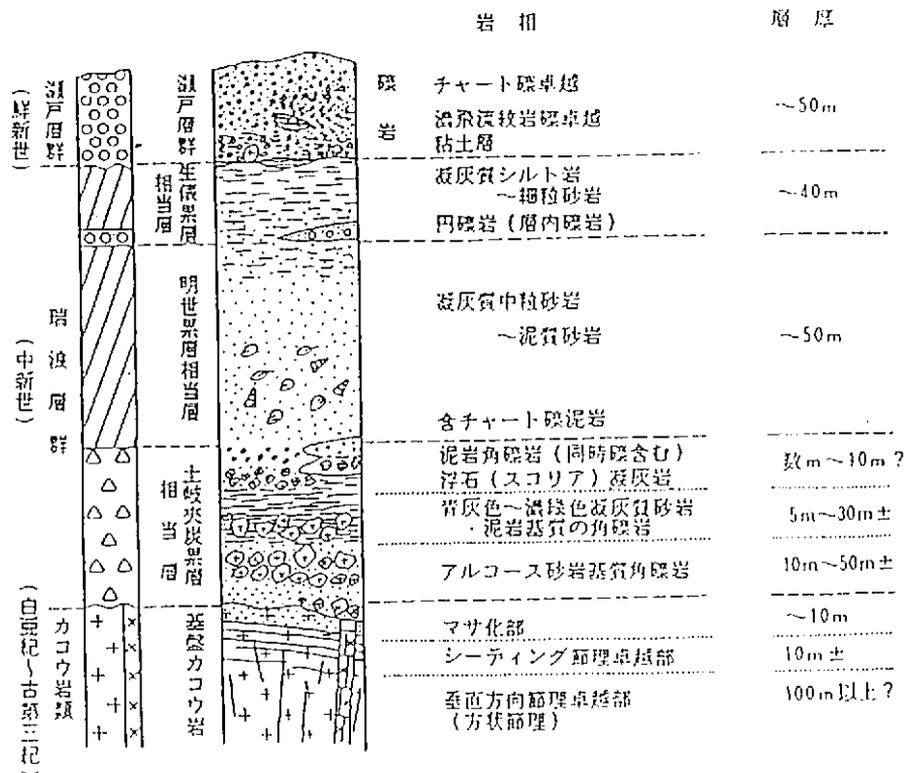
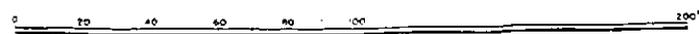


図-4-1-2 調査地域模式地質柱状図



S = 1:1 000

岐阜県瑞浪市明世町月吉字正馬様洞地内

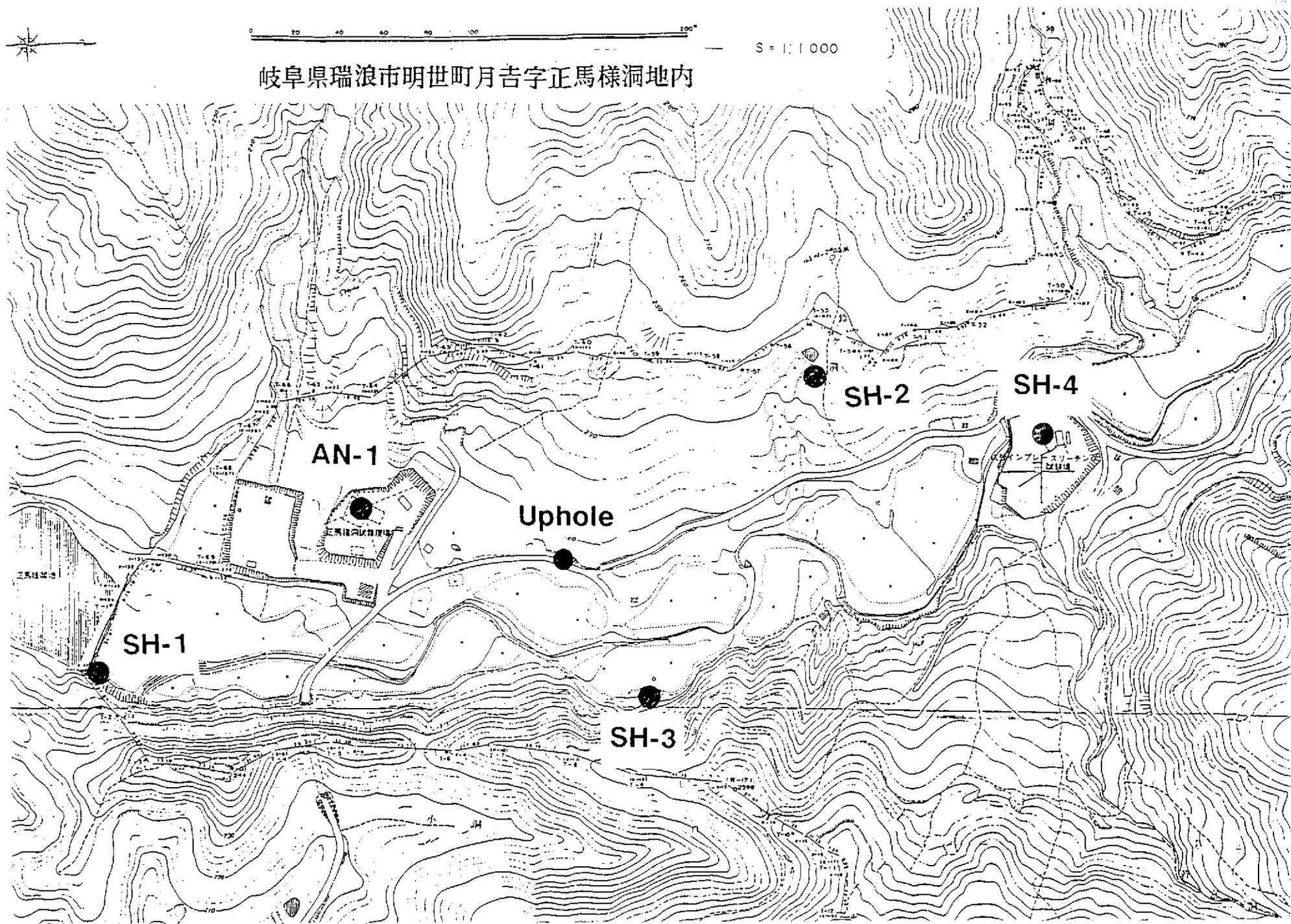


図-4-2-1 坑井及び地上地震計 (uphole) の位置図

表-4-2-1 発震孔の諸元

項目	SH-1	SH-2	SH-3	SH-4
掘削深度、m	32.10	106.20	76.30	95.00
掘削坑径、mm	75.30	76.50	76.50	86.00
ケーシング種類	STPG S/80	STPG S/80	STPG S/80	-
ケーシング挿入深度、m	72.10	106.20	76.30	-
ケーシング外径、mm	60.50	60.50	60.50	-
ケーシング内径、mm	49.50	49.50	49.50	-
セメンティング容積、 r	50.72	182.66	131.24	-
注入スラリー量、 r	130.00	340.00	260.00	-
スラリー比重	1.80	1.80	1.80	-
セメントの種類	普通ポルトランド	普通ポルトランド	普通ポルトランド	-
セメント量、kg	160.00	400.00	320.00	-
セメンティング実施日	1994年10月26日	1994年11月2日	1994年10月30日	-
後処理セメント、kg	40.00	120.00	60.00	-
備考	セメントスラリー 11元まで上昇確認	セメントスラリー 11元まで上昇なし	セメントスラリー 11元まで上昇確認	裸孔

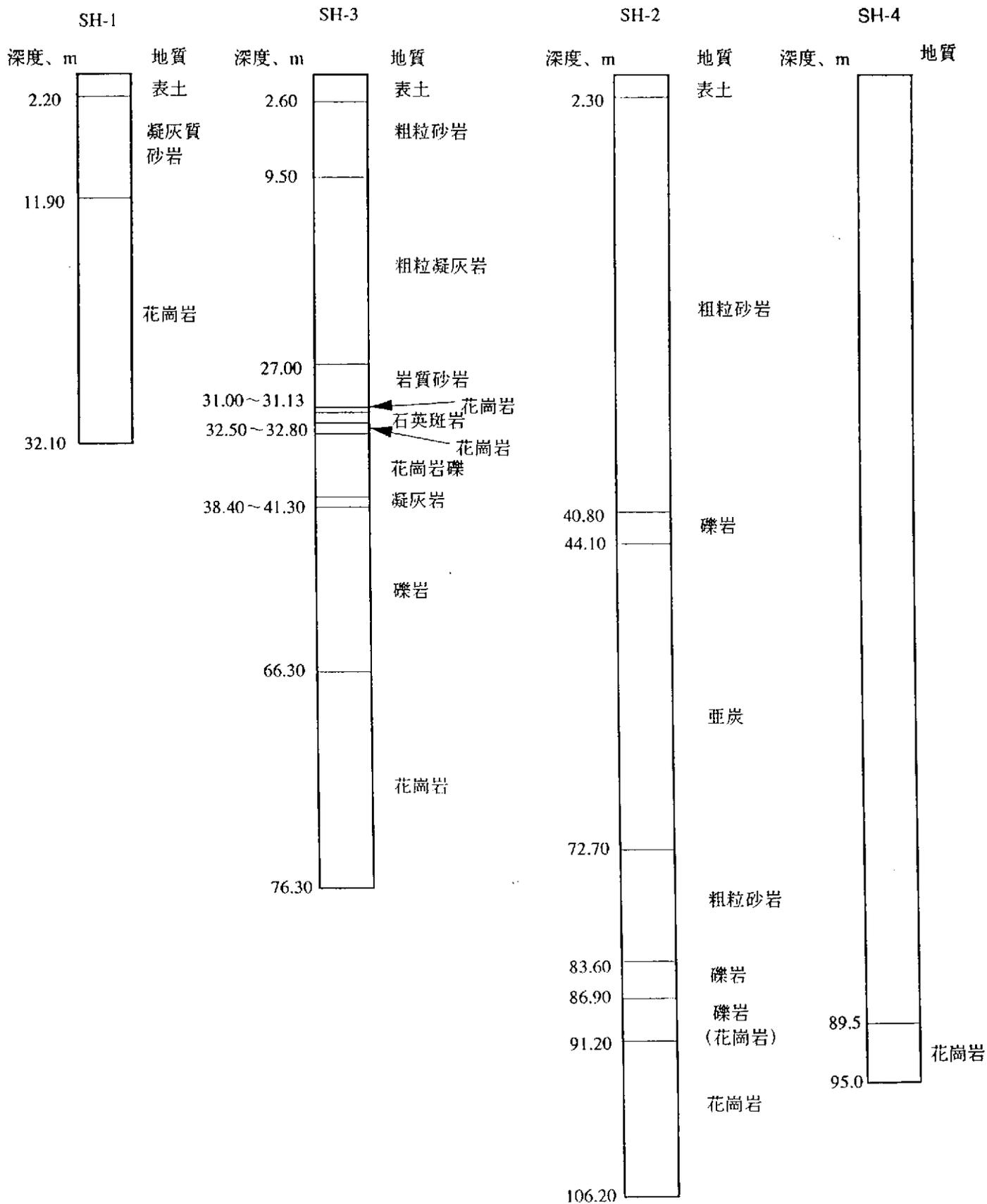


図-4-2-2 発震孔の地質柱状図

表-4-2-2 発震孔測量結果

試錐孔名	X座標(m)	Y座標(m)	比高差(m)	ケーシング高(m)	正距離(m)	斜距離(m)
AN-1	512.657	482.150	0.000	0.150	0.000	0.000
SH-1	380.528	531.046	-8.950	1.150	140.886	141.170
SH-2	723.493	460.675	17.110	0.710	211.927	212.616
SH-3	614.956	583.250	-1.120	0.840	143.827	143.832
SH-4	823.483	506.809	7.360	0.000	311.803	311.889
AI-7	806.590	517.936	7.190	0.000	296.103	296.191
AI-8	791.168	515.200	6.870	0.000	280.465	280.549

注1) 座標原点は任意の点を(500.00,500.00)とした。

注2) 比高差はAN-1と各孔井との基準面(GL)差。

表-4-2-3 データ収録条件

A/D変換精度	24ビット
サンプリングレート	0.25 ms
データ長	1024 ms
アンプゲイン	48 dB
プリトリガー	512 サンプル
ローカットフィルター	3 Hz
入力	ハイドロフォン：10CH トリガー信号：AUXチャンネル アップホール地震計：AUXチャンネル

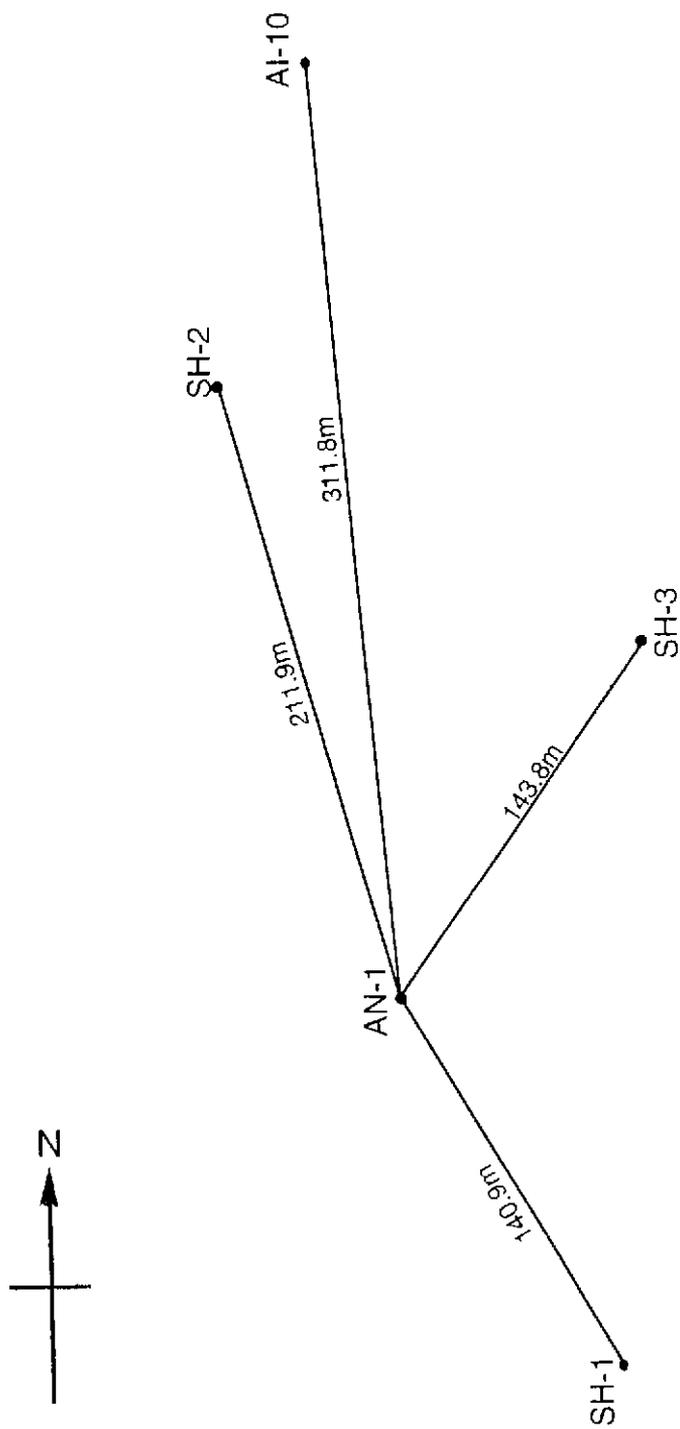


图-4-2-3 坑井位置图



図-4-2-4 発震作業



図-4-2-4 発震作業

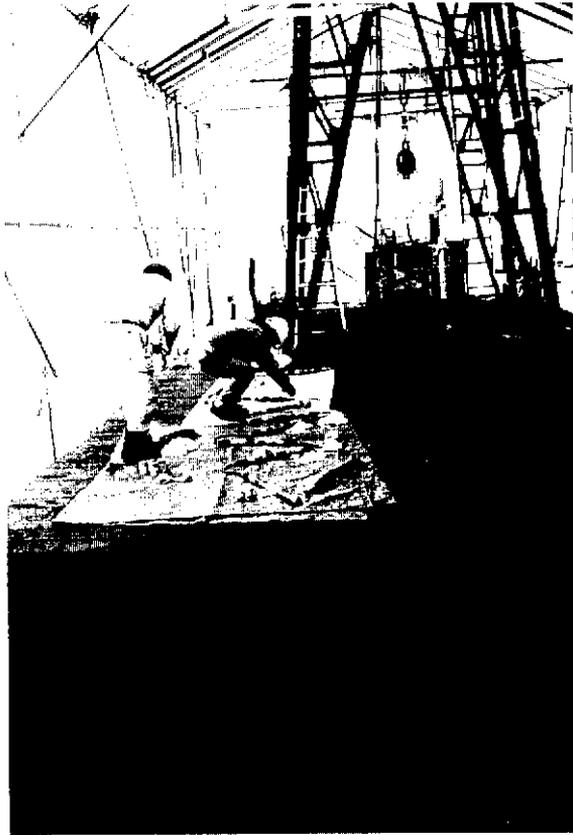


図-4-2-5 ハイドロフォン



図-4-2-6 テンションメーター



図-4-2-7 ハイドロフォン用ウインチ



図-4-2-8 OYO GEOSPACE社製DAS-1 (データ収録装置)

表-4-2-4 使用機器

	型式	数量	仕様
アップホール地震計			
地震計	マークロダック L-22	4	固有周波数：2 Hz
プリアンプ	自作	4	
ハイドロフォン			
ハイドロフォン	マークロダック P-27-12C	12	出力：25 Microvolts/Micobar 周波数範囲：3-1000 Hz 外径：5.08 cm 最高使用深度：600 m プリアンプ内蔵
ハイドロフォンケーブル	マークロダック社製		抵抗：47 Ohms/1000Ft(305 m) 長さ：1,000 m
インターコネクトケーブル		15	
ウインチ	開発工業(株)製		ケーブル 1,000 m 電動 3相200V
深度パネル	(株)物理計測コンサルタント製		
シーブ			
エンコーダ			
テンションメータ			
収録装置	OYO GEOSPACE DAS-1	1	入力チャンネル数：24 A/D変換精度：24ビット Ethernet I/Fカード内蔵
フィールド解析装置			
本体	SPARC LT	1	
HD	(株)ニューテック NTVS2.0L-D	1	容量：2 GB
Cartridge Drive		1	
SPARCPrinter		1	

ハイドロフォンVSP データ収録

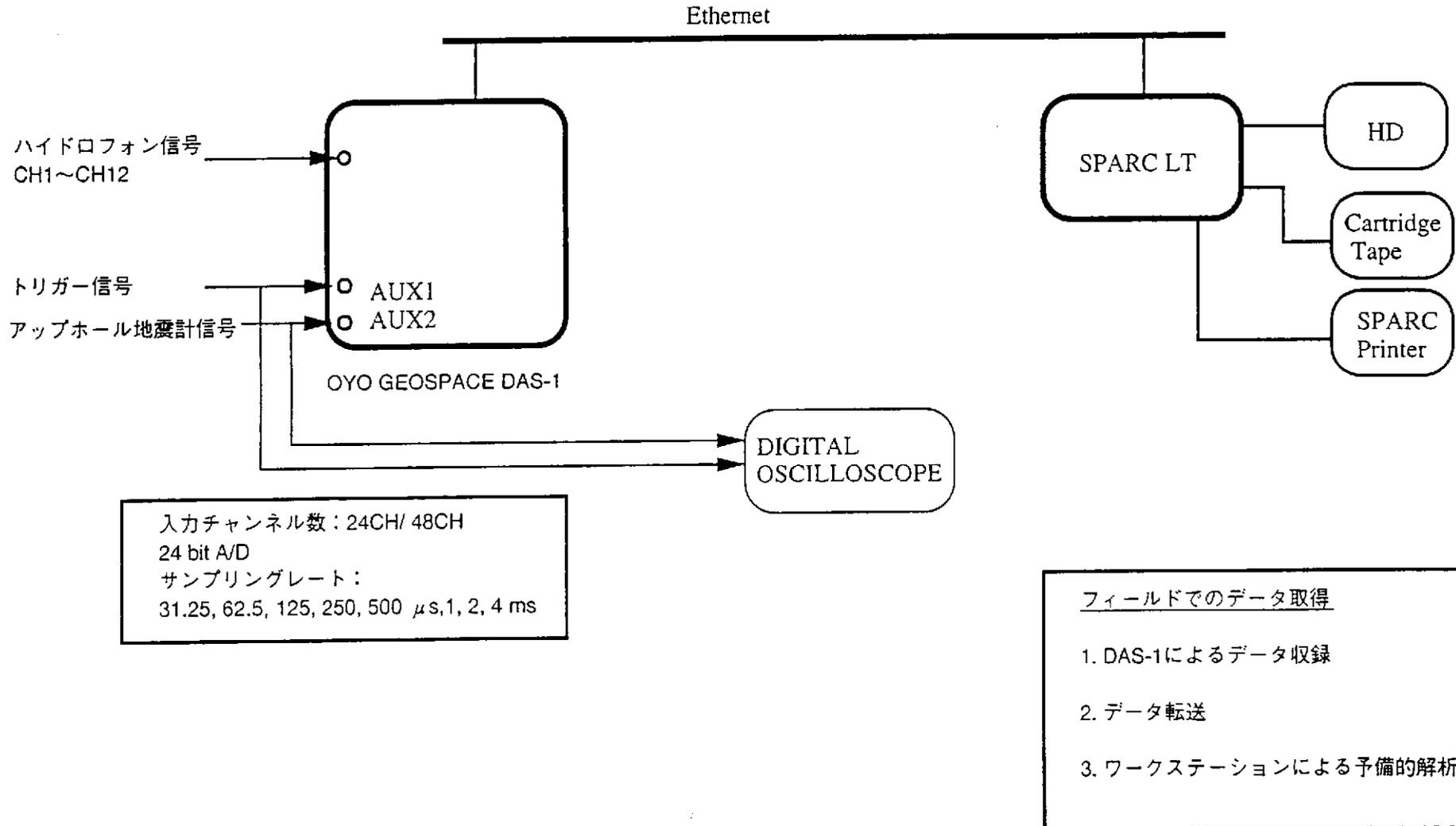


図-4-2-9 データ収録の概要

表-4-2-5 測定実績

実施日	ハットロマン深度、m	SH-1	SH-2	SH-3	SH-4	
11月30日	90.0~99.0	26 m, 25 g	90 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	80.0~89.0	26 m, 25 g	90 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	70.0~79.0	26 m, 25 g	90 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	60.0~69.0	26 m, 25 g	90 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	50.0~59.0	26 m, 25 g	60 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	40.0~49.0	26 m, 25 g	60 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	30.0~39.0	26 m, 25 g	60 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	20.0~29.0	26 m, 25 g	60 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	110.0~119.0	26 m, 25 g	60 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	120.0~129.0	26 m, 25 g	60 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	130.0~139.0	26 m, 25 g	58 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	140.0~149.0	26 m, 25 g	58 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
	12月1日	140.0~149.0			74 m, 25 g	
150.0~159.0		26 m, 25 g	58 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
160.0~169.0		26 m, 25 g	56 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
170.0~179.0		26 m, 25 g		74 m, 25 g	93 m, 25 g	
180.0~189.0		26 m, 25 g		74 m, 25 g	93 m, 25 g	
190.0~199.0		26 m, 25 g		74 m, 25 g	93 m, 25 g	
200.0~209.0		26 m, 25 g	50.5 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
210.0~219.0		26 m, 25 g	50.5 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
220.0~229.0		26 m, 25 g	21 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
230.0~239.0		26 m, 25 g	21 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
240.0~249.0		26 m, 25 g	21 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
250.0~259.0		26 m, 25 g	21 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
260.0~269.0		26 m, 25 g	21 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
270.0~279.0		26 m, 25 g	21 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
280.0~289.0		26 m, 25 g	18 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
290.0~299.0		26 m, 25 g	17 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
300.0~309.0		26 m, 25 g	17 m, 25 g	74 m, 25 g	93 m, 25 g	
12月2日		170.0~179.0		15.7 m, 100 g		
		180.0~189.0		15.7 m, 100 g		
		190.0~199.0		15.7 m, 100 g		
	310.0~319.0	26 m, 25 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
		26 m, 50 g				
	320.0~329.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
	330.0~339.0		15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
	300.0~309.0		15.7 m, 100 g			
	290.0~299.0		15.7 m, 100 g			
	280.0~289.0		15.7 m, 100 g			
	330.0~339.0	26 m, 50 g				
	340.0~349.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
	350.0~359.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
	360.0~369.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	75 m, 25 g	
					93 m, 50 g	
	370.0~379.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
	380.0~389.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g	
390.0~399.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g		
400.0~409.0	26 m, 50 g	15.7 m, 100 g	74 m, 50 g	93 m, 25 g		
12月3日	210.0~219.0		15.7 m, 100 g			
	200.0~209.0		15.7 m, 100 g			
	160.0~169.0		15.7 m, 100 g			
	150.0~159.0		6.5 m, 100 g			
	150.0~159.0		6.5 m, 50 g			
	140.0~149.0		6.5 m, 50 g			
	160.0~169.0		6.5 m, 50 g			

