

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2)

(共同研究報告書)

1997年

地質調査所

動燃事業団東濃地科学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Geotechnics Development Section. Tono Geoscience Center. Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi, Gifu-ken 509-51, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1997

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V S P調査法の適用試験を実施した。本実験の目的は、V S Pで観測されるチューブ波を解析することにより得られる透水性亀裂に関する情報と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V S P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。

発破震源と重錘落下震源の2種類の震源を用いて適用試験を実施したところ、重錘落下震源によるV S P記録は、発破震源の記録に比べてS/Nが低く低周波数であった。しかし、適切なデータ処理を行うことにより、深度20m～559mの範囲の内、19深度でチューブ波の発生が確認でき、発破震源と同様に重錘落下震源を用いたハイドロフォンV S P調査から透水性亀裂を検出できることを示した。

発破震源によるマルチオフセットハイドロフォンV S Pデータを用いて、深度20m～609mの範囲で15のチューブ波発生深度について解析を実施し、透水性亀裂の走向、傾斜角、透水係数を求めた。透水係数の多くは100mdのオーダーで求められた。

B T V記録を用いて、全てのチューブ波発生深度に亀裂が存在することを確認した。チューブ波解析から求めた亀裂の走向と傾斜角の値を、B T V記録から得られた値と比較した結果、単一の亀裂が確認された深度などいくつかの深度で両者の値は良く一致したが、複数の亀裂が確認された深度などで両者の値が一致しない場合があった。両者の値が一致しないことについて検討したが、決定的なことはまだ明らかではない。

本報告書は、ハイドロフォンV S P調査における重錘落下震源の適用性ならびにチューブ波解析結果（走向、傾斜角）とB T Vデータとの比較検討を中心にまとめたものであり、チューブ波解析による透水係数に関する検討は「その3」として報告書に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 2)

ABSTRACT

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

From the VSP experiment using weight drop as seismic source, 19 tube wave generations are detected from 20m to 559m depth. We confirm that VSP experiment using weight drop is effective for detecting permeable fractures as well as one using dynamite explosion.

We calculate fracture dip, strike and permeability at 15 depths from VSP data using dynamite explosion as source. Most of the calculated permeability are of the order of 100md. By using BTV image, fractures are detected at all depths where tube waves are generated. Fracture dip and strike estimated by tube wave analysis are consistent with the results of BTV image at some depths. However, there are some cases that dip and strike by tube wave analysis are different from those by BTV image. The reason why this discrepancy between tube wave analysis and BTV image has occurred is not clear at the present time.

Permeability estimated by tube wave analysis will be discussed in ' part 3' report.

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・傾斜角の推定	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 震源	4-2
4-2-2-1 発破震源	4-2
4-2-2-2 重錘落下震源	4-3
4-2-3 データ収録	4-3
4-2-4 データ取得結果	4-3
4-3 データ処理・解析	4-4
4-3-1 発破震源データ	4-4
4-3-2 重錘落下震源データ	4-6
4-4 検討	4-7
4-4-1 発破震源データ	4-7
4-4-2 重錘落下震源データ	4-8
5. 発破震源データを用いたチューブ波解析	5-1
5-1 チューブ波解析による透水性亀裂の特性	5-1
5-2 チューブ波解析結果とBTV記録の比較	5-2
6. まとめと今後の課題	6-1
参考文献	

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、広域の地下水の流动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动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というVSP調査法の技術開発を実施している。この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た。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、3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-1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、ハイドロフォンVSP調査法の適用試験結果のうち、その2として、3年目に実施した発破及び重錘落下の震源によるVSP調査で検出されたチューブ波の発生深度と、発破震源のVSP記録を用いたチューブ波解析による透水性亀裂の特性を中心にまとめたものである。

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	中尾 信典	青木 和弘
大湊 隆雄	宮崎 光旗	大澤 英昭
木口 努		長谷川 健
桑原 保人		三戸 嘉之

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、ボアホールレビュアー (BHTV)、フォーメーションマイクロスキャナー/フルボアフォーメーションマイクロイメージヤー (FMS/FMI)、ボアホールレビ (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

ボアホールレビやレビュ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、亀裂が開口性か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る。しかし、以上的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、透水性亀裂を検出し、透水性亀裂の亀裂透水係数および走向・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（木口ほか, 1996），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な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パ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パ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パッカー区間に内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、どの亀裂がそのパ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り、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と考えられるが、実用化にあたってはいくつかの課題があることがわかつてきた。そのひとつがチューブ波解析によって得られる亀裂の透水係数を定量的に評価することである。地質調査所の今までの実験では、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の測定結果およびボアホールテレビ（BTM）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ができる。

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、亀裂調査結果と対比することにより、ハイドロフォンVSP調査法による透水性亀裂の特性の把握を評価することができる。このことを目的とし、AN-1号孔を受振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。また、今回は、ハイドロフォンVSP調査における重錘落下震源の有効性を調べるために、震源として、ダイナマイトによる発破と重錘落下の2種類を用いた。

表2-1 龟裂観察各手法の比較

方法	龟裂形態			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	○	○	○		
BTW	○	○	○		
ボーリングレーダー	○			○	△
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	
S波-VSP				・S波異方性解析による 龟裂の配向、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、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う。

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レビュアー（BHTV）がある。BHTV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バー検層で検出できるが、キャリバ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を調べる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知ることが必要である。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調査法を利用する事が試みられている。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。Kitsunezaki (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。3-2, 3-3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)が示す亀裂の透水係数を求める方法は、上述した亀裂のモデル化の仮定の他は、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る方法を示す。

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基本的な考え方は、

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 ζ は入射P波の変位 u と次の関係がある。

$$\zeta = u \cdot \cos \theta$$

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次元の線形層流で、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

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

と表すことができる。

ここで

P^T/P^a : チューブ波とP波の振幅比

k : 亀裂の透水係数

f : P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, 孔井の半径, 孔内流体の圧縮率, 孔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, 孔井が鉛直であり, 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, 孔井が鉛直であり, 亀裂の透水係数を50mdとしたときに, 亀裂の傾斜角 θ を $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ と変化させた場合の理論曲線である。

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BHTV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・傾斜角の推定

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BHTVなど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。

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

..... (3-2)

ここで

$(P^T/P^S)_{SH,i}$: 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

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

$\phi_{SH,i}$: 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 $\phi_{SH,i}$ 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。従つて、 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 解くことができる。 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	well 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

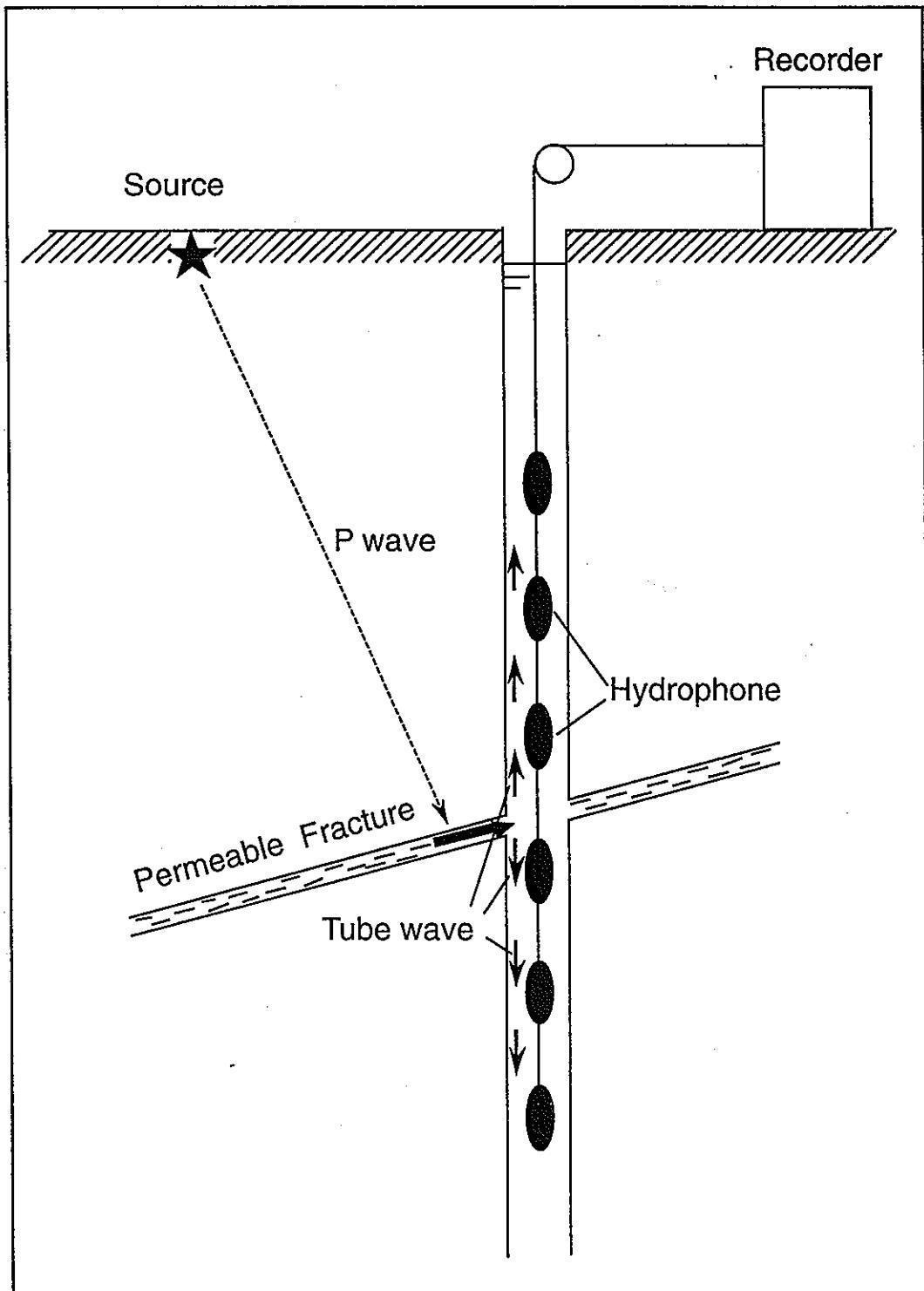
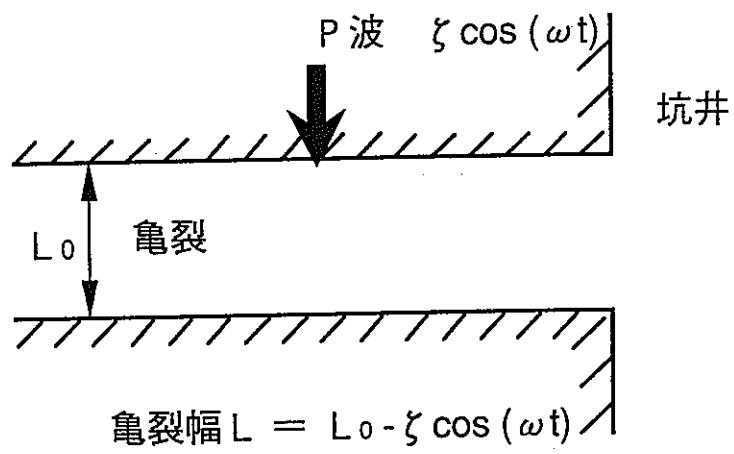


図3-2-1 透水性亀裂においてP波からチューブ波が発生するメカニズム

Beydoun et al. (1985) モデル



Li et al. (1994) モデル

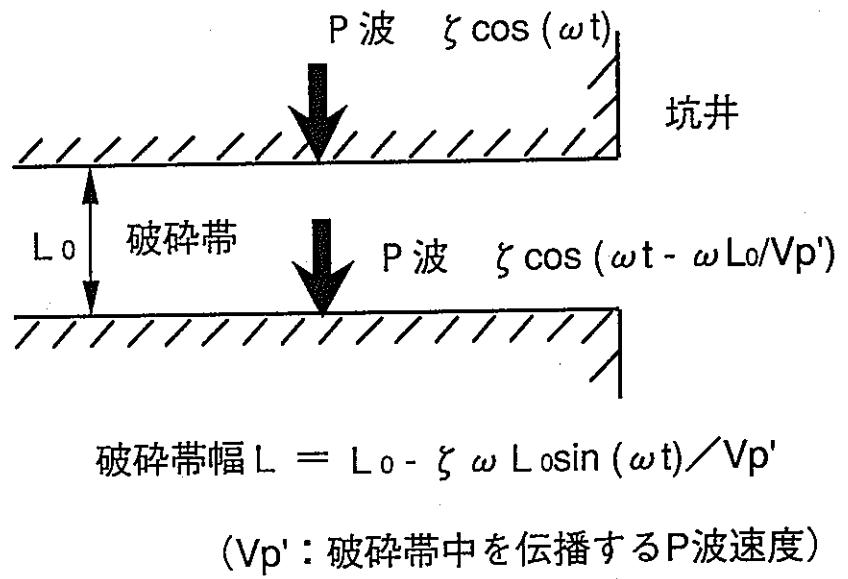


図-3-3-1 Beydoun et al.(1985)のP波の入射による亀裂幅の変化量の与え方と
Li et al.(1994)のP波の入射による破碎帯幅の変化量の与え方の比較.

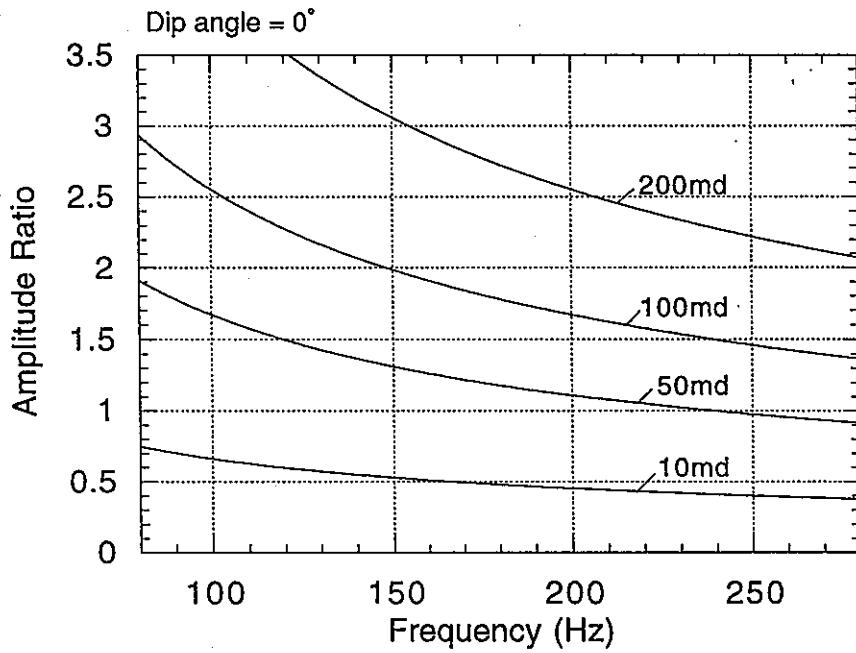


図3-3-2 チューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を示す理論曲線。ゼロオフセットで亀裂の傾斜角が0°の場合に、亀裂の透水係数を10md, 50md, 100md, 200mdと変化させたときの理論曲線を示す。

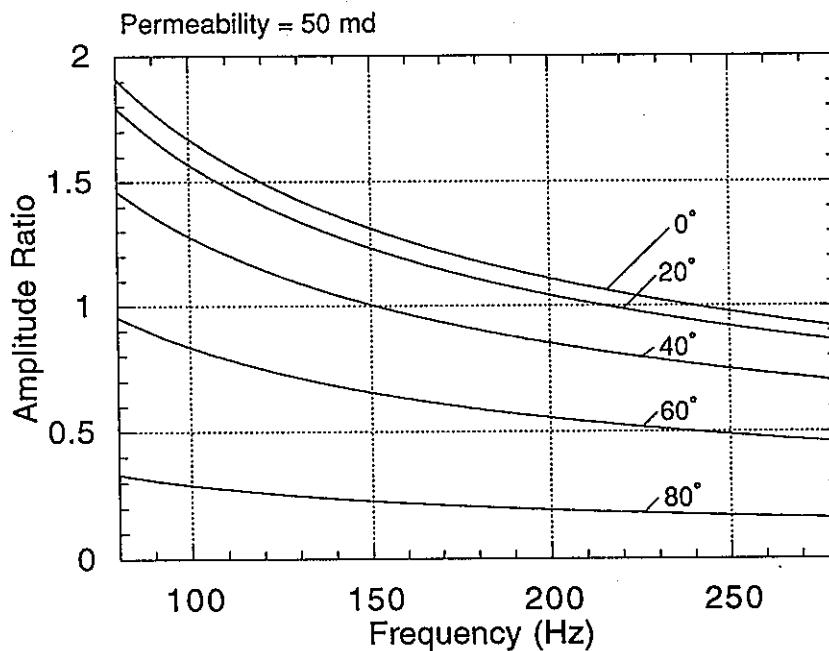


図3-3-3 チューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び亀裂の透水係数の関係を示す理論曲線。ゼロオフセットで亀裂の透水係数が50mdの場合に、亀裂の傾斜角を0°から80°まで変化させたときの理論曲線を示す。

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・閃綠岩などから成り、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1～3m）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号孔を受振孔とし、ダイナマイトの坑内発破による震源と重錐落下による震源の2種類の震源を用いたマルチオフセットハイドロフォンVSP実験を行った。坑内発破に用いた坑井は5本であり、そのうち3本は新たに掘削した。重錐落下震源は発破孔敷地内及び道路脇の2カ所に設置した。受振器として10連のハイドロフォンをAN-1号孔に入れて測定した。データ収録はAN-1号孔敷地内の観測小屋で行った。震源信号補正用の地上地震計の記録と各震源からのトリガー信号は観測小屋まで敷設したケーブルにより伝送した。収録装置で収録したデータは、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 震源

4-2-2-1 発破震源

発破孔

発破孔は、図4-2-1に示す、SH-1A, SH-2A, SH-3, SH-4, SH-5の5孔を用いた。このうち、SH-1A, SH-2A, SH-5の3孔は新たに掘削した。SH-3孔は平成6年度のマルチオフセットハイドロフォンVSP実験の発破孔として掘削されたものである。発破孔の諸元を表4-2-1に示す。

発破孔位置の測量結果を表4-2-2と図4-2-2に示す。測量はトランシットを用いた開放トラバースによる。表4-2-2にSH-1AとSH-2Aの2孔の測量結果が示されていないが、それぞれSH-1とSH-2から数m離れた地点に掘削されている。

発破方法

震源として、電気雷管（深海用（500m）8号電気雷管）及びダイナマイト（深海用桐ダイナマイト）を用いた。また、発破器には、応用地質製サイスマックスターMODEL-1340, 1305及び北斗理研製地震探査用発破器GB-100を使用した。

発破孔内に爆薬を所定の深度まで吊り下ろし、孔内をケーシング口まで注水した。さらにプラスティングマットで発破孔を覆った後、発破した。吊り下ろし方法は、メガネピンの錘とワイヤーロープを用いて行い、発破母線をワイヤーに沿って紐状に一体化したものを使用した。装薬はメガネピンの先に取り付けた竹ひごに装着した（図4-2-3）。所定の深度を確認するためにワイヤーにテープ及びメジャーを巻き付けて確認した。発破母線と電気雷管の結線部にはプロタイトを使用した。ケーシング継目深度では発破しないように留意した。

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。

4-2-2-2 重錘落下震源

重錘落下型の震源として、グリックス愛知（株）製オートハンマーWAH3400型（2台）を使用した。この震源装置は車載型で自走できる特徴を有する。この震源装置を用いて、400kgの重錘を高さ3mから地表の鉄板に自由落下させ発震した。鉄板にはトリガーセンサーを取り付けている。鉄板の下には砂利を敷き、重錘が地面にめり込まないようにした。発震作業中に適宜、砂利を追加した（図-4-2-4）。

重錘落下震源は、SH-1A発破孔から約50m離れた道路脇とSH-4発破孔敷地のSH-4孔の近傍にそれぞれ1台ずつ設置した。それぞれの位置をWD-1, WD-4とする。震源位置を図-4-2-2に示す。当初、WD-1をSH-1A孔の近傍に設置することを計画したが、SH-1A孔の周囲は草地であり震源の搬入ができないため、SH-1A孔の近くの道路脇に設置した。

4-2-3 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、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、降下前との差はほとんど見られなかった。ハイドロフィオ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-4-2-6）。

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、地上地震計（マークプロダクツ社製L-22）を2台設置し、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

ハイドロフォンからの信号はOYO GEOSPACE社製DAS-1（図-4-2-7）の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、発破震源の場合は、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、また、重錘落下震源の場合は、震源作業員に重錘の落下を無線によって指示した。発破及び重錘落下の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4-2-8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。

4-2-4 データ取得結果

平成7年11月14日より11月20日までの7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。このうち、11月14日より11月17日まで、重錐落下震源によるVSPデータを取得した。表4-2-5に示すようにハイドロフォン深度は、WD-1発震の場合20.0m～559.0mであり、WD-4発震の場合20.0m～509.0mである。同一受振深度で発震を繰り返すスタック回数は、受振深度が深くなるにしたがい増加し、3回から30回までとした。スタック回数は現地におけるモニター記録及び予備的なデータ処理の結果から決定した。

11月17日から11月20日まで、発破震源によるVSPデータを取得した。表4-2-6に示すようにハイドロフォン深度は、SH-1A, SH-2A, SH-3, SH-4孔発震の場合400.0m～609.0mであり、SH-5孔発震の場合50.0～609.0mである。ダイナマイト量は、SH-1A, SH-2A, SH-3, SH-4孔では50g (SH-2AとSH-4孔の受振深度570.0～599.0mでは100g) とし、SH-5孔では100gとした。いずれの場合もスタックは1回のみである。SH-1A, SH-2A, SH-4, SH-5孔については最後まで同一の深度で発震することができた。SH-3孔は、測定の途中で発破孔へのダイナマイトの挿入が困難となつたため、深度を1.5m変更して発震を行った。

4-3 データ処理・解析

4-3-1 発破震源データ

AN-1号孔の深度400m～609mのチューブ波発生深度を求めることが主な目的とし、データ処理・解析を行った。なお、平成6年度のVSP記録から、AN-1号孔の400m以浅の深度区間におけるチューブ波の発生深度をすでに求めている。

データ処理として、取得したショット記録を深度順に並べるトレース編集を行った。取得したショット記録を深度順に編集した。1m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

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、それぞれの深度順に編集した。

図-4-3-1～図-4-3-5にそれぞれSH-1A, SH-2A, SH-3, SH-4, SH-5号孔発震による深度400m～609mのVSP記録を示す。また、図-4-3-6、図-4-3-7にSH-5号孔発震による深度50m～400m及び50m～609mのVSP記録をそれぞれ示す。これらの図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、フィルター処理は行っていない。図-4-3-8～図-4-3-11に、SH-1, SH-4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。

それぞれのVSP記録で、初動P波から発生するいくつかのチューブ波が確認できる。VSP記録からチューブ波の発生深度を求めるときには、メディアンフィルタを用いて上方進行または下方進行のチューブ波を強調する処理が行なわれることがある。その処理の例を図-4-3-12と図-4-3-13に示す。これらの図は、SH-1A号孔発震記録からメディアンフィルタにより、それぞれ、下方進行チューブ波を取り除いた記録と上方進行チューブ波を取り除いた記録である。今回のVSP記録では、初動P波からのチューブ波の発生が明瞭であるため、メディアンフィルタ処理を行った記録と元のVSP記録からそれぞれ求めたチューブ波の発生深度に違いはなかった。

発破震源によるVSP記録から求めた深度400～609m区間のチューブ波の発生深度を図-4-3-14に示す。すべてのオフセット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-4-3-14に丸印付の矢印で示す次の4深度である。

467～469m, 478m, 492m, 549m.

なお、467m～469mの深度はこの深度区間全体からチューブ波が発生している可能性があるため、現時点では区間として求めている。

また、一部のオフセットVSP記録でのみチューブ波の発生が確認される場合があり、これらの深度は、図-4-3-14に矢印のみで示す次の11深度である。

411m, 422m, 430m, 436m, 441m, 452m, 482m, 486m, 503m, 531m, 552m.

一部のオフセット記録でのみ発生が確認されるチューブ波は、すべてのオフセット記録で発生が確認されるチューブ波に比べて、振幅が小さいという特徴を示す。チューブ波の発生が一部のオフセット記録でのみ確認される原因として、以下のことが考えられる。Beydoun et al. (1985) によるチューブ波発生のモデルによれば、入射P波と亀裂面の法線方向のなす角度が 90° に近くなると、チューブ波が発生するエネルギーが小さくなる。従って、あるオフセット位置について入射P波と亀裂面の法

線方向のなす角度が90°に近くなり、かつ、亀裂の透水係数が小さい場合、発生するチューブ波が通常のVSP記録では確認できないほど小さくなると考えられる。

各VSP記録からわかるように、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。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された深度では、初動P波の振幅もその区間全体で増加する傾向にある。今回は、初動P波振幅がチューブ波発生深度で大きくなる現象も利用して、VSP記録からチューブ波の発生深度を求めた。

4-3-2 重錐落下震源データ

重錐落下震源によるVSP記録からチューブ波の発生深度を求める目的とし、4-3-1に示す発破震源データの場合と同様のデータの処理・解析を行った。

重錐落下震源は発破震源に比べてエネルギーが小さいことがあらかじめ予想され、また、このことはデータ取得時の予備的な処理においても確認されたので、VSP記録のS/N比を向上させるために、データ取得時に、同一受振深度で発震を繰り返すスタックを行っている。

VSP記録として、まず、スタック処理を行わない、つまり各受振深度で取得した1ショット目の記録を編集したVSP記録を、WD-1震源とWD-4震源について図4-3-15、図4-3-16に示す。受振深度はそれぞれ、20m～559mと20m～509mである。またこれらのVSP記録について深度方向を拡大した記録を図4-3-17～図4-3-27に示す。これらの図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。

次に、S/N比を向上させることを目的とし、スタック処理したVSP記録を示す。表4-3-1に示すように、3～30回のスタックデータを取得している。これらの記録は1ショットずつデータ収録しており、スタック処理を行う際には、各ショットでトリガー時刻がずれていないか、大きなノイズがないか等を検討し、不適と判断したショット記録はスタック処理に用いていない。例えば、各ショット記録を見ると、重錐の下に砂利をいれた直後に、トリガー時刻がずれ、初動振幅が小さくなる傾向を示した。これらの記録はスタック処理に加えていない。データ処理時に行ったスタック回数が表4-3-1に示されている。スタック処理を行ったVSP記録を図4-3-28、図4-3-29に示す。また、深度方向を拡大した記録を図4-3-30～図4-3-40に示す。

重錐落下震源は発破震源に比べて、震源エネルギーが小さいので、VSP記録のS/N比が低いということの他に、観測されるP波やチューブ波が低周波数となる問題点がある。初動P波やそれから発生

するチューブ波が低周波数であると、VSP記録上でこれら波形の分離ができず、チューブ波の発生深度を特定することが困難になる場合がある。このため、VSP記録を見掛け上高周波数とすることを目的として、上記のスタック処理したVSP記録についてローカットフィルタによるフィルタテストを行った。100Hz, 200Hz, 300Hzの3種類のローカットフィルタを用い、それぞれのテスト結果を比較すると、初動P波から発生するチューブ波の波形に違いが見られる場合があるが、求められる発生深度はほぼ同じであった。ここでは、スタック処理した記録に100Hzのローカットフィルタ処理を行ったVSP記録を図-4-3-41、図-4-3-42に示す。また、深度方向を拡大した記録を図-4-3-43～図-4-3-53に示す。

スタック処理と100Hzのローカットフィルタ処理を行ったVSP記録から、チューブ波の発生深度を求めた。WD-1発震またはWD-4発震の記録から、深度20m～559mの区間でチューブ波の発生を確認した深度は図-4-3-54に示すように以下の19深度である。

39m, 52m, 61m, 79m, 103m, 121m, 123m, 130m, 150m, 164m, 168m, 219～224m, 254m;
264～270m, 305m, 467～469m, 478m, 492m, 503m.

図-4-3-54には、重錘落下震源による記録から求めたチューブ波発生深度と比較するために、平成6年度と今回の発破震源によるVSP記録から求めた、深度20～609m区間のチューブ波発生深度を示している。この比較から、発破震源の記録においてすべてのオフセット記録から発生が認められる、振幅の大きい明瞭なチューブ波については、重錘落下震源の記録からもその発生が確認できる。つまり、重錘落下震源の記録からも、チューブ波発生深度を求めることができることが示された。しかし、発破震源の記録で一部のオフセット記録からのみ発生が認められたチューブ波については、重錘落下震源の記録ではその発生が確認できない場合がある。また、重錘落下震源の記録では、チューブ波の発生が確認できる場合においても、その発生深度を特定することが困難な場合があることがわかった。

4-4. 検討

4-4-1 発破震源データ

発破震源のVSP記録から求めた深度400mから609mまでのチューブ波発生深度と既存の坑井検層データとの比較を図-4-4-1に示す。各種検層で大きな異常を示す深度ではチューブ波が発生しており、両者がよく対応していることがわかる。すべてのオフセット記録からチューブ波の発生が確認された4深度（467～469m, 478m, 492m, 549m）では、各種検層で特に大きな異常を示しており、これらの深度に大きな透水係数を持つ透水性亀裂の存在が推定される。深度450m以浅では、それ以深に比べ

て検層は大きな異常を示さないが、チューブ波はいくつかの深度から発生している。深度450m以浅のチューブ波発生深度については、チューブ波が一部のオフセット記録で小さな振幅として確認されていることと、検層で大きな異常を示さないことから、これらの深度の透水性は、チューブ波の振幅が大きく、検層で大きな異常を示すチューブ波発生深度に比べて、低いと予想される。

4-4-2 重錘落下震源データ

重錘落下震源は、一般に、発破震源に比べて、安価であること、取り扱いが簡単であること、発震位置の設定に自由度があることなどの利点があるため、今回の実験で用いた。しかしながら、重錘落下震源には、発震エネルギーが小さいことや発生するP波の周波数が低いという欠点がある。このため、4-3節に示したVSP記録から明らかのように、重錘落下震源による記録は低分解能でS/N比は低くなっている。発破震源と重錘落下震源のエネルギーと周波数を比較するために、同一受振深度における初動P波の振幅値と中心周波数を、SH-1A震源とWD-1震源、及びSH-4震源とWD-4震源について求めた。その結果を表4-4-1、表4-4-2に示す。発破は坑井内で行っており、重錘落下震源と発破震源の位置は異なるため、2つの震源の厳密な比較はできないが、表4-4-1と表4-4-2から両者のおおよその比較を行うと、重錘落下震源によって発生する初動P波は、発破震源に比べて中心周波数が約1/3～1/4と低くなり、振幅が約1/3～1/5と小さくなっている。

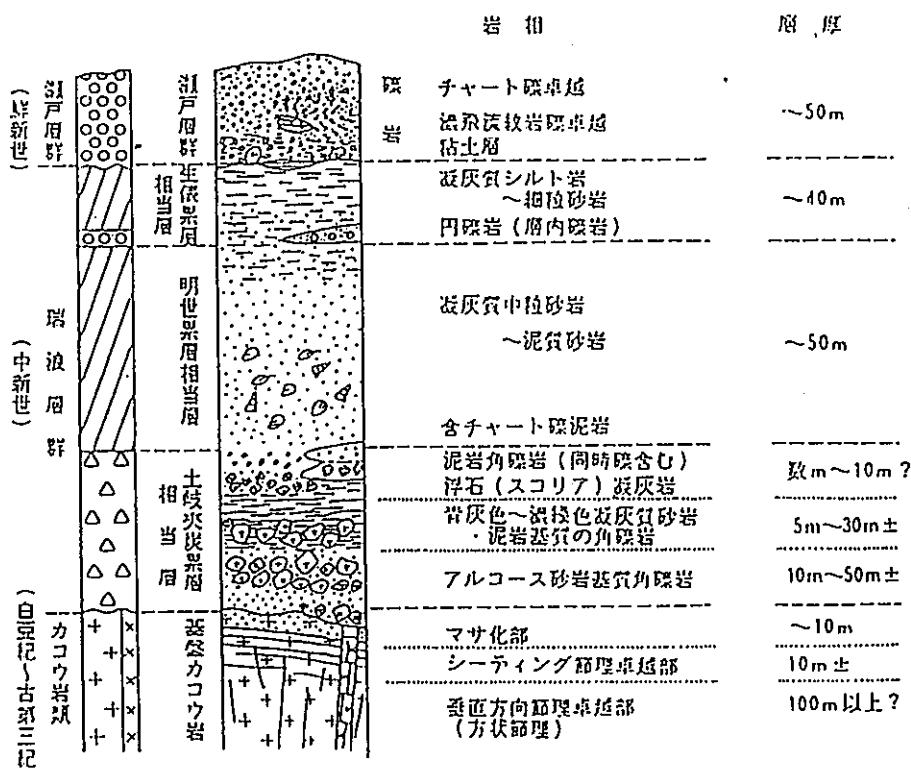
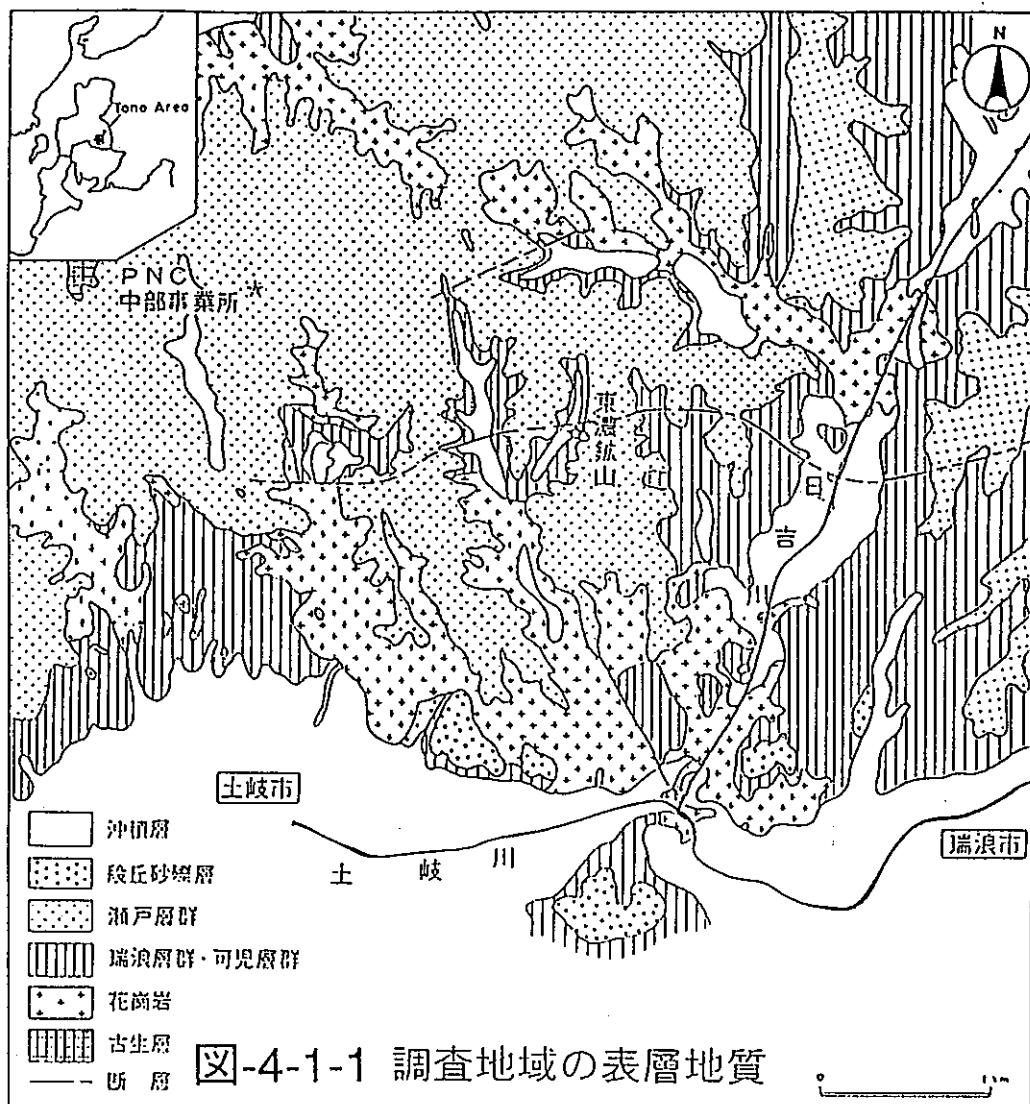


図-4-1-2 調査地域模式地質柱状図

岐阜県瑞浪市明世町月吉字正馬様洞地内

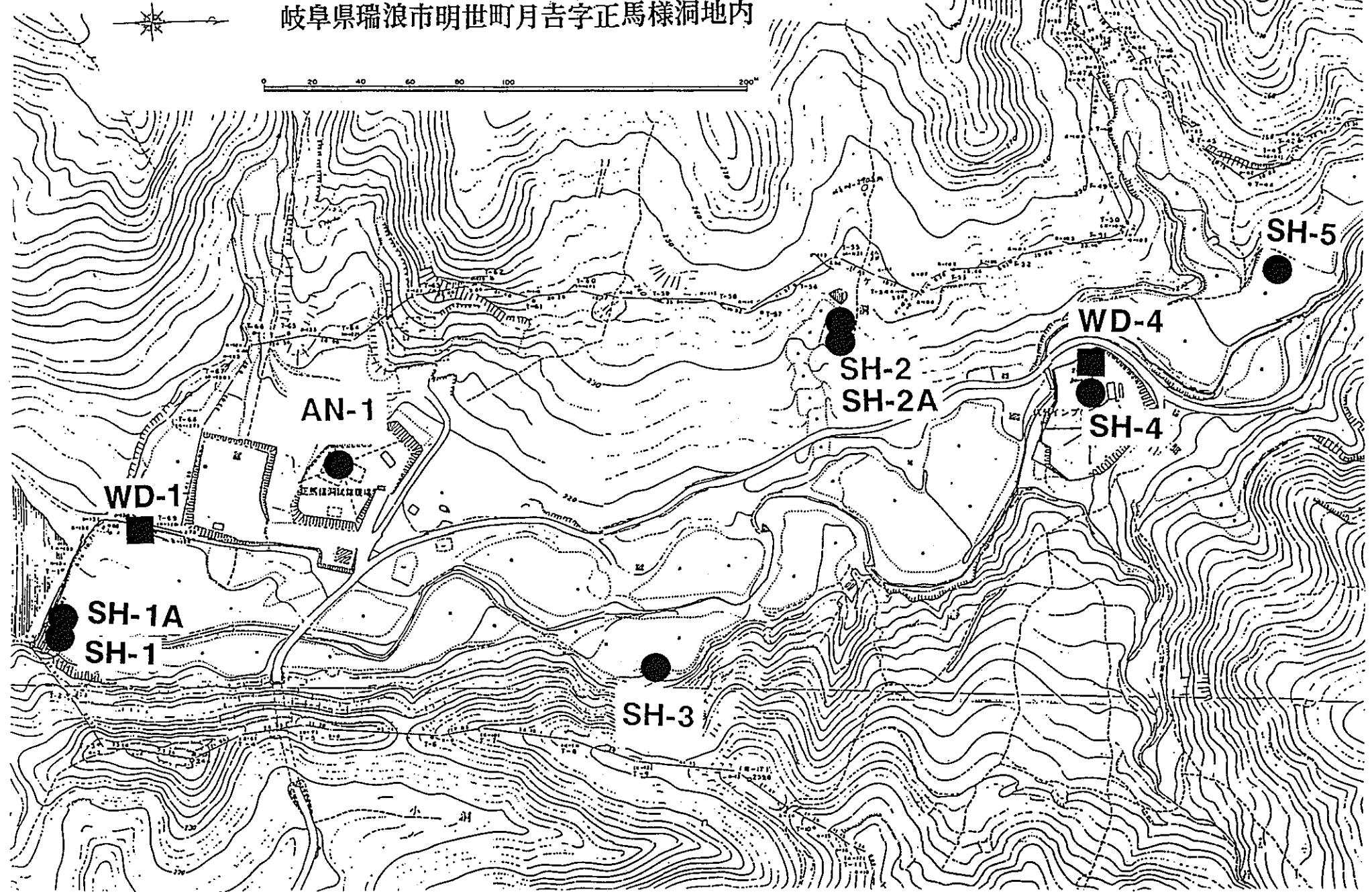


図-4-2-1 坑井及び重錘落下震源の位置図

表-4-2-1 発破孔の諸元

項目	SH-1A	SH-2A	SH-3	SH-4	SH-5
掘削深度(m)	20.15	20.00	76.30	95.00	60.00
ケーシング種類	炭素鋼钢管	炭素鋼钢管	STPG S/80	-	炭素鋼钢管
ケーシング挿入深度(m)	20.15	20.00	76.30	-	60.00
ケーシング外径(mm)	86.10	86.10	60.50	-	86.10
ケーシング内径(mm)	77.70	77.70	49.50	-	77.70

表-4-2-2 発破孔測量結果

発破孔名	X座標(m)	Y座標(m)	比高差(m)	ケーシング高さ(m)	水平距離(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
SH-5	912.228	470.336	11.430	0.910	399.746	399.909

注1) 座標原点は任意の点を(500, 500)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	0.25ms
データ長	1024ms
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	3Hz
入力	ハイドロフォン: 10ch

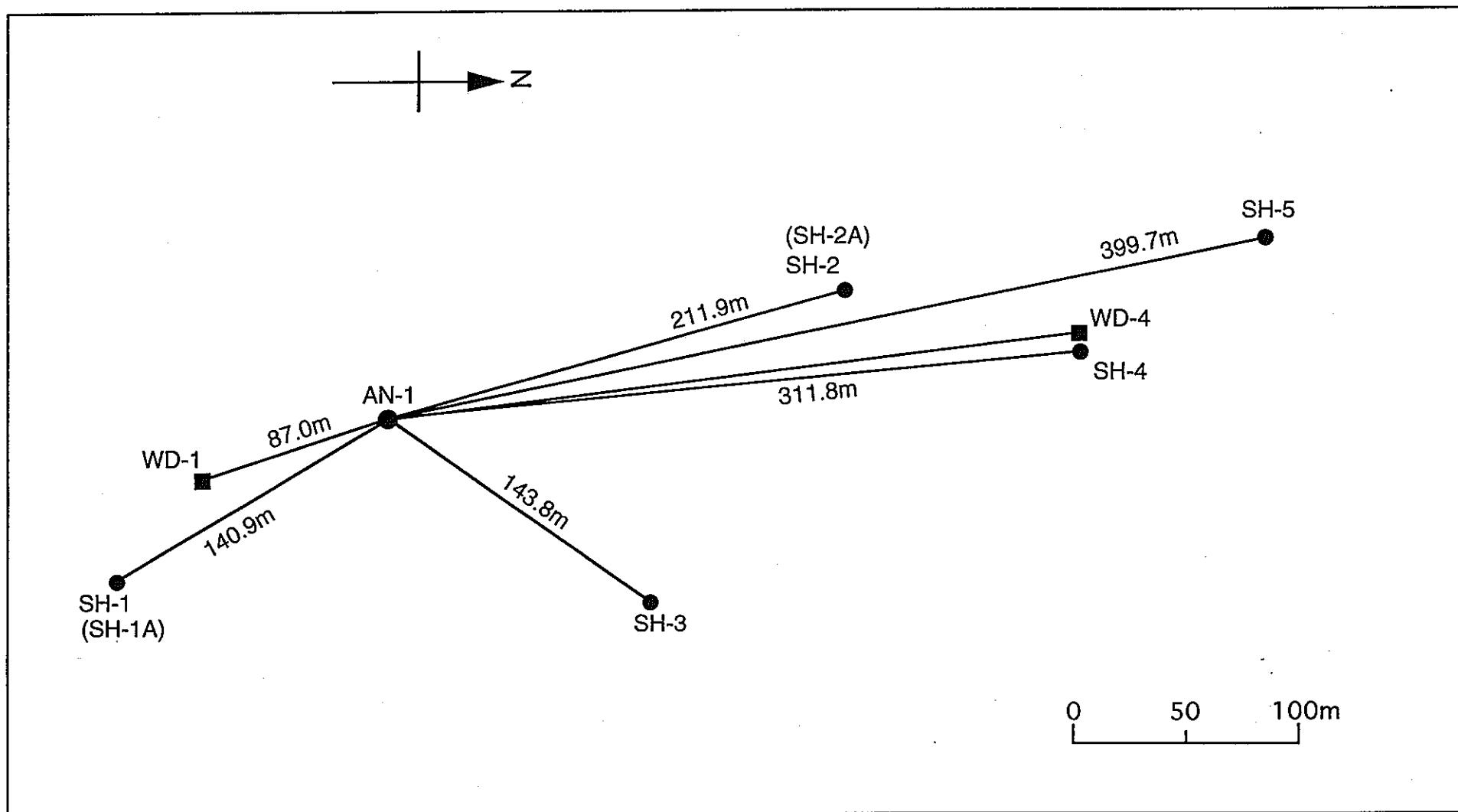


図-4-2-2 坑井と重錘落下震源の位置



図-4-2-3 発破震源の装薬作業



図-4-2-4 重錘落下による発震作業

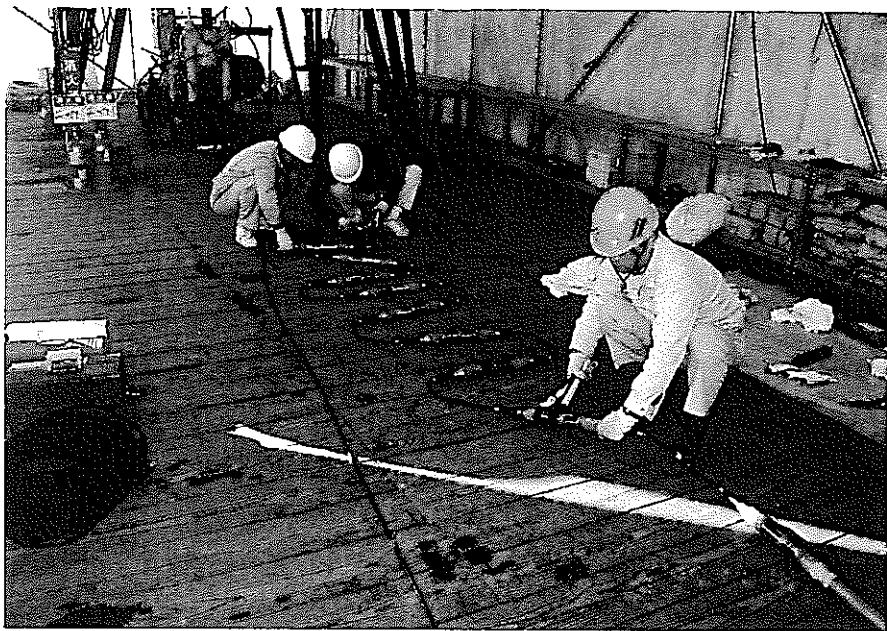


図-4-2-5 ハイドロフォン（マークプロダクツ社製P-27-12C）



図-4-2-6 ハイドロフォン用ウインチ

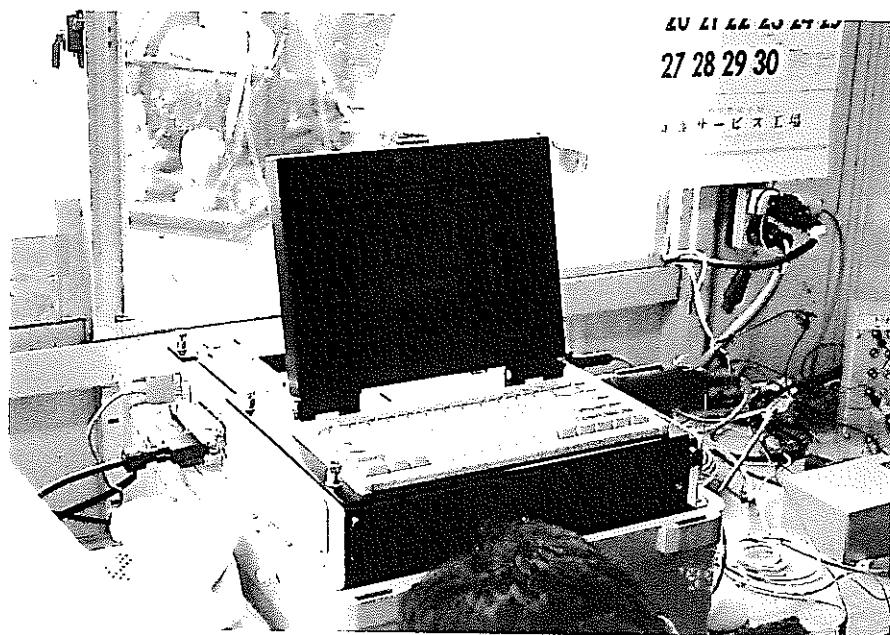
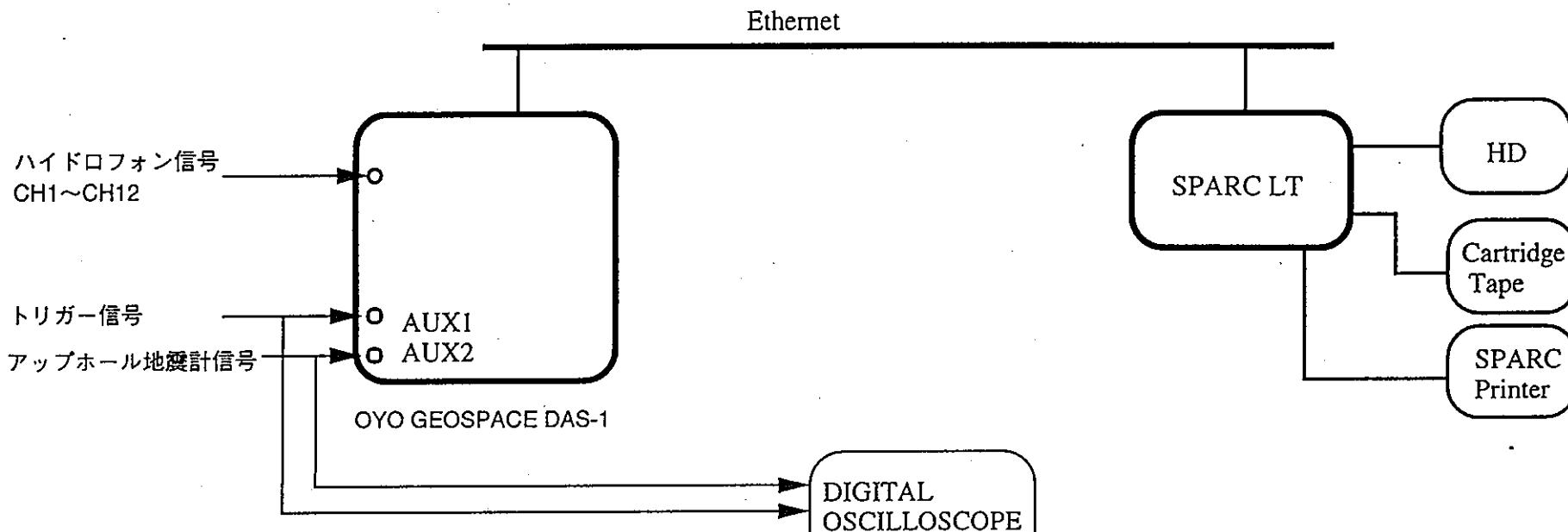


図-4-2-7 データ収録装置（OYO GEOSPACE社製DAS-1）

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 [®] L-22	2	固有周波数：2 Hz
プリアンプ	自作	2	
ハイドロフォン			
ハイドロフォン	マーク [®] ロダ [®] P-27-12C	10	
			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 [®] 社製	1	抵抗：47 Ohms/1000Ft(305 m)
			長さ：1,000 m
インターネットケーブル	マーク [®] ロダ [®] 社製	9	長さ：1 m
ウインチ	開発工業(株)製	1	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	1	
シーブ		2	
エンコーダ		1	
テンションメーター		1	
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



入力チャンネル数：24CH/ 48CH
24 bit A/D
サンプリングレート：
31.25, 62.5, 125, 250, 500 μ s, 1, 2, 4 ms