SH-1

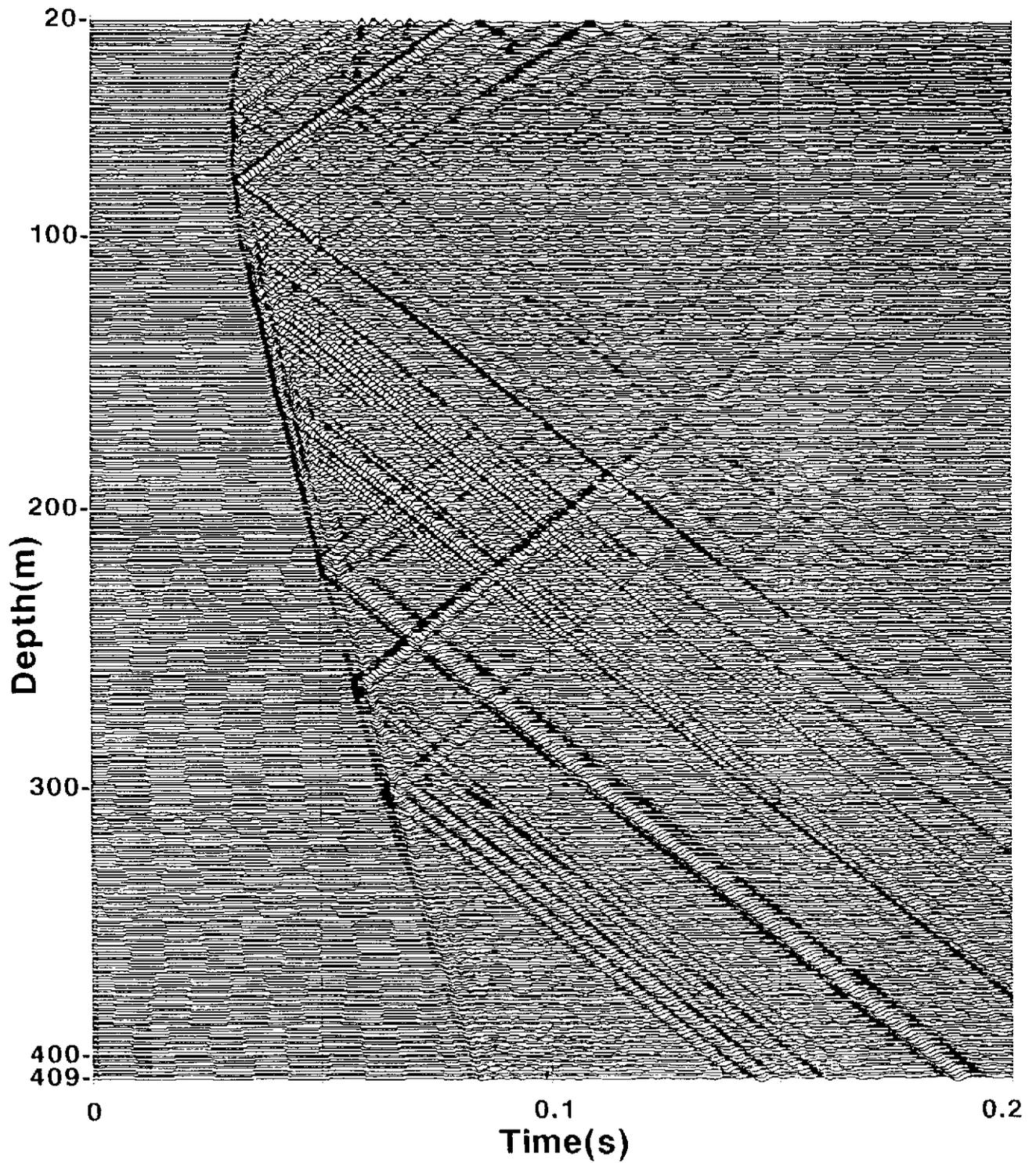


図-4-3-1 SH-1号孔発震のVSP記録（全深度）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-2

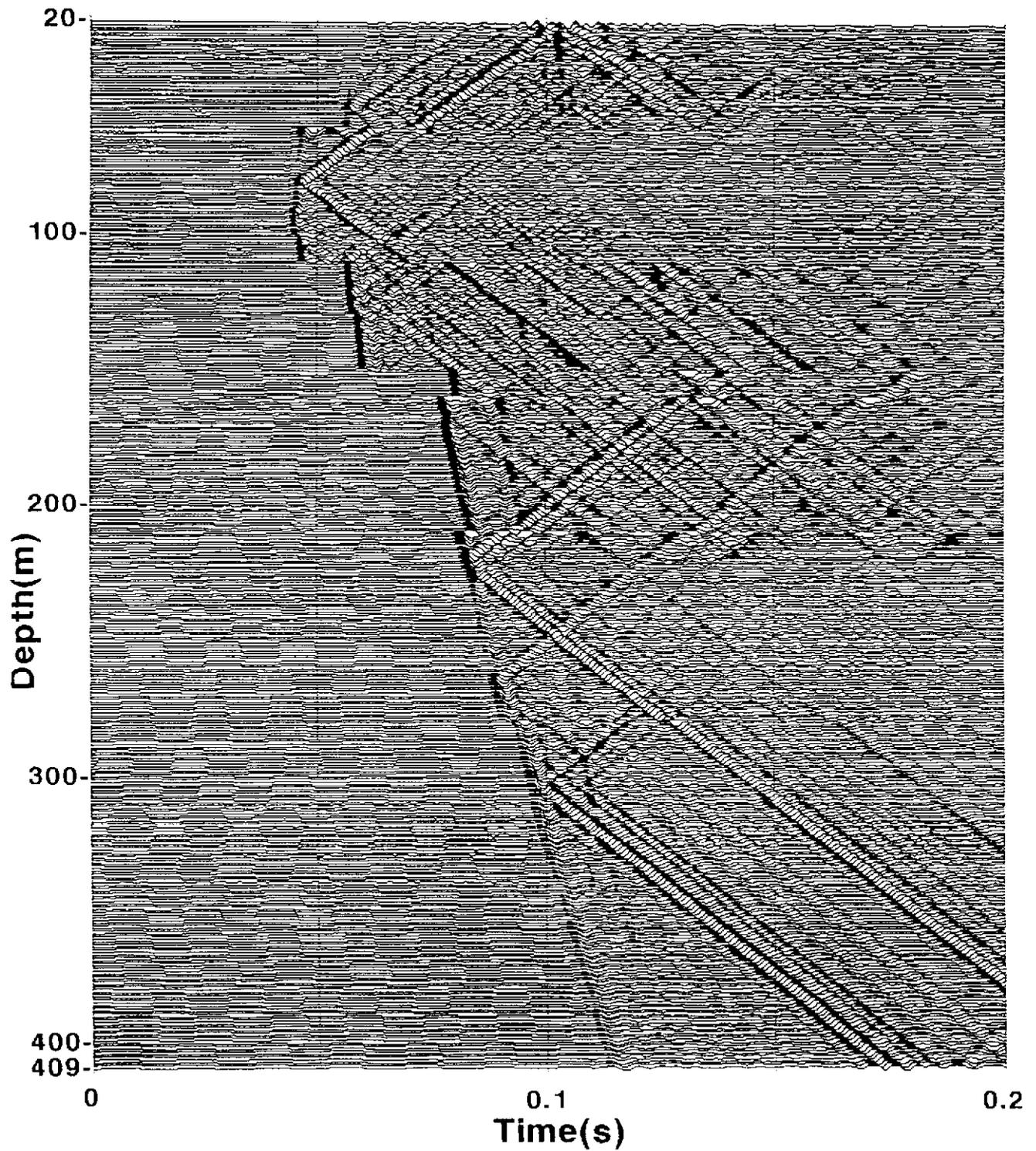


図-4-3-2 SH-2号孔発震のVSP記録（全深度）。発震深度が変化したために、走時がずれている。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-3

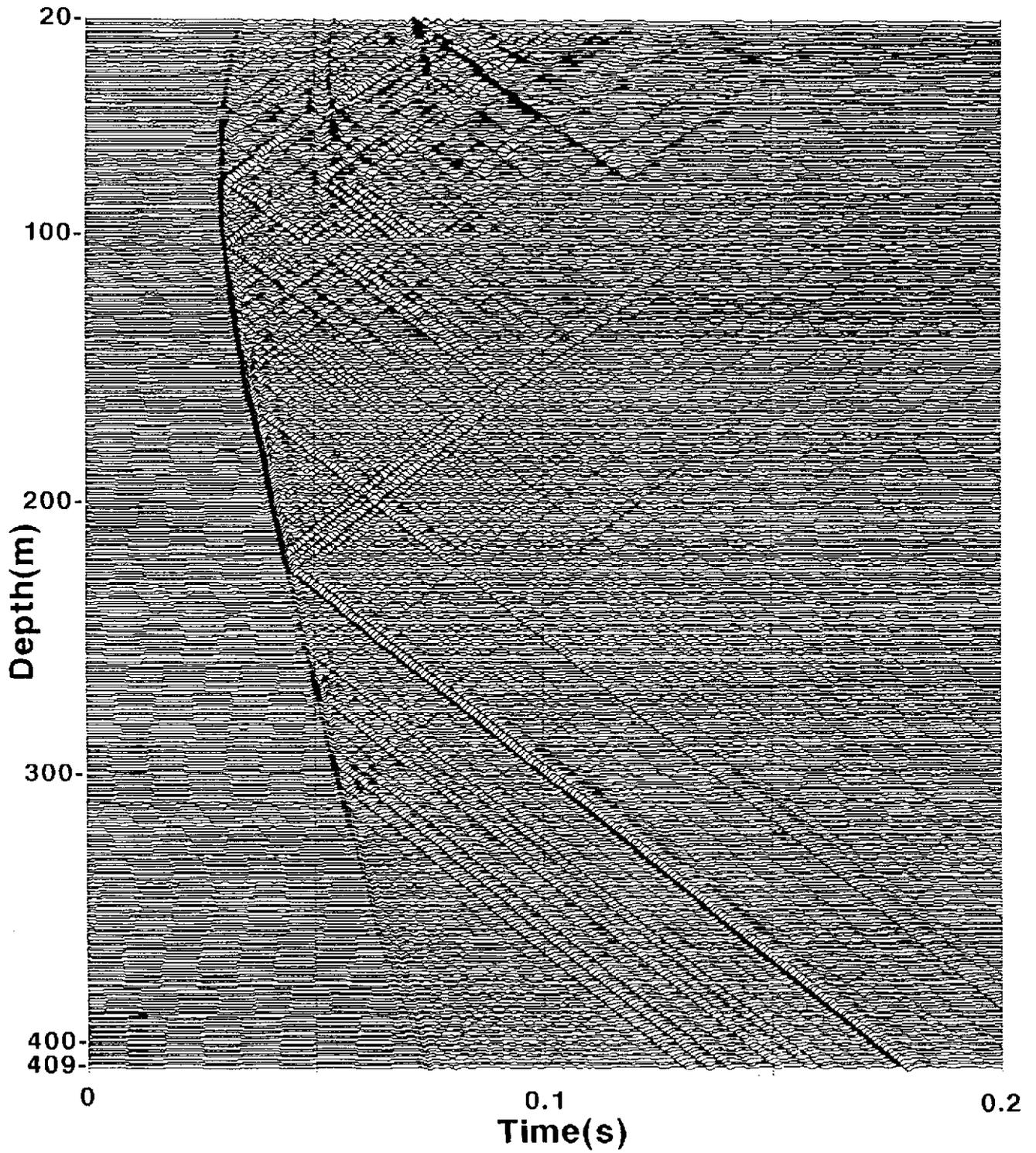


図-4-3-3 SH-3号孔発震のV S P記録（全深度）．各トレースごとに振幅を規格化しているため，図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-4

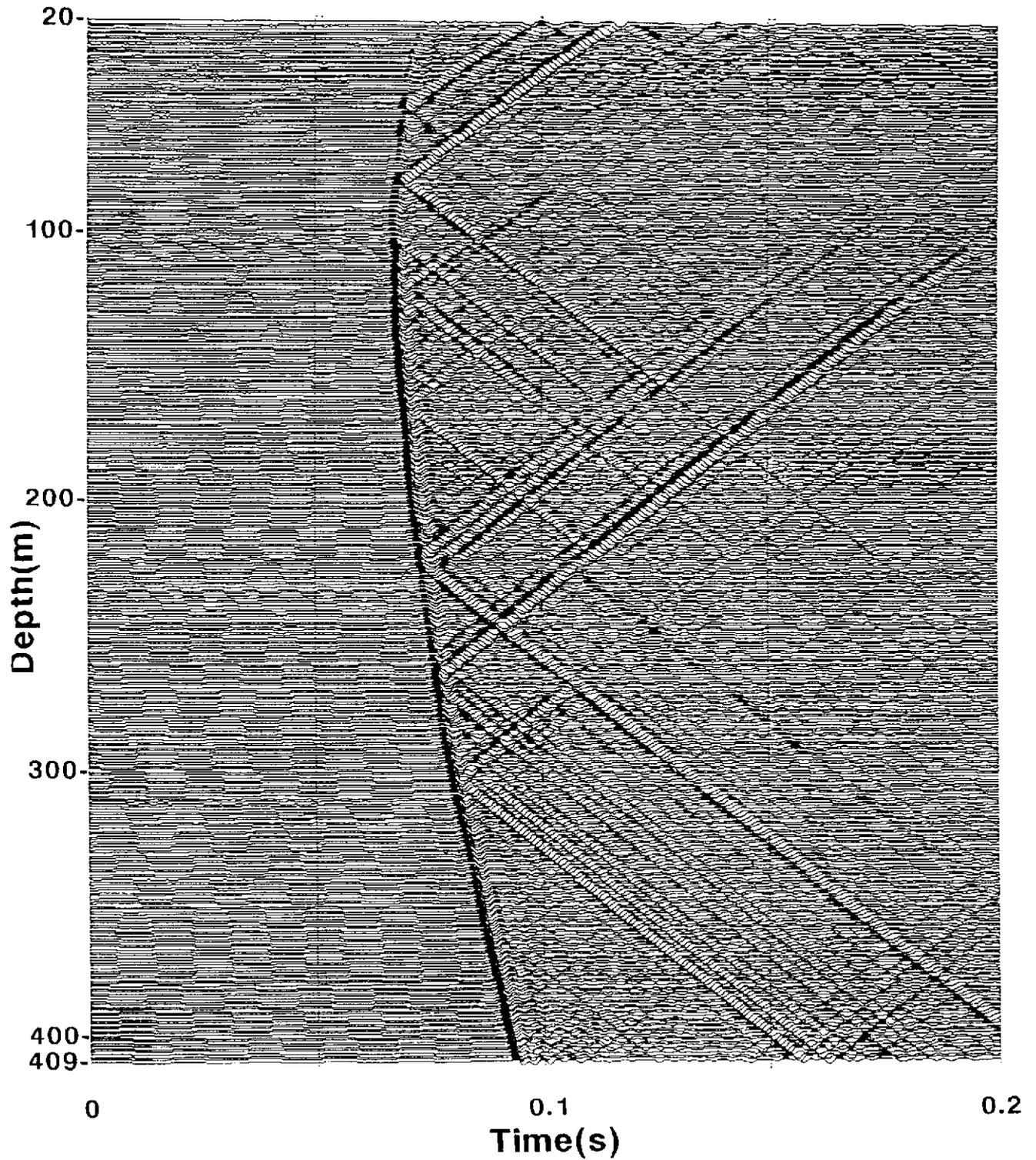


図-4-3-4 SH-4号孔発震のVSP記録（全深度）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない．

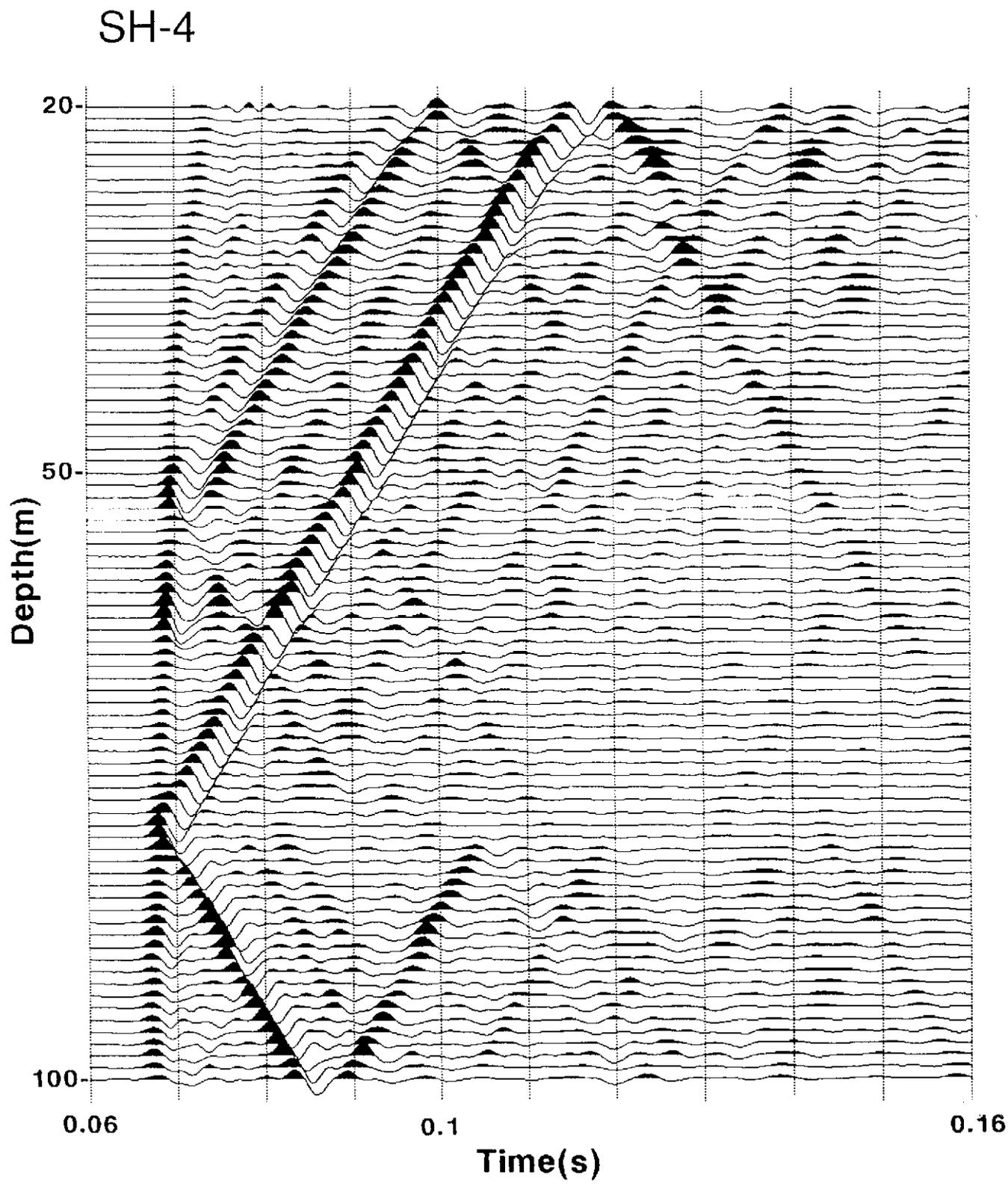


図-4-3-5 SH-4号孔発震のV S P記録（深度20～100m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-4

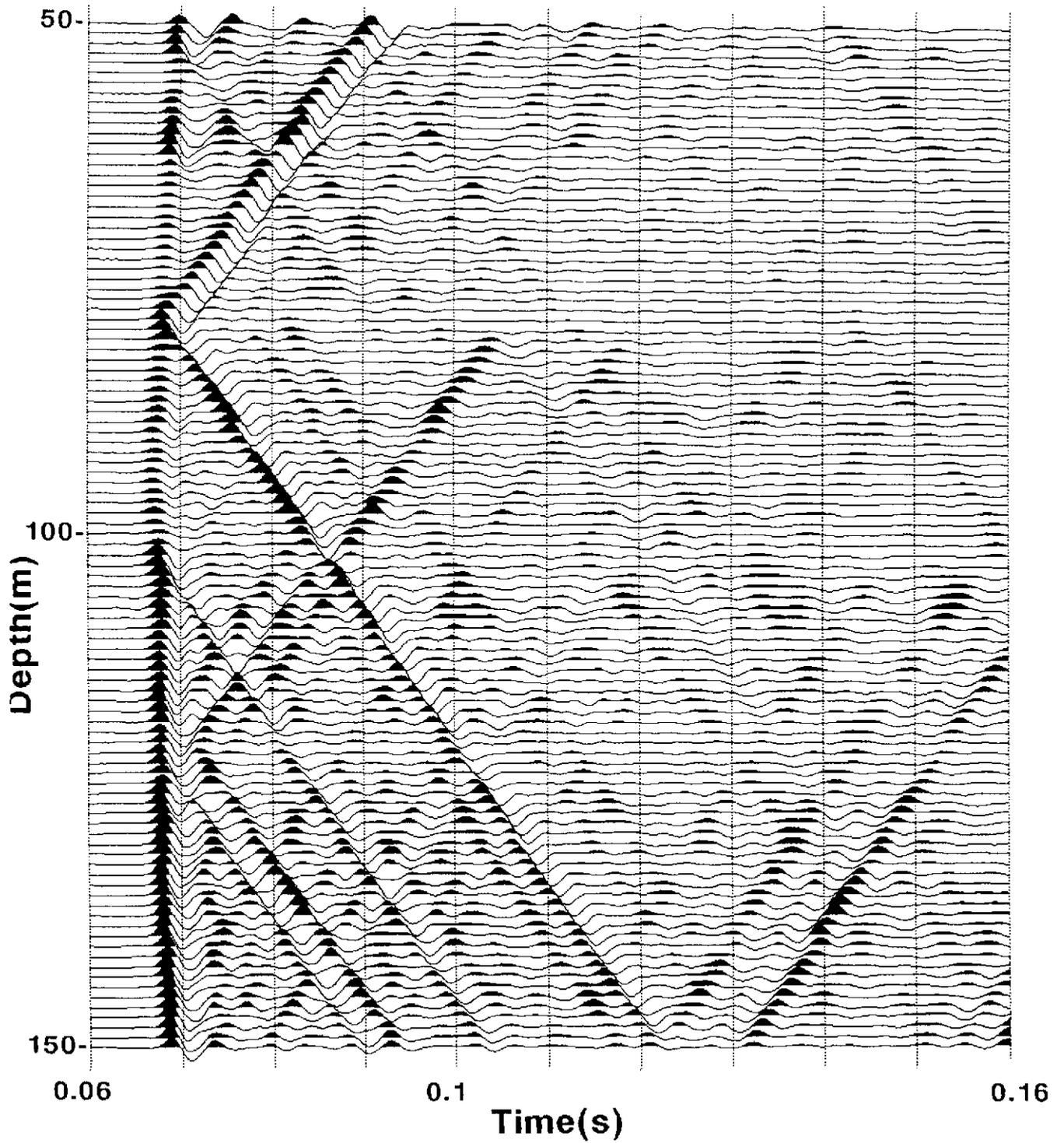


図-4-3-6 SH-4号孔発震のVSP記録（深度50～150m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため，図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-4

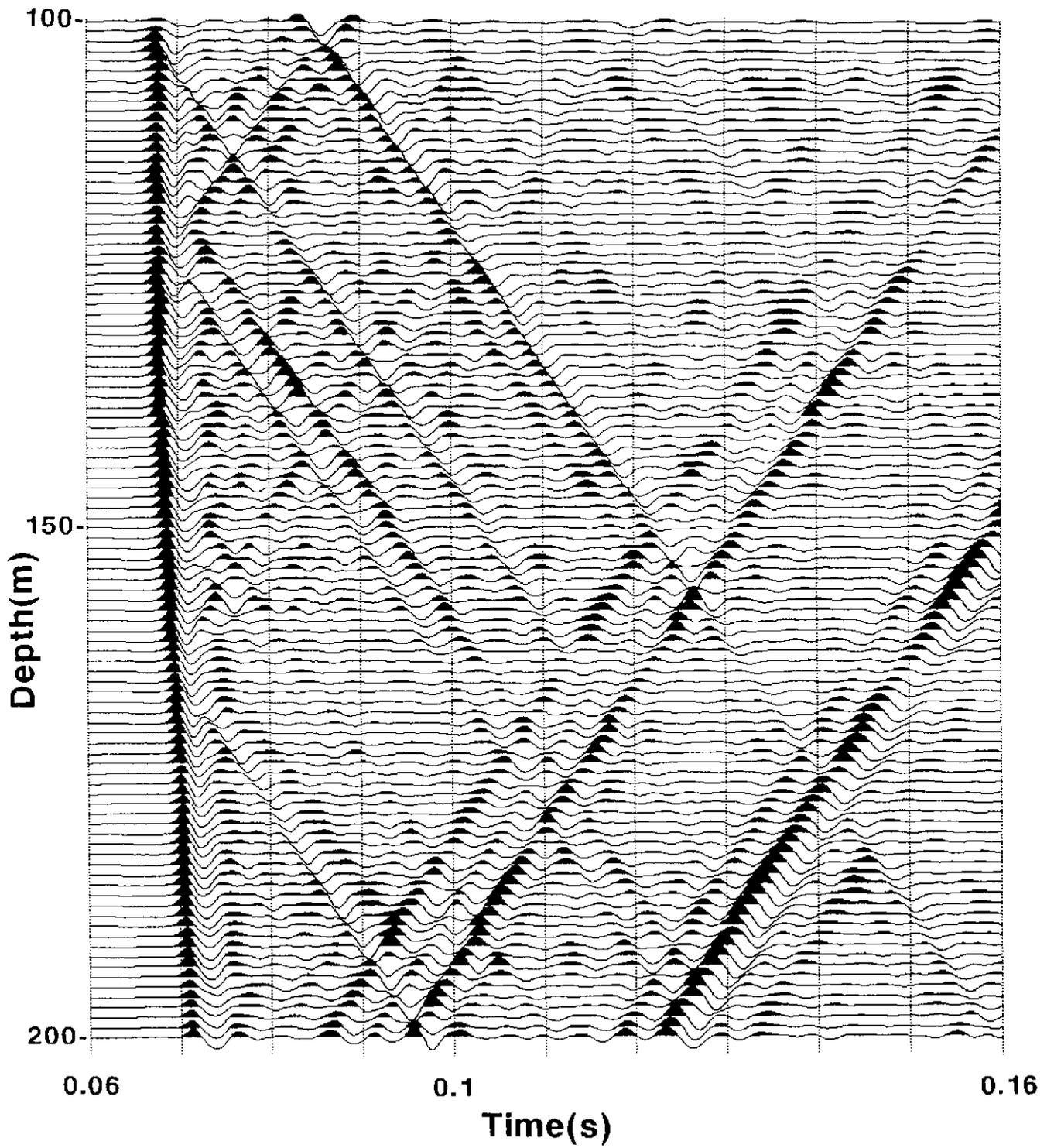


図-4-3-7 SH-4号孔発震のV S P記録（深度100～200m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-4

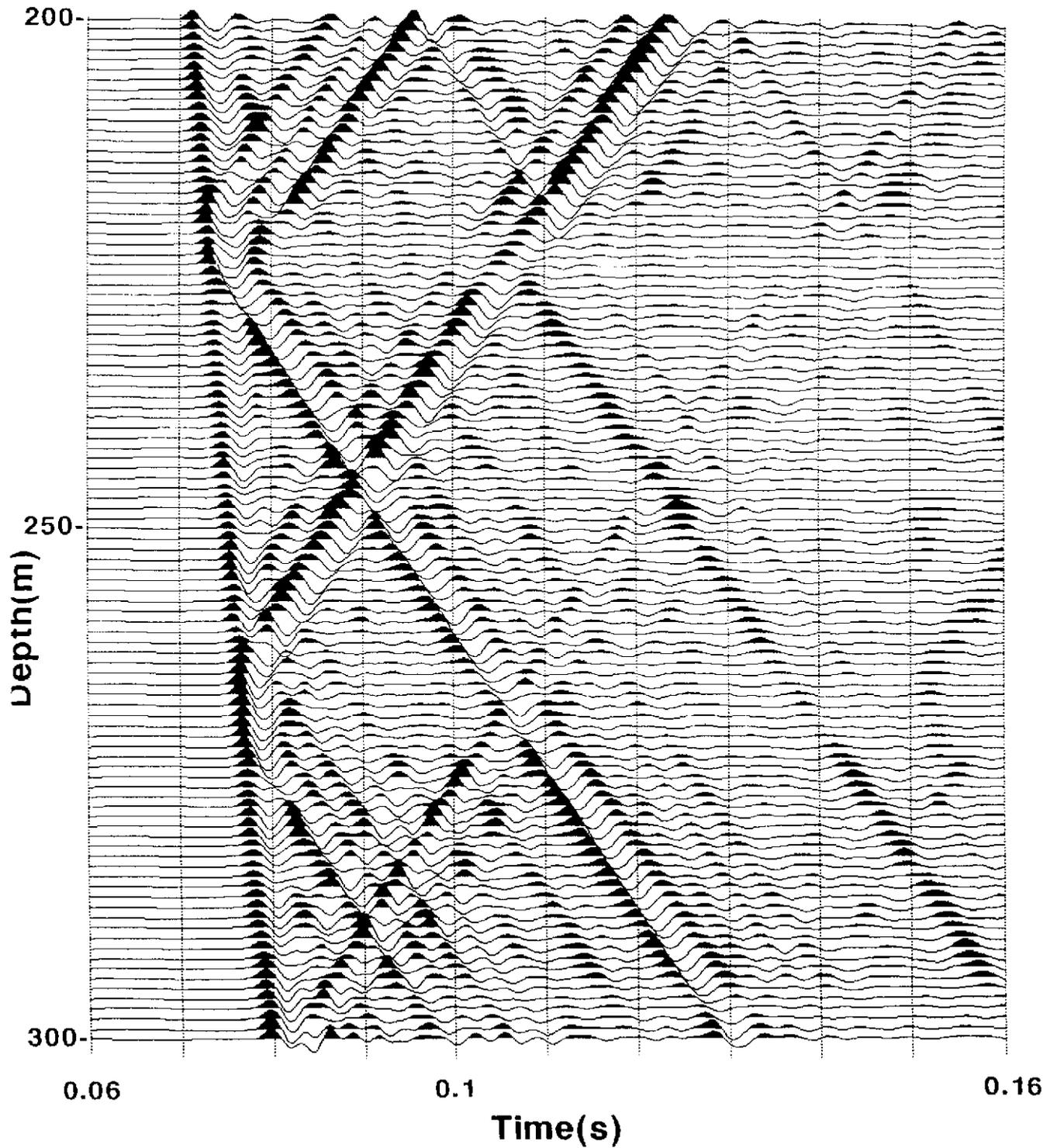


図-4-3-8 SH-4号孔発震のVSP記録（深度200～300m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-4

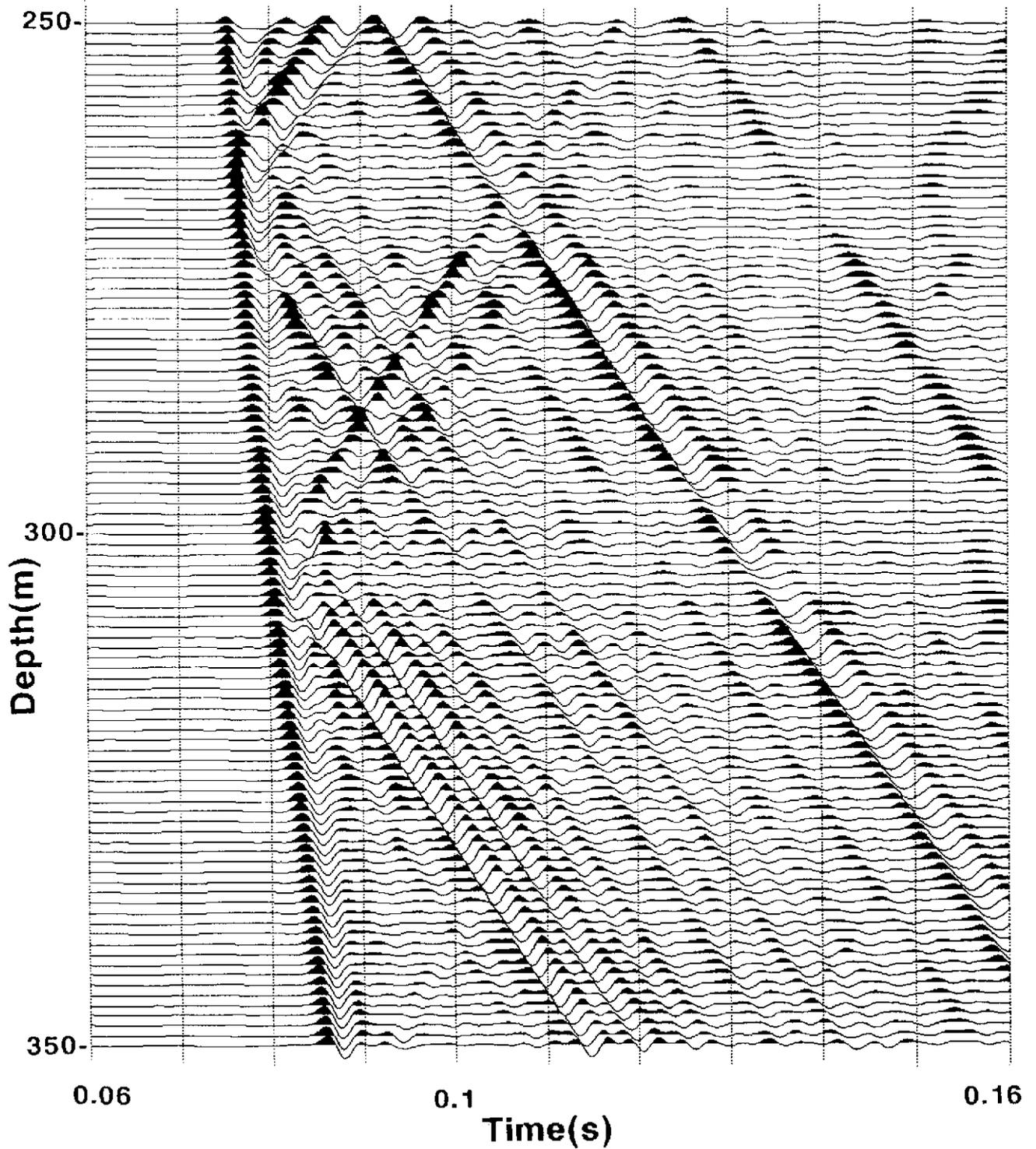


図-4.3-9 SH-4号孔発震のV S P記録（深度250～350m）、各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-4

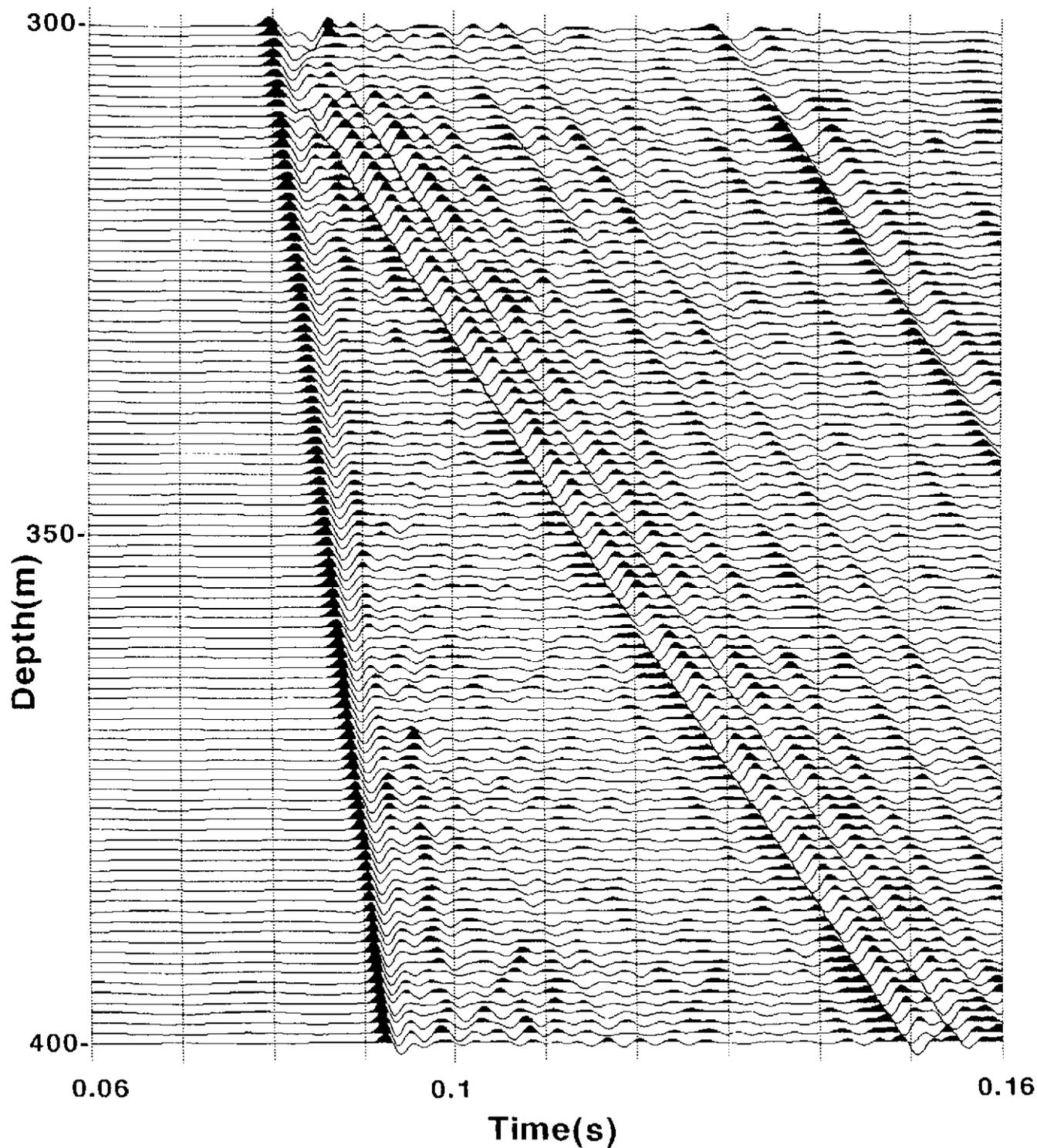


図-4-3-10 SH-4号孔発震のVSP記録（深度300～400m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-1

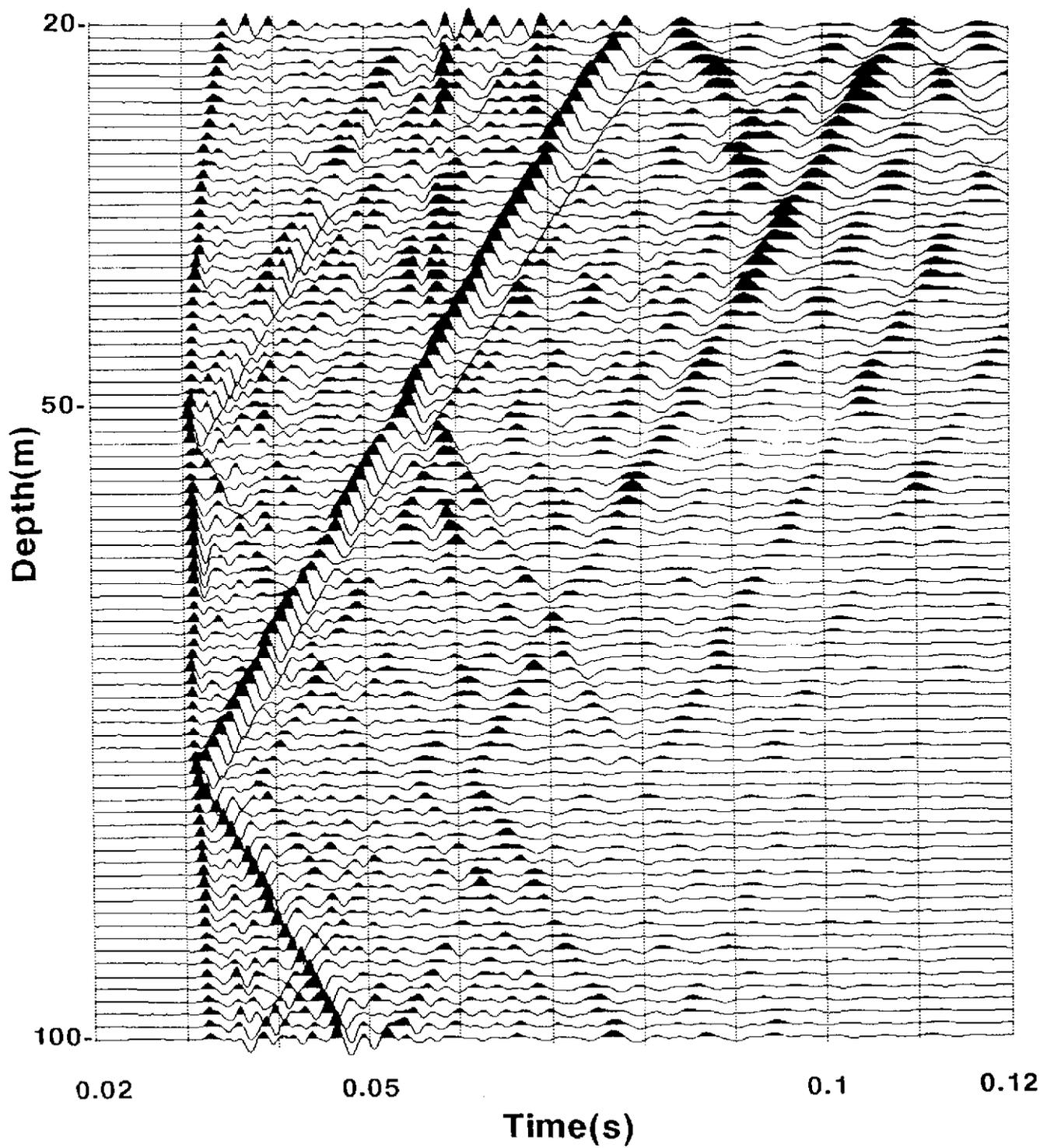


図-4-3-11 SH-1号孔発震のVSP記録（深度20～100m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-1

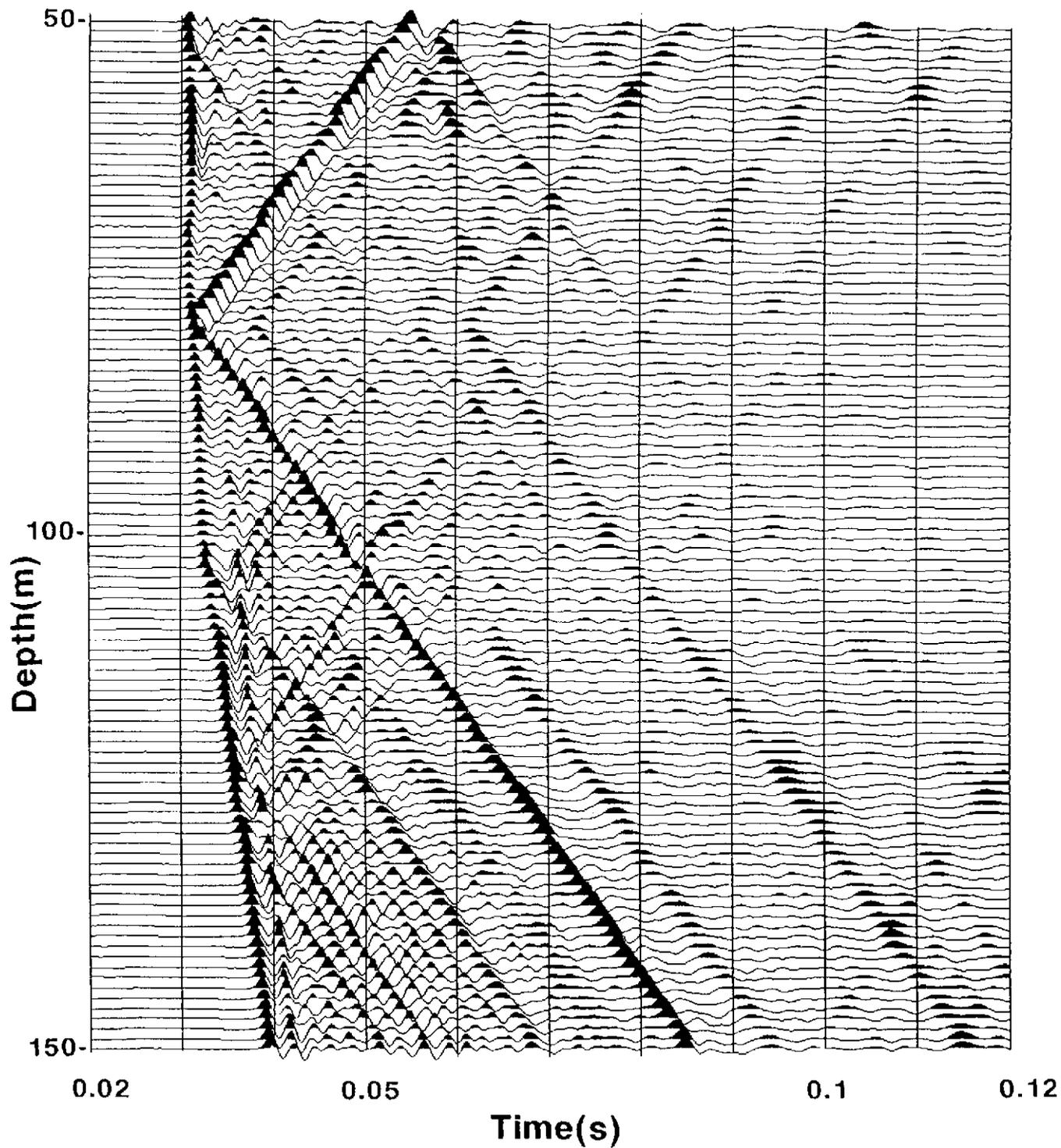


図-4-3-12 SH-1号孔発震のVSP記録（深度50～150m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-1

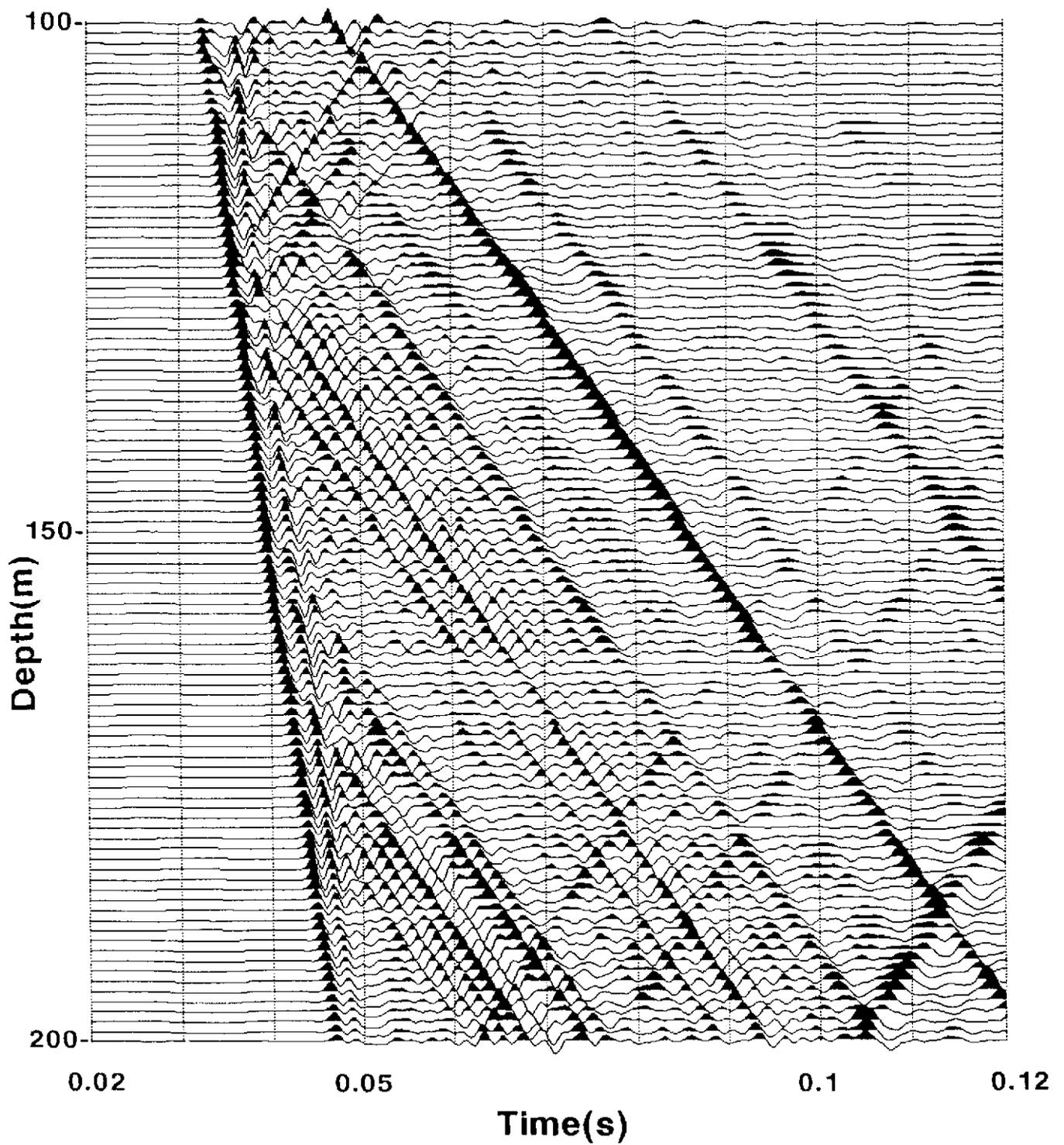


図-4-3-13 SH-1号孔発震のV S P記録（深度100～200m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため，図全体で相対振幅は保存されていない．

SH-1

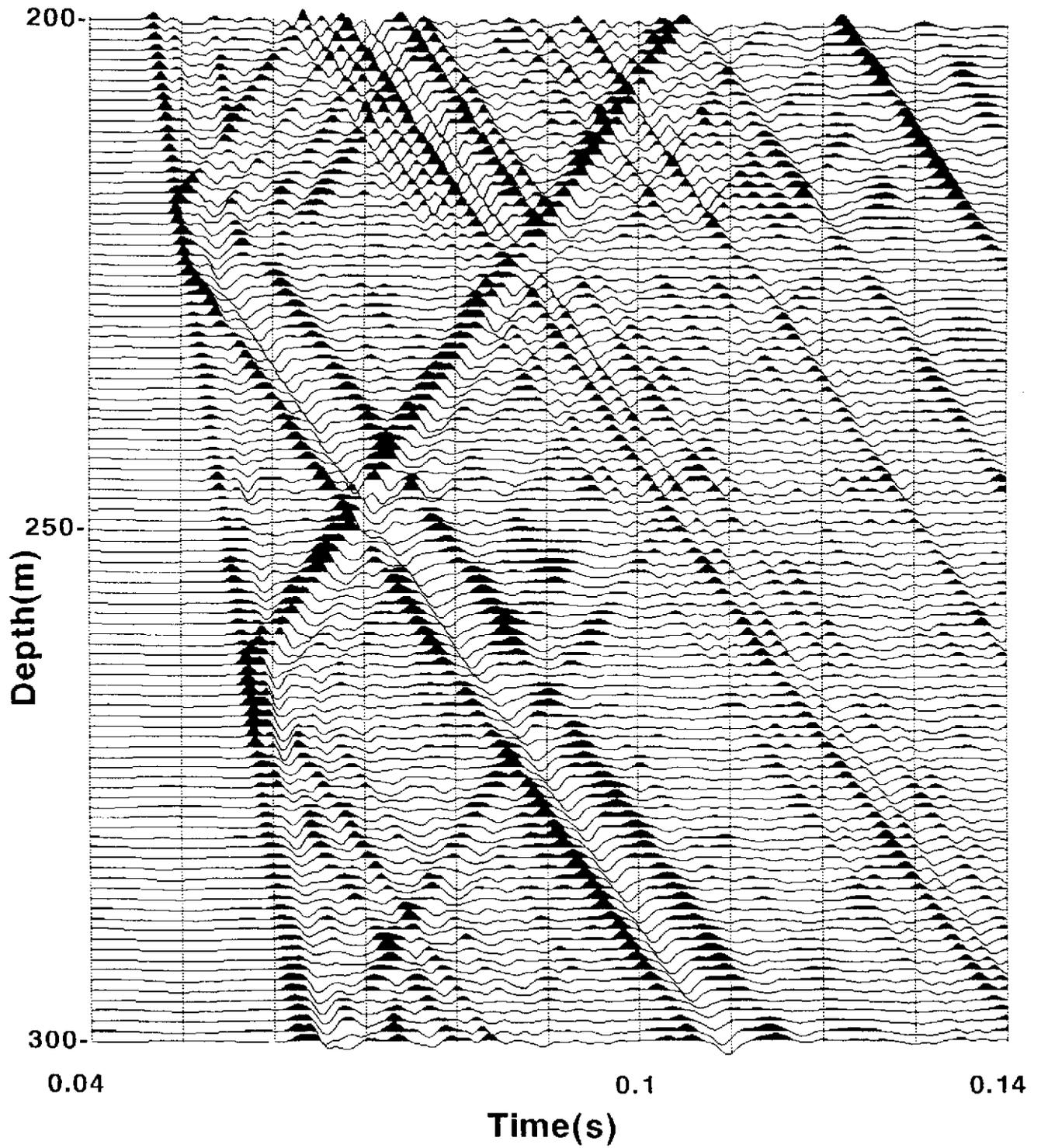


図-4-3-14 SH-1号孔発震のV S P記録（深度200～300m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-1