フィールドでのデータ取得

1. DAS-1によるデータ収録
2. データ転送
3. ワークステーションによる予備的解析

図-4-2-8 データ収録の概要

表-4-2-5 重錘落下震源による測定実績

実施日	メートル深度(m)	WD-1 (スタッカ回数)	WD-4 (スタッカ回数)
11月14日	20.0~29.0	5	5
	30.0~39.0	3	5
	40.0~49.0	3	5
	50.0~59.0	3	5
	60.0~69.0	3	5
	70.0~79.0	3	3
	80.0~89.0	3	3
	90.0~99.0	3	3
	100.0~109.0	3	3
	110.0~119.0	3	3
	120.0~129.0	3	3
	130.0~139.0	3	3
	140.0~149.0	3	3
	150.0~159.0	3	5
	160.0~169.0	3	5
	170.0~179.0	5	8
	180.0~189.0	8	8
	190.0~199.0	8	8
	200.0~209.0	8	8
	210.0~219.0	8	8
	220.0~229.0	8	8
	230.0~239.0	8	8
	240.0~249.0	8	8
	250.0~259.0	8	8
	260.0~269.0	8	8
	270.0~279.0	10	10
	280.0~289.0	10	10
11月15日	290.0~299.0	8	10
	300.0~309.0	8	10
	310.0~319.0	8	10
	320.0~329.0	10	15
	330.0~339.0	10	15
	340.0~349.0	10	15
11月16日	350.0~359.0	10	15
	360.0~369.0	10	15
	370.0~379.0	10	15
	380.0~389.0	15	15
	390.0~399.0	15	15
	400.0~409.0	15	15
	410.0~419.0	15	15
	420.0~429.0	15	15
	430.0~439.0	15	15
	440.0~449.0	15	15
	450.0~459.0	15	15
	460.0~469.0	15	15
	470.0~479.0	15	15
	480.0~489.0	15	15
	490.0~499.0	15	15
	500.0~509.0	15	15

表-4-2-5 重錘落下震源による測定実績

実施日	ハドロファン深度(m)	WD-1 (スタッカ回数)	WD-4 (スタッカ回数)
	510.0~519.0	20	—
11月17日	520.0~529.0	30	—
	530.0~539.0	30	—
	540.0~549.0	30	—
	550.0~559.0	30	—
合計		563	474

表-4-2-6 発破震源による測定実績

実施日	ハドロフン深度(m)	SH-1A	SH-2A	SH-3	SH-4	SH-5
11月17日	400.0~409.0	18m, 50g		62.5m, 50g		55m, 50g
	410.0~419.0	18m, 50g		62.5m, 50g		55m, 100g
	420.0~429.0	18m, 50g		62.5m, 50g		55m, 100g
	430.0~439.0	18m, 50g		62.5m, 50g		55m, 100g
	440.0~449.0	18m, 50g		62.5m, 50g		55m, 100g
11月18日						
	450.0~459.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	460.0~469.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	470.0~479.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	480.0~489.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	490.0~499.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	500.0~509.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	510.0~519.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	520.0~529.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	530.0~539.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	540.0~549.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	550.0~559.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	560.0~569.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	570.0~579.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
11月19日	580.0~589.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	590.0~599.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
	600.0~609.0	18m, 50g		61m, 50g		55m, 100g
11月20日						
	100.0~109.0					55m, 100g
	110.0~119.0					55m, 100g
	120.0~129.0					55m, 100g
	130.0~139.0					55m, 100g
	140.0~149.0					55m, 100g
	150.0~159.0					55m, 100g
	160.0~169.0					55m, 100g
	170.0~179.0					55m, 100g
	180.0~189.0					55m, 100g
	190.0~199.0					55m, 100g
	200.0~209.0					55m, 100g
	400.0~409.0		18m, 50g		93m, 50g	
	410.0~419.0		18m, 50g		93m, 50g	
	390.0~399.0					55m, 100g
11月21日	420.0~429.0		18m, 50g		93m, 50g	
	430.0~439.0		18m, 50g		93m, 50g	
	380.0~389.0					55m, 100g
	440.0~449.0		18m, 50g		93m, 50g	
	370.0~379.0					55m, 100g
11月22日	360.0~369.0					55m, 100g
	450.0~459.0		18m, 50g		93m, 50g	
	350.0~359.0					55m, 100g
	460.0~469.0		18m, 50g		93m, 50g	
	340.0~349.0					55m, 100g
	470.0~479.0		18m, 50g		93m, 50g	
	330.0~339.0					55m, 100g
	480.0~489.0		18m, 50g		93m, 50g	
	320.0~329.0					55m, 100g
	490.0~499.0		18m, 50g		93m, 50g	
	310.0~319.0					55m, 100g

表-4-2-6 発破震源による測定実績

実施日	バト・ロボン深度(m)	SH-1A	SH-2A	SH-3	SH-4	SH-5
	500.0～509.0		18m, 50g		93m, 50g	
	300.0～309.0					55m, 100g
	510.0～519.0		18m, 50g		93m, 50g	
	600.0～609.0		18m, 50g		93m, 50g	
	590.0～599.0		18m, 100g		93m, 100g	
	580.0～589.0		18m, 100g		93m, 100g	
	570.0～579.0		18m, 100g		93m, 100g	
	560.0～569.0		18m, 50g		93m, 50g	
	550.0～559.0		18m, 50g		93m, 50g	
	540.0～549.0		18m, 50g		93m, 50g	
	530.0～539.0		18m, 50g		93m, 50g	
	520.0～529.0		18m, 50g		93m, 50g	
	290.0～299.0					55m, 100g
	280.0～289.0					55m, 100g
	270.0～279.0					55m, 100g
	260.0～269.0					55m, 100g
	250.0～259.0					55m, 100g
	240.0～249.0					55m, 100g
	230.0～239.0					55m, 100g
	220.0～229.0					55m, 100g
	210.0～219.0					55m, 100g
	90.0～99.0					55m, 100g
	80.0～89.0					55m, 100g
	70.0～79.0					55m, 100g
	60.0～69.0					55m, 100g
	50.0～59.0					55m, 50g

Depth (m)	Depth of tube wave generation (m)
400	411 422 430 436 441 452 467 469 478 482 486 492 503
450	
500	531
550	549 552
600 609	

図-4-3-14 発破震源によるVSP記録から求めた深度400~609m
区間のチューブ波発生深度

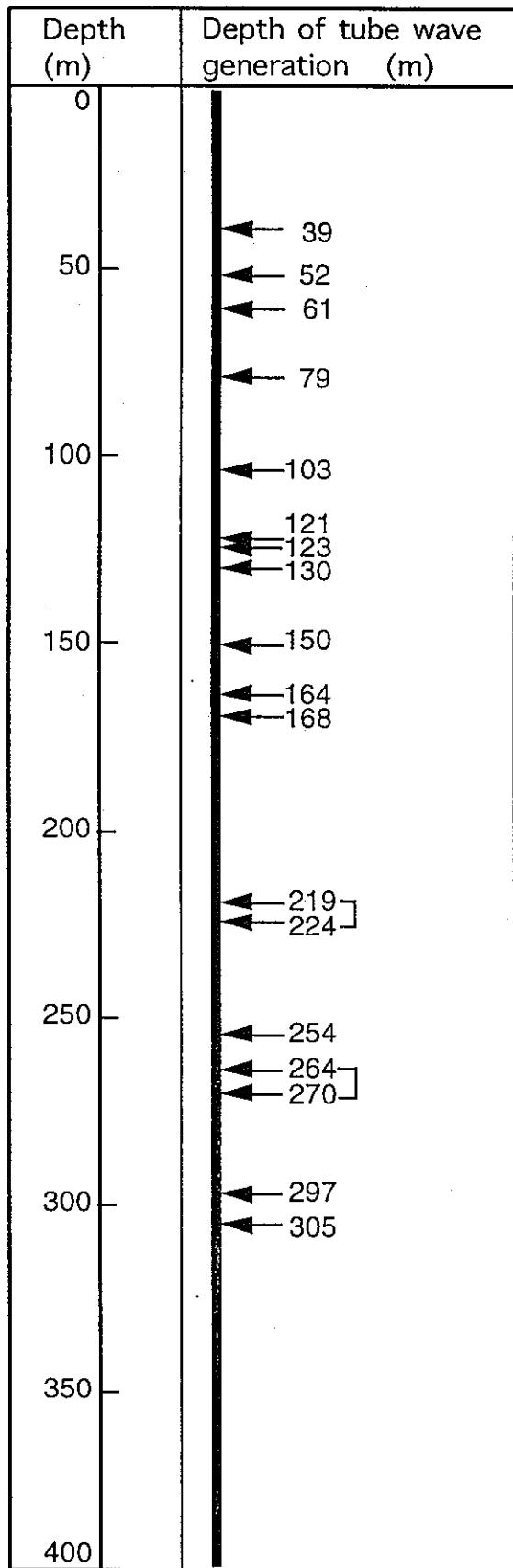
表-4-3-1 重錐落下震源による記録の測定時及び処理時のスタッカ回数

バト・ロボン深度(m)	WD-1 (測定時)	WD-1 (処理時)	WD-4 (測定時)	WD-4 (処理時)
20~29	5	2	5	5
30~39	3	2	5	3
40~49	3	1	5	4
50~59	3	1	5	5
60~69	3	2	5	3
70~79	3	2	3	2
80~89	3	2	3	2
90~99	3	1	3	3
100~109	3	1	3	3
110~119	3	2	3	3
120~129	3	1	3	1
130~139	3	2	3	3
140~149	3	2	3	3
150~159	3	3	5	5
160~169	3	1	5	3
170~179	5	4	8	8
180~189	8	4	8	8
190~199	8	6	8	6
200~209	8	6	8	8
210~219	8	7	8	8
220~229	8	4	8	6
230~239	8	6	8	8
240~249	8	6	8	7
250~259	8	7	8	6
260~269	8	4	8	8
270~279	10	9	10	7
280~289	10	9	10	8
290~299	8	7	10	10
300~309	8	7	10	7
310~319	8	7	10	9
320~329	10	9	15	11
330~339	10	10	15	13
340~349	10	9	15	11
350~359	10	10	15	13
360~369	10	9	15	8
370~379	10	8	15	10
380~389	15	14	15	13
390~399	15	15	15	12
400~409	15	15	15	11
410~419	15	13	15	13
420~429	15	15	15	12
430~439	15	14	15	12
440~449	15	15	15	14
450~459	15	6	15	13

表-4-3-1 重錘落下震源による記録の測定時及び処理時のスタッカ数

バト・ロfon深度(m)	WD-1 (測定時)	WD-1 (処理時)	WD-4 (測定時)	WD-4 (処理時)
460~469	15	15	15	13
470~479	15	15	15	12
480~489	15	15	15	9
490~499	15	14	15	9
500~509	15	15	15	11
510~519	20	20	—	—
520~529	30	10	—	—
530~539	30	29	—	—
540~549	30	30	—	—
550~559	30	30	—	—

重錘落下震源の記録から求めた
チューブ波発生深度



発破震源の記録から求めた
チューブ波発生深度

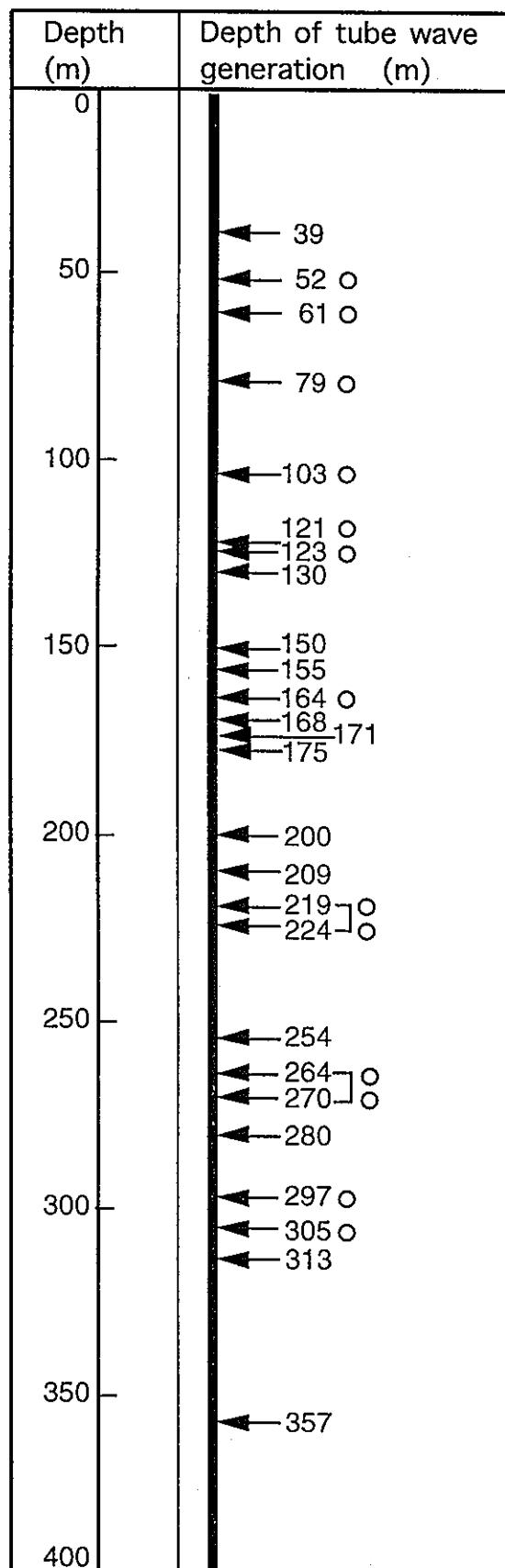
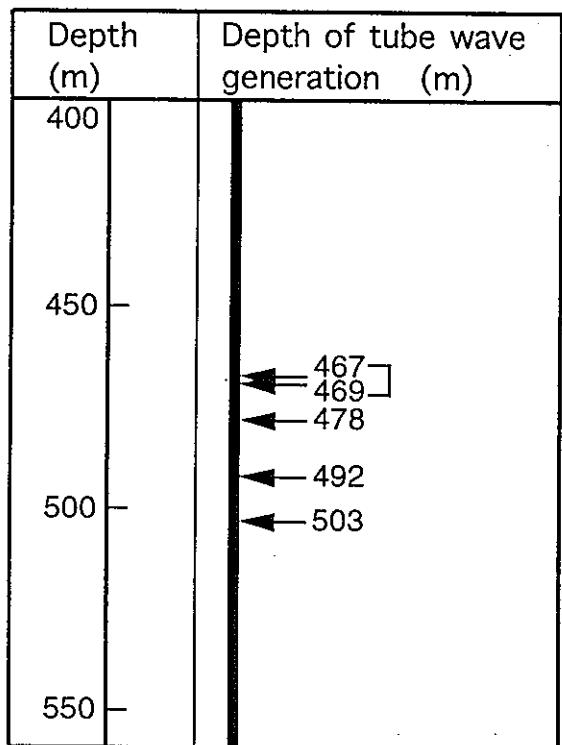


図-4-3-54 重錘落下震源のV S P記録及び発破震源のV S P記録から求めた
チューブ波発生深度

重錘落下震源の記録から求めた
チューブ波発生深度



発破震源の記録から求めた
チューブ波発生深度

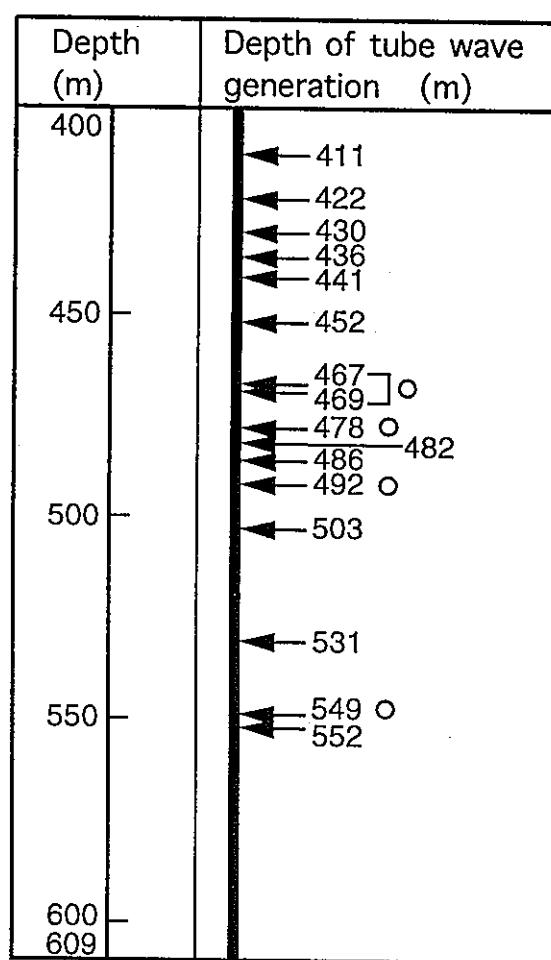


図-4-3-54 重錘落下震源のVSP記録及び発破震源のVSP記録から求めた
チューブ波発生深度

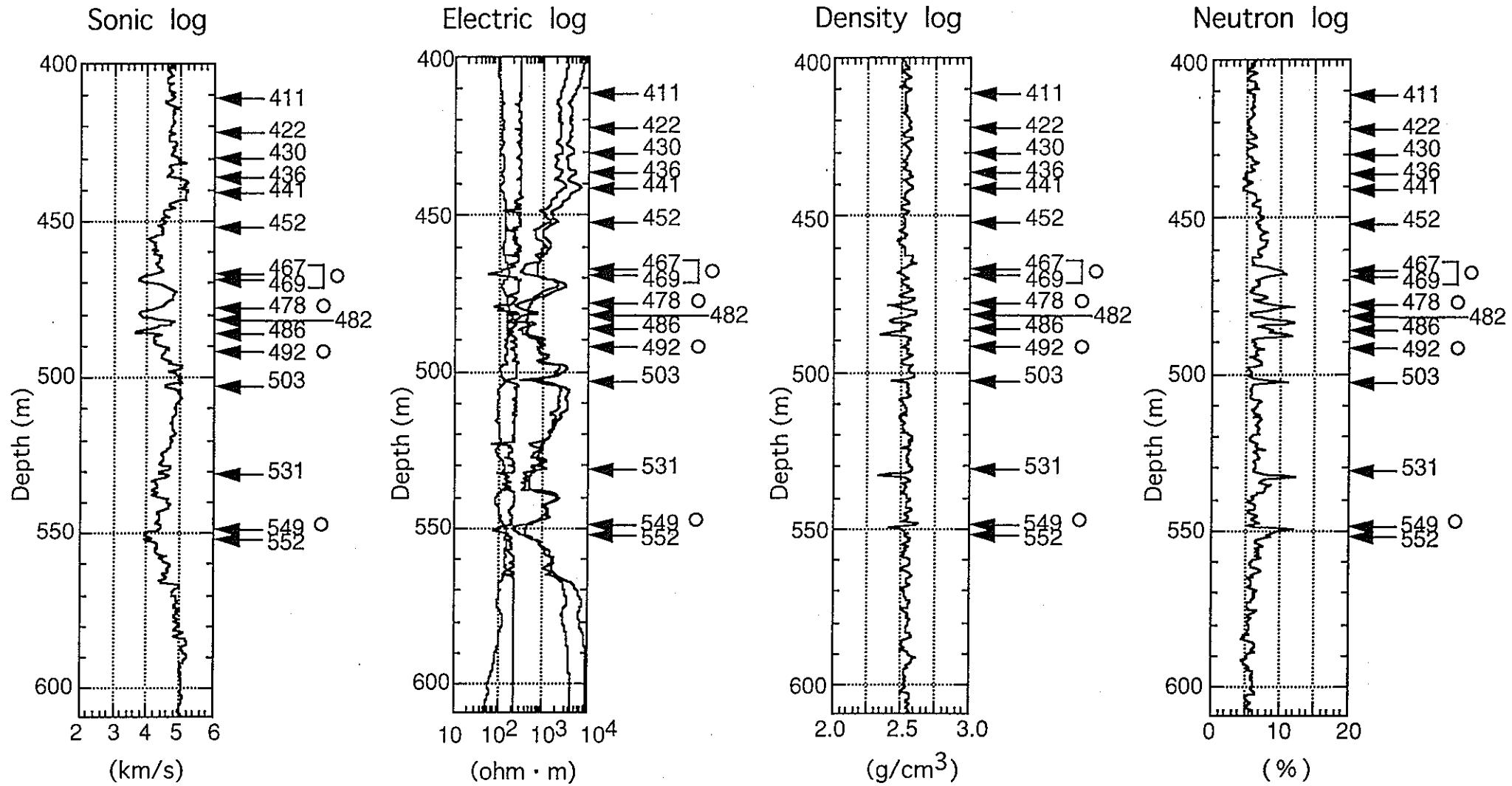


図-4-4-1 発破震源記録から求めたチューブ波発生深度と検層結果との比較。左から順に、速度検層、電気検層、密度検層、中性子検層の結果を示す。チューブ波発生深度を矢印で示す。

表-4-4-1 受振深度550mにおけるWD-1震源とSH-1A震源による
初動P波の中心周波数と振幅の比較

	WD-1 重錘落下 スタック1回	SH-1A 発破 スタック1回
中心周波数	約50Hz	約150Hz
振幅 (peak to peak) (収録装置の24bit値)	約50,000	約250,000

表-4-4-2 受振深度509mにおけるWD-4震源とSH-4震源による
初動P波の中心周波数と振幅の比較

	WD-4 重錘落下 スタック1回	SH-4 発破 スタック1回
中心周波数	約50Hz	約200Hz
振幅 (peak to peak) (収録装置の24bit値)	約70,000	約180,000

SH-1A

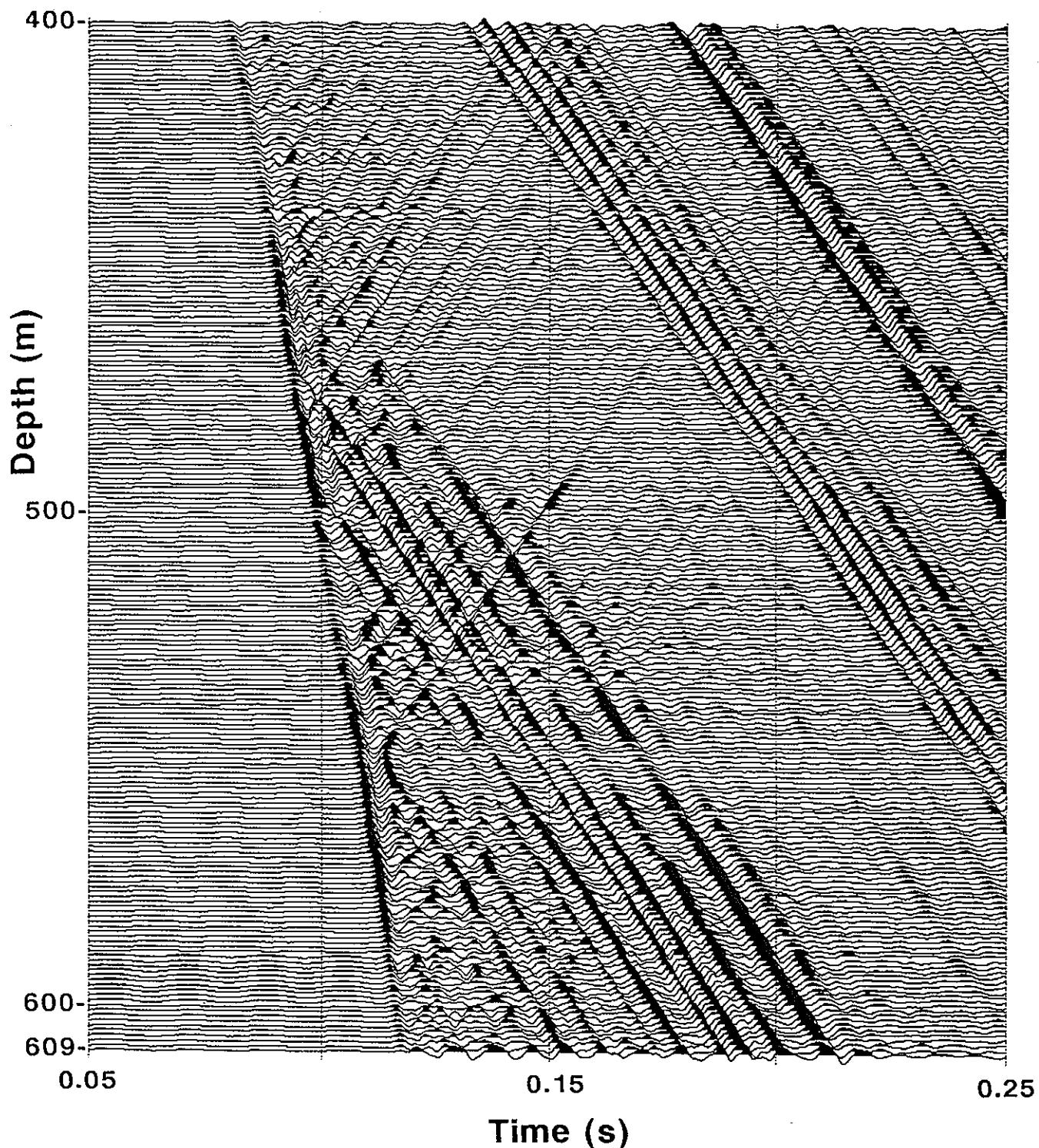


図-4-3-1 SH-1A号孔発震のV S P記録（深度400～609m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-2A