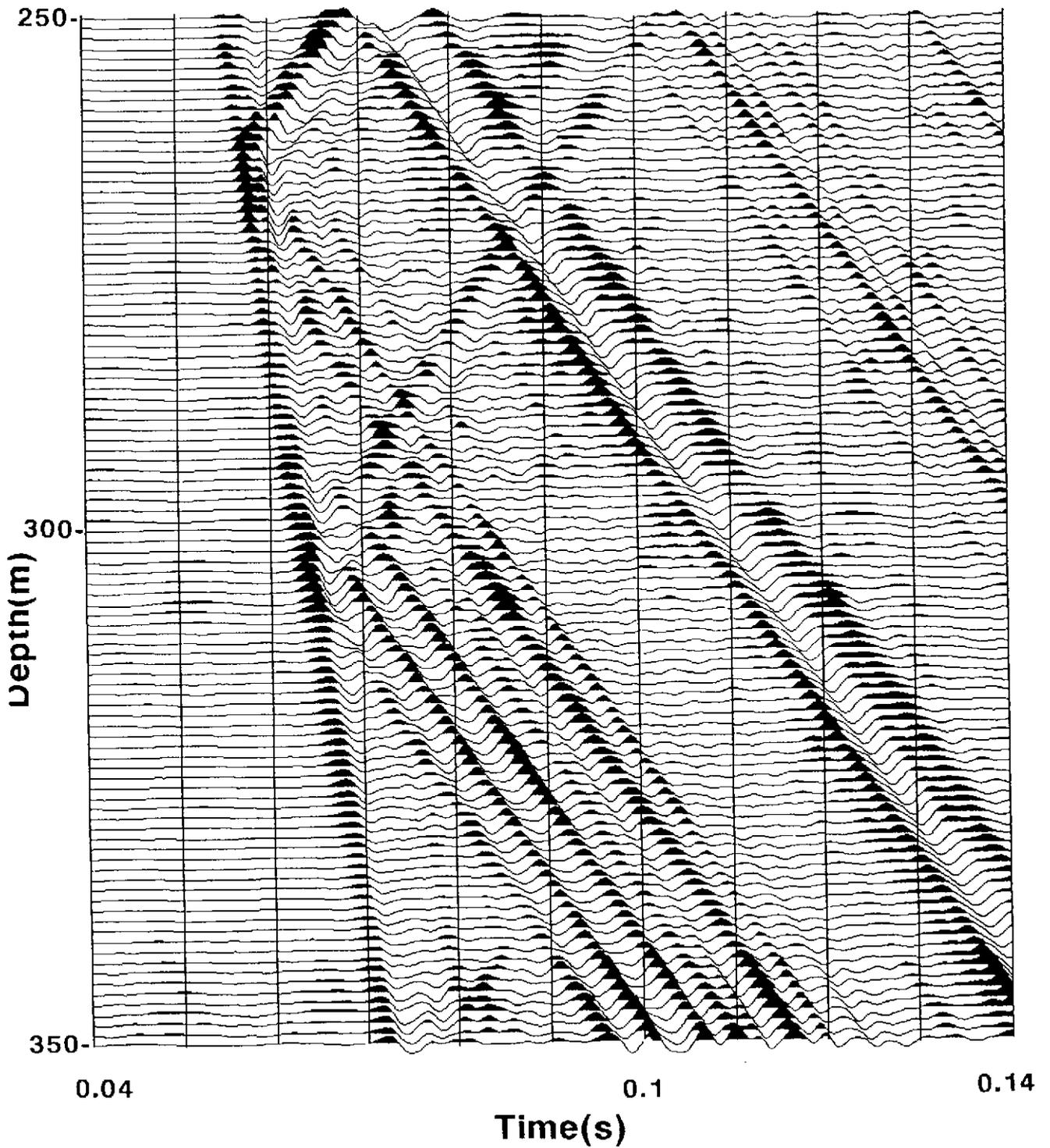


図-4-3-15 SH-1号孔発震のVSP記録（深度250～350m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-1

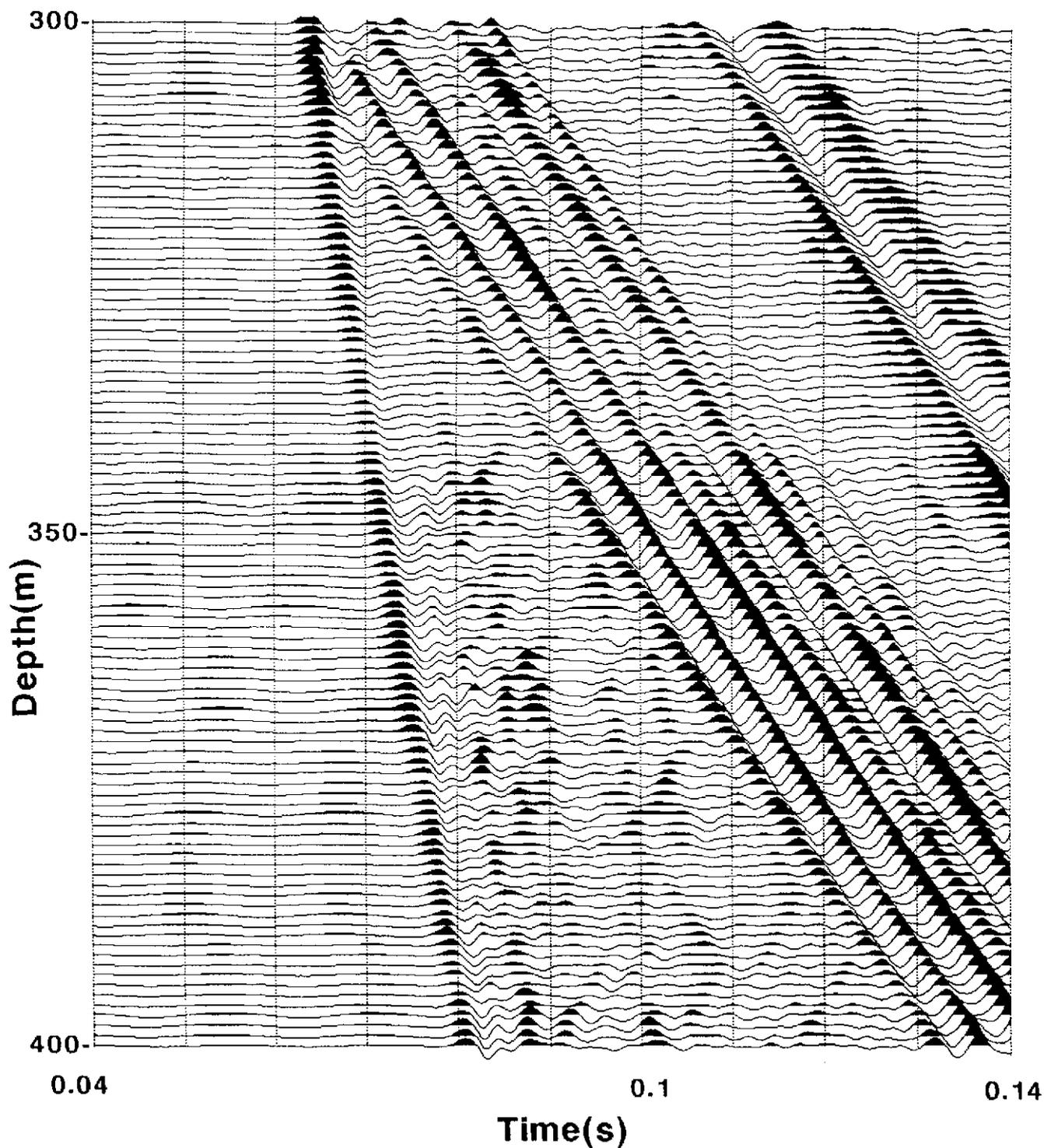


図-4-3-16 SH-1号孔発震のV S P記録（深度300～400m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

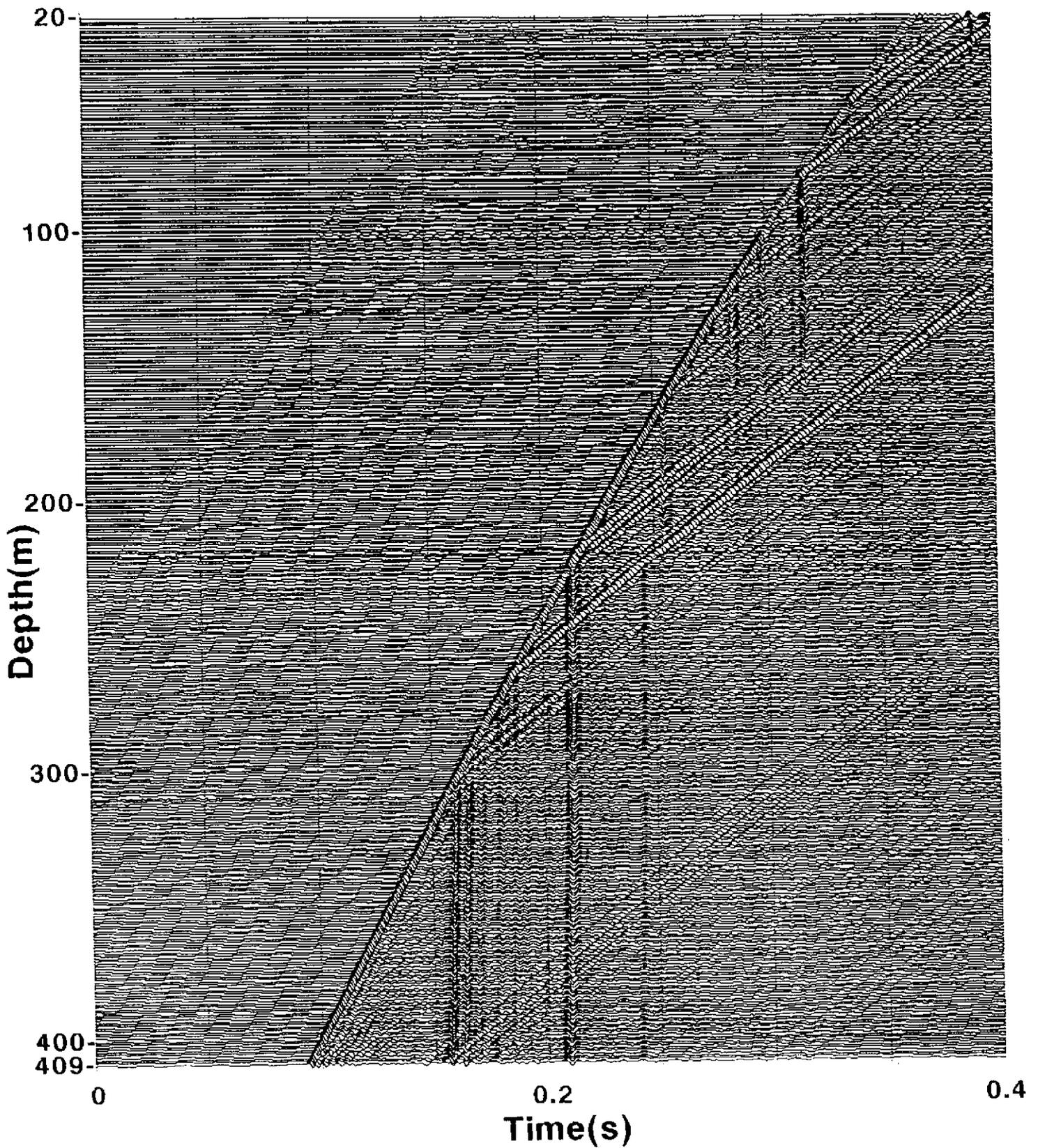


図-4-3-17 下方進行チューブ波の並列化. SH-4号孔発震のV S P記録から0.75ms / traceで各トレースを時間シフトする.

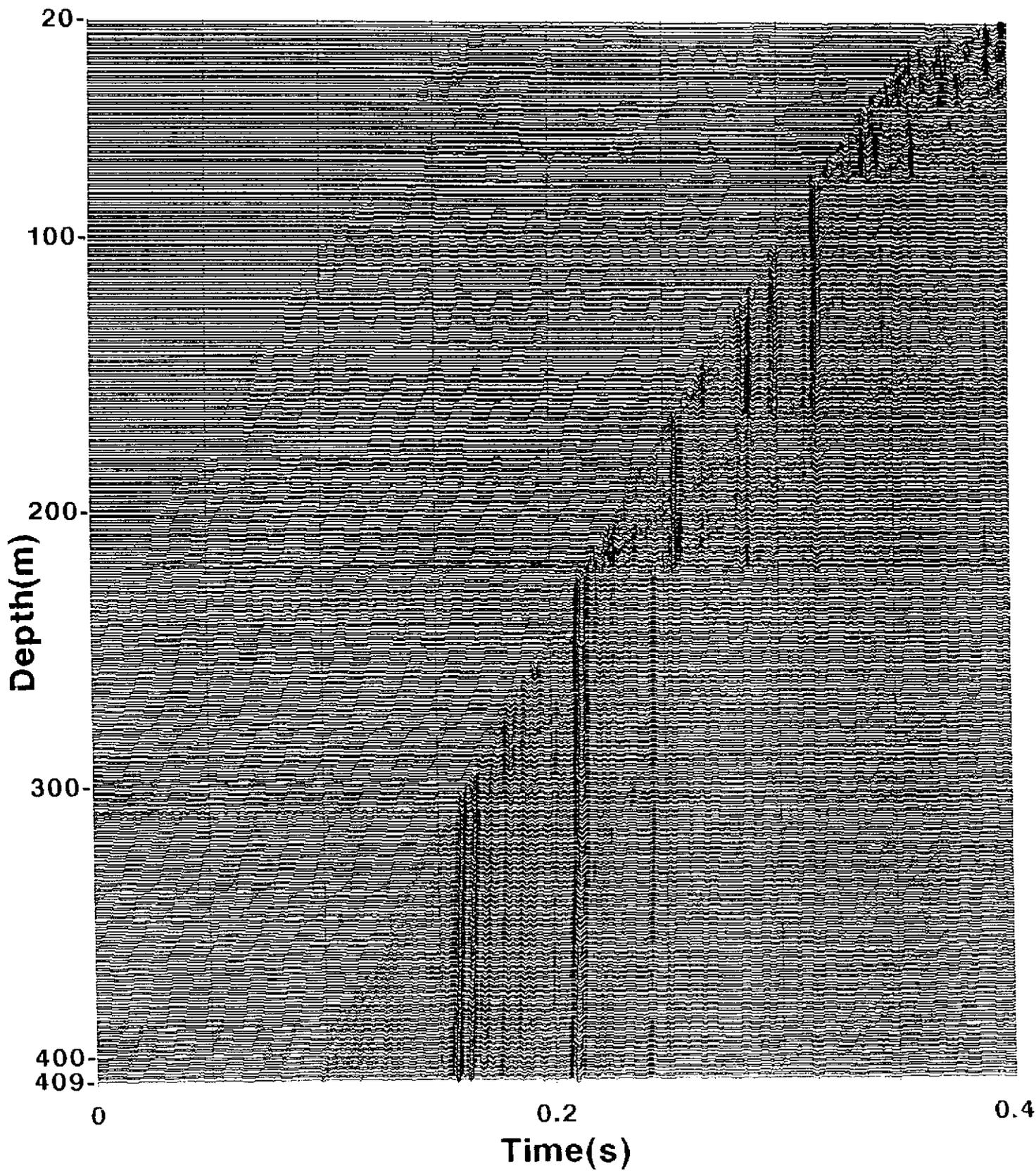


図-4-3-18 下方進行チューブ波の強調. 図-4-3-17にメディアンフィルター処理を行う.

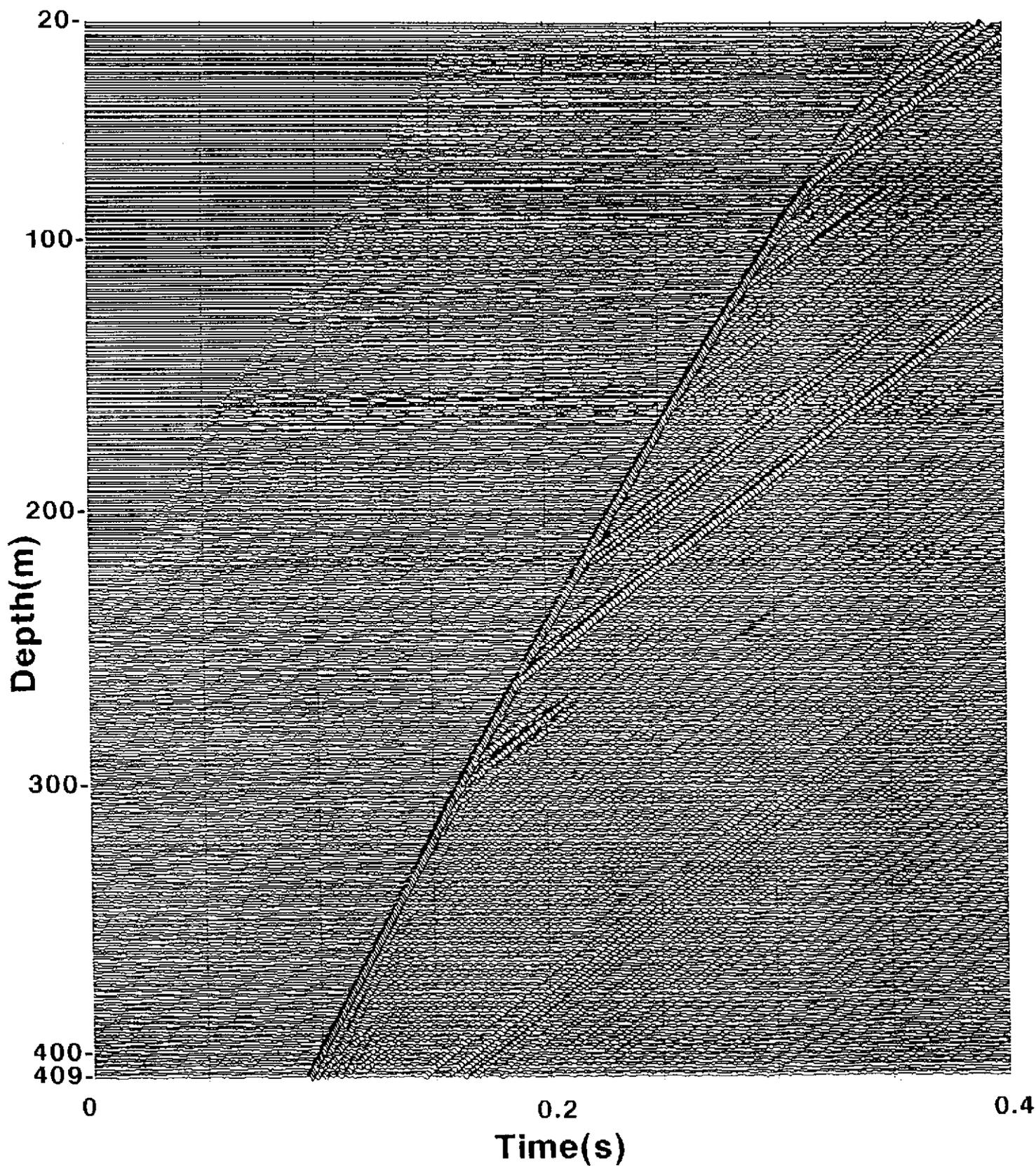


図-4-3-19 下方進行チューブ波の除去. 図-4-3-17から図-4-3-18を減算する.

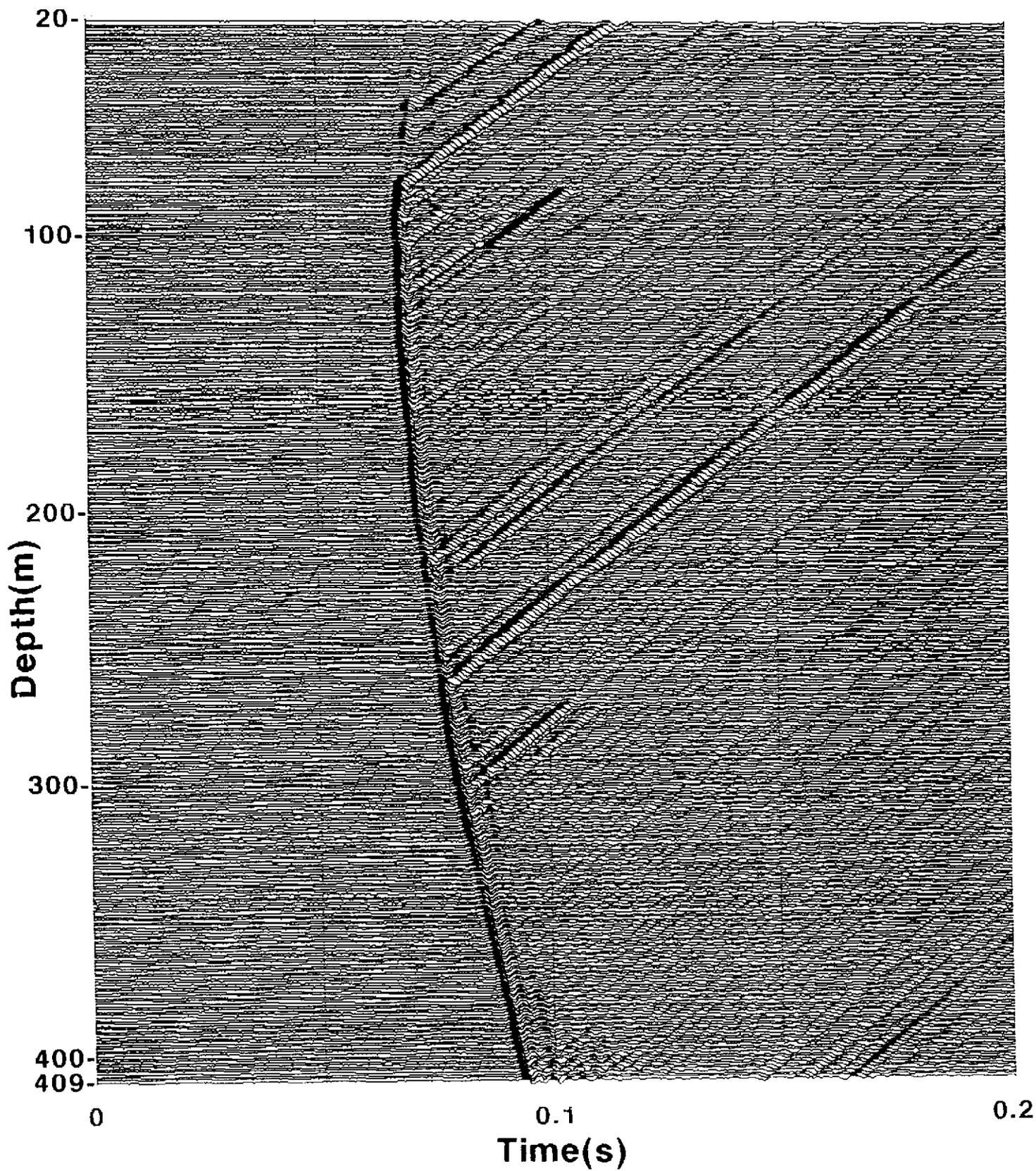


図-4-3-20 下方進行チューブ波が除去されたVSP記録. 図-4-3-19を時間シフトする.

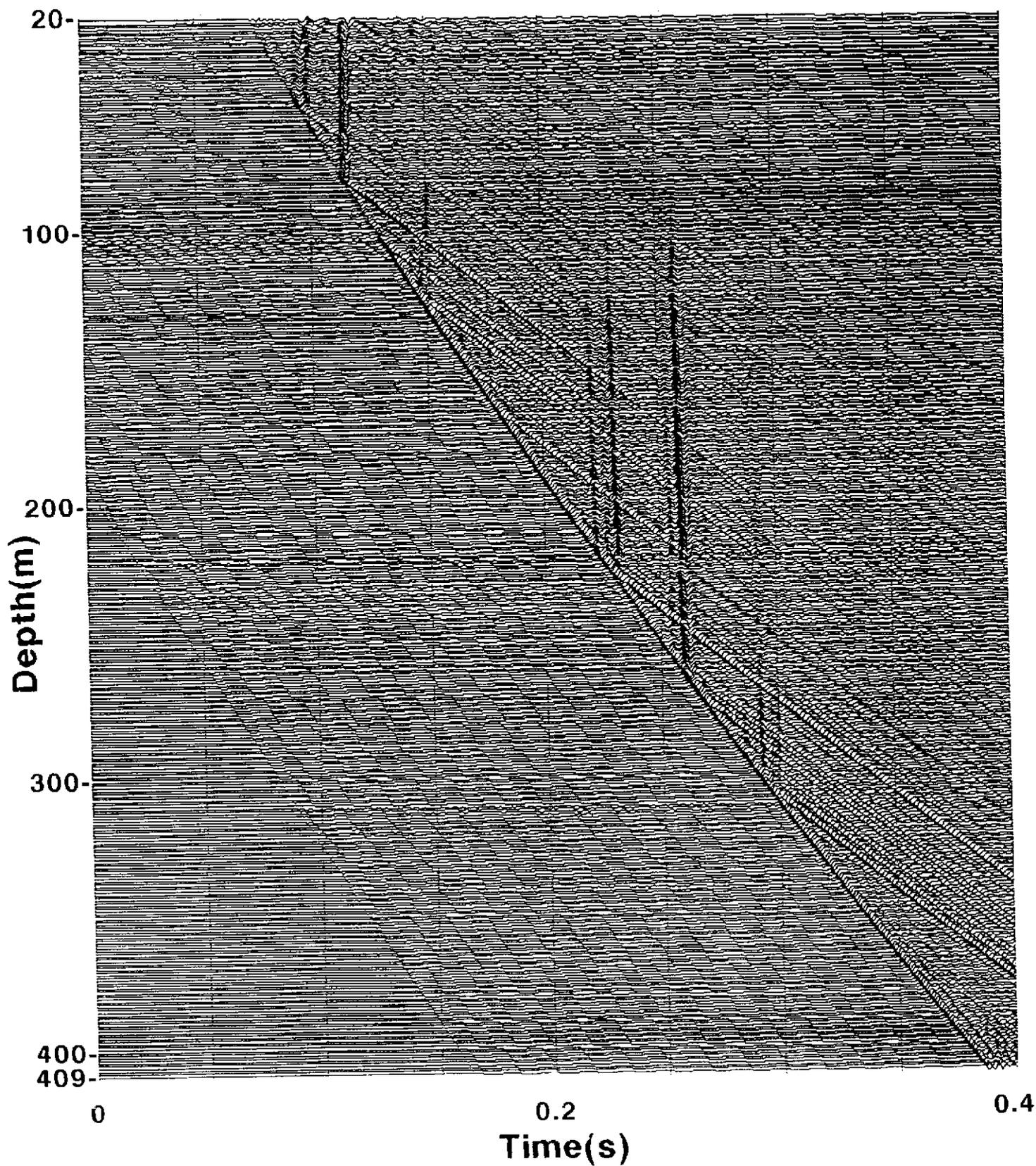


図-4-3-21 上方進行チューブ波の並列化. SH-4号孔発震のV S P記録から -0.75ms / traceで各トレースを時間シフトする.

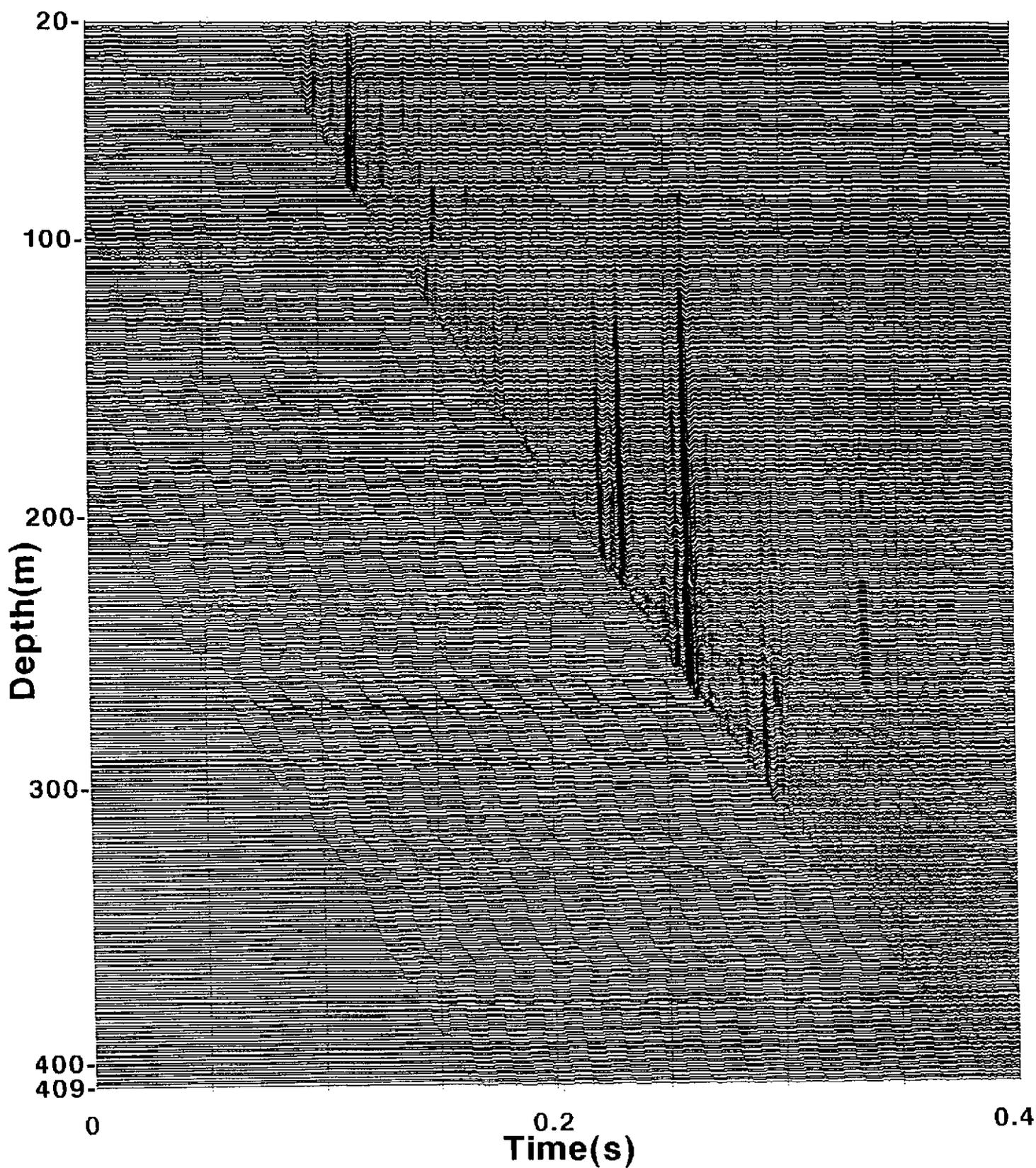


図-4-3-22 上方進行チューブ波の強調. 図-4-3-21にメディアンフィルター処理を行う.

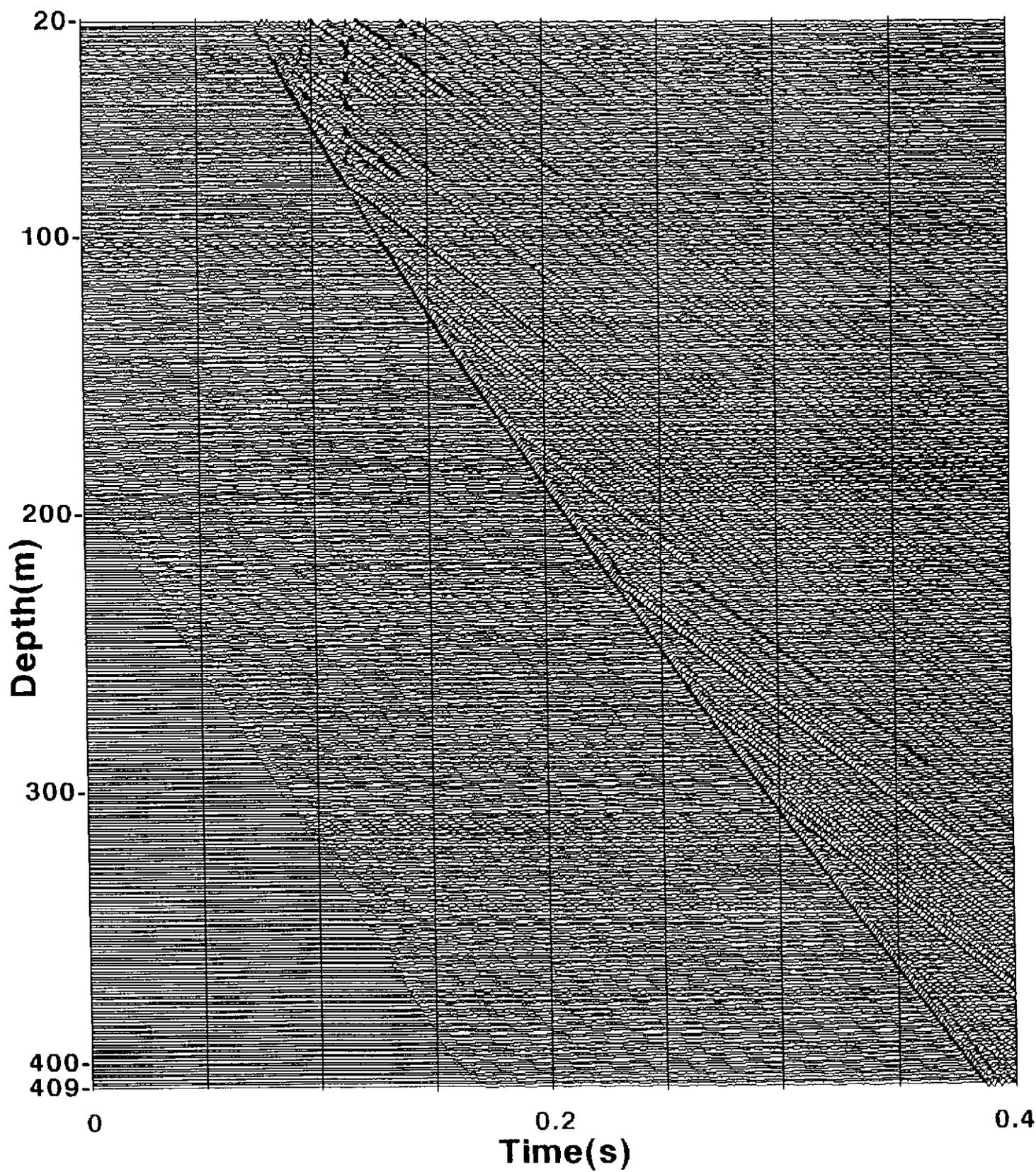


図-4-3-23 上方進行チューブ波の除去. 図-4-3-21から図-4-3-22を減算する.

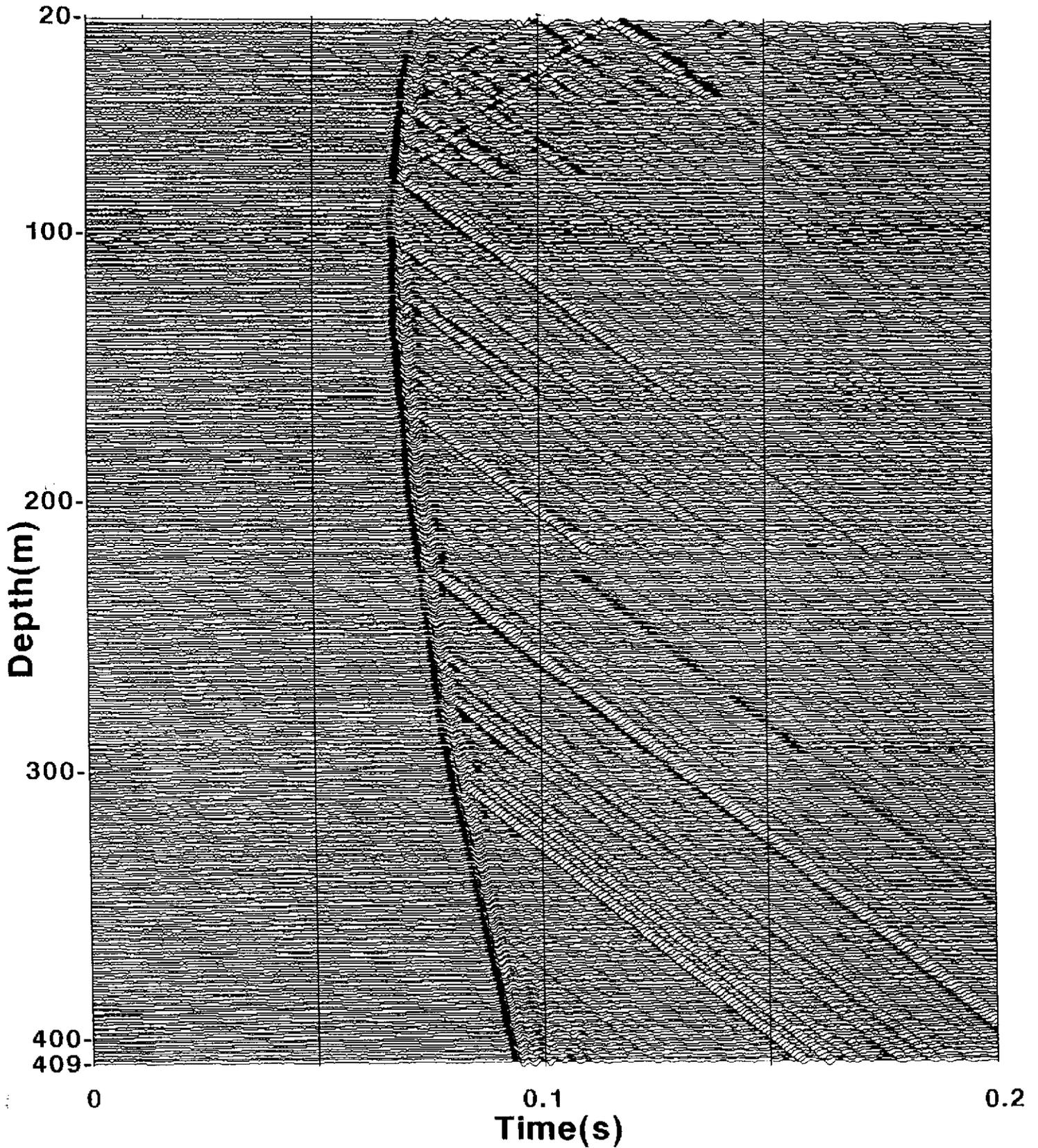


図-4-3-24 上方進行チューブ波が除去されたVSP記録. 図-4-3-23を時間シフトする.

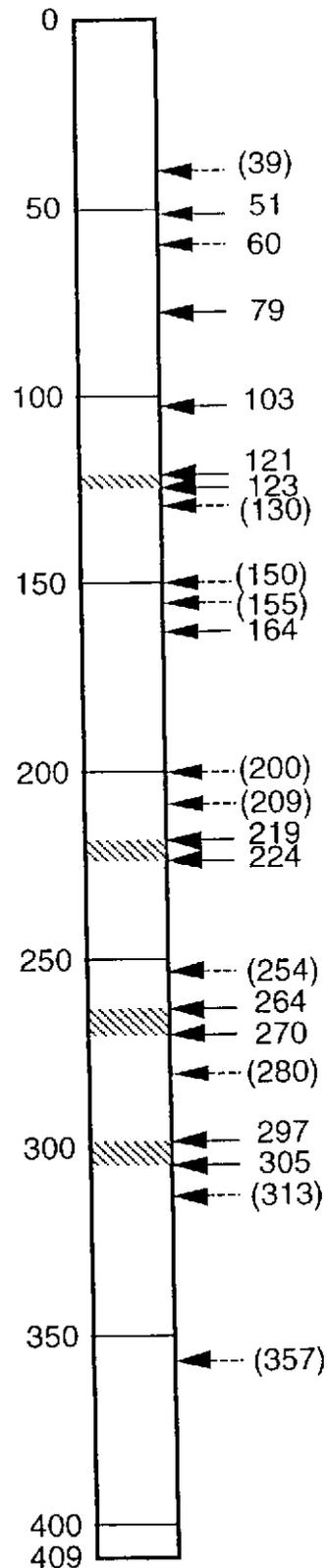


図-4-3-25 チューブ波の発生深度。実線矢印はすべてのVSP記録からチューブ波の発生を確認した深度を示し、点線矢印（深度をカッコ内に示す）は一部のVSP記録でチューブ波の発生を確認した深度を示す。斜線部分は、その区間全体からチューブ波が発生している可能性を示す。

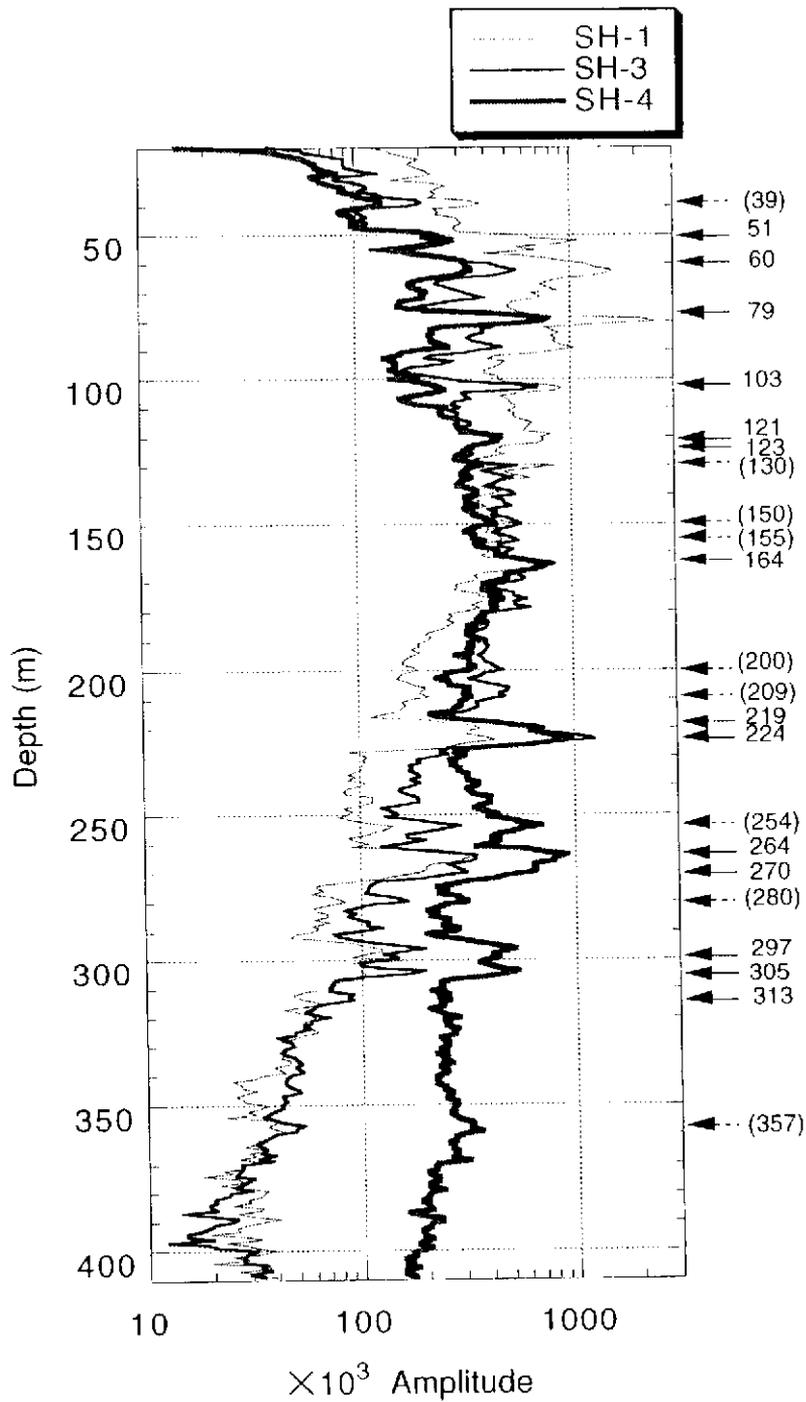


図-4-3-26 各VSP記録から求めた初動P波の振幅値。図中の矢印はチューブ波発生深度を示す。

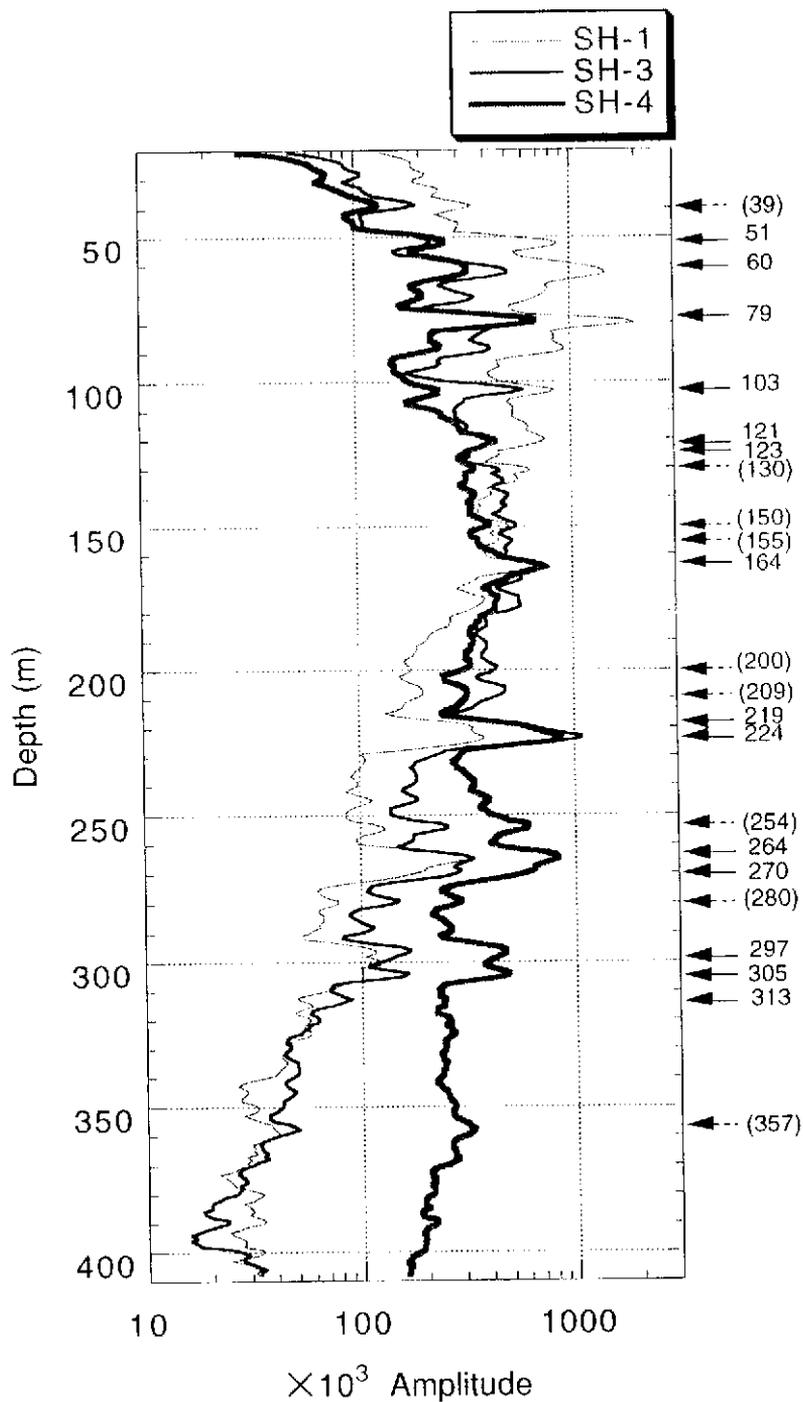


図-4-3-27 各VSP記録から求めた初動P波の振幅値の3深度ごとの移動平均値。
 図中の矢印はチューブ波発生深度を示す。

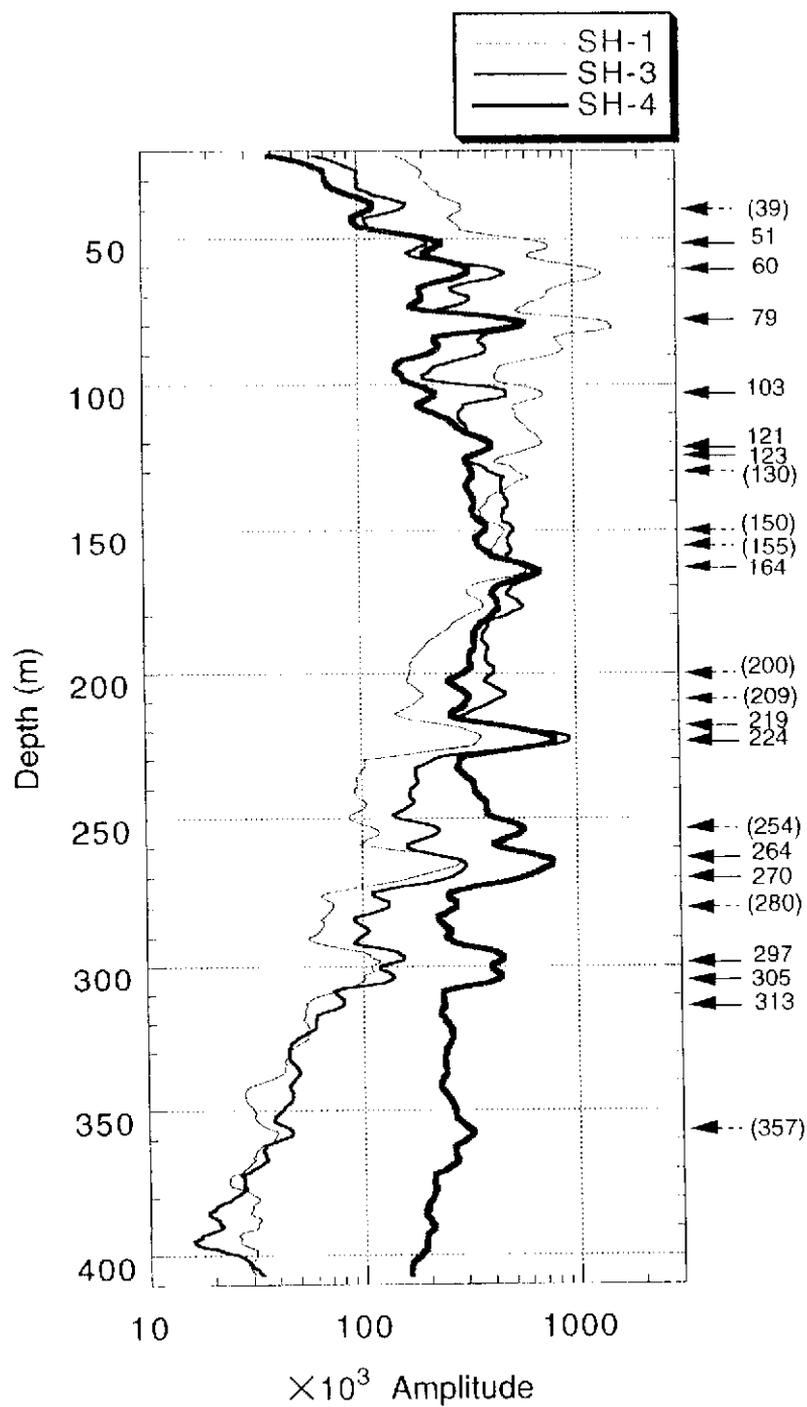


図-4-3-28 各VSP記録から求めた初動P波の振幅値の5深度ごとの移動平均値。
 図中の矢印はチューブ波発生深度を示す。

5. AN-1号孔における割れ目の特性

試錐孔AN-1号孔の地質構造を把握するため、割れ目調査等を実施した。以下にその結果を記述する。

“割れ目”は、本報告書においては、肉眼で識別可能な不連続面を指している。

5-1 岩芯観察結果

東濃地域の深部結晶質岩盤の地質学的特性を把握することを目的に、岩芯を用いた割れ目の形態調査、母岩、変質帯、充填物の岩石鉱物学的調査を実施した（吉田ほか、1989）。これらの調査結果に基づき、深度別の地質学的特性を把握した。

調査を実施した試錐孔AN-1号孔は、地下の水理学的状況および地球化学的状況を乱さないように泥材を用いず、清水により掘削した。また、岩芯の取り出しに際しては、人工的な割れ目を生じさせないよう細心の注意を払い、かつ掘削現場に岩芯試料が観察できる棚を設置した。割れ目調査は、自然の割れ目を対象に、(1)深度、(2)柱状図、(3)割れ目深度、(4)割れ目形態、(5)割れ目の連続性、(6)割れ目の表面構造、(7)条線の有無、(8)割れ目充填鉱物、(9)割れ目充填幅、(10)変質度、(11)変質幅、(12)割れ目の角度（角度は、今後、傾斜試錐を施する可能性もあるため、記載時には試錐孔延長方向と割れ目のなす角度で表現する）の12項目について観察・記載を行った（表-5-1）。

(1) 割れ目の形態

花崗岩における割れ目の水理学的、地球化学的特性を把握し、岩盤の水理地質学的、地球化学的評価に資することを目的として、割れ目の表面構造（粗度や条線の有無）などの割れ目の形状を基準に、以下に示す4つのタイプに割れ目の形態を区分した。

!割れ目表面が滑らかで平らな形状を呈する Planar(P)グループ

”割れ目表面が粗い形状を呈する Irregular(I)グループ

#割れ目表面が緩く湾曲する Curved(C)グループ

§割れ目表面が階段状を呈する Stepped(S)グループ

さらに、それぞれを細分し、25種類（タイプ）の割れ目形態を設定した。図-5-1に、その割れ目形態の分類とその略称および名称を示した。以下に各グループの割れ目の特徴を記述する。

P(Planar)グループの割れ目は、表面構造が滑らかで、鏡肌状を呈し、表面にしばしば条線（滑り面）が認められるタイプである。Pグループの割れ目は、典型的な鏡肌を呈し派生した割れ目を伴わ

ないタイプ(P0)、派生した付随割れ目を伴うタイプ(P1,P2)、数cm~10cm程度の区間に数本のPグループの割れ目が発達しているタイプ(P3)、岩芯を完全に切っていないタイプ(P4)に区分される。Pグループの割れ目には、充填物として緑泥石、絹雲母、方解石を幅0.1mm~10mm伴うことが多い。また、高角度を呈するPグループの割れ目が集中しているゾーンは、割れ目沿いに淡緑色あるいは淡桃色変質帯を伴うことが多い。この変質帯は、変質鉱物としてモンモリロナイト、絹雲母、緑泥石を伴う。