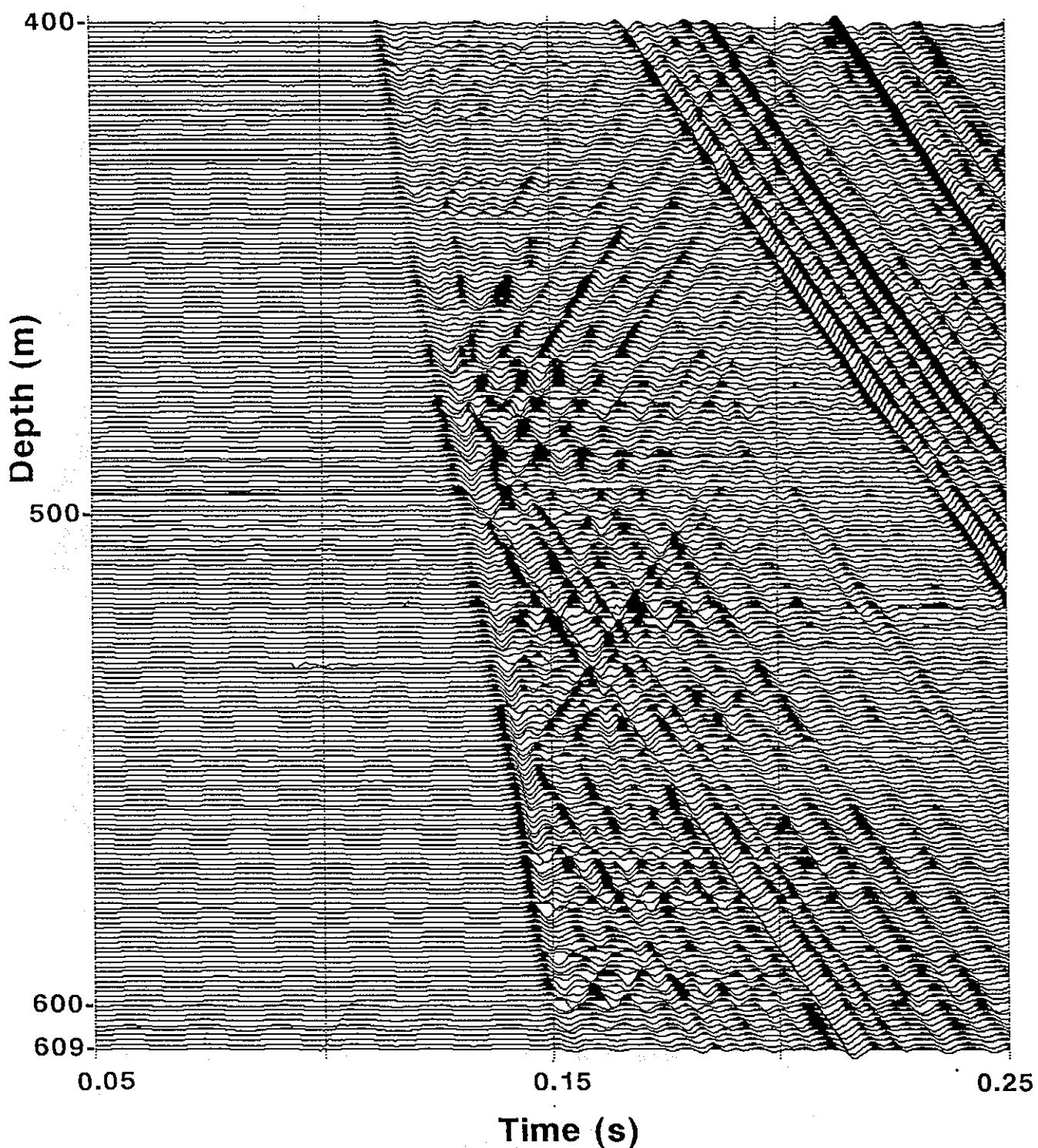


図-4-3-2 SH-2A号孔発震のV S P記録（深度400～609m）

SH-3

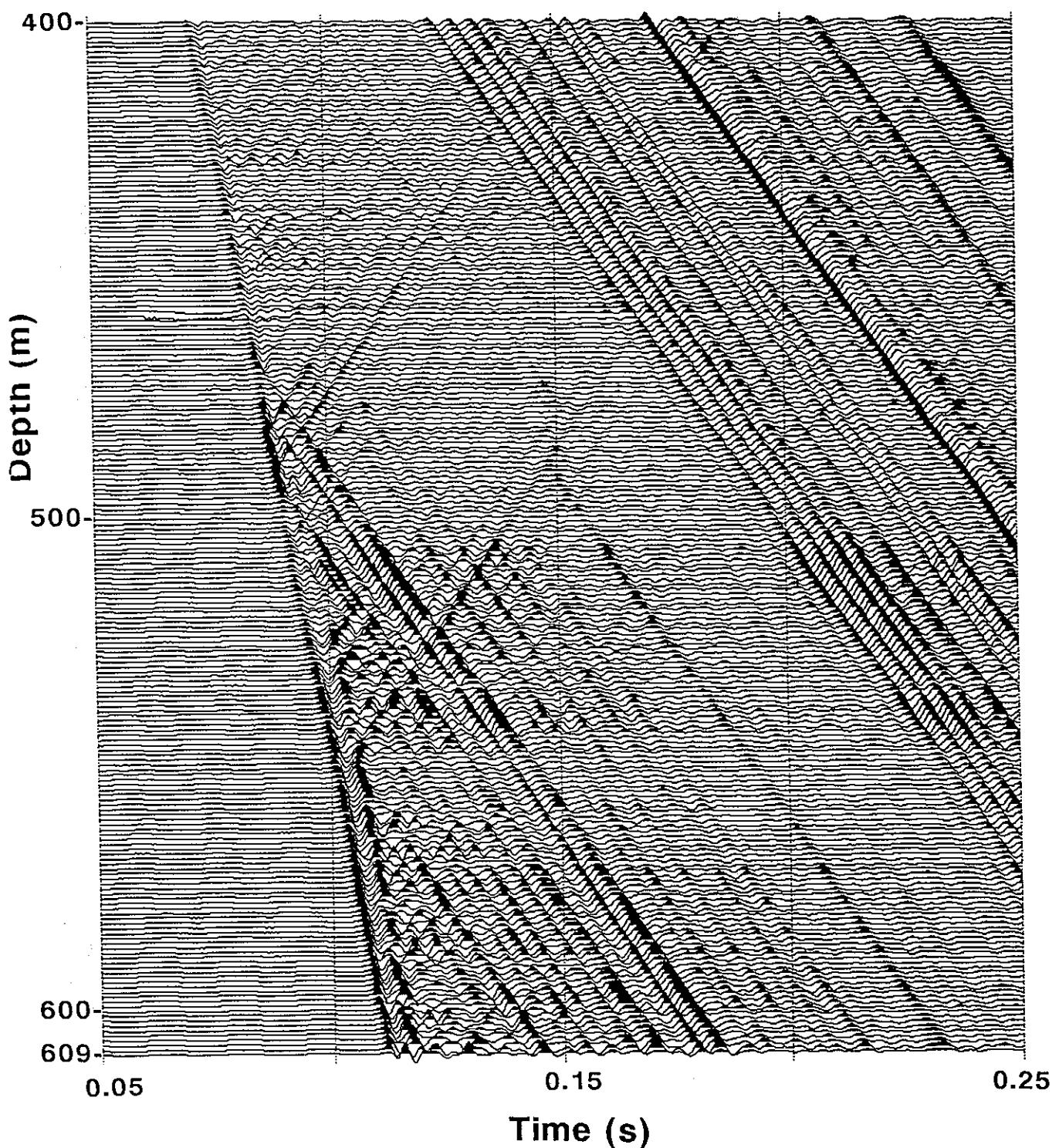


図-4-3-3 SH-3号孔発震のV S P記録（深度400～609m）

SH-4

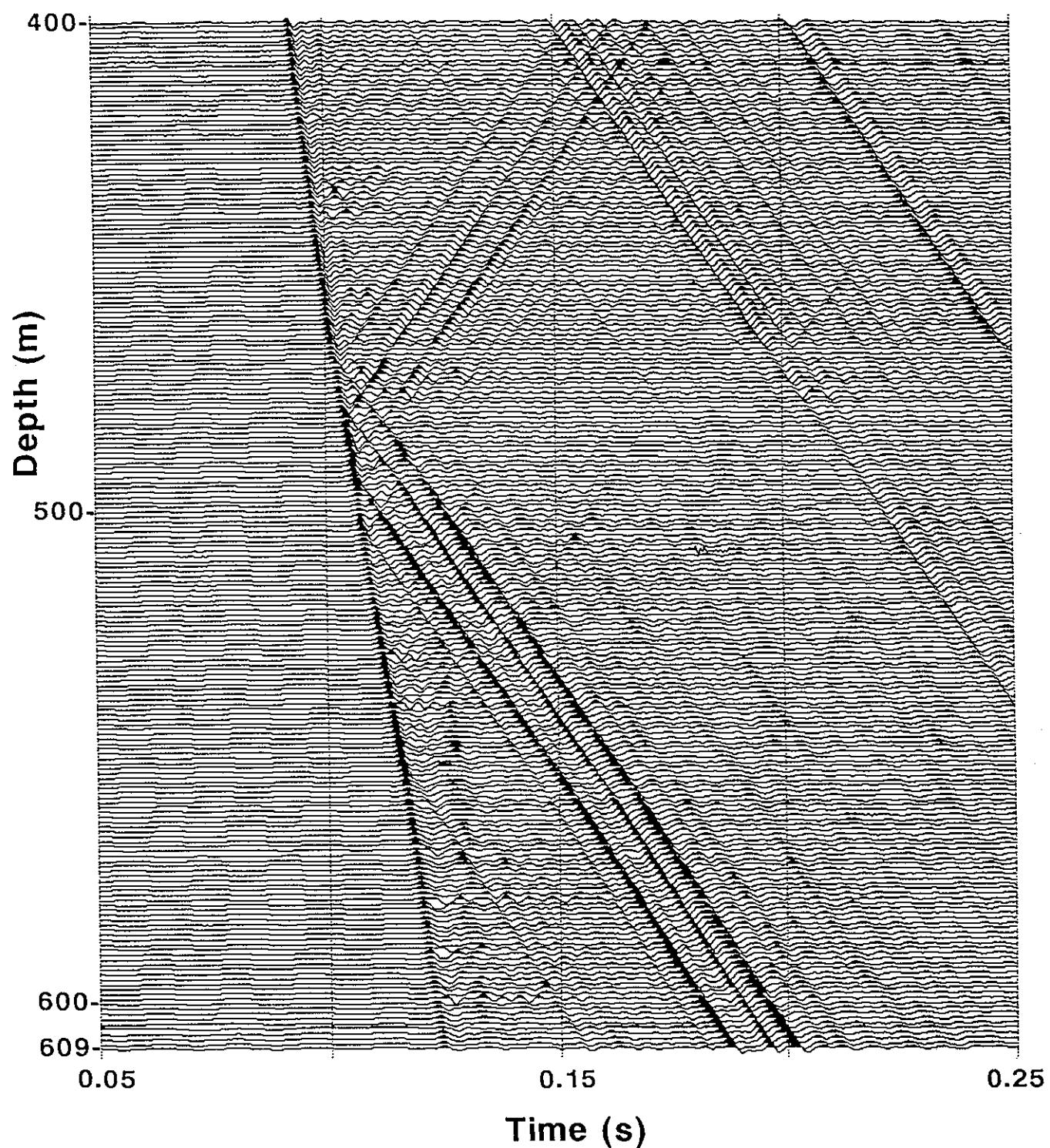


図-4-3-4 SH-4号孔発震のV S P記録（深度400～609m）。

SH-5

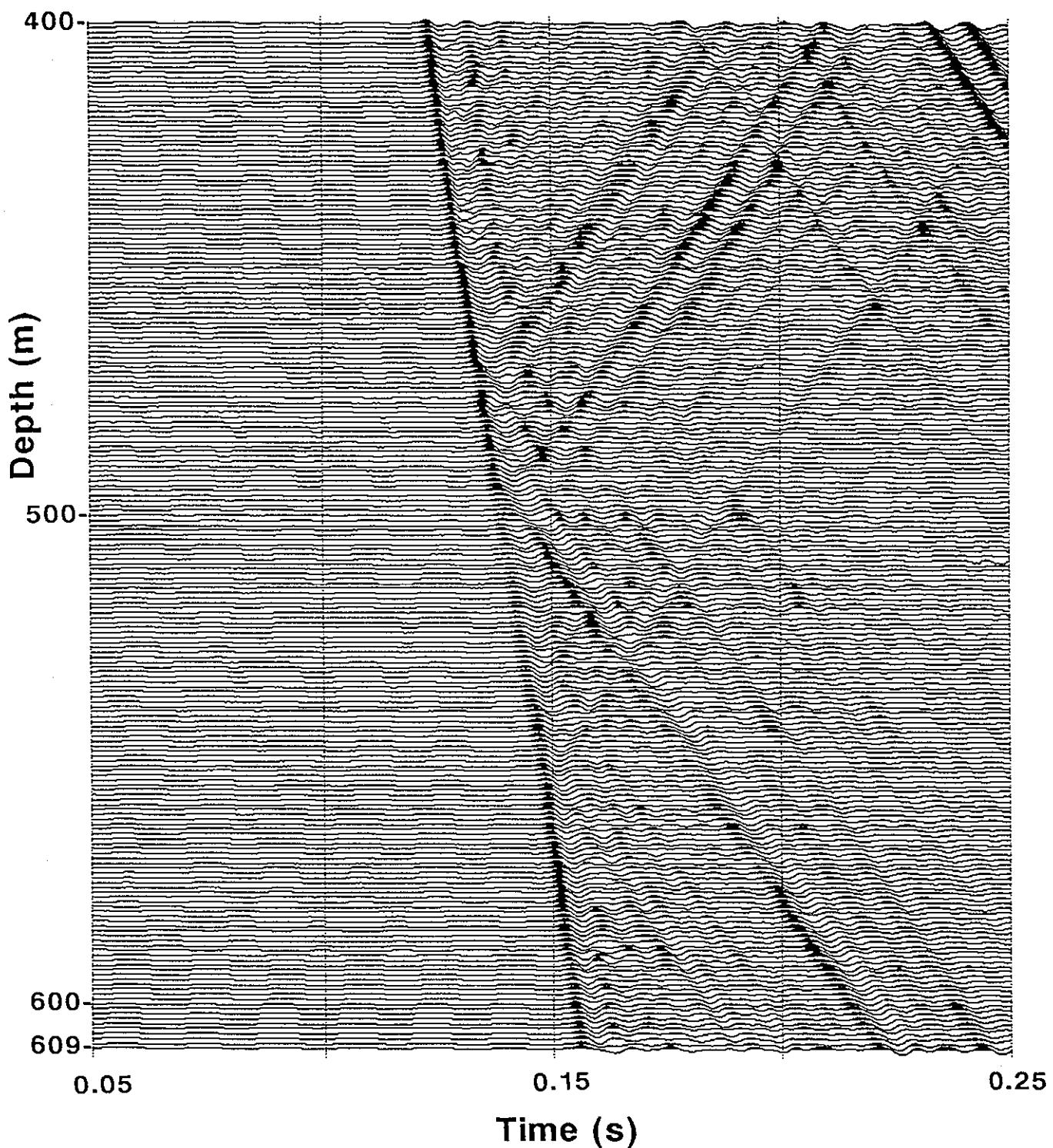


図-4-3-5 SH-5号孔発震のV S P記録（深度400～609m）.

SH-5

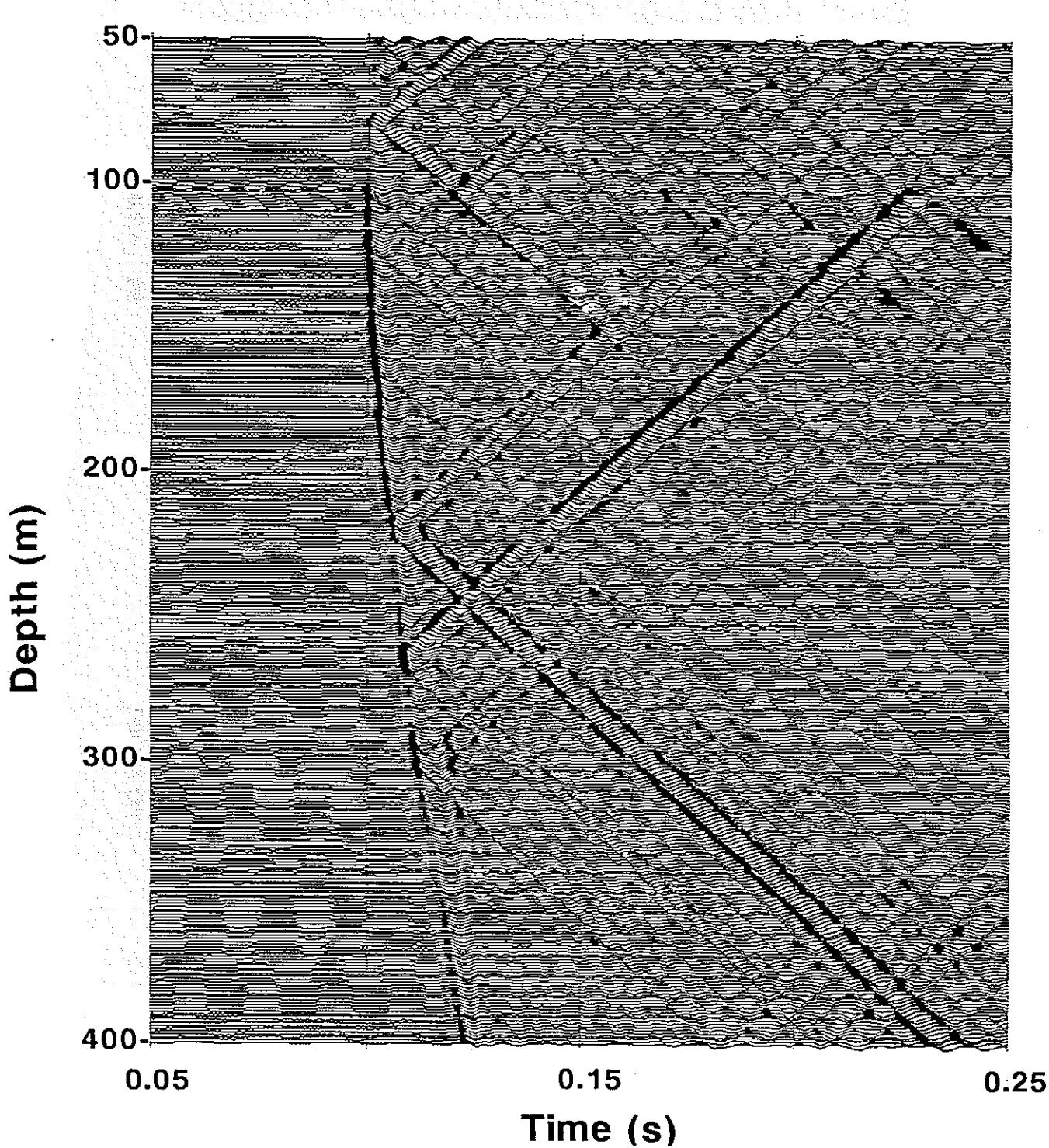


図-4-3-6 SH-5号孔発震のV S P記録（深度50～400m）．各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-5

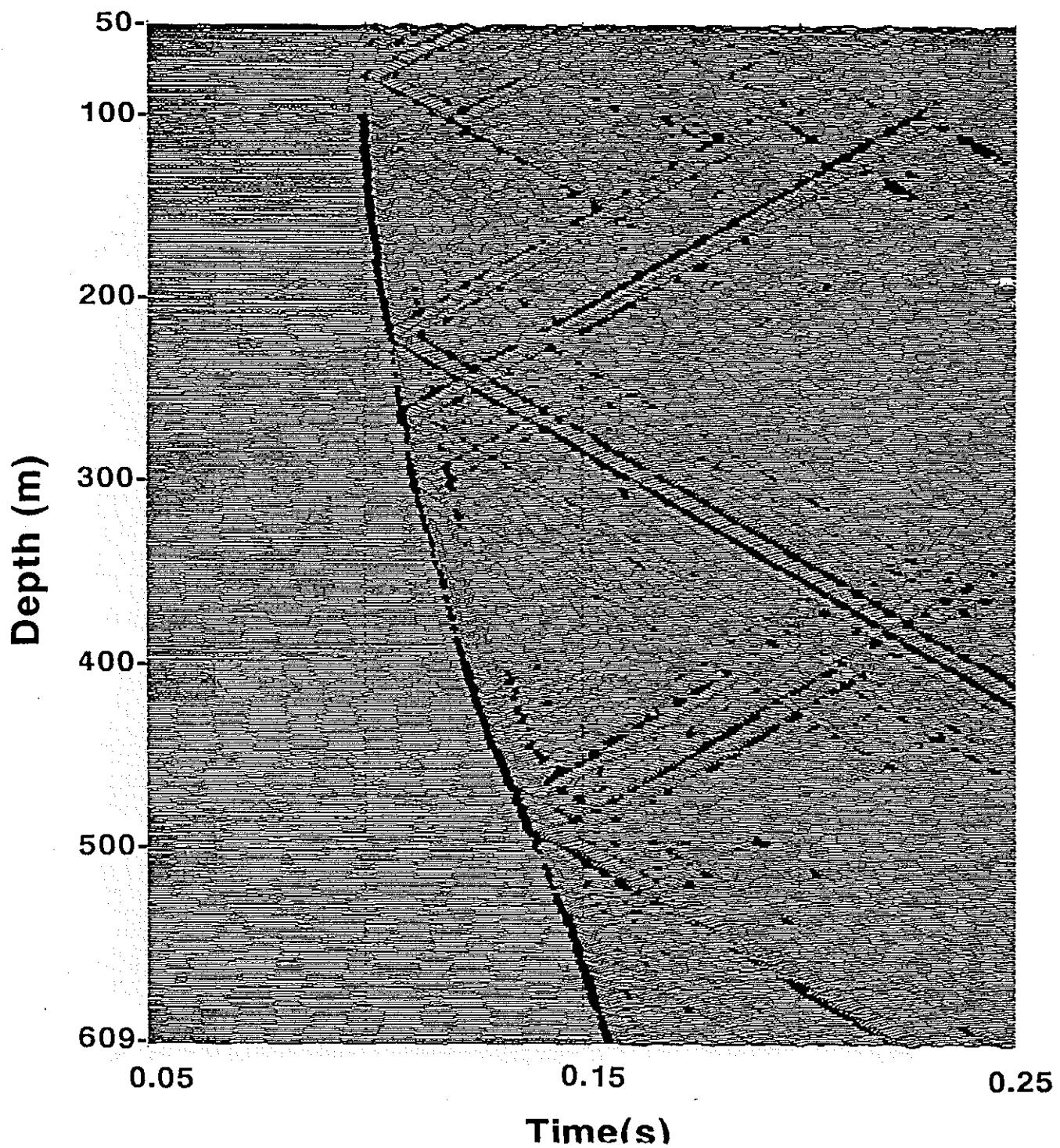


図-4-3-7 SH-5号孔発震のV S P記録（深度50～609m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-1A

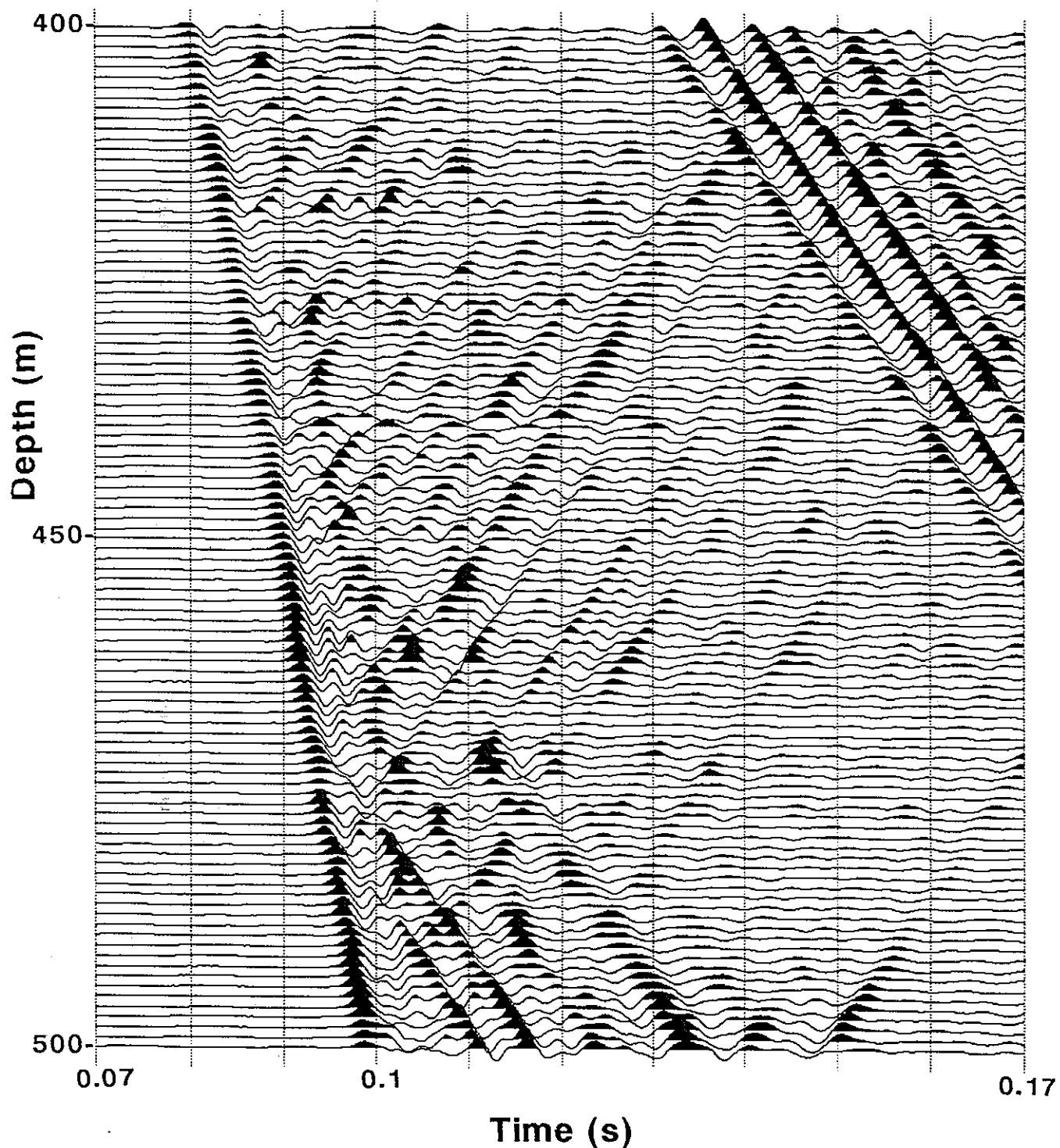


図-4-3-8 SH-1A号孔発震のVSP記録（深度400～500m）。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-1A