I(Irregular)グループの割れ目は、表面構造が粗く、条線が発達していないタイプの割れ目である。割れ目は岩芯の採取により人工的に開いているが、割れ目表面の凸凹は大部分かみ合う。Iグループの割れ目は、付随割れ目を伴わないタイプ(I0)、付随割れ目を伴うタイプ(I1,I2)、幅5-20cm程度に数本の割れ目が集中し薄く剥離するタイプ(I3)、幅5-20cm程度の区間に鏡下ではじめて観察できるような極めて微小な割れ目が多数発達しているタイプ(I4,I5)に区分される。Pグループの割れ目が高角度傾斜(鉛直方向に対して10~60°の角度)を呈するのに対し、Iグループの割れ目は、低角度傾斜(鉛直方向に対して80~90°の角度)を呈するものと、高角度傾斜(鉛直方向に対して10~60°の角度)を呈するものとが認められる。低角度傾斜を呈するIグループの割れ目は、一般には充填物を伴わない。高角度傾斜を呈するIグループの割れ目は、充填幅1~2cmのモンモリロナイトを主体とした青灰色の粘土鉱物からなる充填物を伴うものと、全く充填物を伴わないものとが認められる。特に、変質部付近のIグループの割れ目は、幅1~2cmのモンモリロナイトを主体とした青灰色の粘土鉱物を伴うことが多い。

C(Curved)グループの割れ目は、割れ目表面が緩く湾曲するタイプである。Cグループの割れ目は付随割れ目を伴わないタイプ(C0)、派生した付随割れ目を伴うタイプ(C1,C2)、岩芯を切っていない不連続なタイプ(C3,C4)に区分される。Cグループ、Iグループの割れ目は、分布が著しく少なく、割れ目形成に直接結びつく情報が少なく、成因的に不明な点が多い。また、ICグループはIグループとCグループの重なりあった中間的な形状を呈する割れ目である。

S(Stepped)グループの割れ目は、表面構造が階段状を呈するタイプである。派生した付随割れ目を伴うタイプ(S1,S2)、網目状の形態を示すタイプ(S3)、エッジロン状を示すタイプ(S4)、コアを切っていないタイプ(S5)に区分する。Sグループの割れ目に伴う変質は、Pグループのそれに類似する。

(2) 母岩の岩石鉱物学的特性

AN-1号孔の岩相は、中粒角閃石・黒雲母花崗岩が主体をなす。ここではAN-1号孔の岩相を、造岩鉱物の平均的なサイズを目安に、細粒(<1mm)、中粒(1-10mm)、粗粒(>10mm)に区分した。鉱物の一般的な粒度により区分された各岩相について代表的なサンプルを採取し、モード分析を実施した。

モード測定結果を、石英-斜長石-アルカリ長石三角図(図-5-2)に示す。その結果、本試錐孔の岩相は、いずれも狭義の花崗岩に分類された。深度方向の鉱物組成の顕著な変化は認められなかった。

(3) 変質帯における岩石鉱物学的調査

AN-1号孔では、風化帯、緑色変質帯、淡桃色変質帯、灰緑色～灰白色変質帯、赤色変質帯が認められる。AN-1号孔の変質帯の岩芯を用いたX線回折装置によるバルク分析(無処理)、定方位分析(無処理、エチレングリコール処理、塩酸処理)により同定した変質鉱物を基に、以下に各変質帯の特徴を示す。

①風化帯

AN-1号孔では、基盤と第三系の不整合(深度16.8m)から38mまで、灰緑色に変質し、マイクロクラック、割れ目の発達が著しい。風化帯は、変質鉱物としてスメクタイト、絹雲母、緑泥石を含む。鏡下では、黒雲母が一部粘土化あるいは緑泥石化し、斜長石の絹雲母化が観察される。

②淡桃色～緑色変質帯

淡桃色～緑色変質帯は、変質鉱物としてスメクタイト、絹雲母、緑泥石、方解石から構成される。変質帯の中心部は緑灰色を呈し、中心部から離れるに従い、淡緑色から淡桃色に変化する。

③淡黄色変質帯

淡黄色変質帯は、主として300m以深に認められ、石英、絹雲母を充填鉱物として伴う割れ目の集中帯と、石英、絹雲母を充填鉱物として伴う単一割れ目(変質幅1.0-1.5mm)に発達する。鏡下では、斜長石の絹雲母化が認められる。

④赤色変質帯

赤色変質帯は、石英と絹雲母の充填鉱物が割れ目集中帯に発達し、その周辺は淡桃色に変質している。鏡下では、長石類は微細な赤色の鉄酸化鉱物を有している。赤色変質帯では、著しい化学組成の変化は認められない。

(4) 充填物の岩石鉱物学的特性

AN-1号孔においては、肉眼観察により、以下のタイプの充填物が認められた。

①青灰色および灰白色の粉末状粘土鉱物から構成されるタイプ

②黄灰色の絹雲母と石英から構成されるタイプ

③緑灰色の緑泥石から構成されるタイプ

④赤色の鉄酸化鉱物から構成されるタイプ

以下に、各タイプの充填物の特徴を記述する（表-5-2）。

①青灰色および灰白色の粉末状粘土鉱物から構成されるタイプ

本タイプの割れ目充填鉱物は、スメクタイト、方解石、緑泥石などから構成される。本タイプの割れ目充填鉱物は、一般に割れ目の表面構造が粗く、条線が発達しないIグループの割れ目に認められる。割れ目充填物の幅は、数mm～数cmを呈する。充填物は、粉末状の粘土鉱物の他に、長石類や石英の破片を含んでいる。本タイプの割れ目充填物は、300m以浅においては青灰色、420m～500m深度においては、白～灰白色を呈する。また、このタイプの充填鉱物を伴う割れ目には、一般に割れ目に沿って顕著な変質は認められない。しかし、粘土化を伴う緑色変質帯においては、その割れ目にもこのタイプの割れ目充填鉱物が認められる。

②黄灰色の絹雲母と石英から構成されるタイプ

本タイプの割れ目充填鉱物は、一般に表面構造が滑らかなPグループの割れ目に伴われる。割れ目充填物は、幅0.1mm から最大1mm を呈する。また、本タイプの充填物を伴う割れ目は周辺に、幅1.0～1.5cmの淡桃色変質帯を伴う。この、変質帯では、斜長石の絹雲母化が著しい。また、このタイプの充填物を伴う割れ目の集中部は、幅1m～2mの淡桃色変質帯を伴う、また、一部、赤色変質化している部分も認められる。

③緑灰色の緑泥石から構成されるタイプ

本タイプの割れ目充填物は、一般に表面構造が滑らかな、条線を伴うPグループの割れ目に多く認められる。割れ目充填物の幅は、0.1～0.6mmを呈する。

④赤色の鉄酸化鉱物から構成されるタイプ

赤色の鉄酸化鉱物から構成される割れ目充填物には、以下の産状を呈するものが存在する。

- ・青灰色および灰白色の粘土鉱物とともに存在するもの

本タイプは、PグループあるいはIグループの割れ目に観察され、割れ目充填物の幅は、1mm～3mmを呈する。鉄酸化鋳物は表面に散在する。

・鉄酸化鋳物のみが割れ目表面に付着するもの

本タイプは、Iグループの割れ目に認められ、割れ目表面に散在する形で付随する。

・割れ目表面の黒雲母から鉄酸化鋳物が晶出しているもの

本タイプは、Pグループの割れ目に認められ、割れ目表面の黒雲母から赤色の鉄酸化鋳物の晶出が観察される。割れ目表面には、その他に、絹雲母、石英が認められる割れ目と、スメクタイト、絹雲母の粘土鋳物が認められる割れ目が存在する。

(5) AN-1孔の鉛直方向の地質構造区分

割れ目の密度、方向性、形態、充填物鋳物の種類と産状、変質帯の種類と産状から、AN-1号孔は、大きく5つのセグメントに区分される(図-5-3)。

①セグメント1 (16.8m～300m)

セグメント1には、主にPグループ、特にP0、P1、P2タイプが主として認められ、試錐孔の1m区間中に数本以上平行に発達する。S、CとICグループは、Pグループに比べると発達頻度は低い。不整合面下数m以内では、数十cm程度の区間に数本の割れ目が集中し、薄く剥離するI3タイプ割れ目が卓越する。変質帯においては、I4、I5タイプの割れ目が主として認められ、また部分的に10～30cm間隔でI3タイプの割れ目が認められる。

本セグメントの割れ目の卓越方向は、N45°W走向20°傾斜とN45°W走向15°傾斜を呈する。さらに、局所的に、EW走向65°N傾斜とN45°W走向65°NE傾斜の割れ目が認められる。

セグメント1の変質帯は、淡緑色～淡桃色を呈し、変質鋳物としてモンモリロナイト、絹雲母、緑泥石、緑簾石を含み、一部の深度で熱水変質と思われる閃亜鉛鋳を含む。また、上部の変質帯は岩芯全体が緑色を呈し、全体に微少な割れ目(I5タイプ)が発達するものの、ハンマーで叩いても壊れない程度の固さを保つ。鏡下では、結晶粒子サイズまでにおよぶ割れ目が縦横に発達する。また、黒雲母、角閃石に変質し、長石も微少割れ目に沿って絹雲母化しているのが認められる。

セグメント1で認められる割れ目充填鋳物は、主として絹雲母、カオリナイト、緑泥石および若干のモンモリロナイトである。Pグループの割れ目表面は、しばしば厚さ1～2mmの緑泥石、方解石でコーティングされており、その場合の割れ目沿いの変質度は弱い。Iグループの割れ目に認められる充填鋳物は、絹雲母、緑泥石、モンモリロナイトが主体である。

②セグメントⅡ(300～420m)

セグメントⅡでは、割れ目の密度は、連続、不連続割れ目を合わせて平均1本/mと小さく、RQDもほぼ全体にわたって100%で堅固な岩盤である。セグメントⅡの割れ目はPグループが主体をなし、若干のCグループの割れ目が認められる。P,Cグループのうち特にP4,C3,C4タイプの不連続割れ目が主体である。本セグメントの割れ目の卓越方向は、N45°W走向65°NE傾斜である。セグメントⅡには、著しい変質帯は存在せず、絹雲母を充填鉱物として伴う単一割れ目沿いに幅1～2cmの淡黄色の変質を伴うのみである。

③セグメントⅢ(420～690m)

セグメントⅢでは、主として鉛直方向に対する角度が70°～90°のIグループの割れ目が卓越する。その他に、鉛直方向に対する角度0°～15°のPグループの割れ目が局所的に存在する。平均の割れ目密度は、7本/mを越える。また、変質帯の部分には、I0,I2,I3タイプの割れ目が卓越する。部分的に幅数十cmにIグループの割れ目が集中し、I3タイプの割れ目が存在する。本セグメントの割れ目の卓越方向は、N45°W走向20°傾斜である。さらに、局所的に、EW走向65°S傾斜とEW走向50°N傾斜の割れ目が認められる。セグメントⅢでの割れ目に伴う変質は、白～灰色を示し、有色鉱物はほとんどその自形をとどめていない。セグメントⅢに発達する単一割れ目の充填鉱物としては、モンモリロナイト、方解石、絹雲母が主体である。

④セグメントⅣ(690～820m)

セグメントⅣでは、割れ目の密度は小さく、連続、不連続の割れ目を合わせても、5本/m以下を示す。RQDもほぼ全体にわたって100%で、堅固な岩盤である。セグメントⅣの割れ目はPグループとSグループが主体をなす。特に、他のセグメントと比較し、Sグループが占める割れ目の割合が高い。本セグメントの割れ目の方向は分散し、明瞭な卓越方向を示さない。セグメントⅢには、主として石英、絹雲母を充填鉱物として伴う割れ目が分布する。本セグメントには著しい変質帯は存在せず、絹雲母を充填物として伴う単一割れ目沿いに幅1～2mmの淡黄色の変質を伴うのみである。

⑤セグメントⅤ(820～960m)

セグメントⅤには、主にIグループとPグループの割れ目が認められる。特に、他のセグメントと異なる点は、Iグループの割れ目が占める割合が、Pグループの割れ目の占める割合と同程度分布す

ることである。割れ目の密度は、5本/m以上と非常に高く、RQDも50%以下の区間が多い。本セグメントの割れ目は、EW走向50°N傾斜とN45°W走向65°NE傾斜が卓越している。セグメントVには、淡灰色の粘土鉱物から構成されている充填物を伴う割れ目が卓越する。さらに、淡桃色や赤桃色の変質帯を伴う割れ目帯が存在する。

(6) 割れ目帯

AN-1号孔において連続的に取得された密度・中性子検層結果と岩芯を用いて測定されたRQDに基づき、表-5-3に示す指数を与え、さらに表-5-4に示すA～Gの等級に区分して、浅層から深層まで連続的に岩盤区分を行った。各岩盤等級を対応する地質学的特徴は以下の通りである。

- A : 割れ目がほとんど認められない極硬岩
- B : 密着した割れ目が少し認められる極硬岩
- C～E : 風化・変質のかなり進んだ部分で、開口割れ目が発達した岩盤
- F～G : C～Eよりさらに風化・変質のかなり進んだ部分で、固結程度が低く粘土を伴うような割れ目帯および破碎帯

今回は、この岩盤等級を用いて、F～Gの部分をAN-1号孔と交差する割れ目帯として識別した。岩盤等級を用いて識別された割れ目帯の深度を前述の図-5-3に示す。AN-1号孔では、23の割れ目帯が識別された。特に、地表～試錐孔長200m、試錐孔長200m～300m、試錐孔長420m～600m、試錐孔長900m～1000mの区間に割れ目帯は集中している。

(7) ハイドロフォンVSPで得られた透水性亀裂とコア観察で得られた割れ目との比較

図-5-4(1)および(2)はAN-1号孔でのコア観察の結果から得られた割れ目の頻度分布図であり、割れ目のタイプ別に1m毎に割れ目の頻度をプロットしたものである。また、図中に矢印で示した深度が、今回得られた透水性亀裂の深度である。

両図より、今回得られた透水性亀裂と割れ目の頻度分布には特に相関は認められない。ただ、透水性亀裂の大部分はコア観察が不可能かあるいは観察が可能なコアの回収率がかなり悪い部分と対応しており、コア観察の結果とハイドロフォンVSPの結果を対比することは、あまり意味が無いといえる。

今後は、ボアホールテレビで得られた孔壁の画像等との対比により、透水性亀裂の特性を解明し

ていく必要がある。

5-2 物理検層

物理検層結果（尾方ほか，1990a，1990b）を図-5-5 に示す。以下，各物理検層結果について記す。

（1）検層項目

(a)温度検層

温度検層は孔内の温度を深度に対して連続的に測定して地層の温度を決定することによって，地層の対比，逸水層，出水層，帯水層などの位置を判定することができる。本試錐孔の最高温度は，孔底 1010m で約36.7℃，深度100m～1010m 間の平均温度勾配は2.2℃/100mであった。また温度勾配は，深度500m付近を境として2分され，500m以浅で2.4℃/100m，500m以深で2.0℃/100mであった。温度の異常部は特に認められなかった。

(b)電気検層（25cmノルマル，100cmノルマル）

本試錐孔の比抵抗は，100Ωm～11000Ωmを示している。10000Ωm前後の高比抵抗を示すゾーンは，深度約310m～約440m，約580m～約800mに，1000Ωm程度以下の低比抵抗を示すゾーンは，深度20m～約130m，約220m～270m，約450m～570m，約950m～1010mにある。低比抵抗部は岩芯観察から割れ目・変質が発達した部分とよく一致した。特に，この中で最も低い比抵抗値を示す部分（深度224.20m，比抵抗値100Ωm）は，岩芯観察から断層の可能性が高い。

(c)電気検層（2.5cmマイクロ）

2.5cmマイクロ電気検層は，ノルマル検層より電極間隔が短く，また孔壁に圧着させて測定するため，電極間隔の長いノルマル検層では検出できない割れ目などの検出に有効である。

結果は，全体的に25cmノルマル，100cmノルマルの結果と同様な傾向を示している。しかし，ノルマル値が高く安定している部分でもマイクロ値は細かい変化を示しており，割れ目を精度よく抽出している可能性がある。

(d)音波検層

本試錐孔のP波速度の値は，一般的に4.5km/sec～5.0km/secを示す。P波速度値の低い部分は，岩芯観察による割れ目集中部とよく一致した。また，電気検層の低比抵抗部では，P波速度値は低く

なる傾向を示し、特に最も低い比抵抗値を示す224m付近ではP波速度も低く、3.0km/sec以下であった。

(e)密度検層

本試錐孔の密度値は2.5g/cm³～2.6g/cm³を示し、上部から下部まで安定した値を示している。ただし、割れ目・変質が発達している部分では低密度部が存在し、特に深度102m～105mでは2.4g/cm³以下の値を示す。

(f)中性子検層

中性子検層の結果は、本試錐孔では5%～10%の値で安定している。ただし、深度310mまでの浅部では、割れ目・変質の進んだ部分で20%程度の高い間隙率値を示す部分が存在する。

(g)X-Y孔径検層

X-Y孔径検層の結果は、掘削に使用したダイヤモンドリーマの外径(98mmφ～100mmφ)で安定している。ただし、深度102m～105mで、孔径が100mmφ～160mmφと変化している。

(2) ハイドロフォンVSPで得られた透水性亀裂と検層データとの比較

深度410mよりも浅い部分について、検層データが異常を示す深度を図-5-5から読み取り、表-5-5および表-5-6にまとめた。異常部については、主に電気検層25cmノルマルのデータと音波検層P波速度のデータに着目して抽出を行った。表には、明らかに異常であると判定される深度については○印を、異常とは判定されない深度については×印を、異常の可能性があると判断される深度については△印を記した。ただし、今回は、異常の絶対値は考慮しておらず、目視で異常として識別可能かどうかを判定の基準とした。従って、客観性にやや欠ける点があることを明記しておく。なお、表を2つに分けたのは、深度310m付近で検層図のパターンが大きく異なるためである。

表-5-5および表-5-6より、透水性亀裂は次の4つのパターンに分類できる。

(a)25cmノルマルのデータ、P波速度のデータおよび孔径のデータに明確な異常を伴うもの

深度 79m, 103m, 224m

(b)25cmノルマルのデータあるいはP波速度のデータに明確な異常を伴うもの

深度 39m, 51m, 121m, 164m, 209m, 219m, 254m, 264m, 270m, 280m, 305m, 357m

(c) 25cm ノルマルのデータあるいはP波速度のデータに弱い異常を伴うもの

深度 60m, 123m, 200m

(d) 検層データの異常を伴わないもの

深度 130m, 150m, 155m, 297m, 313m

5-3 ボアホールレーダー調査結果

AN-1号孔ではボアホールレーダーによる調査が実施されている（佐久間ほか、1988）。以下、調査法および調査結果について述べる。

(1) レーダー法シングルホール調査について

レーダー法は、岩盤に波長の短い電磁パルスを発信させ、電磁波の速度や減衰の変化に着目して非破壊で岩盤中の水理地質特性に関する情報を得ようとする手法である。レーダー法で得られるのは岩盤の電気的な特性に関する情報であるが、岩盤の電気的な特性は岩盤の含水量と密接な関係があり、岩盤の孔隙率が大きくなったり割れ目や変質帯の発達により含水量が増加すると、その部分で誘電率や電気比抵抗が変化する。レーダー法を用いると、このような水理地質特性の変化を電気的特性の変化として捉えることができる。

図-5-6はシングルホール調査およびその測定結果を模式的に示したものである。シングルホール調査では、送信プローブと受信プローブをガラスファイバー棒で接続して同一試錐孔内に降ろし、送信プローブと受信プローブの距離を一定に保ったまま試錐孔内を下降あるいは上昇させて測定を行う。送信プローブから発信された電磁波パルスは反射面で反射され、その反射波を受信プローブで受信することにより反射面の位置や連属性が把握できる。反射面が平面的に広がっている場合は直線状のレーダー反射図が得られ（反射面が試錐孔と交差している場合は「ハ」の字状になる）、点状の反射物体からのレーダー反射図は双曲線状を呈する。

上で述べた測定原理から明らかなように、シングルホール調査では試錐孔と直交する方向の反射面の検出は出来ない。また、事業団が所有しているレーダー法システムのアンテナには指向性が無いため、1本の試錐孔のみを用いた調査で得られるのは反射面が試錐孔と交わる深度とその角度であり、反射面の空間的な位置を特定することは出来ない。

(2) AN-1号孔における測定結果

図-5-7がAN-1号孔の深度150mから450mで得られたレーダー反射図である。使用したアンテ

ナの中心周波数は60MHzであり、プローブの移動間隔は1mである。この図の縦軸は試錐孔の深度であり、横軸は反射波の往復走時である。

図-5-7には、深度300m付近から深度420m付近にかけて、他の部分に比較して透過距離が大きい（より遠い反射面からの反射波が明瞭に記録されている）部分が見られる。これは、この部分の電気比抵抗が大きいことと対応しており、割れ目や変質帯の少ない堅固な岩盤であることが推定されるが、これは岩芯観察結果や検層結果とよく一致している。さらに、岩芯観察の結果、深度217mから223mに断層の存在が予想されているが、これは(2)番の反射面として捉えられており、特に深度220mから230mにかけて記録されている到着波形の乱れは、断層の破碎帯に起因しているものと考えられる。

反射面に関しては(1)番から(14)番までの反射面を読み取ることが出来た。表-5-7に反射面が試錐孔と交差する深度を記した。ただし、深度の値は反射波の読み取り位置の曖昧さから、±数m程度の誤差を含んでいる。また、ケーブルの伸びに伴う深度の補正は実施していない。

今回得られた反射面の深度と透水性亀裂の深度には特に関係は認められなかった。

5-4 水理試験結果

AN-1号孔では深度170mまで水理試験が行われ（吉田ほか，1989），JFT法とパルス法の2通りの方法で透水係数が測定されている。得られた透水係数は、割れ目帯において $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s、割れ目の少ない区間では $10^{-6} \sim 10^{-9}$ cm/sを示す。

しかし、割れ目帯においても $10^{-6} \sim 10^{-9}$ cm/sを示す区間が見い出された。これらの区間では貯留効果が発生しており、その原因として割れ目内に粘土鉱物等の充填鉱物が存在することが考えられる。そして、透水係数が低く求まったのは、この充填鉱物が割れ目を閉塞しているためであると考えられる。

表-5-1 岩芯観察記載項目

項 目	記 載 事 項
1. 深 度	AN-1号孔では1/20スケールを採用
2. 柱 状 図	AN-1号孔では花崗岩に対し5種類の凡例を使用
3. 割れ目深度	割れ目深度を固有化するために割れ目と岩芯の中央線の交点を記載
4. 形 態	割れ目形態の分類
5. 連 続 性	割れ目が岩芯を切っているか否かの記載
6. 表面構造	割れ目の表面構造・形態についての記載
7. 条 線	割れ目表面上に認められる条線の有無・形態についての記載
8. 充填鉱物	割れ目の充填鉱物についての記載
9. 充 填 幅	割れ目充填幅の記載
10. 変 質 度	割れ目に伴う変質帯の変質度について記載
11. 変 質 幅	変質部の厚さの記載
12. 角 度	鉛直方向と割れ目のなす角度

表-5-2 割れ目充填鉱物の特徴

肉眼観察による区分	産 状	構 成 鉱 物	変 質 と の 関 係
①青灰色および灰白色を呈する粘土鉱物から構成されるタイプ	①表面の粗いIグループ割れ目(高角度傾斜)に伴う ・幅 数mm~10mm程度 ②表面に条線がついたP, I中間の割れ目(低角度傾斜)に伴う ・幅 数mm ・粘土鉱物系の充填物と割れ目表面の間に数mmの石英を伴うことがある	(a) スクタイト+セリサイト+ 緑泥石+方解石 (b) スクタイト+セリサイト+ 緑泥石 (c) スクタイト+カサイト+セリサイト+緑泥石 + (方解石) (d) スクタイト+セリサイト+ 緑泥石+ (黄鉄鉱) (e) スクタイト+セリサイト+ 鉄酸化鉱物	・割れ目沿いに変質が認められない ・スクタイトが主構成鉱物である淡桃色~緑色変質帯では一般に、このタイプの充填物を伴う割れ目が認められる
②黄灰色の雲母粘土鉱物, 石英から構成されるタイプ	Pグループ高角度傾斜の割れ目に伴う	(a) セリサイト, 石英 (b) セリサイト	・割れ目沿いに淡桃色の変質(幅2~3m)を伴う(斜長石→セリサイト化) ・このタイプの充填物を伴う割れ目の集中部では1m~2mの淡桃色変質帯を伴うことがある(一部、鉄酸化物を伴うことがある)
③灰緑色の緑泥石から構成されるタイプ	Pグループ高角度傾斜の割れ目に伴う	緑泥石(緑簾石)	
④赤色の鉄酸化物を伴うタイプ	(a) 青灰色および灰白色を呈する粘土鉱物から構成されるタイプと共に存在. 割れ目表面に平行にその表面と粘土鉱物系の充填物の隙間に付着(P, Iグループ) (b) 鉄酸化物のみが割れ目表面に付着(Iグループ) (c) 割れ目表面に接触した黒雲母から鉄酸化物が晶出(Pグループ)	鉄酸化鉱物(石英, 方解石, セリサイトを伴うこともある)	・産状(a), (b)には割れ目沿いに変質は認められない ・産状(c)の場合には, 幅2~5cm程度黒雲母から赤色鉄酸化鉱物が晶出(一部2~5cmほど赤色変質しているものあり)
⑤方解石から構成されるタイプ	Pグループ高角度傾斜の割れ目に伴う	方解石	・変質は認められない

表-5-3 岩盤区分に用いた指数

指数	RQD (%)	孔隙率 (%)
1	100	5.0 以下
2	90	5.0 - 7.5
3	80, 70	7.5 - 10.0
4	60, 50	10.0 - 12.5
5	40, 30	12.5 - 15.0
6	20, 10	15.0 以上
7	0	

表-5-4 RQDおよび密度-中性子検層から算出した孔隙率による岩盤区分

RQD指数+孔隙率指数	岩盤区分
2	A
3 ~ 4	B
5 ~ 6	C
7 ~ 8	D
9 ~ 10	E
11 ~ 12	F
13	G

表-5-5 (1) 物理検層で得られた異常部と透水性亀裂の深度の対比
(深度20m~310m)

深度 (m)	電気検層 25cm/層	音波検層 P波	密度検層	中性子検層 孔隙率	孔径検層	割れ目帯 深度 (m)	透水性亀裂 深度 (m)
33.0	○	○	△	○	×		
36.5	○	○	×	△	×		
39.5	○	○	×	○	×		39
51.0	○	○	×	○	×		51
52.0	△	△	×	×	×		
60.5	×	△	×	○	×	60~61	60
61.5	△	△	×	○	×		
63.0	△	○	×	○	×		
68.5	△	○	×	×	×		
71.5	○	○	×	○	×		
79.5	○	○	○	○	○	(77~79)	79
81.5	△	△	×	×	×		
83.0	△	○	×	△	×		
86.5	○	×	×	×	×		
90.5	○	○	×	○	×	(89~90)	
93.0	○	△	×	×	×		
95.0	○	○	×	×	×		
103.0	○	○	○	○	○	101~104	103
108.0	○	○	×	△	×		
110.5	○	×	×	×	×		
112.5	○	×	×	×	×		
115.5	○	×	×	×	×		
118.0	×	△	×	○	×		
121.5	○	○	×	○	×		121
123.0	△	△	×	×	×		123
124.5	△	△	×	×	×	(124~125)	
126.0	○	○	×	○	×		
							130
133.5	△	○	×	△	×		
134.0	△	○	×	△	×	133~134	
137.0	△	×	×	×	×		
139.0	△	×	×	×	×		
143.5	×	×	×	○	×	141~144	
147.0	△	△	×	×	×	147~148	
148.5	△	△	×	×	×		