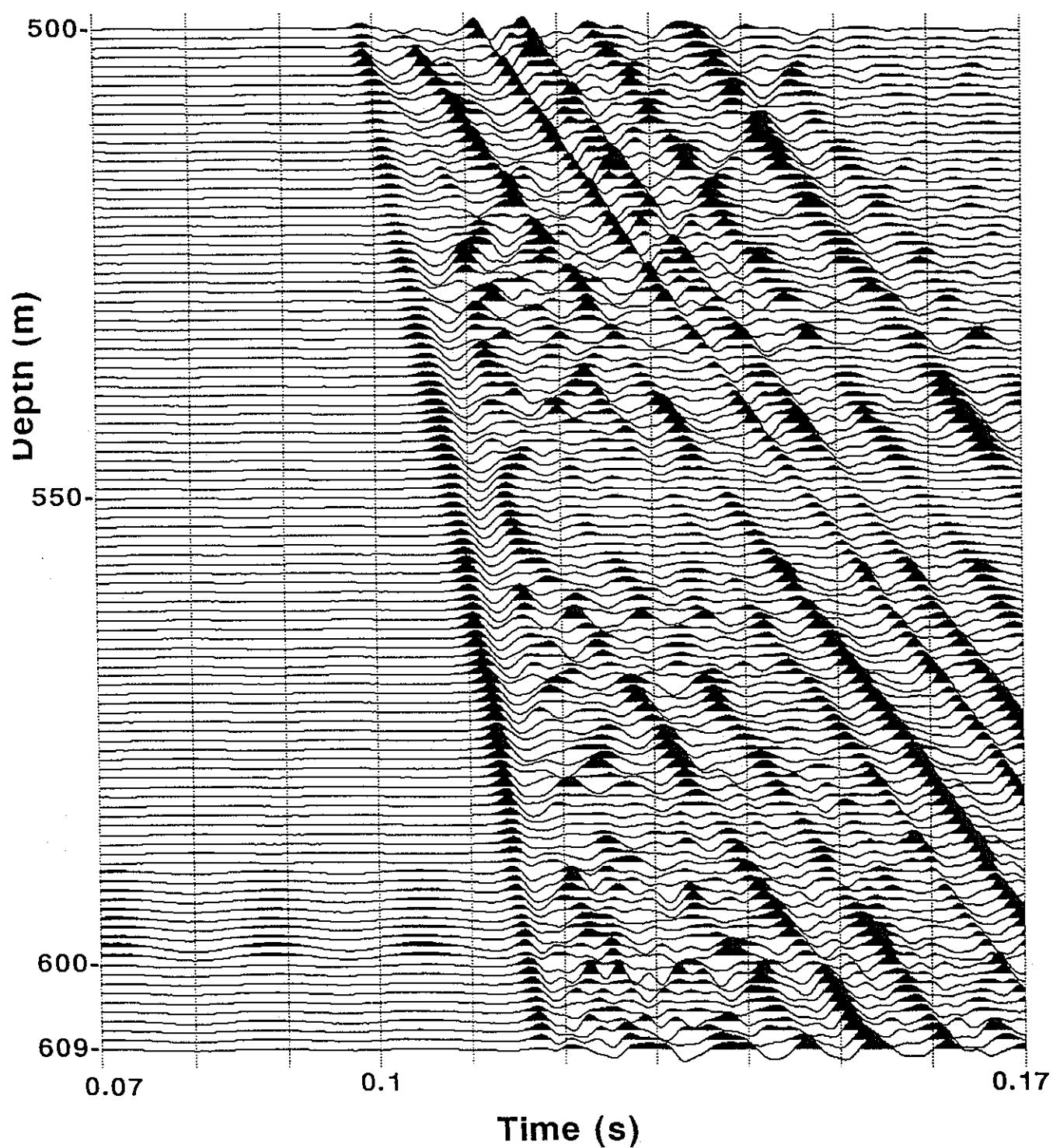


図-4-3-9 SH-1A号孔発震のV S P記録（深度500～609m）。

SH-4

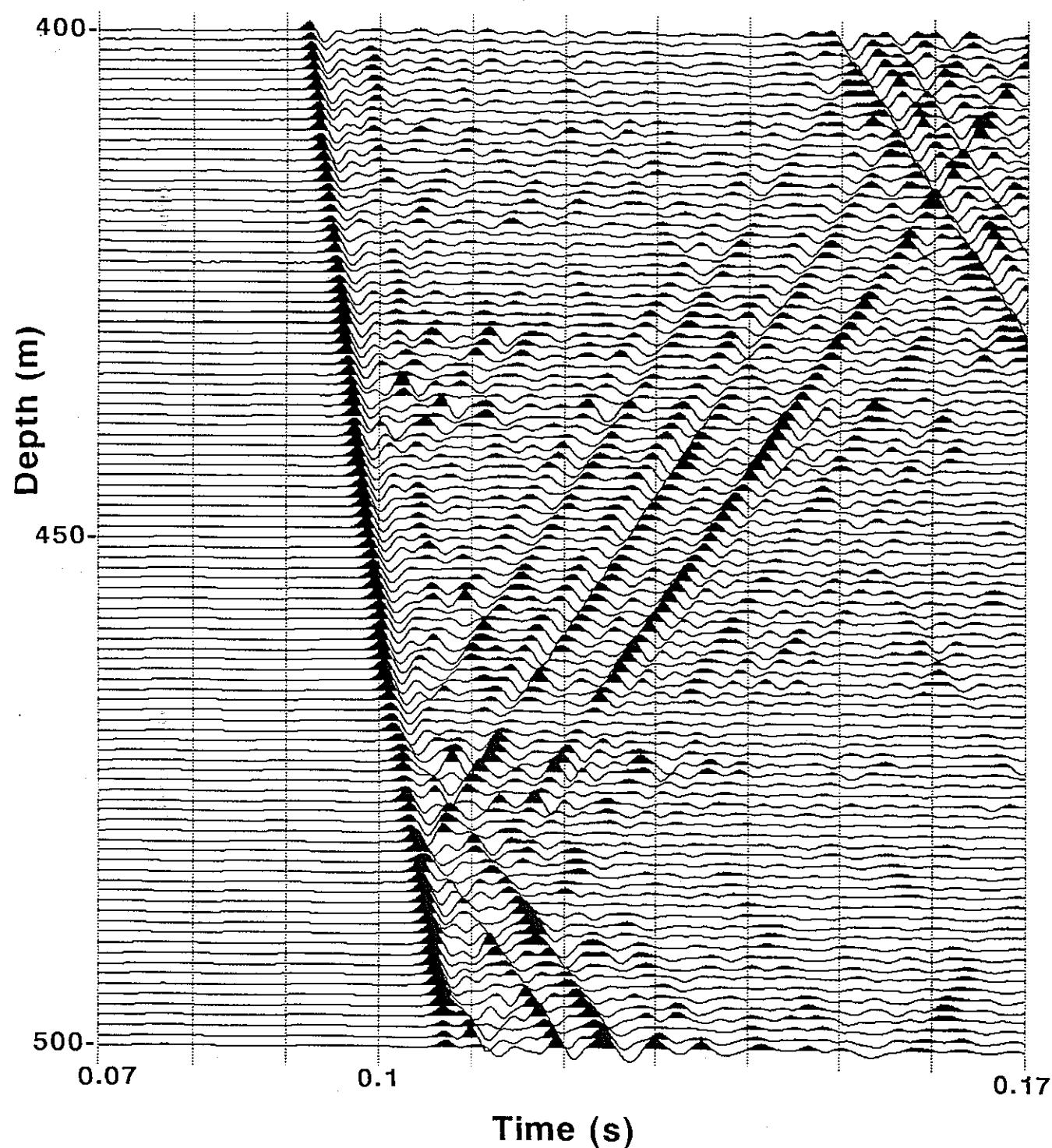


図-4-3-10 SH-4号孔発震のV S P記録（深度400～500m）。

SH-4

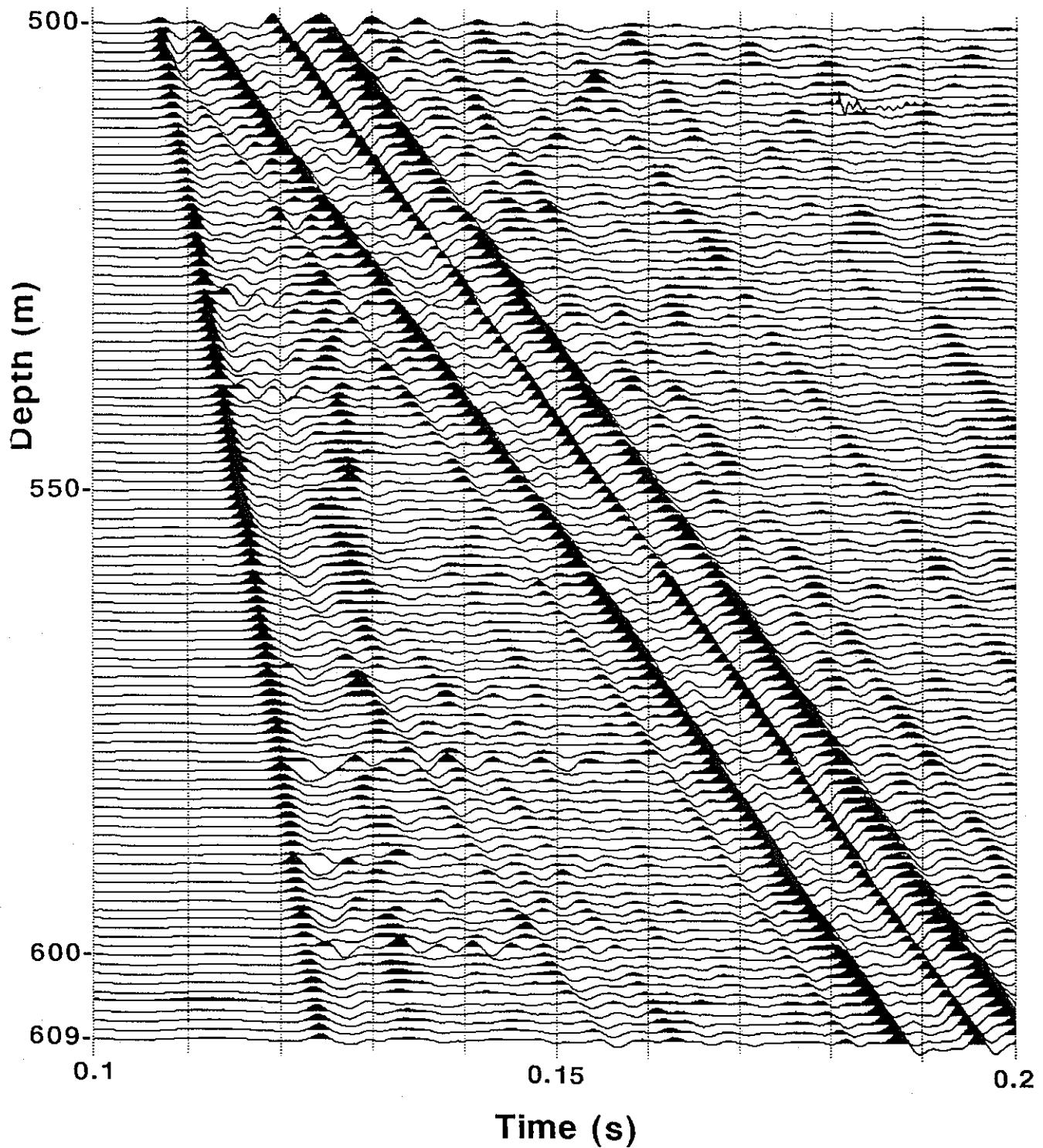


図-4-3-11 SH-1A号孔発震のV.S.P記録（深度500～609m）。

SH-1A

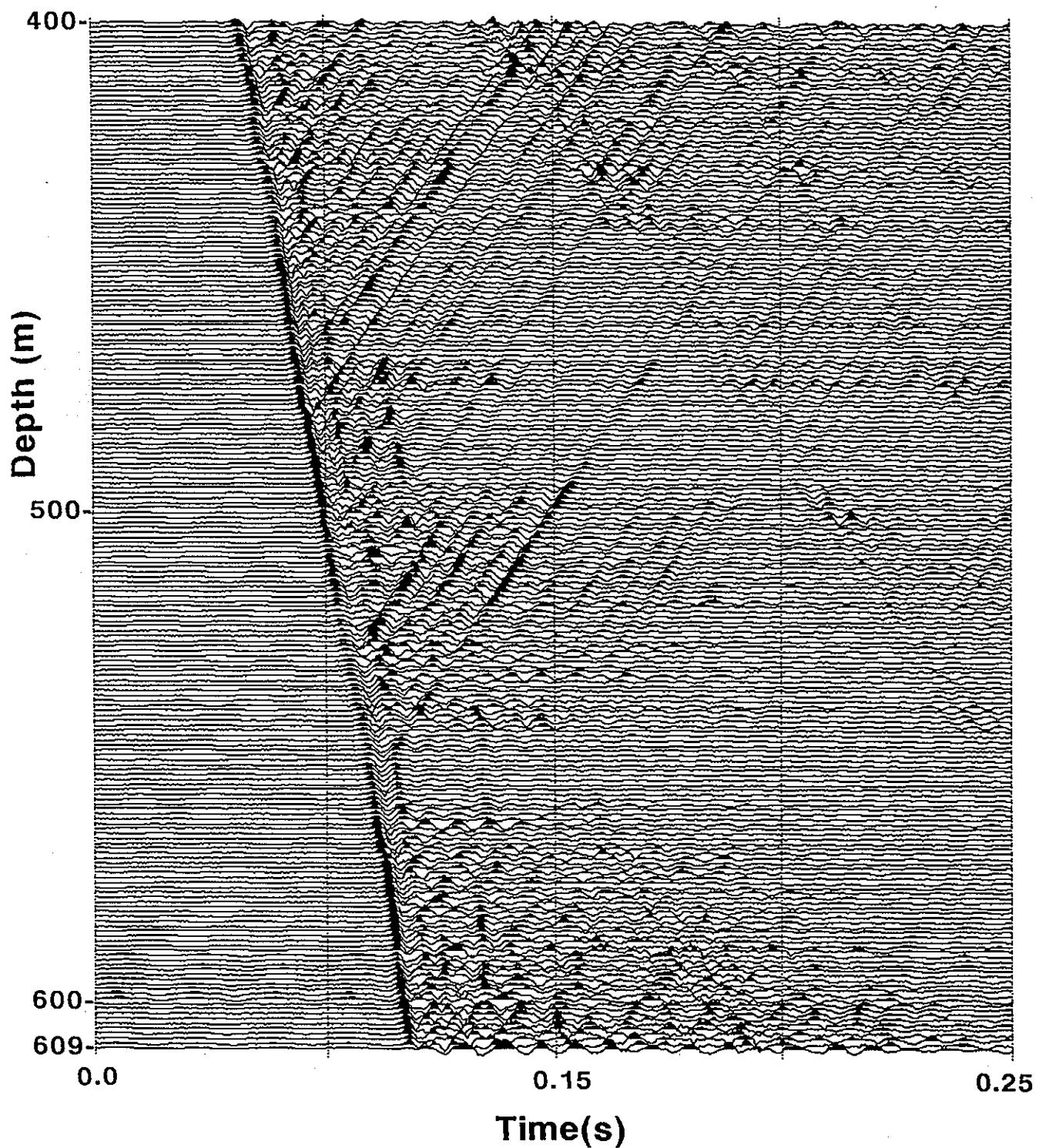


図-4-3-12 メディアンフィルタにより下方進行波を取り除いた、SH-1号孔発震の
V S P 記録。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相
対振幅は保存されていない。

SH-1A

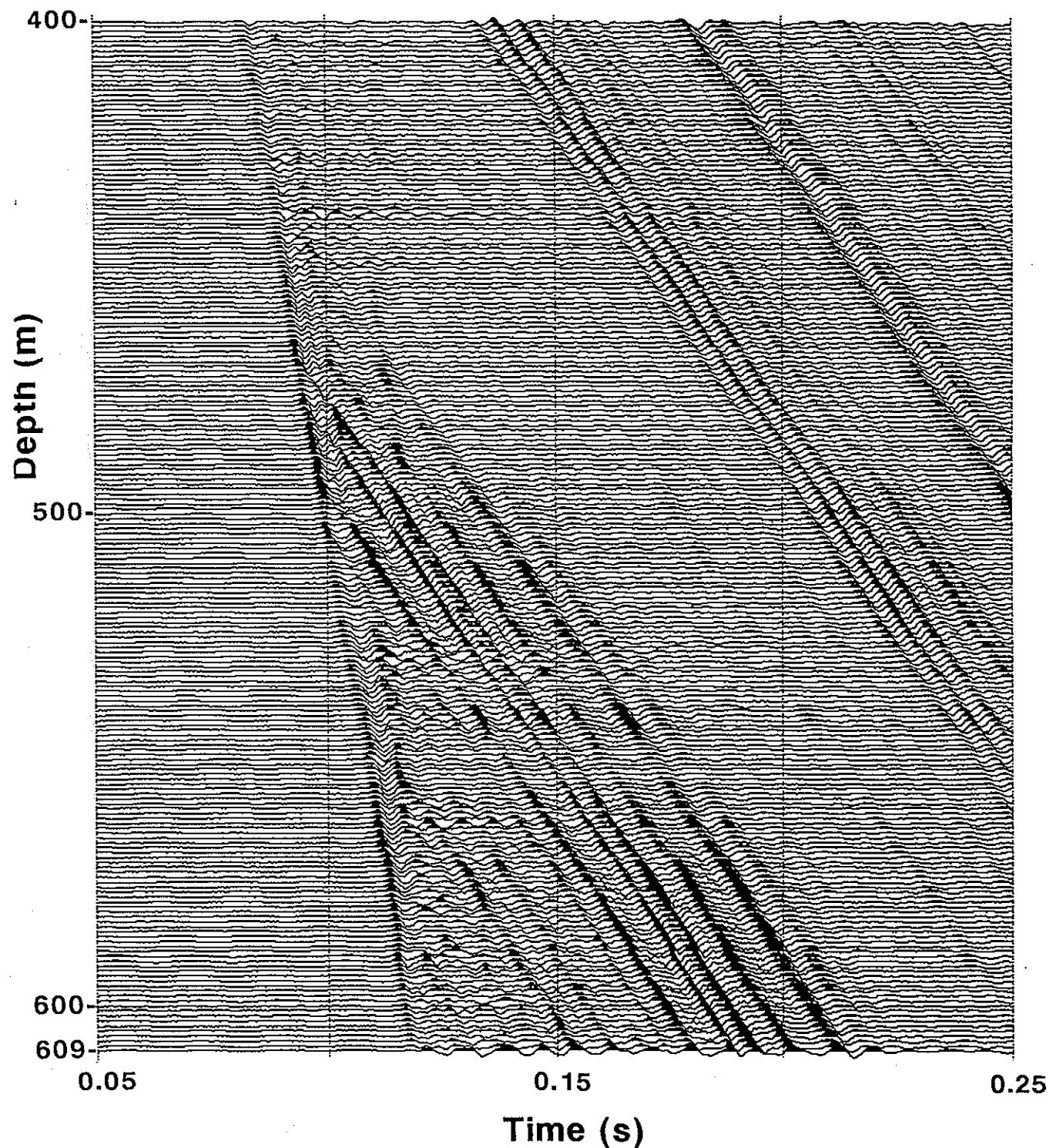


図-4-3-13 メディアンフィルタにより上方進行波を取り除いた、SH-1号孔発震の
V S P 記録。

WD-1

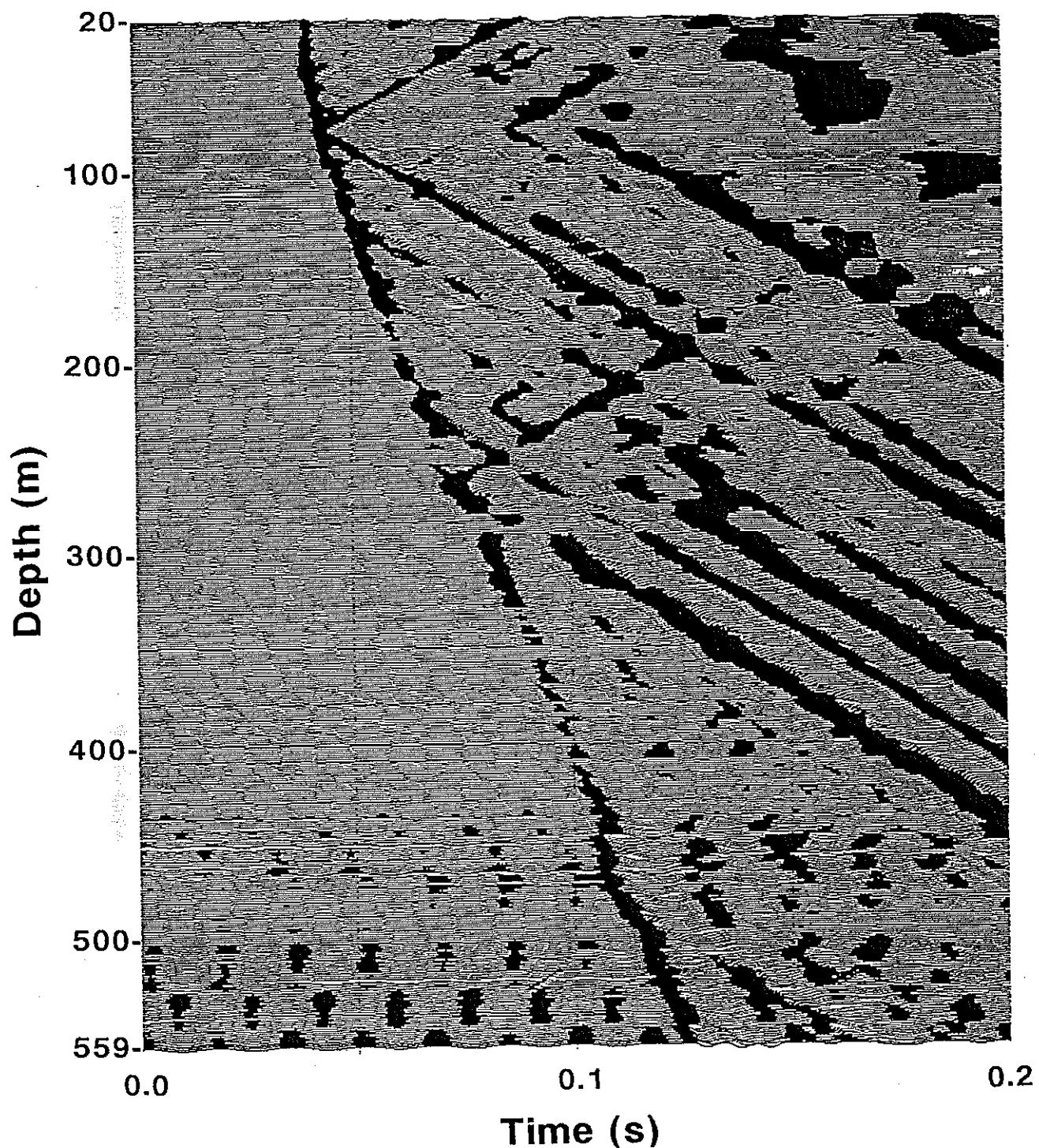


図-4-3-15 WD-1発震のV S P記録（深度20~559m）。スタック処理を行っていない。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

WD-4

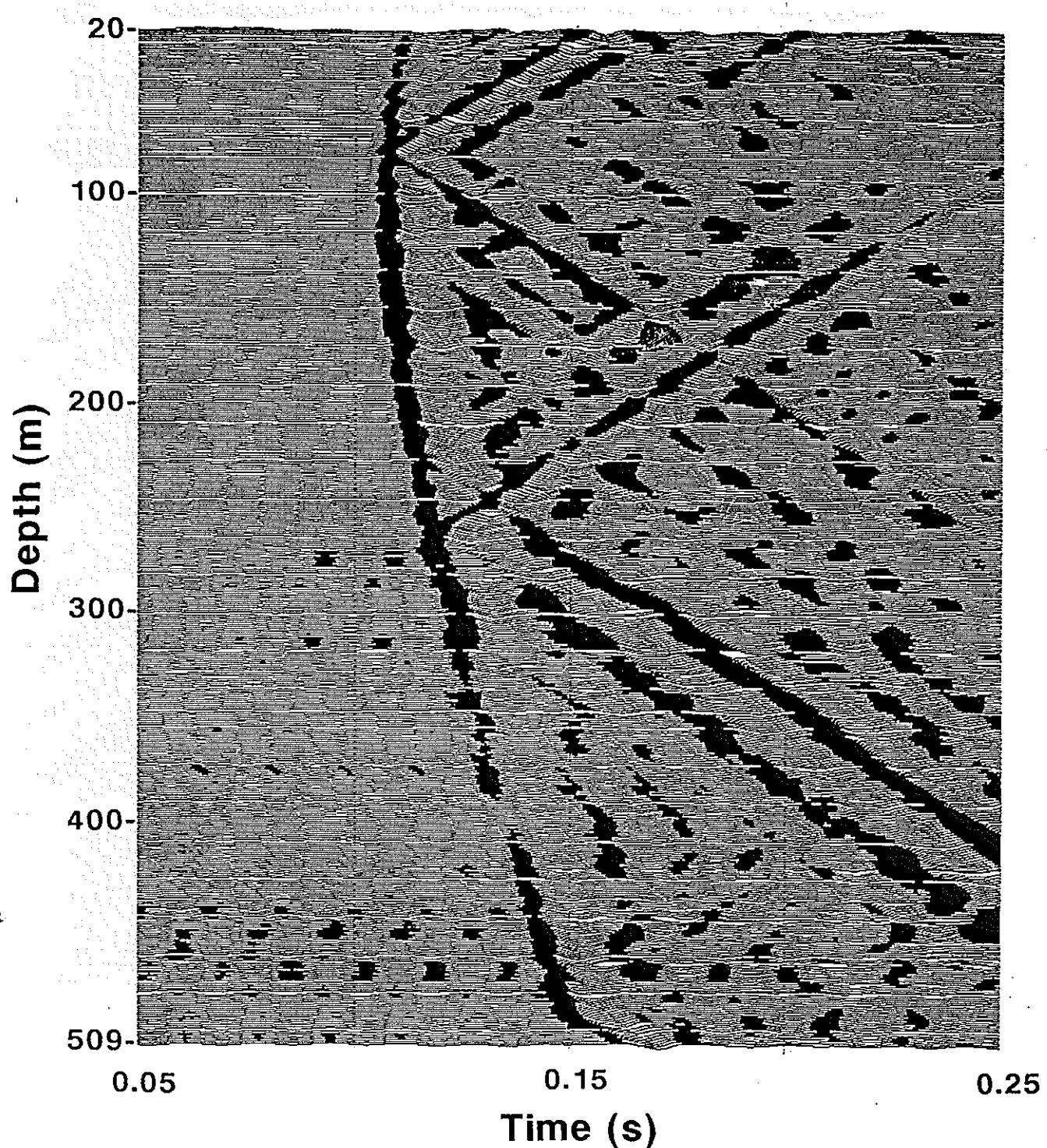


図-4-3-16 WD-4発震のV S P記録（深度20~509m）。スタック処理を行っていない。

WD-1

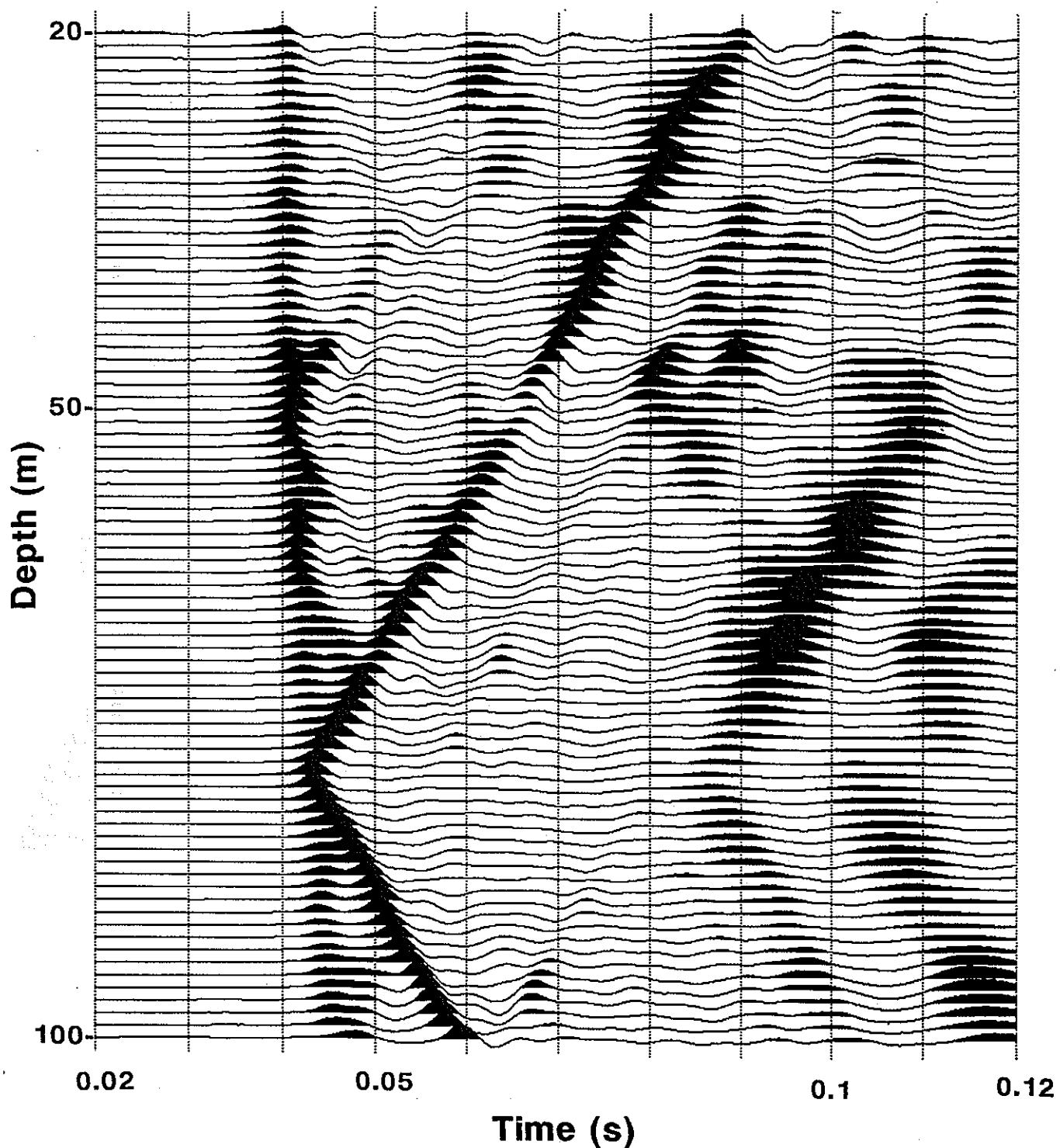


図-4-3-17 WD-1発震のV S P記録（深度20～100m）。スタック処理を行っていない。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