表-5-5 (2) 物理検層で得られた異常部と透水性亀裂の深度の対比
(深度20m~310m)

深度 (m)	電気検層 25cm/ルル	音波検層 P波	密度検層	中性子検層 孔隙率	孔径検層	割れ目帯 深度 (m)	透水性亀裂 深度 (m)
							150
152.5	○	△	×	×	×		
							155
163.0	○	○	○	○	×	(160~161)	164
175.5	△	○	×	×	×		
191.5	○	×	×	×	×		
198.5	○	△	×	×	×		
201.0	△	△	×	×	×		200
206.0	○	○	×	×	×		
210.0	○	○	×	×	×		209
220.0	△	○	×	○	△		219
223.5	○	○	○	○	○	223~224	224
231.0	○	○	×	×	×		
236.5	×	△	×	×	×		
239.0	△	△	×	×	×		
243.0	×	△	×	×	×		
246.0	○	○	×	×	×		
254.0	○	○	×	○	×		254
255.5	○	○	×	○	△		
259.5	○	○	×	△	△		
264.0	×	○	×	×	△	264	264
266.5	○	×	×	△	△		
269.5	△	○	×	△	△	~269	270
277.5	×	○	○	△	△		
280.0	○	○	×	×	×		280
288.5	△	○	×	×	×		
295.0	×	○	○	○	×		
						(297~298)	297
299.0	○	○	○	○	×		
305.0	○	○	×	○	×		305

表-5-6 物理検層で得られた異常部と透水性亀裂の深度の対比
(深度310m~410m)

深度 (m)	電気検層 25cm/ルル	音波検層 P波	密度検層	中性子検層 孔隙率	孔径検層	割れ目帯 深度 (m)	透水性亀裂 深度 (m)
							313
346.0	○	○	×	×	×		
355.0	△	×	×	×	×		
358.0	○	○	×	×	×		357
364.5	△	×	×	×	×		
368.0	○	○	×	×	×		
376.5	○	○	×	×	×		
391.0	○	○	×	×	×		

表-5-7 レーダー法シングルホール調査で得られた反射面の深度

反射面の番号	深 度 (m)		反射面の番号	深 度 (m)	
	上側深度	下側深度		上側深度	下側深度
1		-165	8	372	377.5
2		-232.5	9	381.5	383
3	272	-282	10		-395.5
4	291.5	-291.5	11	407	-
5		-308	12	417.5	
6	350	-355	13	428.5	
7		-367	14	441.5	-

主要割れ目形態		割れ目タイプ		
		連続割れ目	不連続割れ目	割れ目形態の名称
平 滑 型 P o				P ₀ ; Planar Type P ₁ ; Planar with major splays Type P ₂ ; Planar with minor splays Type P ₃ ; Parallel Type P ₄ ; Nonpersistence Planar Hairline Type
不 規 則 型 I o				I ₀ ; Irregular Type I ₁ ; Irregular with major splays Type I ₂ ; Irregular with minor splays Type I ₃ ; Braided Type I ₄ ; Short nonpersistence Hairline Type I ₅ ; Microfracture I _{C1} ; Irregular and Curved Type I _{C2} ; Irregular and Curved with major splays Type I _{C3} ; Irregular and Curved with minor splays Type
曲 線 型 C o				C ₀ ; Curved Type C ₁ ; Curved with major splays Type C ₂ ; Curved with minor splays Type C ₃ ; Braided Type C ₄ ; Nonpersistence Curved Hairline Type
段 階 型 S o				S ₀ ; Stepped Type S ₁ ; Stepped with major splays Type S ₂ ; Stepped with minor splays Type S ₃ ; Meshwork Type S ₄ ; En echelon Type S ₅ ; Nonpersistence Stepped Hairline Type

(a)

R O U G H N E S S (S U R F A C E S T R U C T U R E O F O P E N F R A C T U R E)

T Y P E	A	B	C	D	E
S U R F A C E S T R U C T U R E					
R O U G H N E S S	Smooth	Defined ridges	Small steps	Rough	Very rough
S t i c k e n s i d e s	◎	○	—	—	—
F i l l i n g m a t e r i a l	◎	○, ◎	△, ○	—, △	—, ○
F r a c t u r e p a t t e r n	Planar Type	Planar-Curved Type	Stepped Type	Stepped-Irregular Type	Irregular Type

LEGEND ◎ : abundant ○ : common △ : rare — : none

(b)

図-5-1 割れ目形態の分類とその基準

(a) 割れ目形態の分類

(b) 基準とした割れ目の表面の形状、粗度、条線の特徴

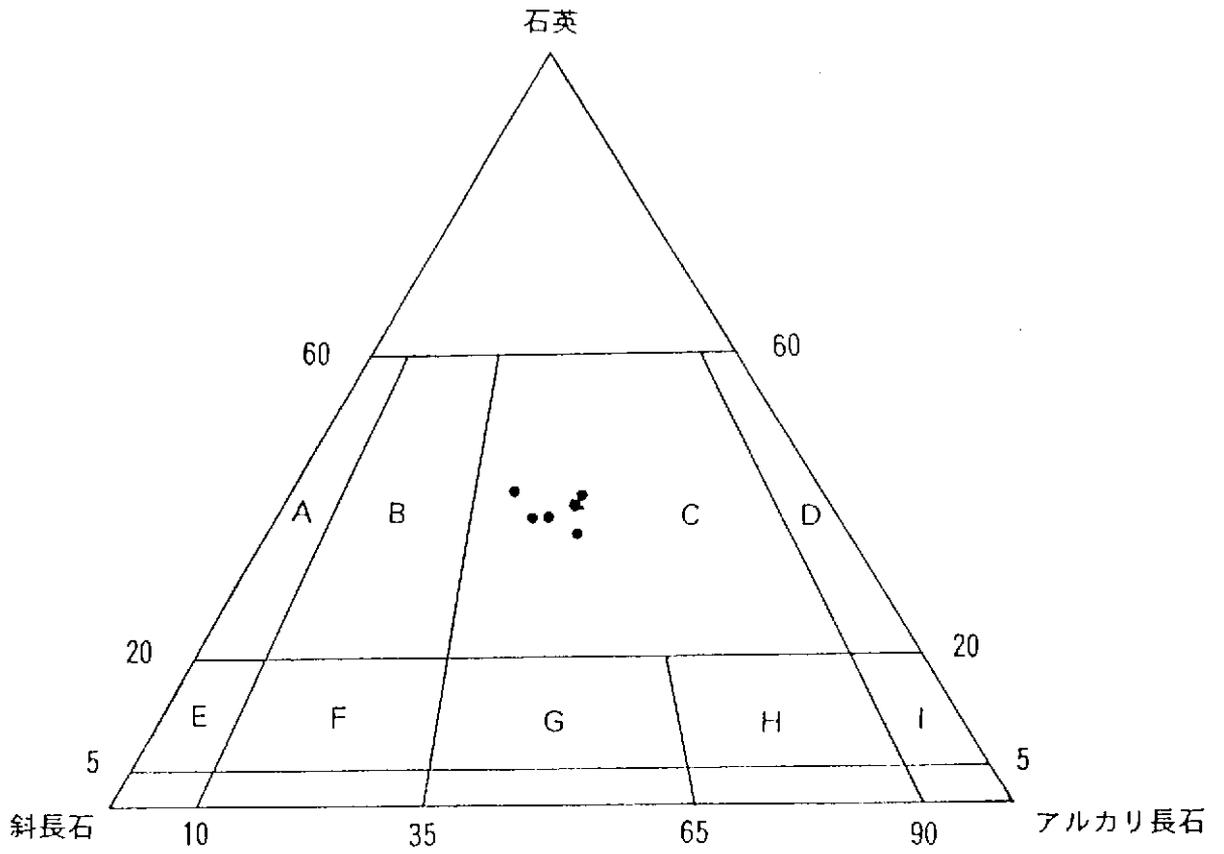


図-5-2 AN-1号孔モード分析結果

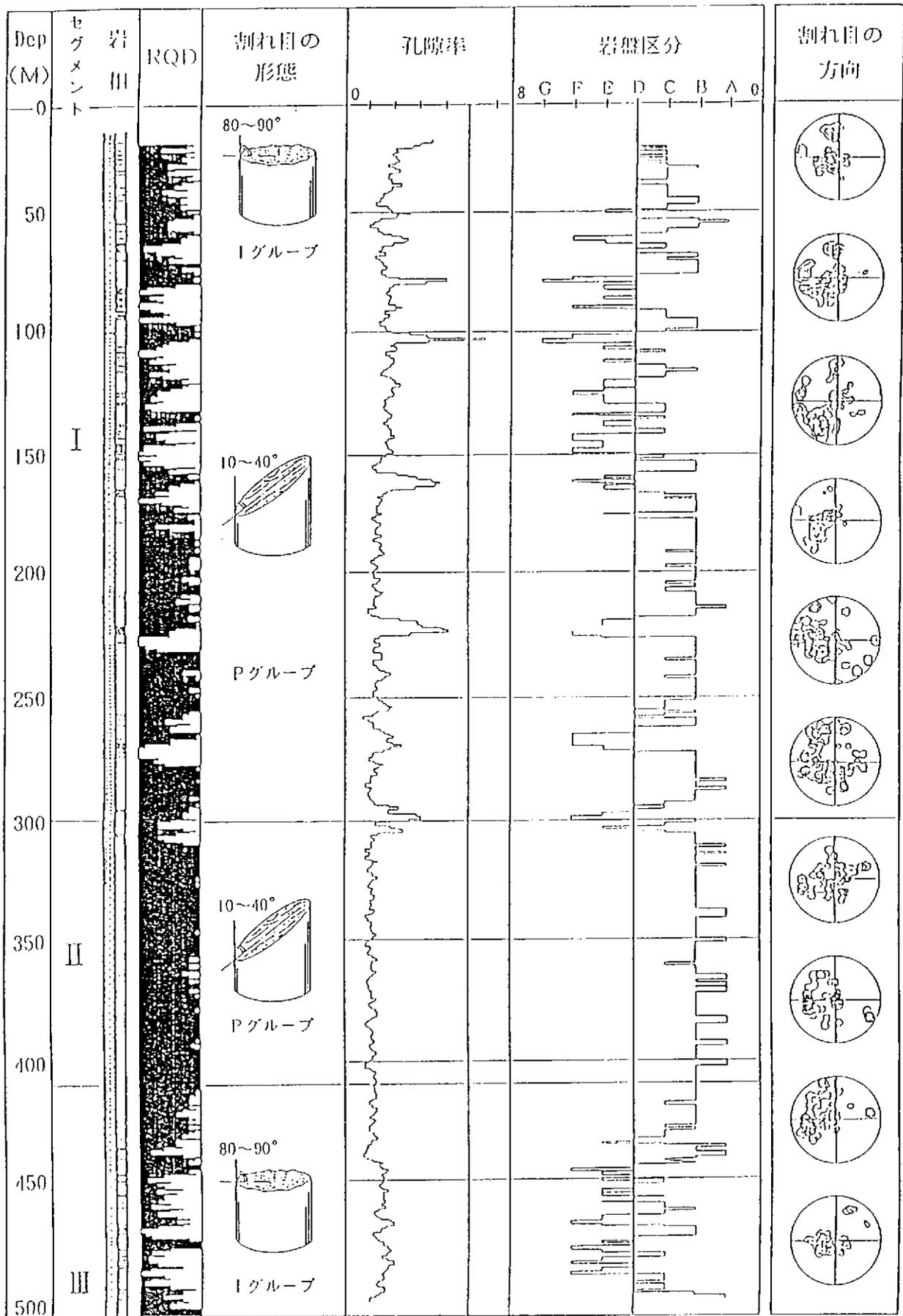


図-5-3(1) AN-1号孔における地質構造区分 (0~500m)

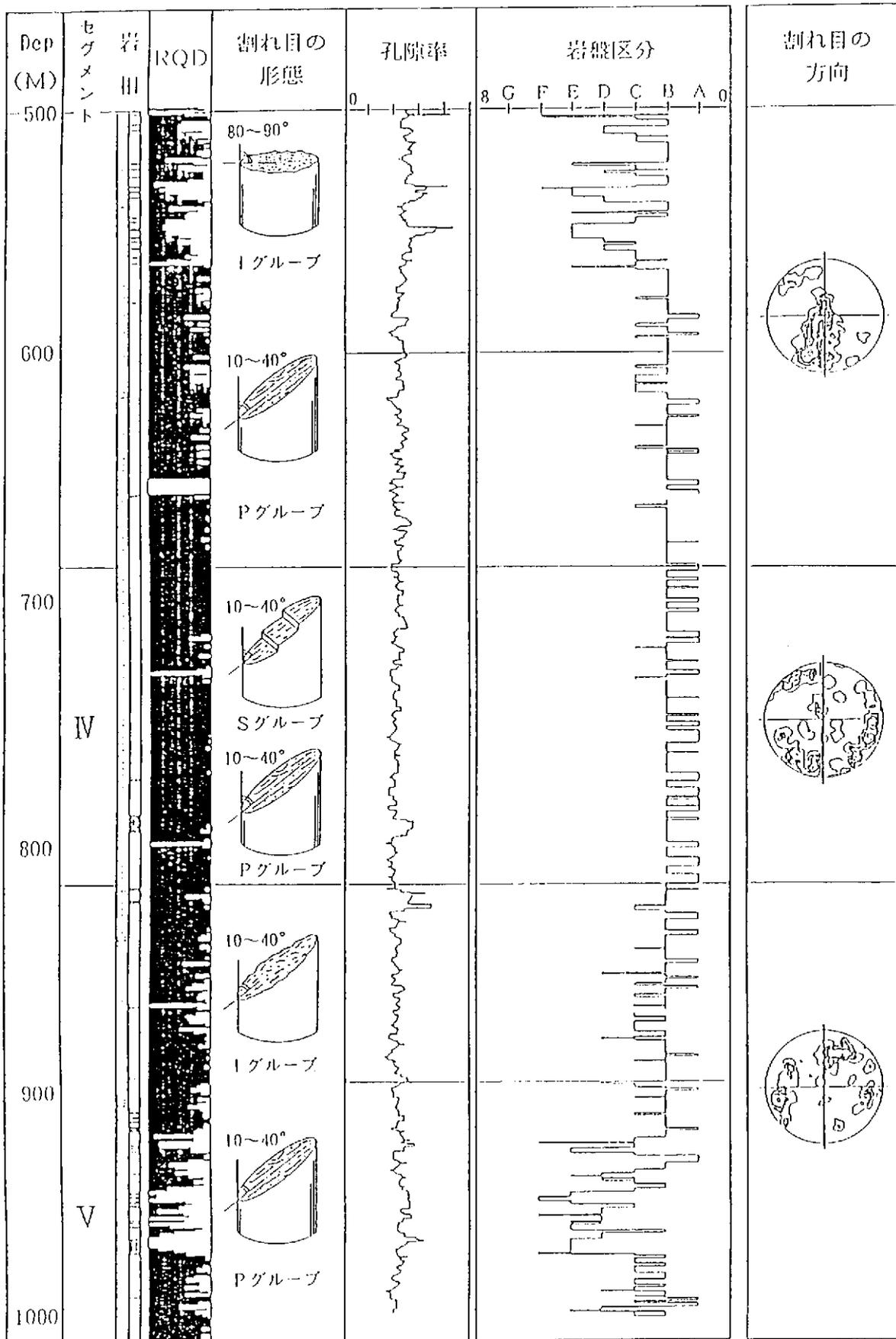


図-5-3(2) AN-1号孔における地質構造区分 (500~1000m)

AN-1号孔Pグループ割れ目の頻度分布

AN-1号孔コア観察可能部分

(%) 100 0

傾斜角度 (90° ~ 40°)

傾斜角度 (40° ~ 0°)