WD-1

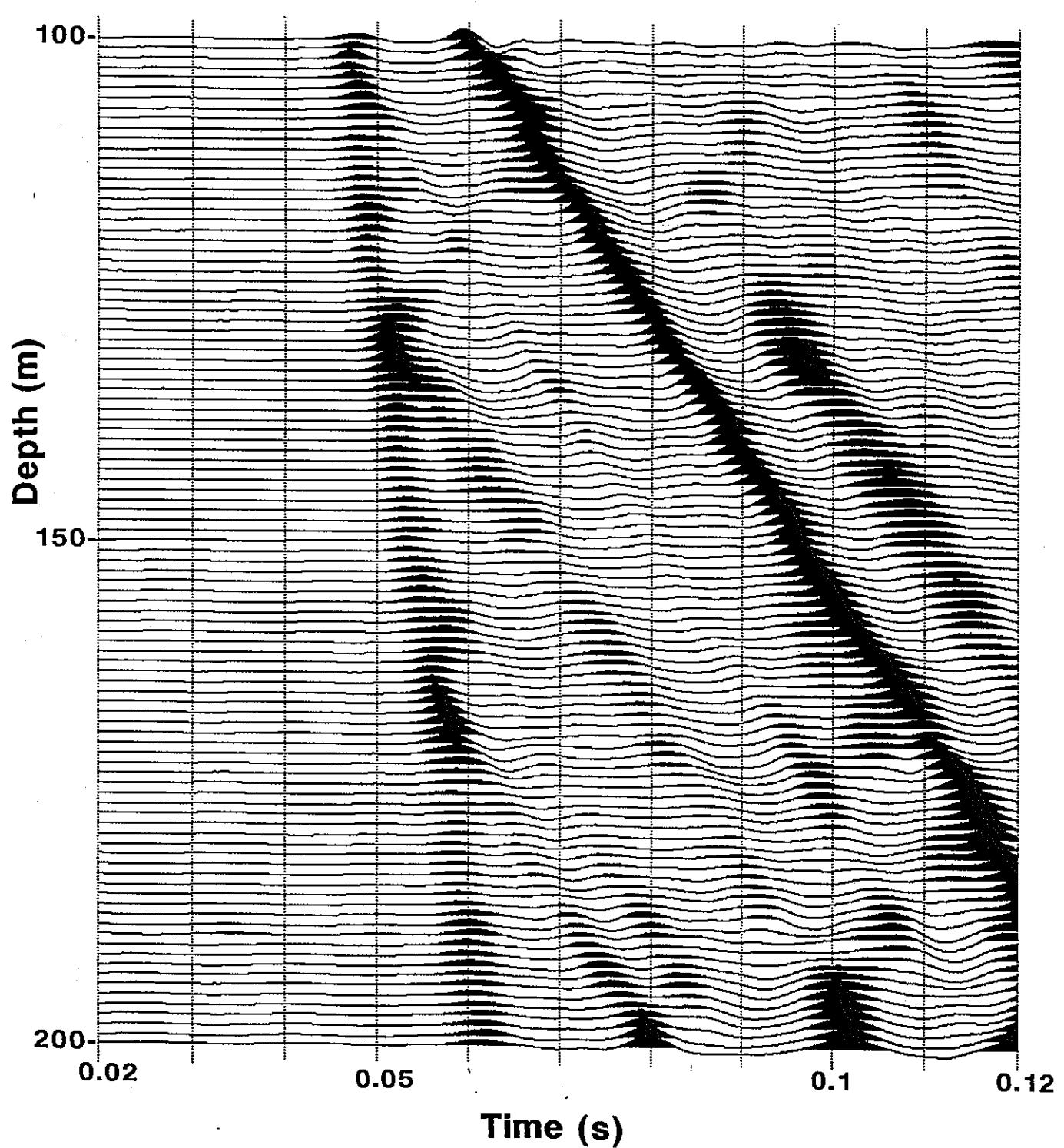


図-4-3-18 WD-1発震のV S P記録（深度100～200m）。スタック処理を行っていない。

WD-1

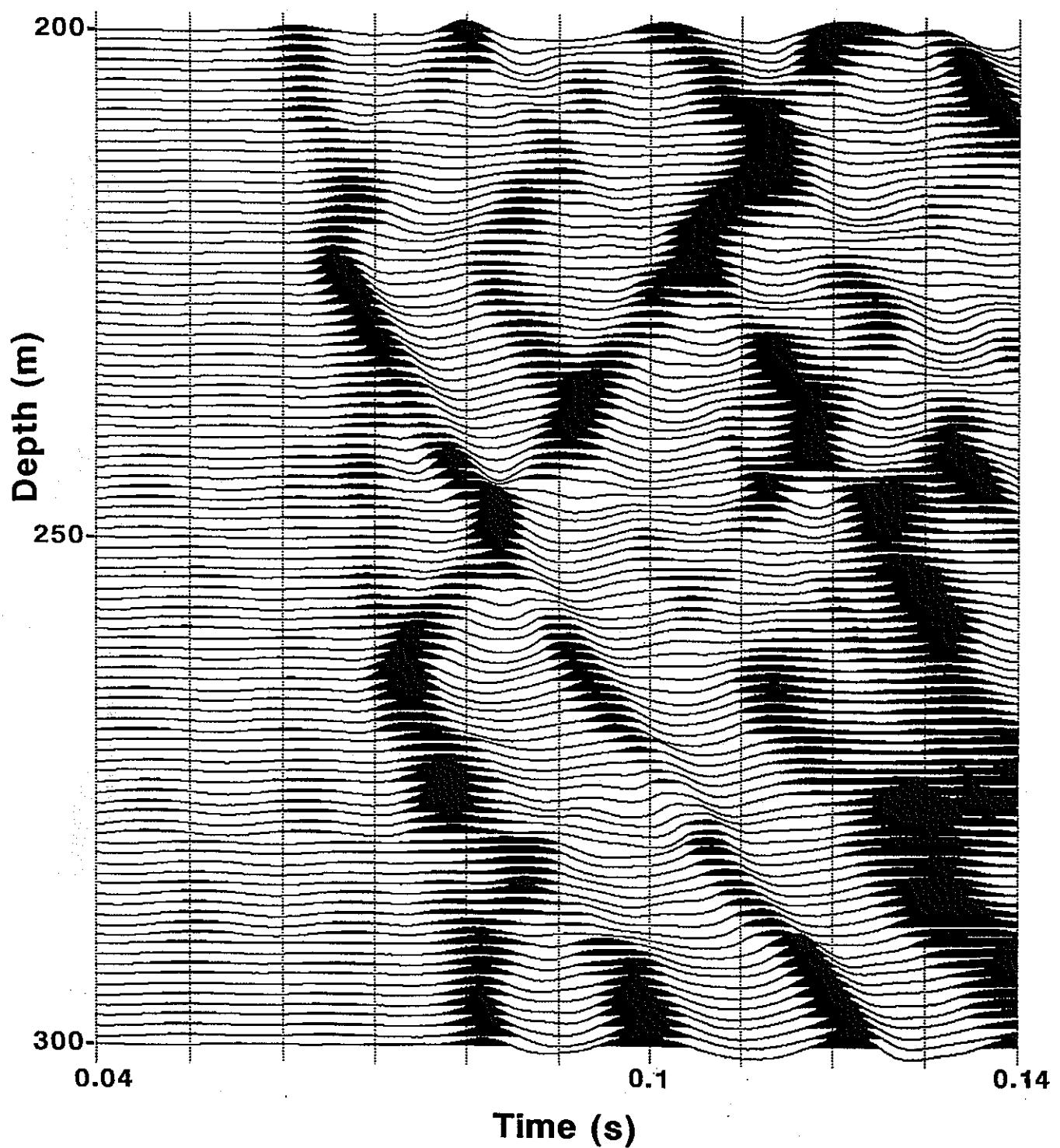


図-4-3-19 WD-1発震のV S P記録（深度200～300m）。スタック処理を行っていない。

WD-1

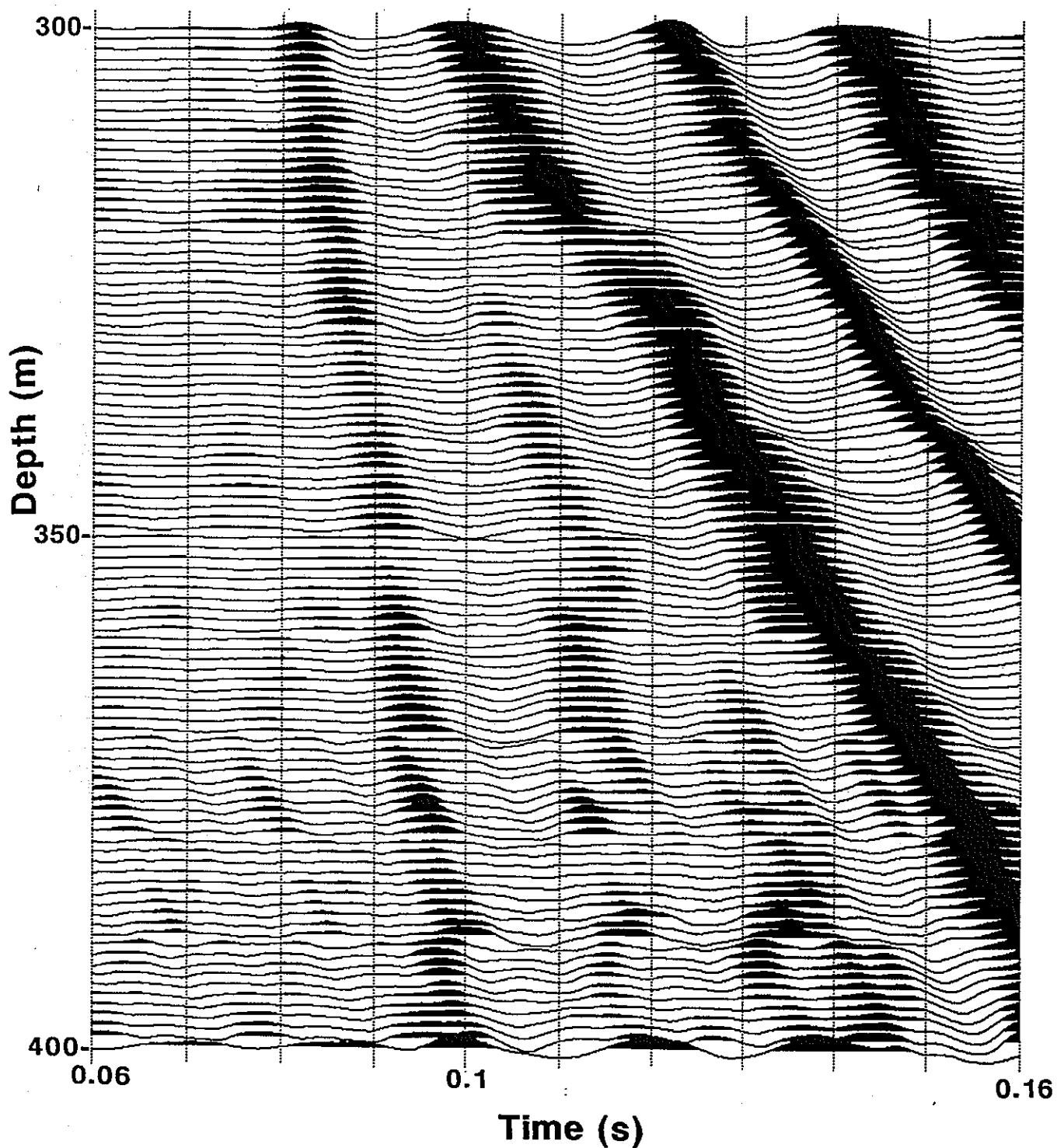


図-4-3-20 WD-1発震のV S P記録（深度300～400m）．スタック処理を行っていない。

WD-1

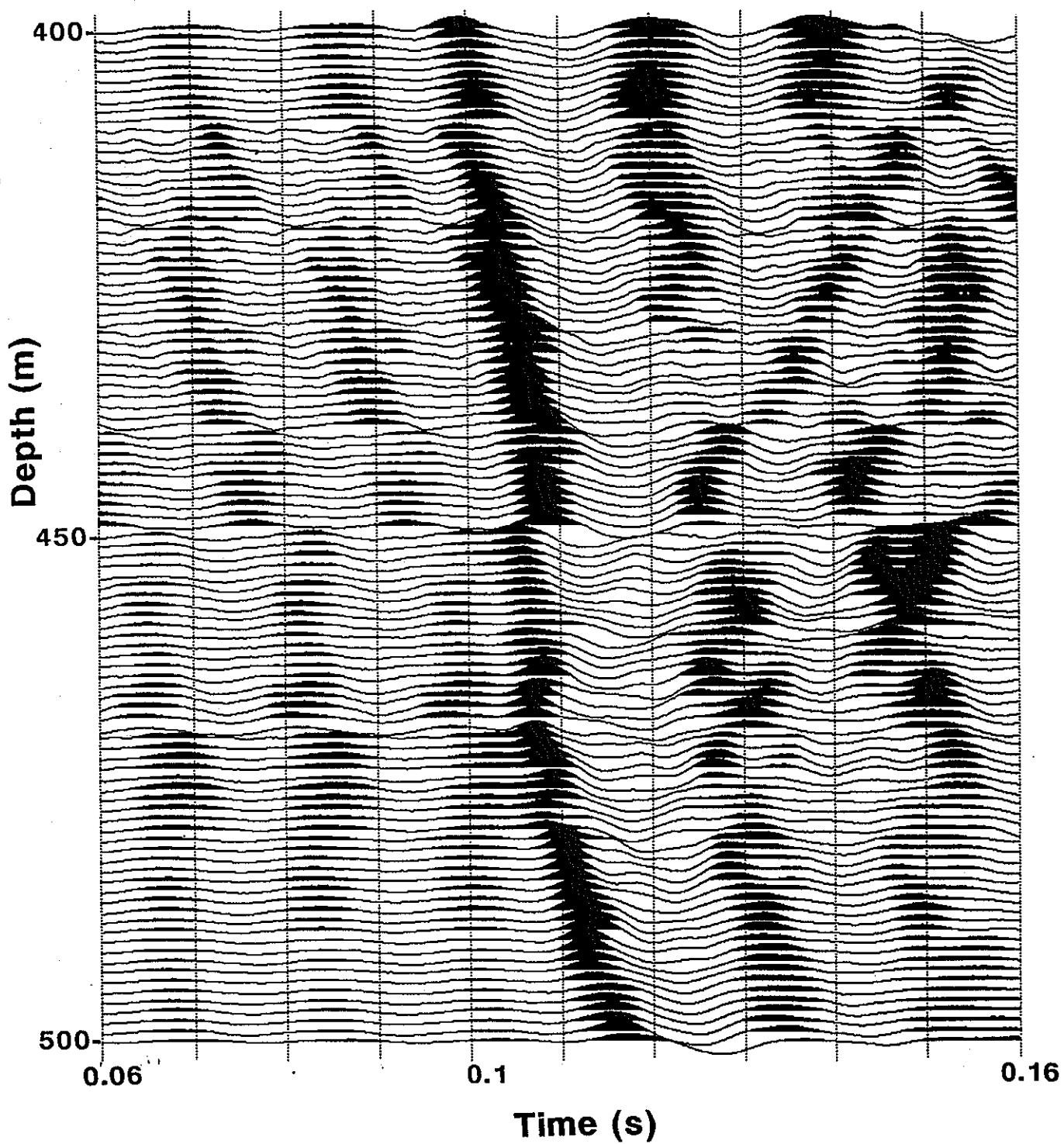


図-4-3-21 WD-1発震のV S P記録（深度400～500m）．スタック処理を行っていない。

WD-1

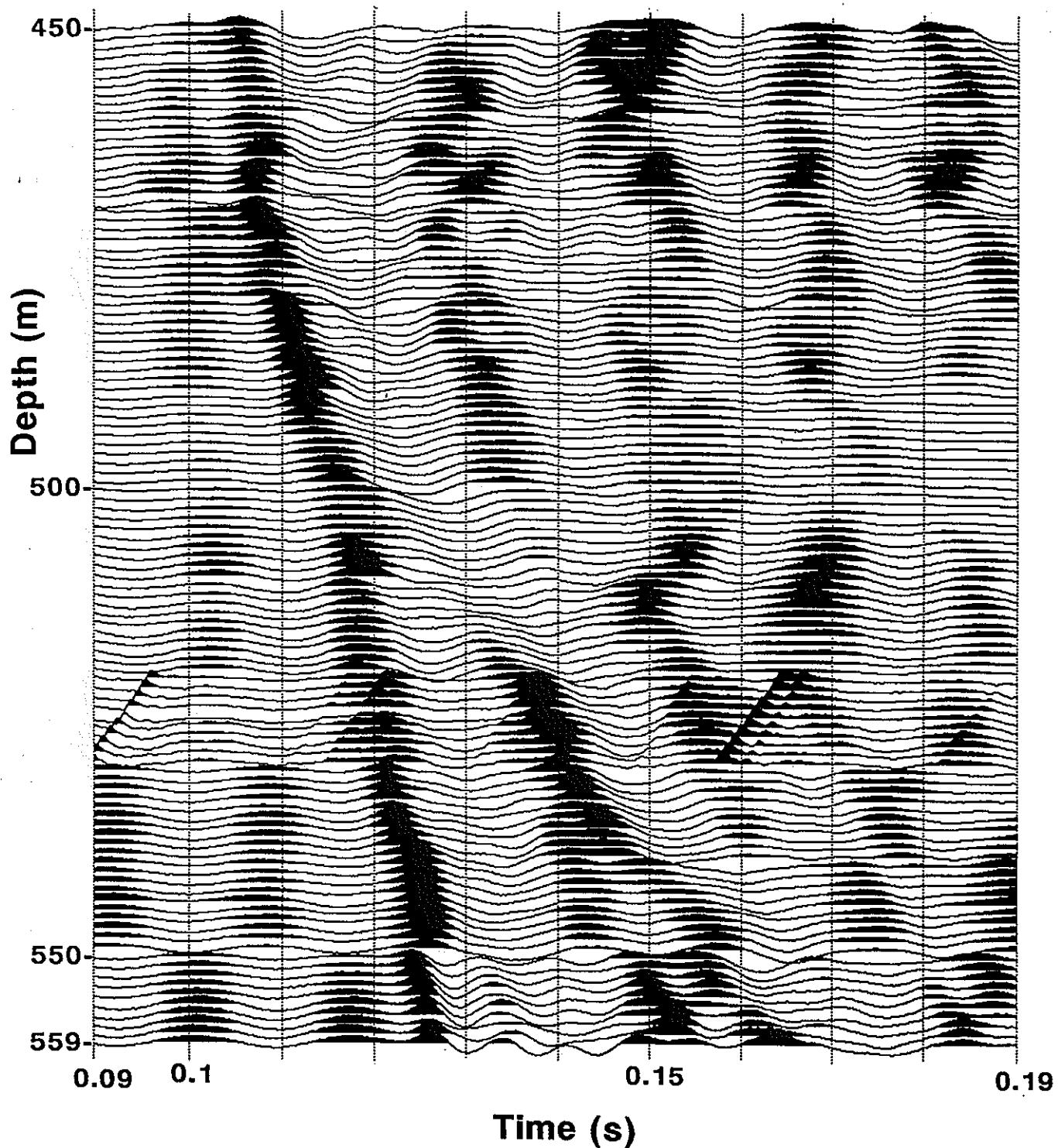


図-4-3-22 WD-1発震のV S P記録（深度450～559m）。スタック処理を行っていない。

WD-4

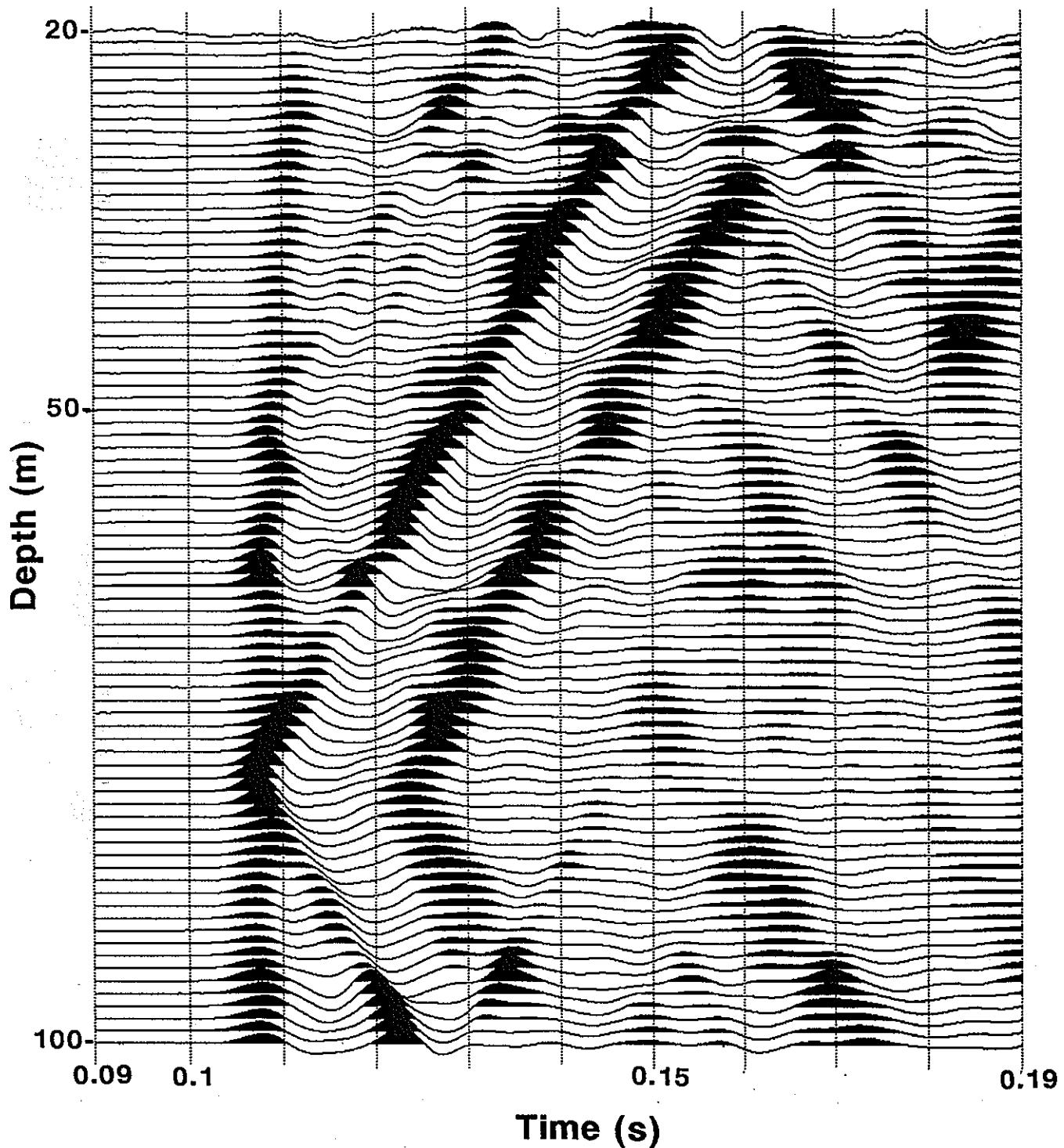


図-4-3-23 WD-4発震のV S P記録（深度20～100m）．スタック処理を行っていない。

WD-4

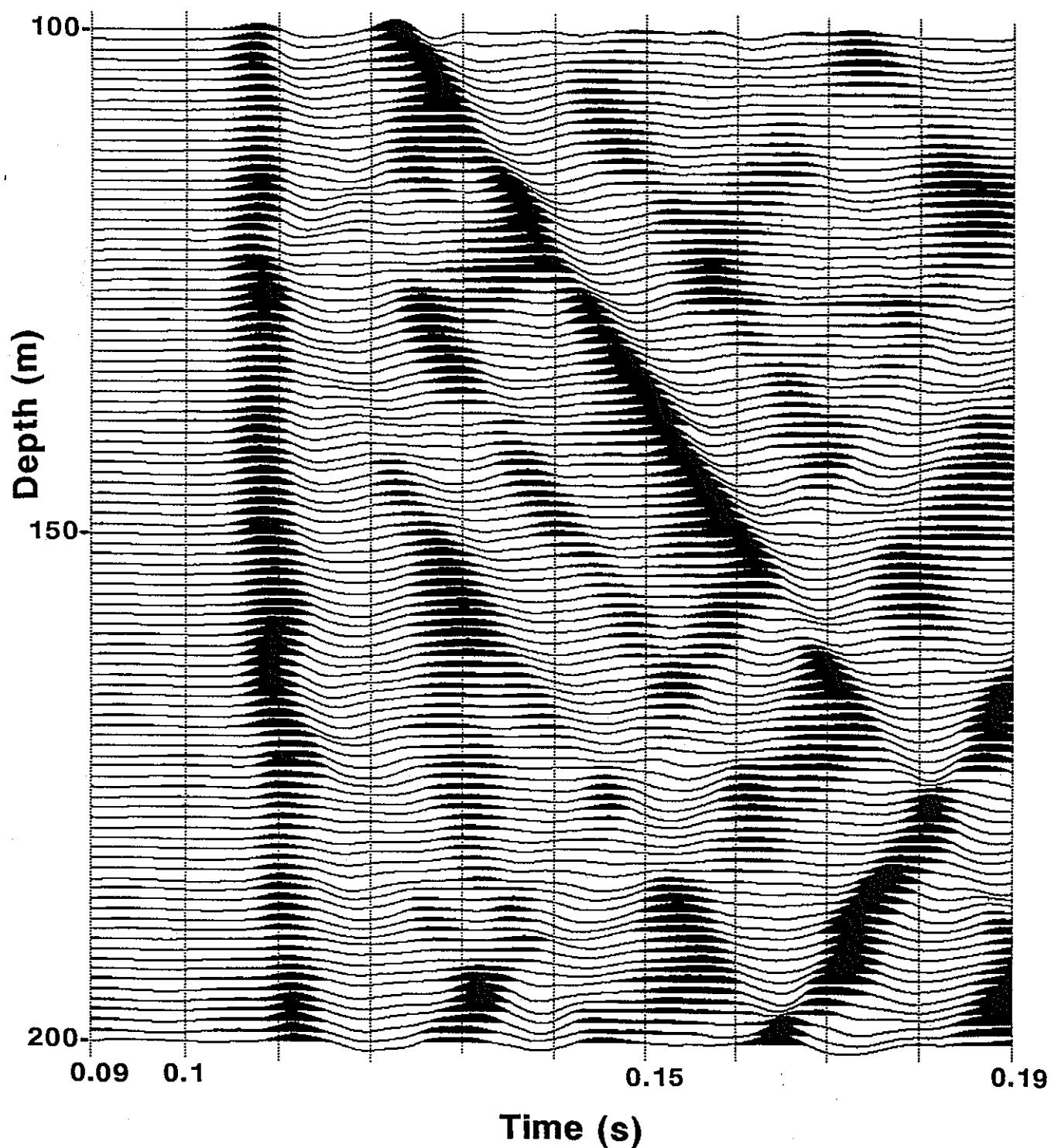


図-4-3-24 WD-4発震のV S P記録（深度100～200m）．スタック処理を行っていない。

WD-4

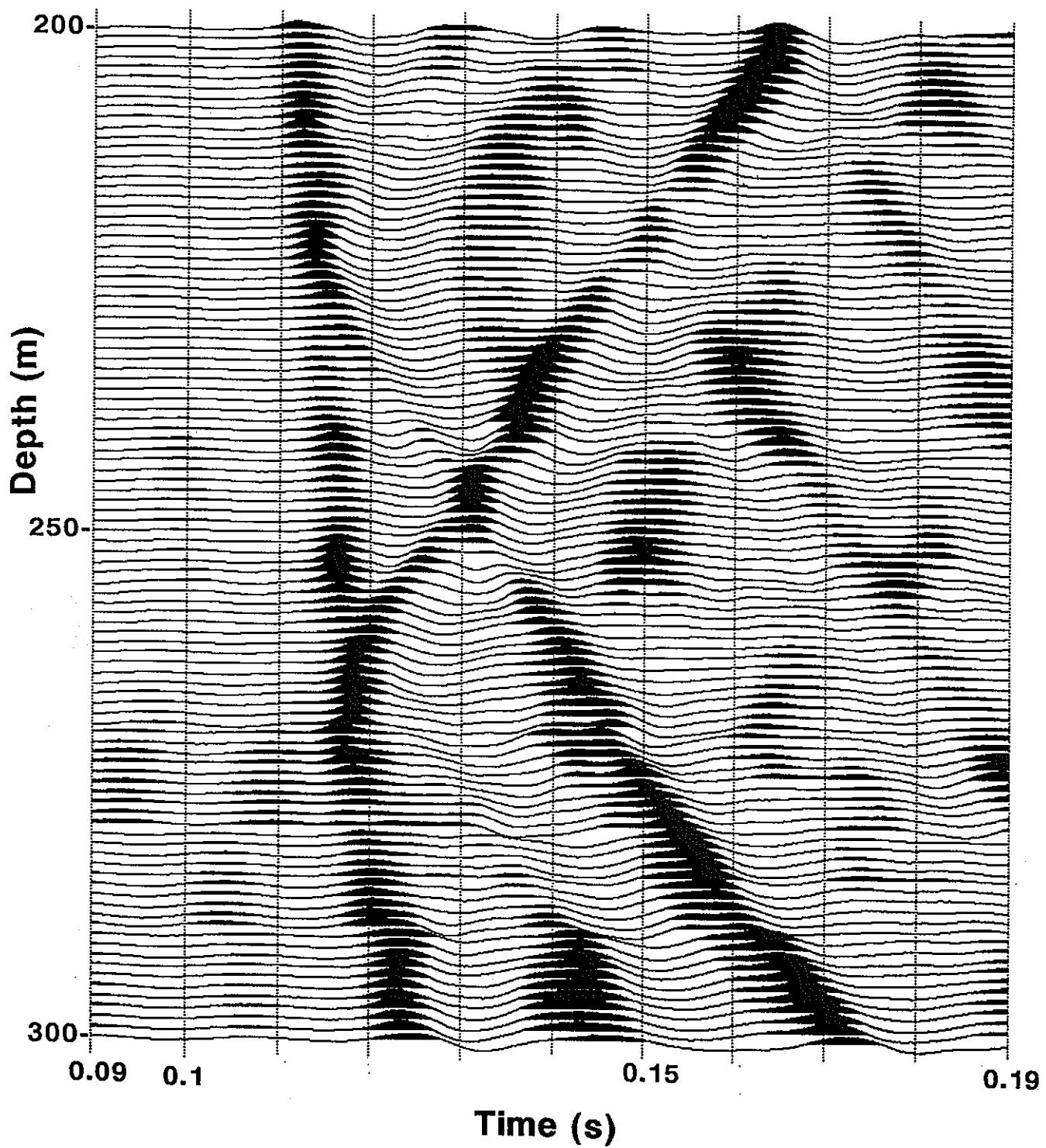


図-4-3-25 WD-4発震のV S P記録（深度200～300m）。スタック処理を行っていない。

WD-4

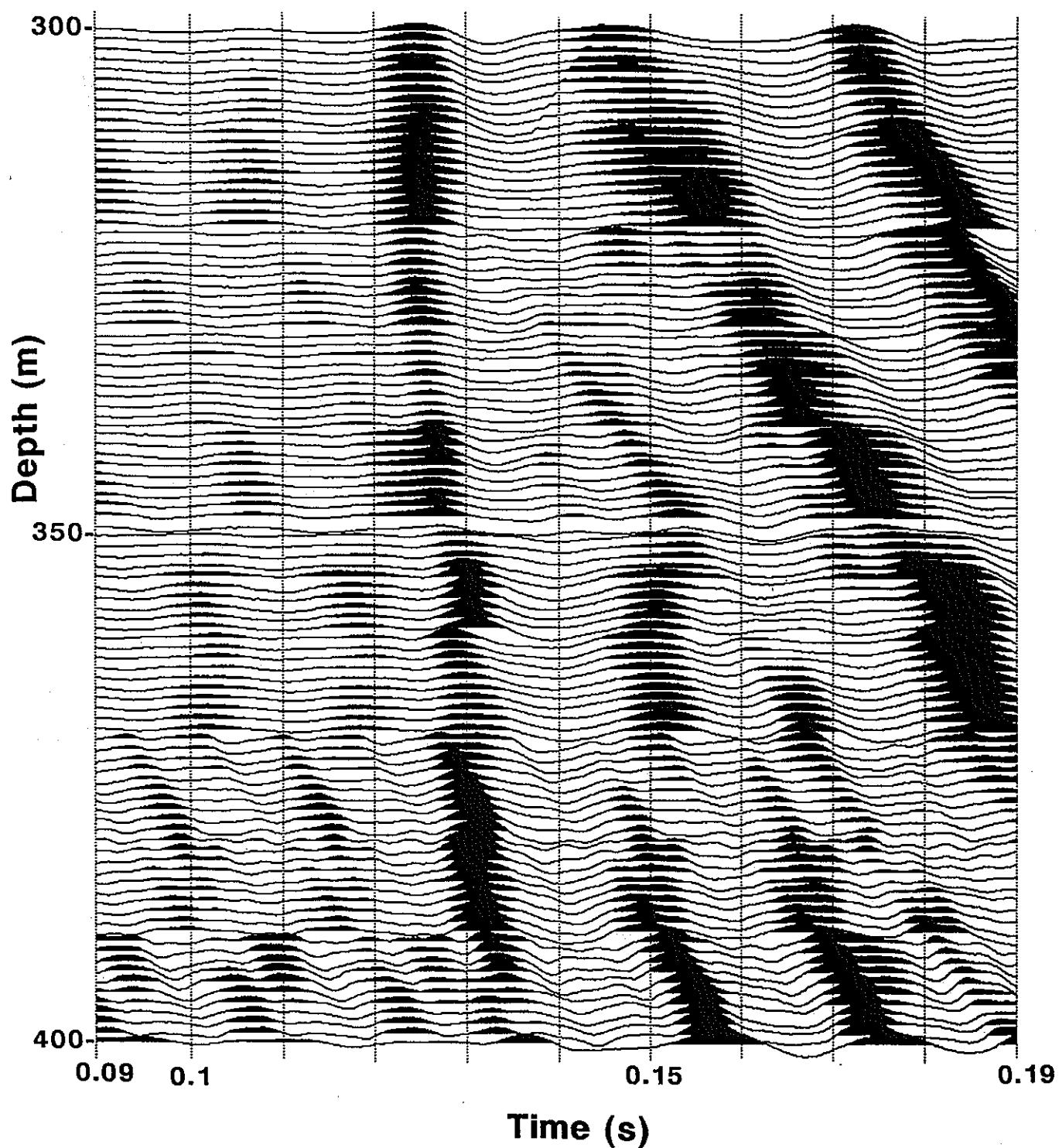


図-4-3-26 WD-4発震のV S P記録（深度300～400m）．スタッツク処理を行っていない。

WD-4

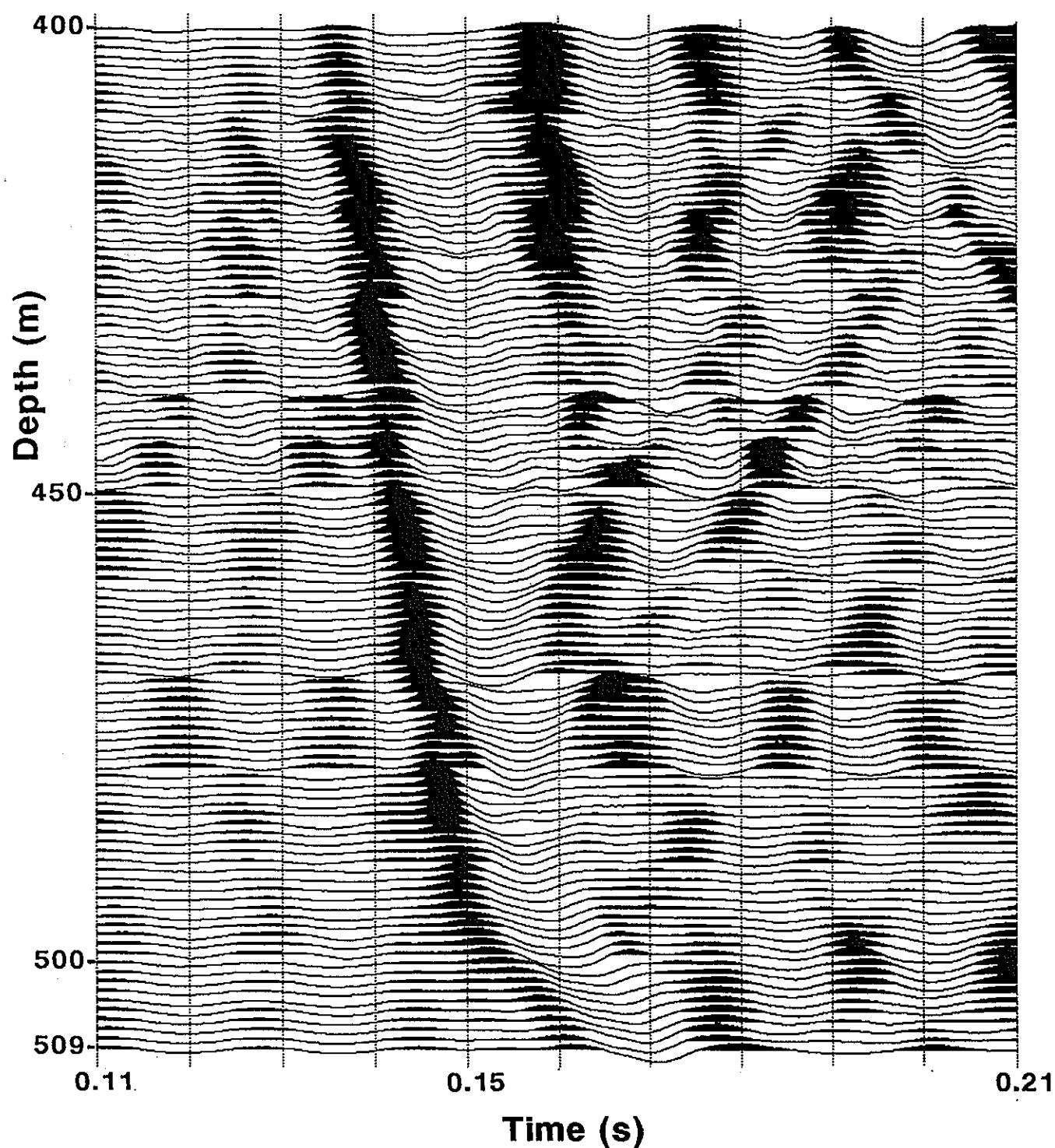


図-4-3-27 WD-4発震のV S P記録（深度400～509m）。スタック処理を行っていない。

WD-1 stack

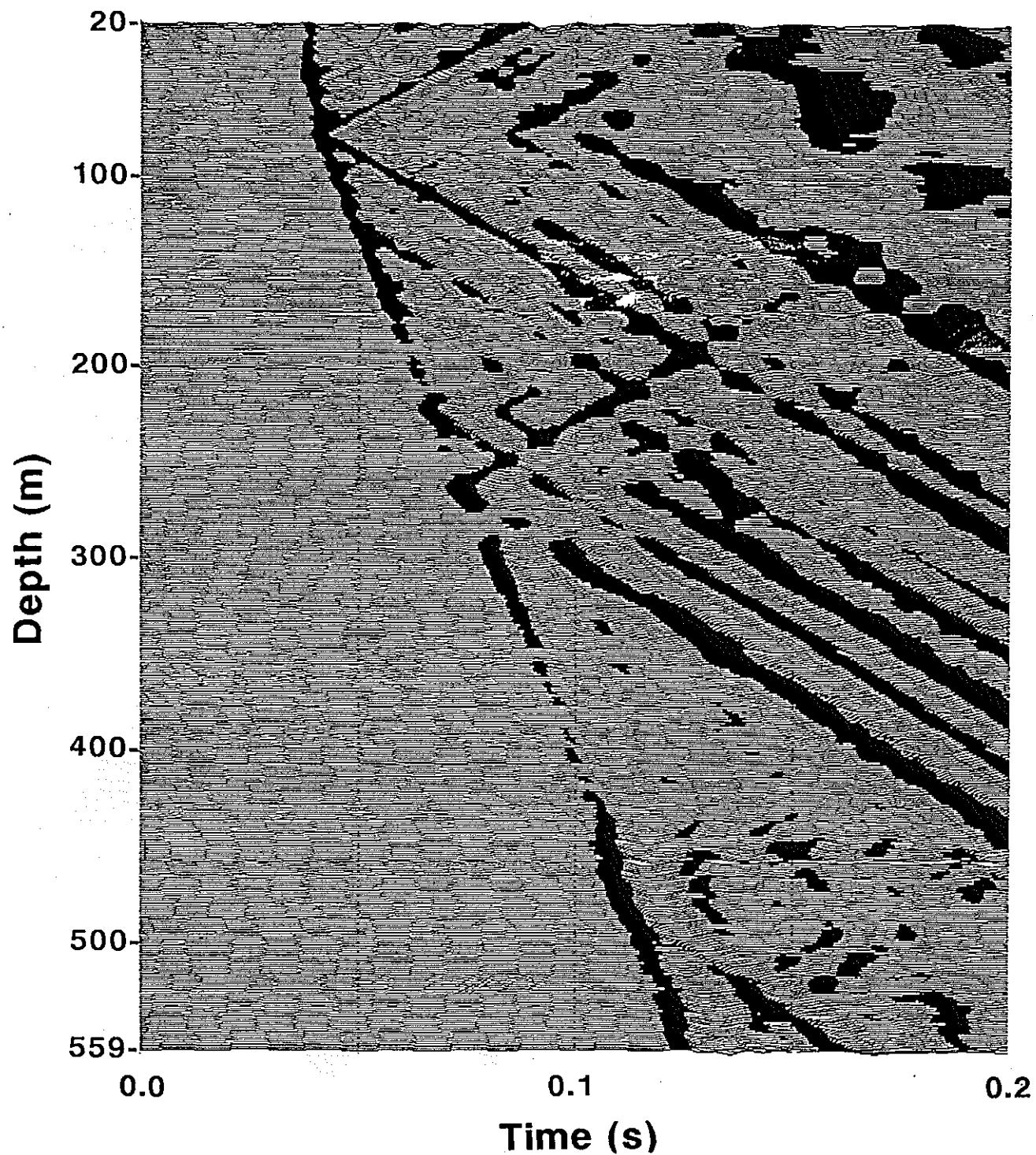


図-4-3-28 WD-1発震のV S P記録（深度20～559m）。スタック処理を行っている。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

WD-4 stack

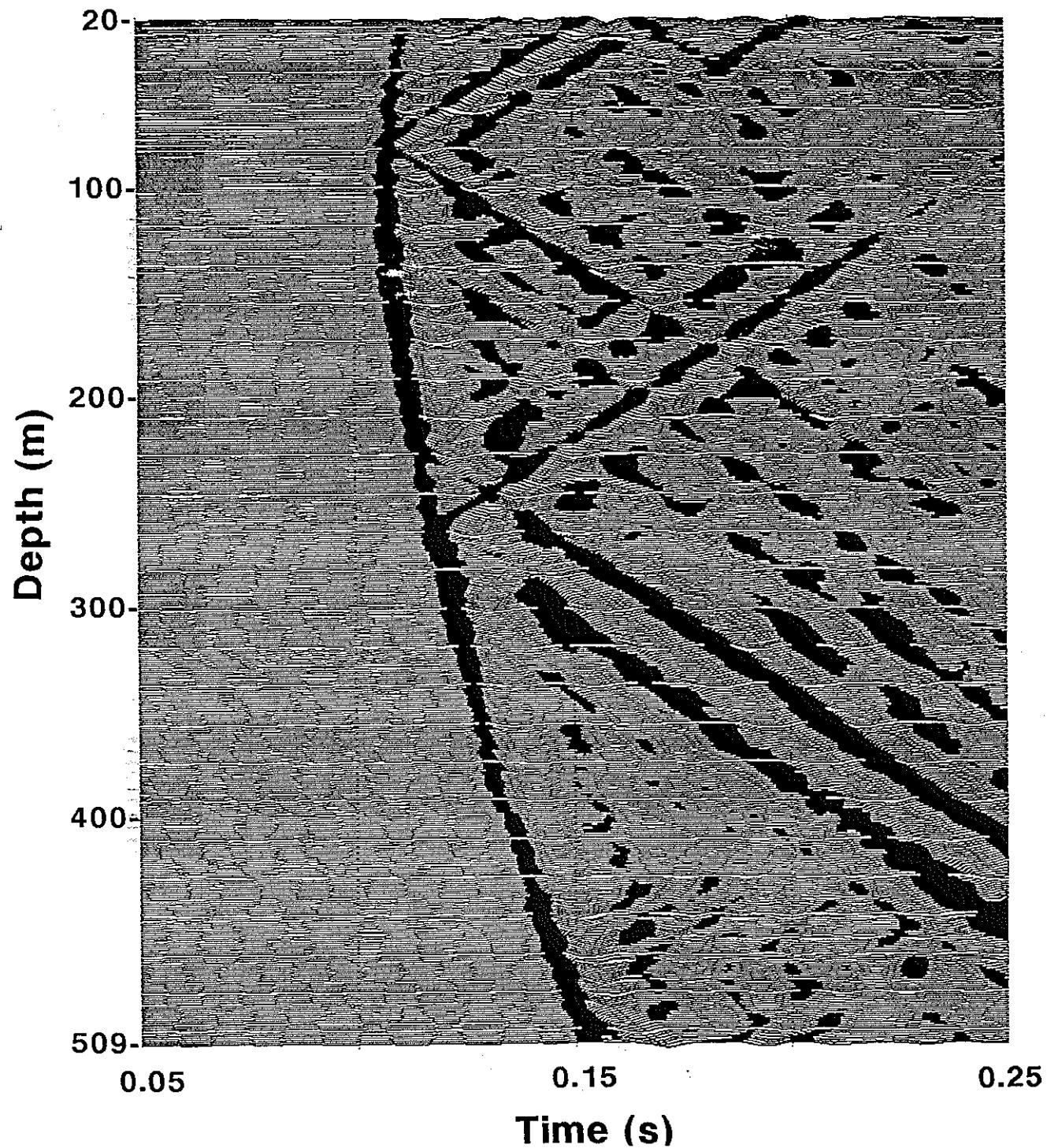


図-4-3-29 WD-4発震のV S P記録（深度20～509m）．スタック処理を行っている。

WD-1 stack

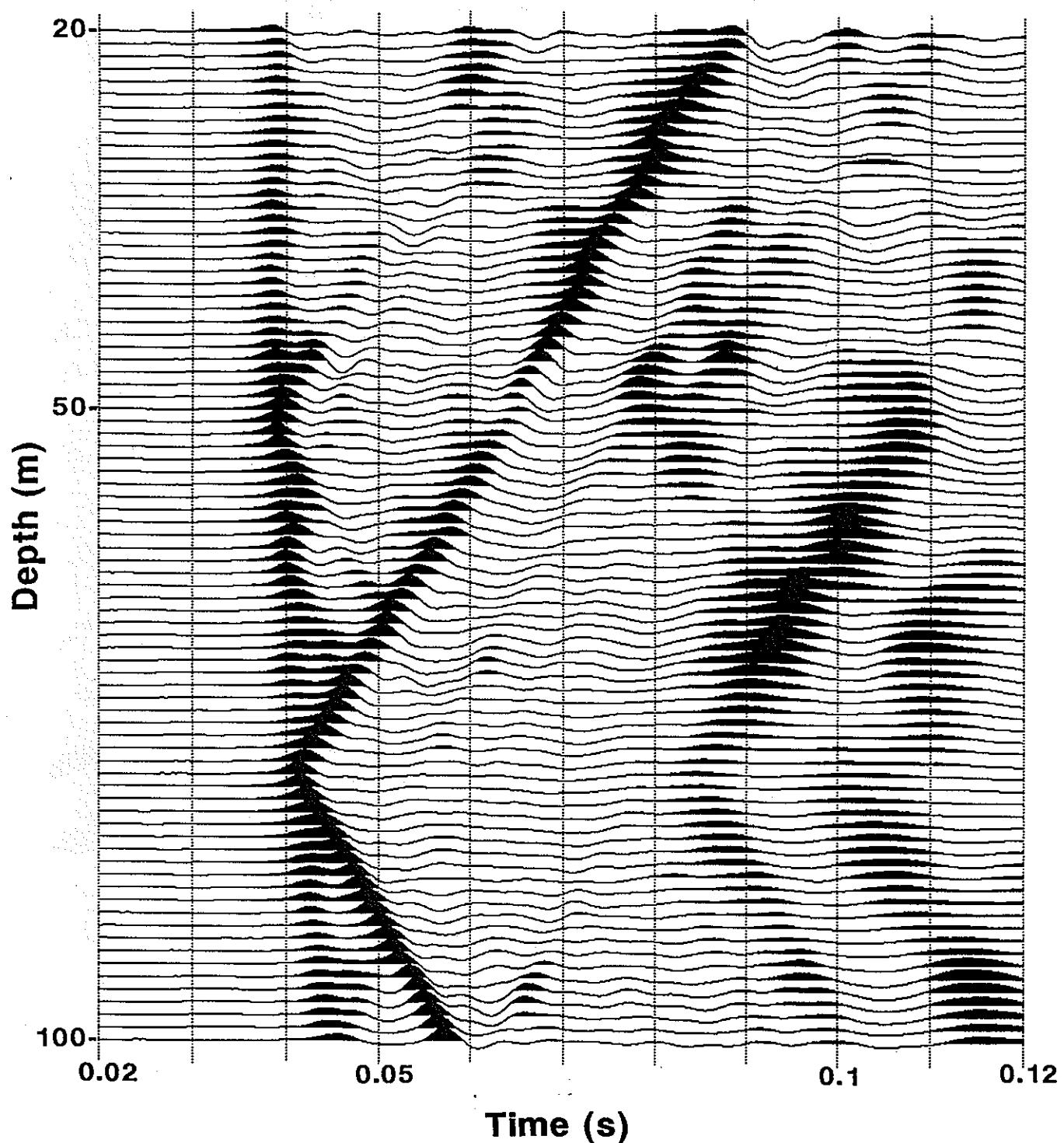


図-4-3-30 WD-1発震のVSP記録（深度20~100m）。スタック処理を行っている。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