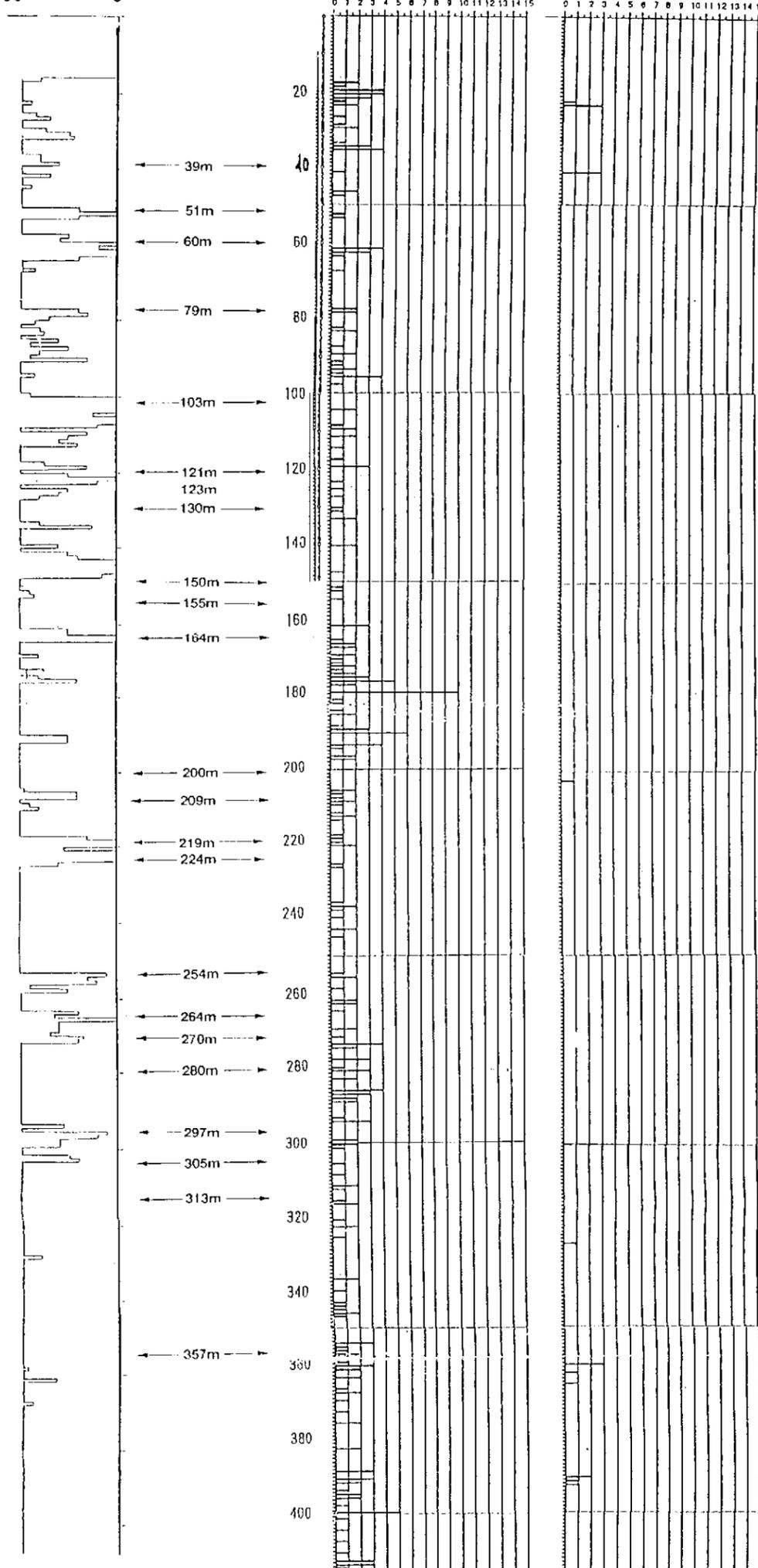


図 5-4 (1) AN-1号孔 P グループ割れ目の頻度分布と VSPで得れた透水性割れ目の深度との比較

AN-1号孔 I グループ割れ目の頻度分布

AN-1号孔コア観察可能部分

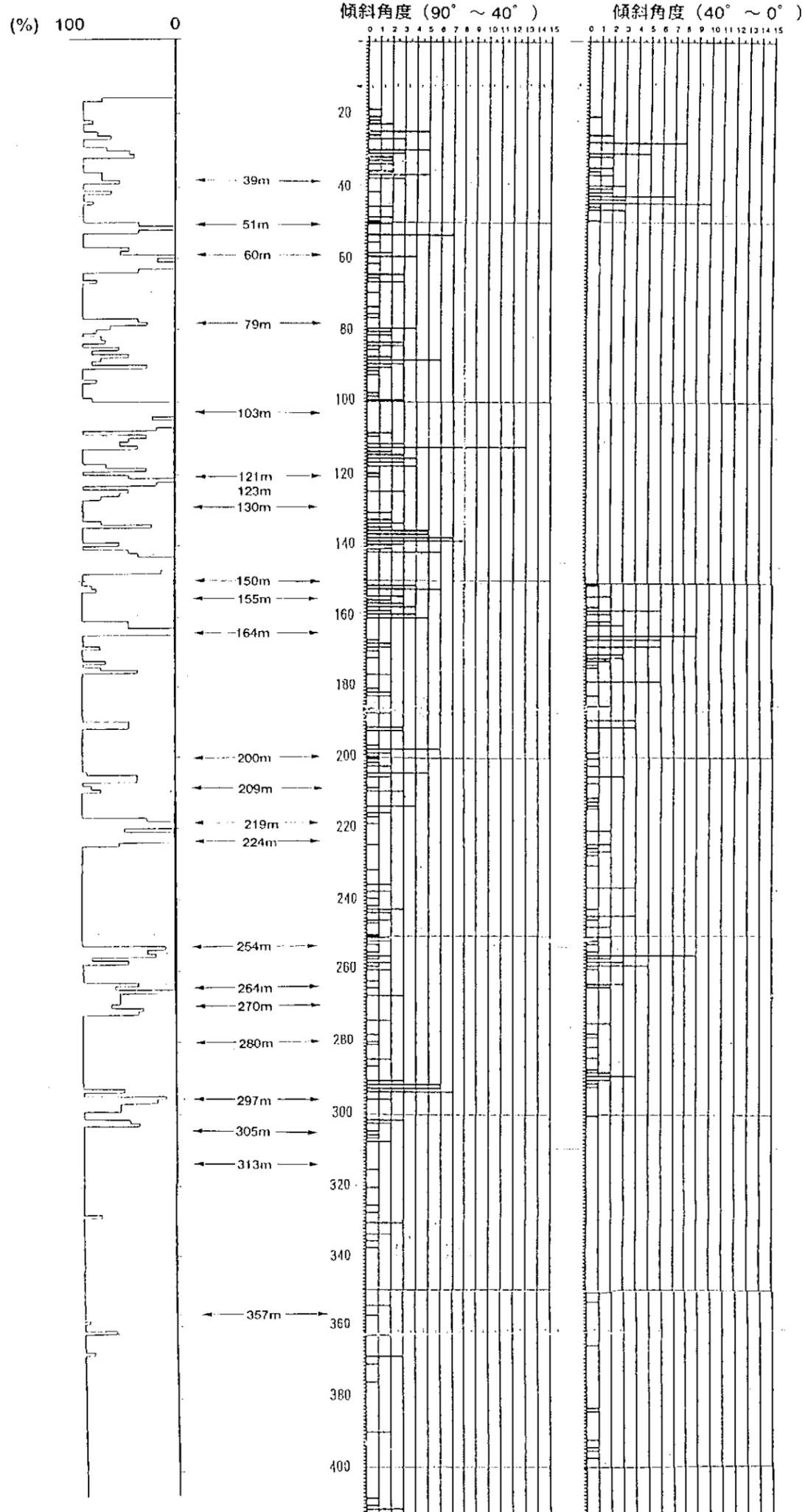


図-5-4(2) AN-1号孔 I グループ割れ目の頻度分布と VSPで得れた透水性割れ目の深度との比較

東濃（正馬様）AN-1号综合柱状図 1:500

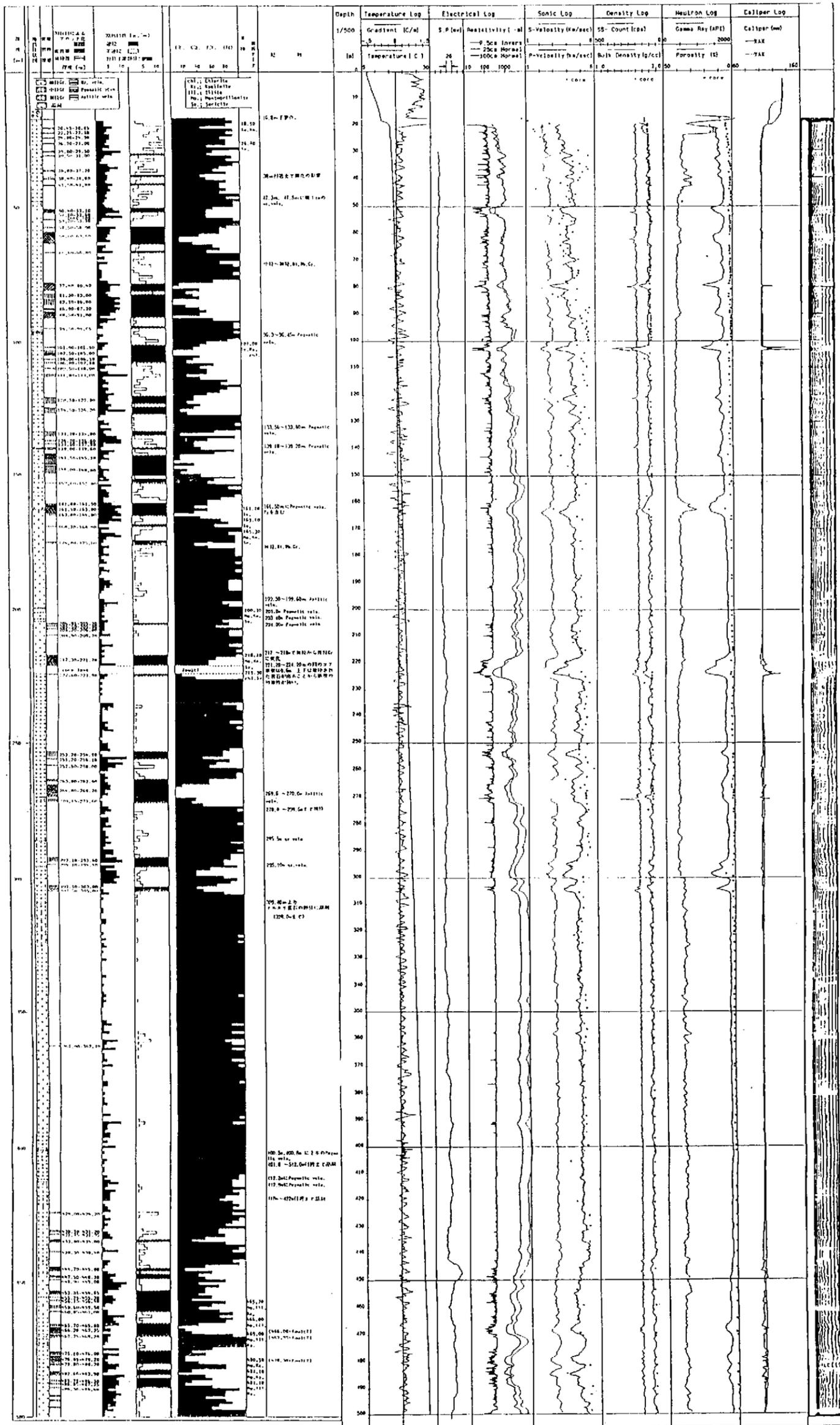


図-5-5(1) 東濃（正馬様）AN-1号孔综合柱状図（0～500m）

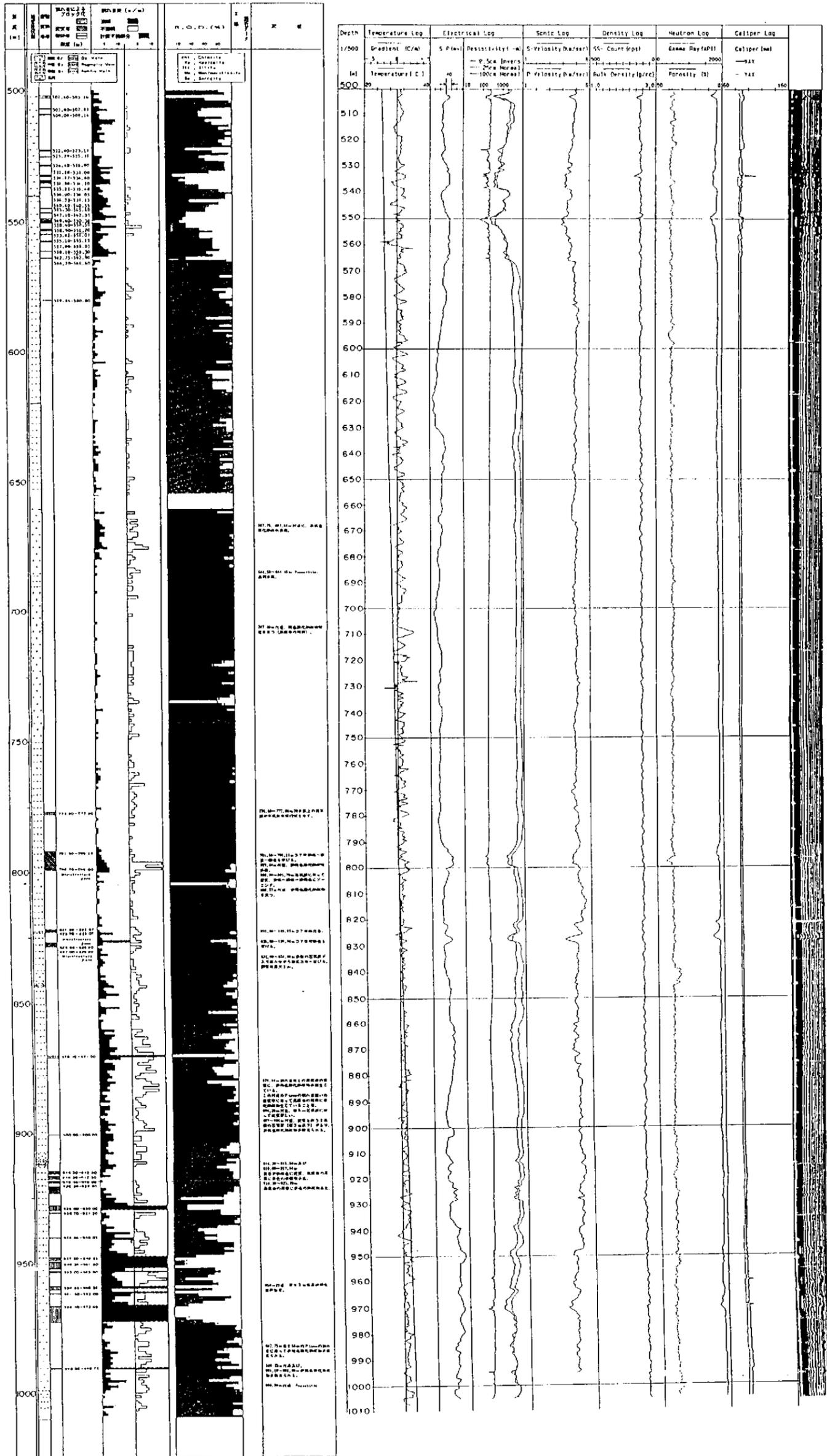


図-5-5(2) 東濃（正馬様）AN-1号孔総合柱状図（500~1000m）

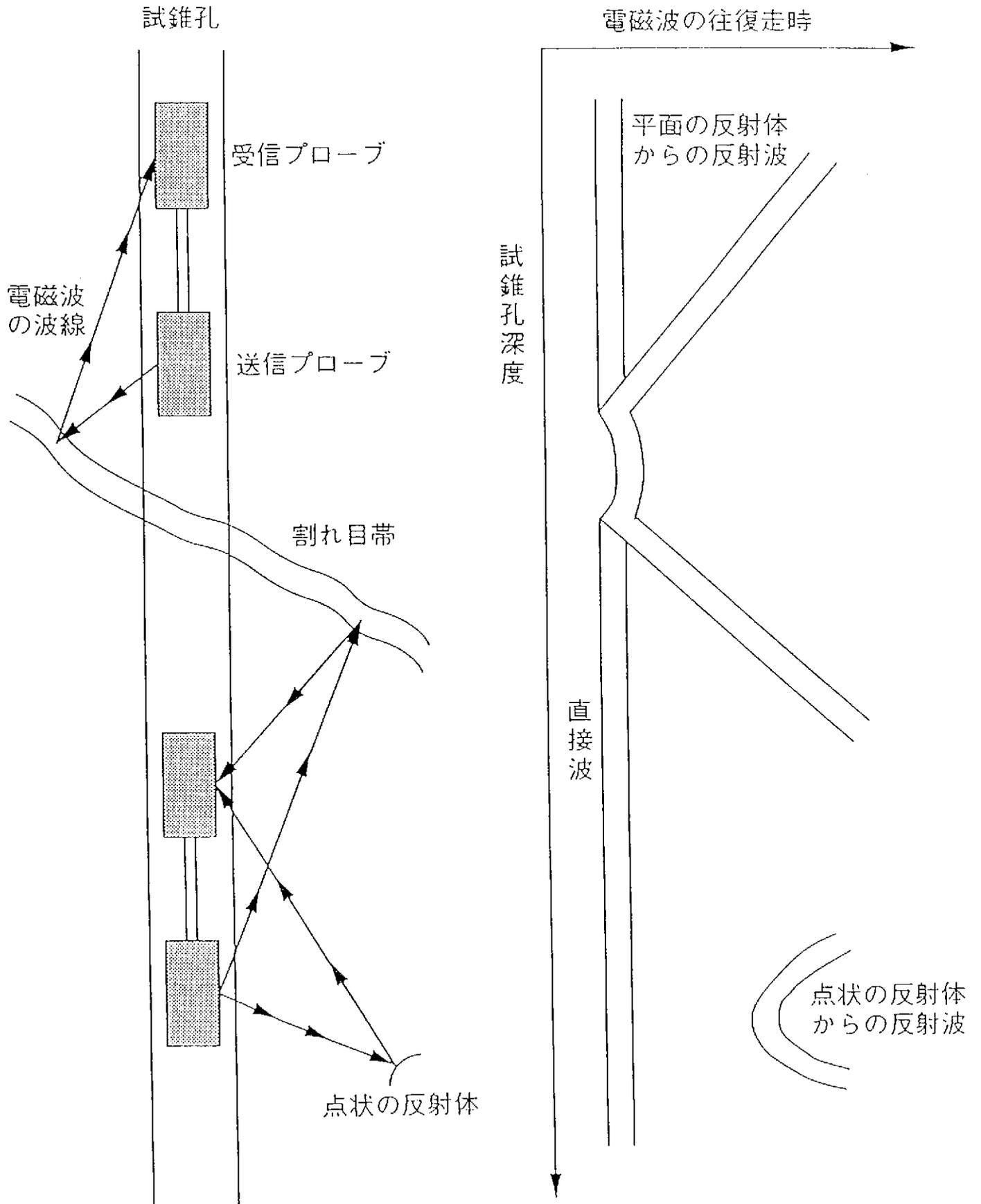


図-5-6 レーダー法シングルホール調査の概念図

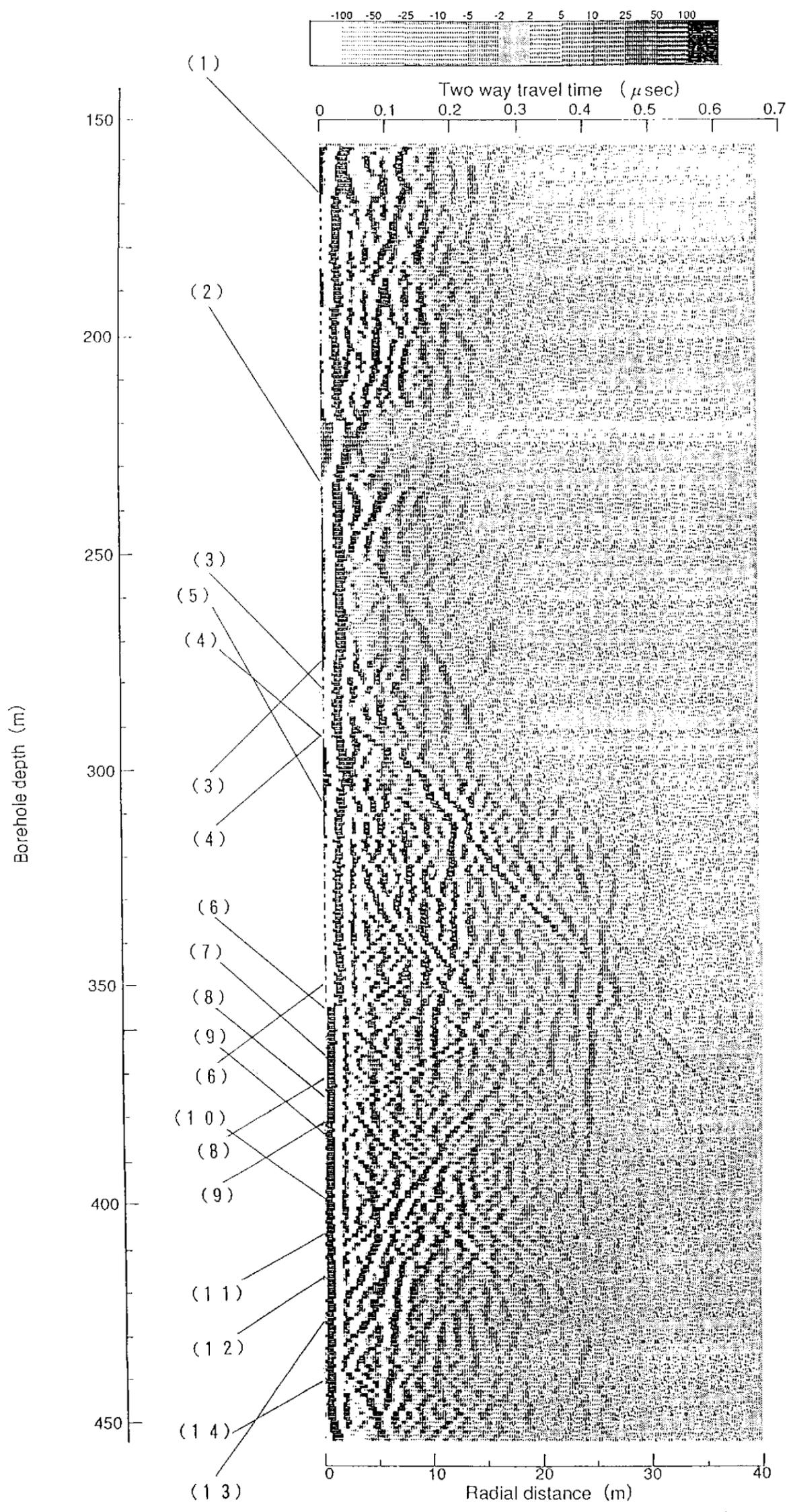


図-5-7 AN-1号孔で得られたレーダー反射図 (150~450m)

6. 検討（総合解析）

チューブ波の発生深度と既存坑井データとの比較

図-6-1にチューブ波の発生深度と水理試験から求めた透水係数および、コア解析から得た割れ目帯深度の3者を比較した。さらに図-6-2では既存の坑井検層データとチューブ波の発生深度とを比較した。

図-6-1から明らかなように、

- 1) 水理試験から求めた透水係数が 10^{-4} cm/sを越える高透水性を持つ区間においてはチューブ波の発生が見られる。
- 2) コア解析から割れ目帯とされた12の深度は、89-90m、141-144mを除いて、チューブ波の発生深度とほぼ対応している。しかし、23個のチューブ波の発生深度のうち、割れ目帯との記載がない深度は11個ある。これは割れ目帯として現れない小さな亀裂からもチューブ波の発生していることを示していると考えれる。

また、図-6-2より、

- 3) 検層で大きな異常を示さない深度（例えば150 m, 155 m, 313 mなど）からもチューブ波が発生していることがわかる。これは検層では検出できない亀裂幅の小さな亀裂からチューブ波が発生していることを示している。

以上の結果は、検層では検出できない亀裂幅の小さな透水性亀裂をハイドロフォンVSP調査法によって検出できる可能性を示している。

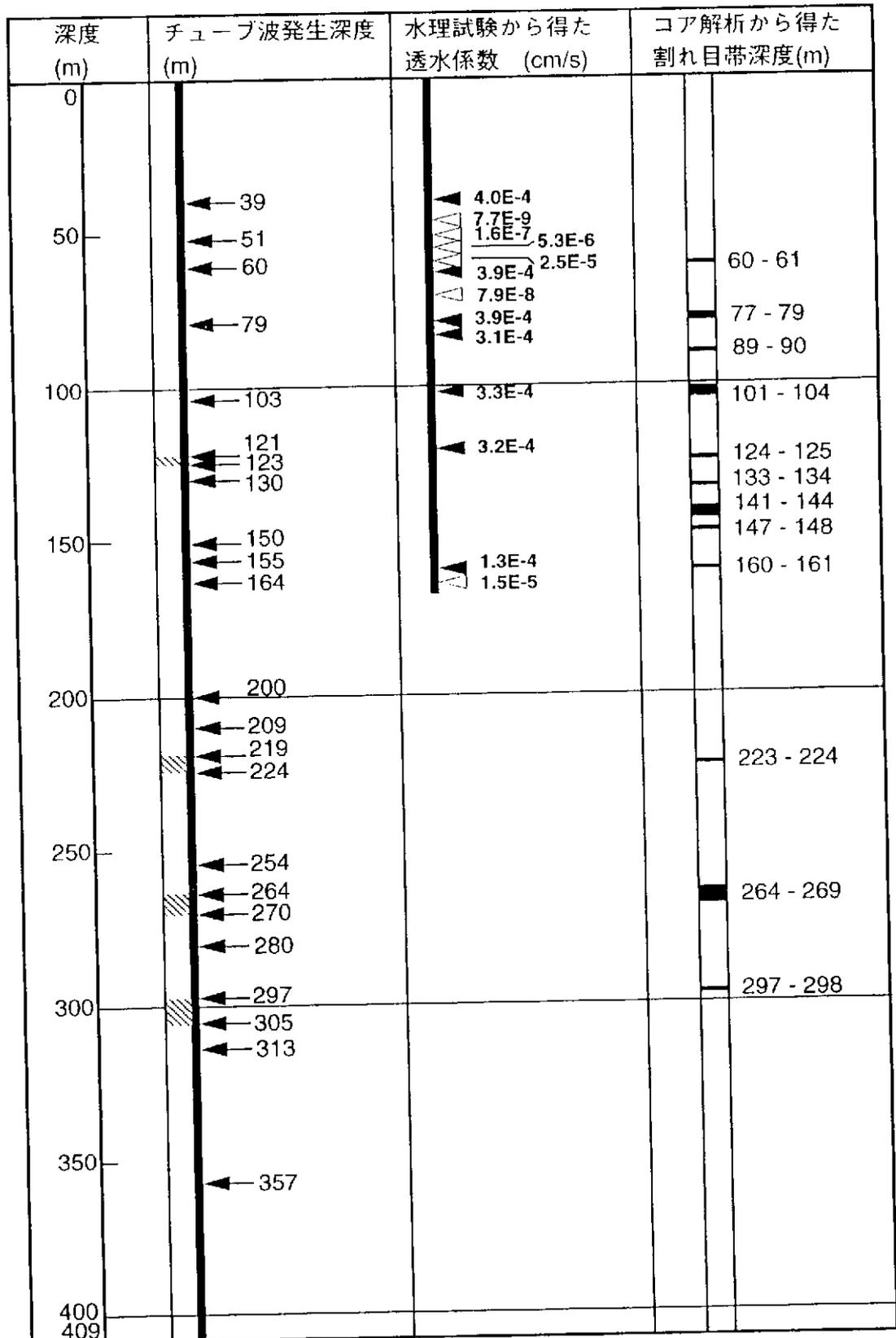


図-6-1 V S P 記録から求めたチューブ波の発生深度、水理試験から得た透水性係数及びコア解析から得た割れ目帯の深度の比較。
 水理試験から得た透水性係数の中で、黒三角は $1.0E-4(\text{cm/s})$ 以上の透水性係数が求めた深度を示し、白三角は $1.0E-4(\text{cm/s})$ 未満の透水性係数が求めた深度を示す。($1.0E-4(\text{cm/s})$ は $100(\text{md})$ である)

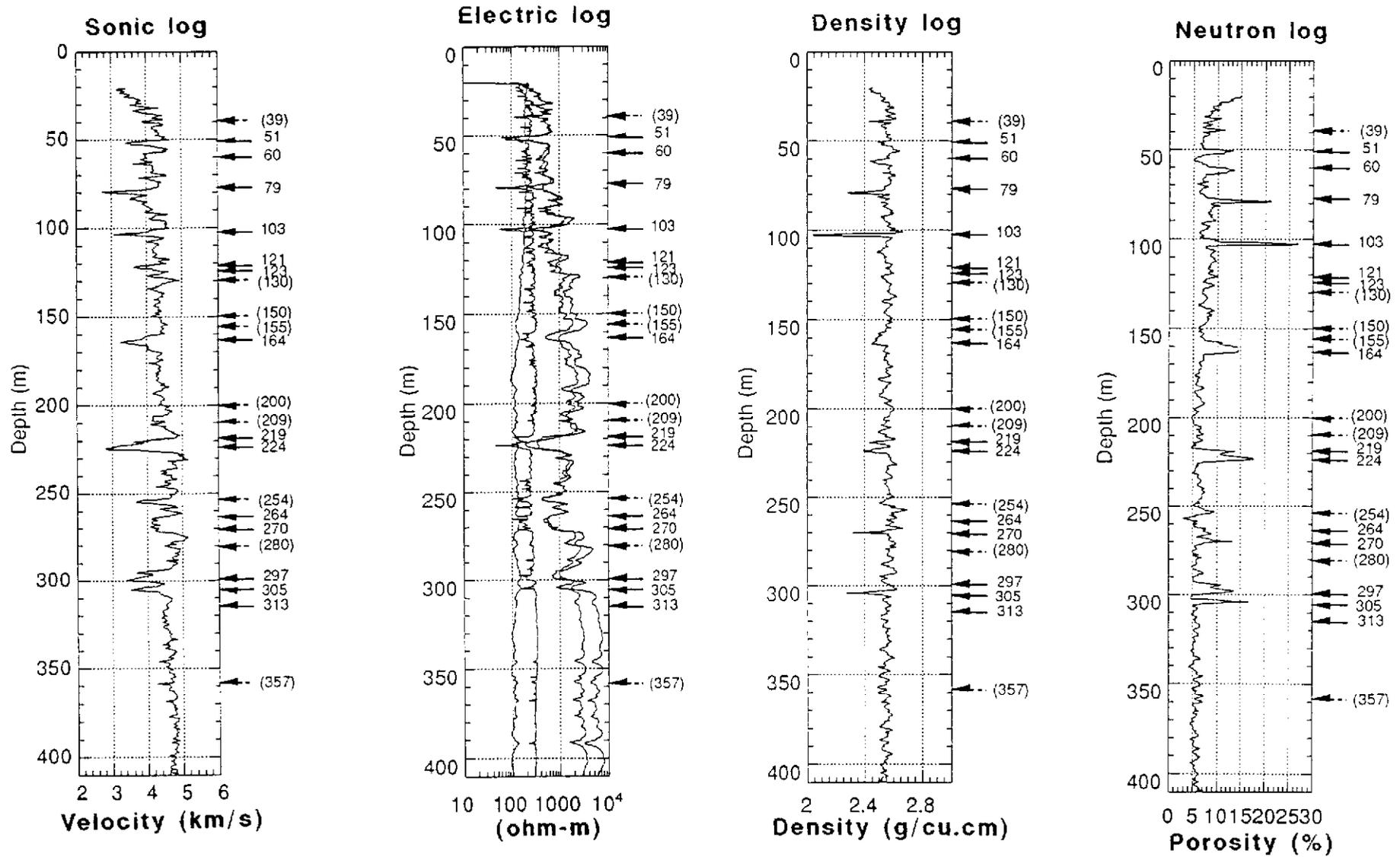


図-6-2 検層結果とチューブ波の発生深度の比較。左から順に速度検層、電気検層、密度検層、中性子検層の結果を示す。チューブ波発生深度を矢印で示す。

7. まとめと今後の課題

共同研究の2年目としてAN-1号孔においてハイドロフォンVSP実験を行った。実験はハイドロフォン深度409 mまで順調に行われた。この結果多くのチューブ波が観測された。これらのチューブ波はその発生深度が水理試験によって高透水性を与えた区間、あるいはコア解析から得た割れ目集中帯深度と良く一致することがわかった。このことより、ハイドロフォンVSP調査法が透水性亀裂の評価に極めて有効であることが実証された。今後、

- 1) チューブ波発生深度と既存孔井データとの比較についてさらに検討を進めるとともに、
- 2) チューブ波の振幅を用いた解析による亀裂の透水係数の推定と既存水理データとの比較、
- 3) マルチオフセットデータによる透水性亀裂の走向・傾斜角の推定と既存孔井データとの比較などについて解析・検討を進める必要がある。

これらの検討結果を踏まえて、

- 4) チューブ波解析で用いる透水性亀裂のモデルの考察
等の課題についても検討を進める必要がある。

今回の適用試験では測定期間等の制約測定深度は409 mにとどまった。今後さらに深部での測定のための問題点の整理を行う必要がある。

参考文献

- Barton, C., and Zoback, M. D. (1992) : Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass scientific drill hole. *J. Geophys. Res.*, 97, 5181-5200.
- Beydoun, W. B., Cheng, C. H. and Toksöz, M. N. (1985) : Detection of open fractures with vertical seismic profiling. *J. Geophys. Res.*, 90, 4557-4566.
- Hardage, B. A. (1983) : *Vertical Seismic Profiling : Principles*. Geophysical Press, London, 509 p.
- Hardin, E. L., Cheng, C. H., Paillet, F. L. and Mendelon, J. D. (1987) : Fracture characterization by means of attenuation and generation of tube waves in fractured crystalline rock at Mirror Lake, New Hampshire. *J. Geophys. Res.*, 92, 7989-8006.
- Huang, C. F. and Hunter, J. A. (1981) : The correlation of "tube wave" events with open fractures in fluid-filled borehole. *Current Res., Part A, Geol. Surv. Can.*, 81-1A, 361-376.
- Huang, C. F. and Hunter, J. A. (1984) : The tube-wave method of estimating in-situ rock fracture permeability in fluid filled boreholes. *Geoprospection*, 22, 245-259.
- 木口努・桑原保人・伊藤久男 (1990) : ハイドロフォンVSP法によるフラクチャーの透水係数の推定, 物理探査学会第82回 (平成2年度春季) 学術講演会講演論文集, 208 - 210.
- 木口努・伊藤久男・桑原保人・中尾信典・大湊隆雄 (1994) : ハイドロフォンVSPで見た透水性き裂と検層記録の比較, 物理探査学会第91回 (平成6年度秋季) 学術講演会講演論文集, 20 - 24.
- 木口努・伊藤久男・桑原保人・中尾信典・大湊隆雄 (1995) : マルチオフセットハイドロフォンVSPによる透水性亀裂の評価, 地質調査所報告, 282, 205 - 225.
- Kiguchi, T., Ito, H., Kuwahara, Y., Nakao, S. and Ohminato, T. (1995) : Evaluation of permeable fractures by multi-offset hydrophone VSP, *Geotherm. Sci. & Tech.*, in press.
- Kitsunezaki, C. (1971) : Field experimental study of shear waves and the related problems, *Contributions, Geophysical Institute, Kyoto University*, 11, 103-177.
- 工業技術院地質調査所・動力炉・核燃料開発事業団 (1994) : 地質調査所・動燃事業団 共同研究報告書「ゼロオフセットS波VSP調査法の亀裂性岩盤への適用試験」, PNC PJ1518 94-001.
- Li, Y. D., Rabbel, W. and Wang, R. (1994) : Investigation of permeable fracture zones by tube-wave analysis, *Geophys. J. Int.*, 116, 739-753.
- 宮川公雄, 田中和広, 井上大栄, 大澤英昭, 柳澤孝一, 山田稔 (1989) : 東濃鉱山における花崗岩の断裂系の特性調査と岩盤評価 (2) - ボアホールテレビジョン装置による深部岩盤割れ目の分布特性 -, 電力中央研究所報告, U91014.

尾方伸久・大澤英昭・中野勝志・柳澤孝一・西垣誠（1992）：堆積岩の地質学的特性および透水係数，見かけ比抵抗相互の関係とその水理的構造モデル化への適用，応用地質，32，321 - 332.

尾方伸久，大澤英昭（1990a）：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術（1），PNC TN741090-005.

尾方伸久，大澤英昭（1990b）：地下水特性調査技術開発の現状，検層技術（1），PNC TN741090-006.

佐久間秀樹，坪田浩二，Olsson, O., Lundmark, L. (1988)：土岐花こう岩におけるRAMACシステムの適用試験，物理探査学会第78同学術講演会予稿集.

Toksöz, M. N., Cheng, C. H. and Cicerone, R. D. (1992) : Fracture detection and characterization from hydrophone vertical seismic profiling data, in EVANCE, B. and WONG, T., eds., Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, Academic Press, New York, 389-414.

White, J. E. (1993) : Underground Sound, Elsevier Science Publ. Co., Amsterdam, 253p.

吉田英一，大澤英昭，柳澤孝一，山川稔（1989）：深部花崗岩中の割れ目解折―岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして―，応用地質，30，11 - 22.