WD-1 stack

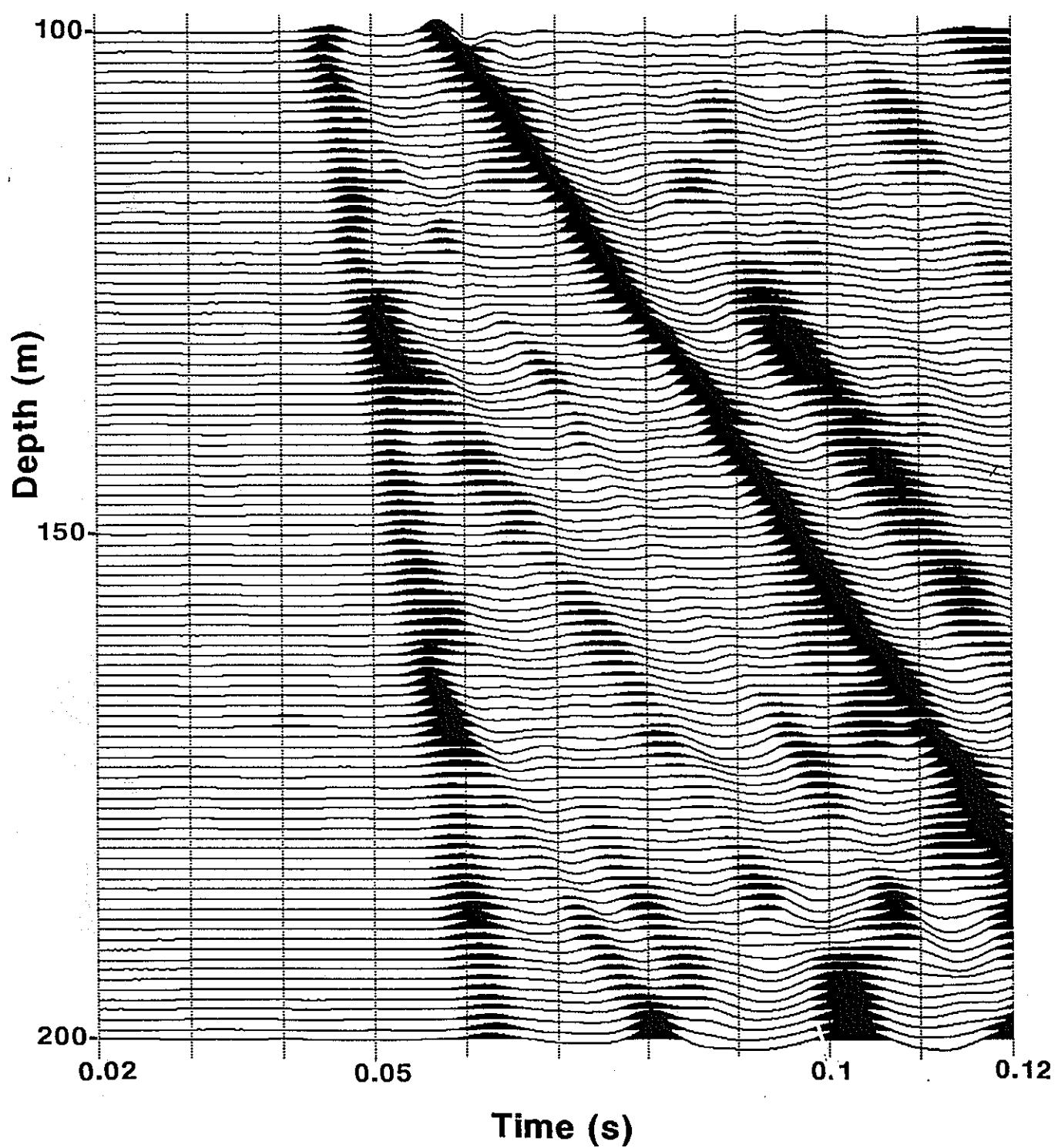


図-4-3-31 WD-1発震のV S P記録（深度100～200m）．スタック処理を行っている。

WD-1 stack

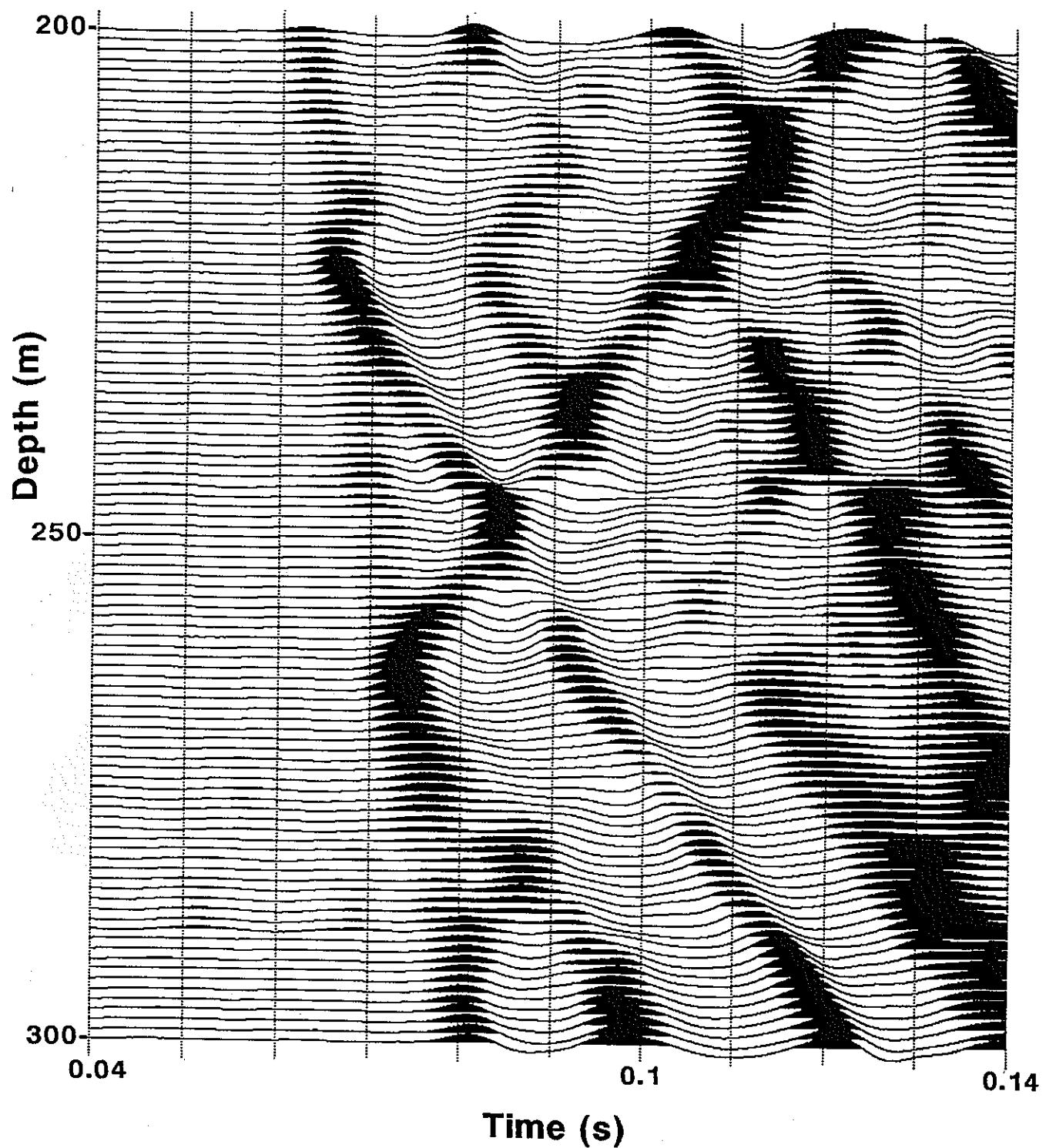


図-4-3-32 WD-1発震のV S P記録（深度200～300m）．スタック処理を行っている。

WD-1 stack

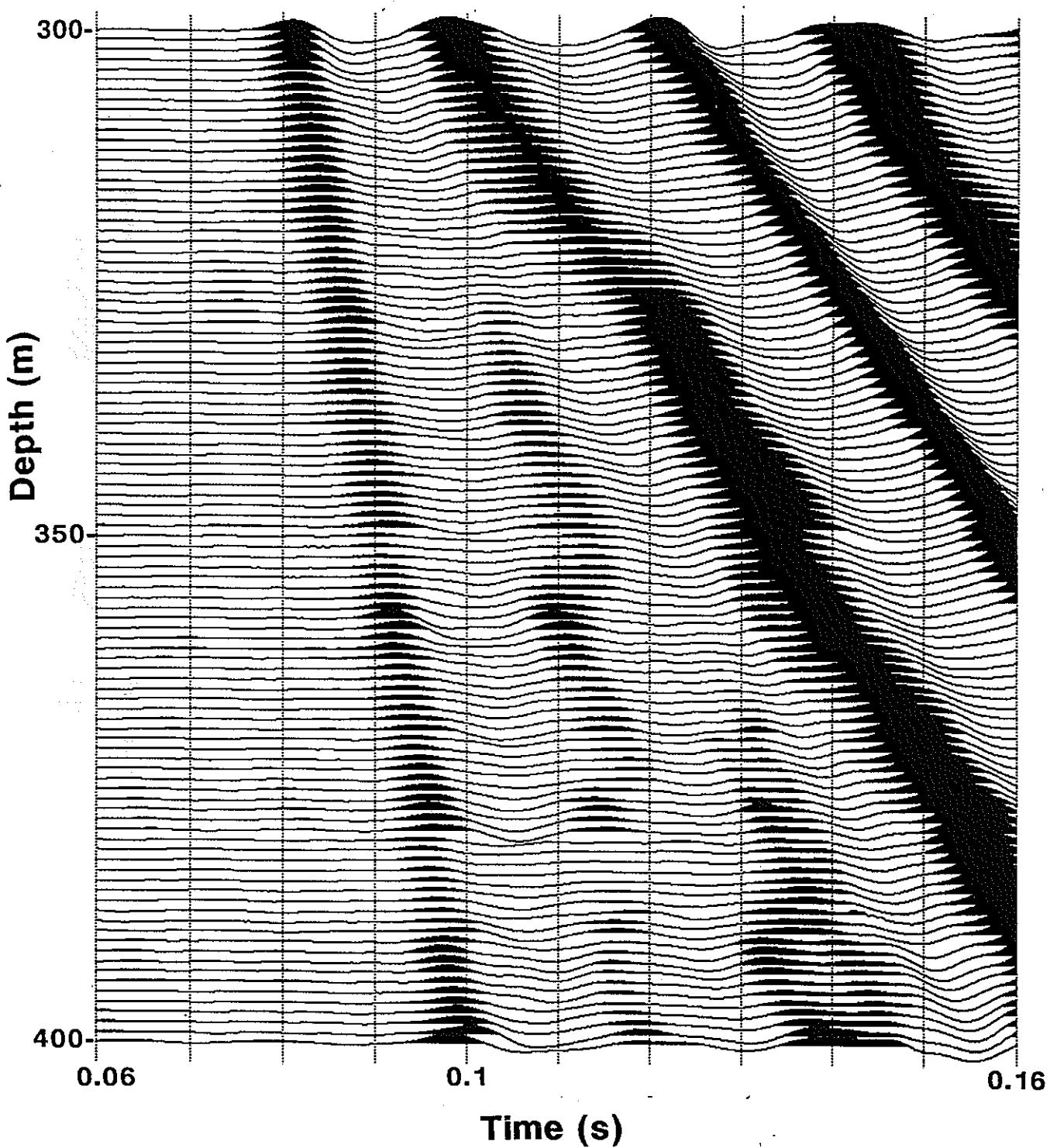


図-4-3-33 WD-1発震のV S P記録（深度300～400m）。スタック処理を行っている。

WD-1 stack

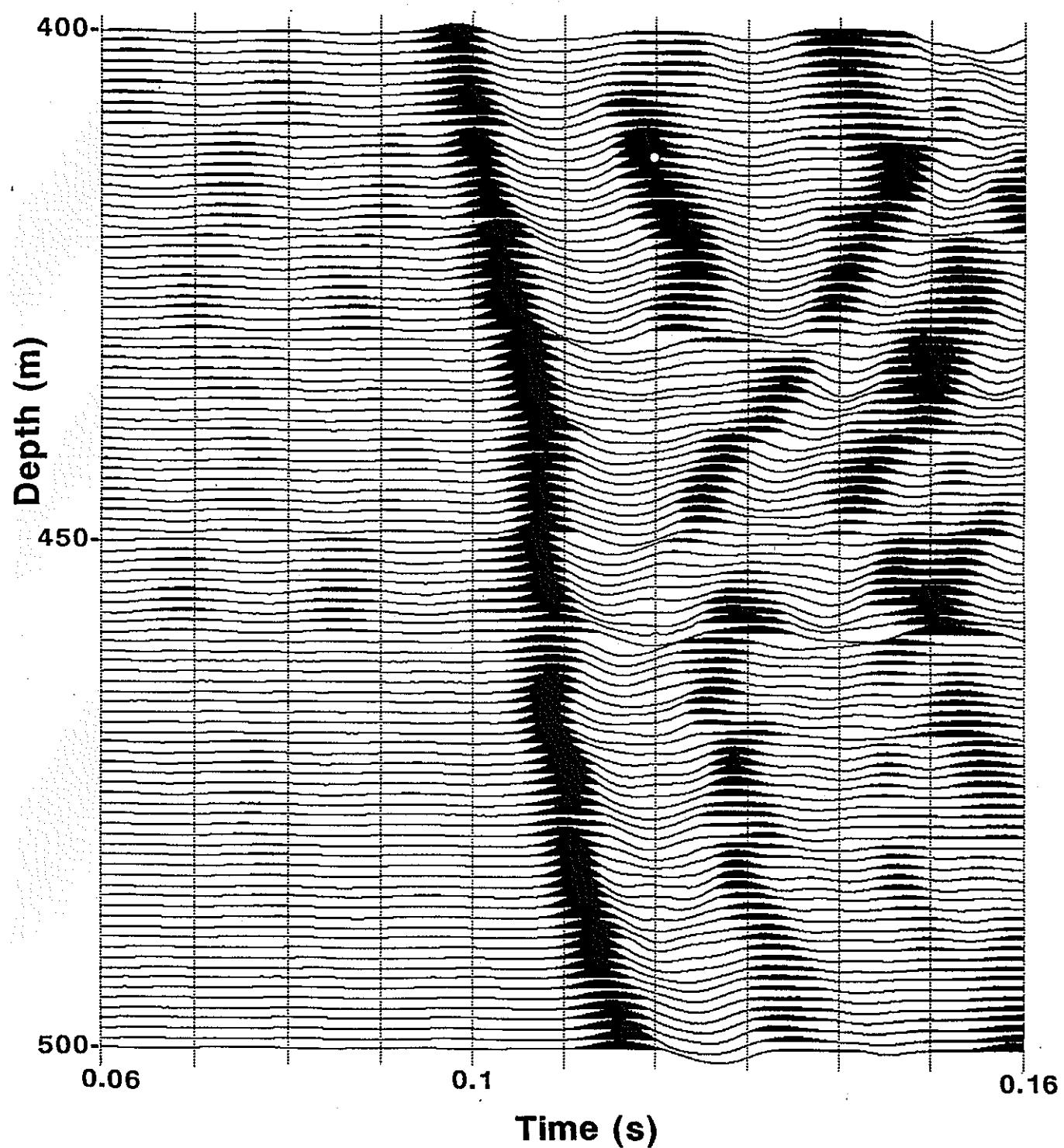


図-4-3-34 WD-1発震のVSP記録（深度400～500m）。スタック処理を行っている。

WD-1 stack

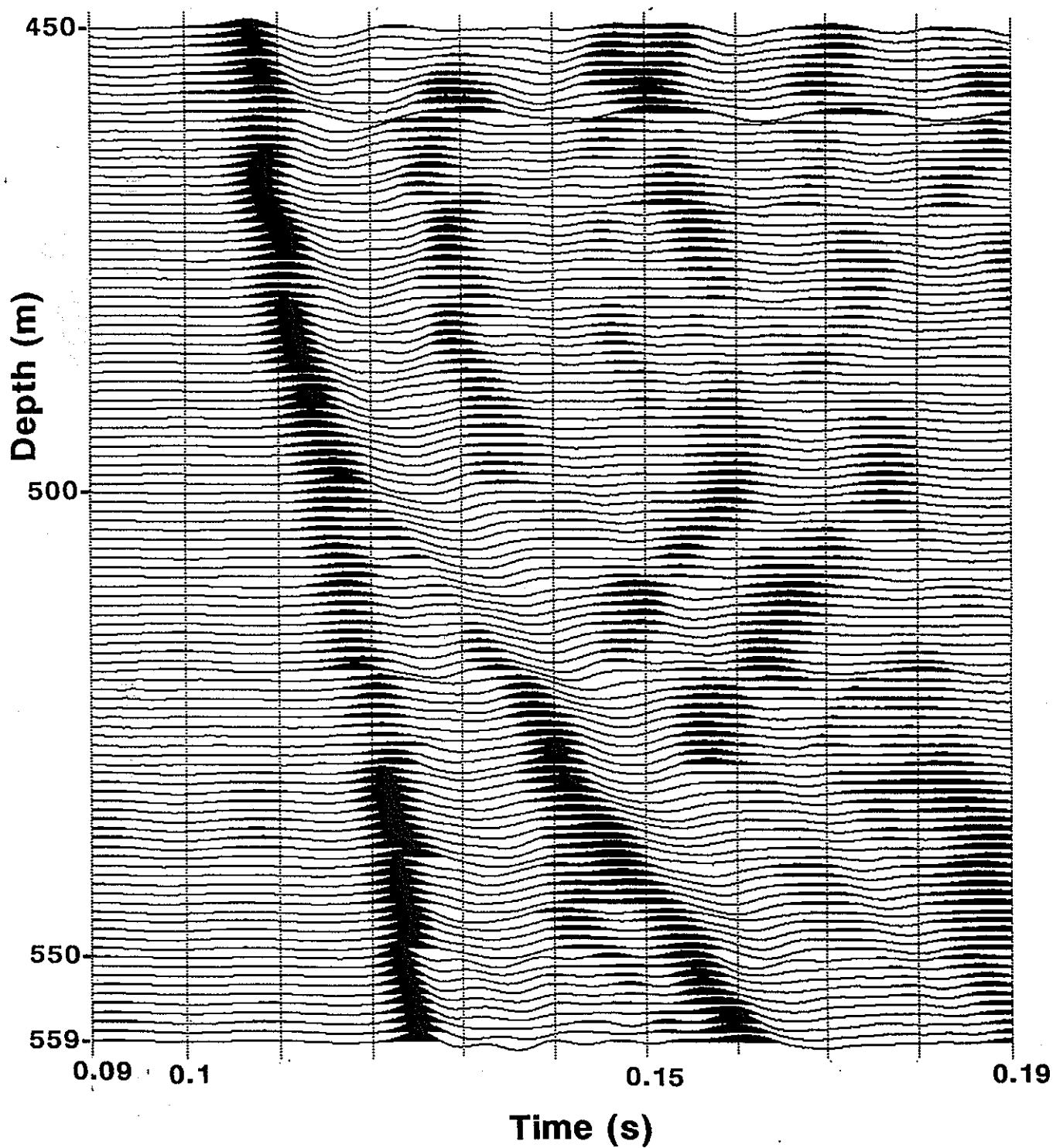


図-4-3-35 WD-1発震のVSP記録（深度450～559m）。スタック処理を行っている。

WD-4 stack

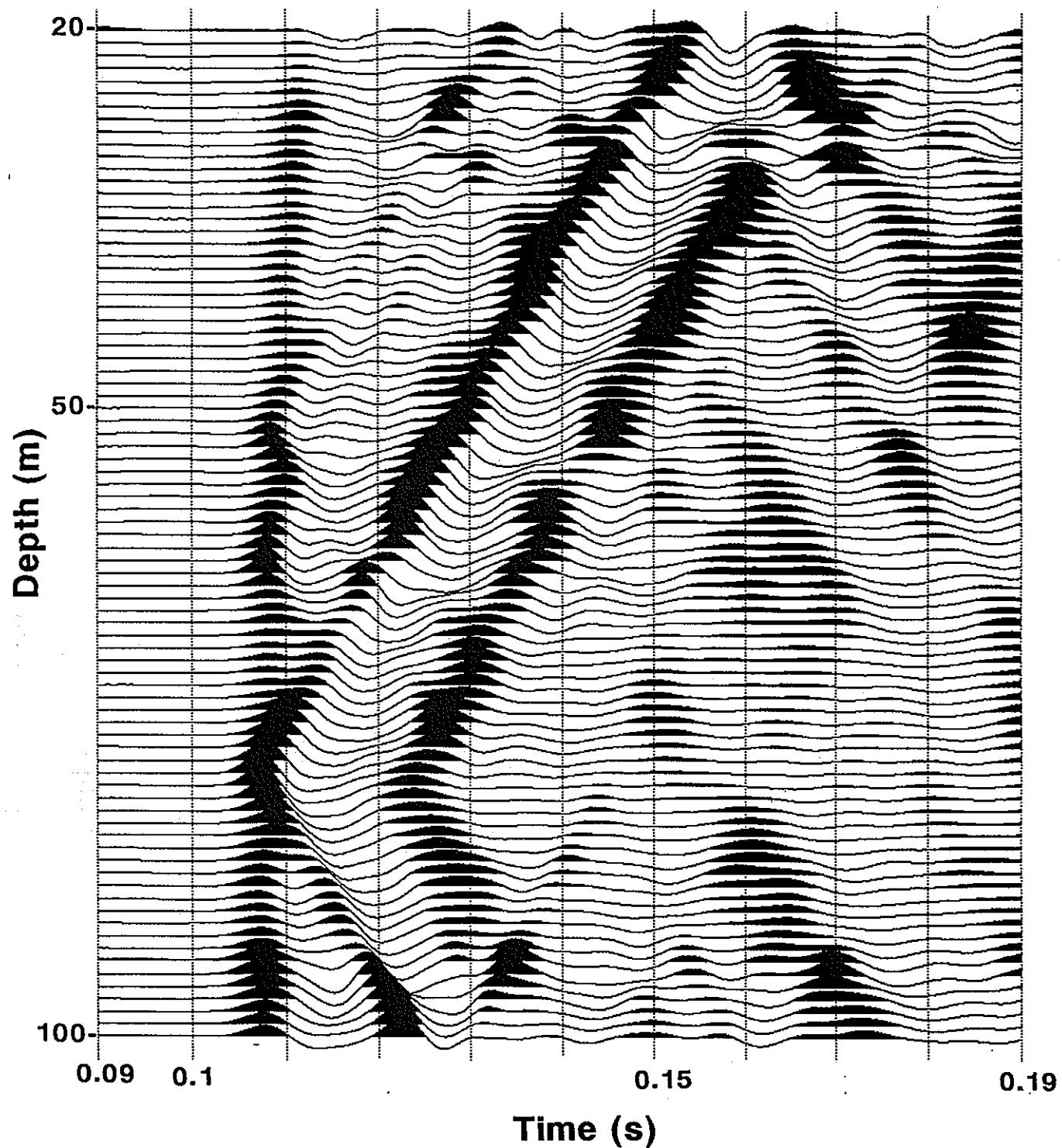


図-4-3-36 WD-4発震のV S P記録（深度20～100m）。スタック処理を行っている。

WD-4 stack

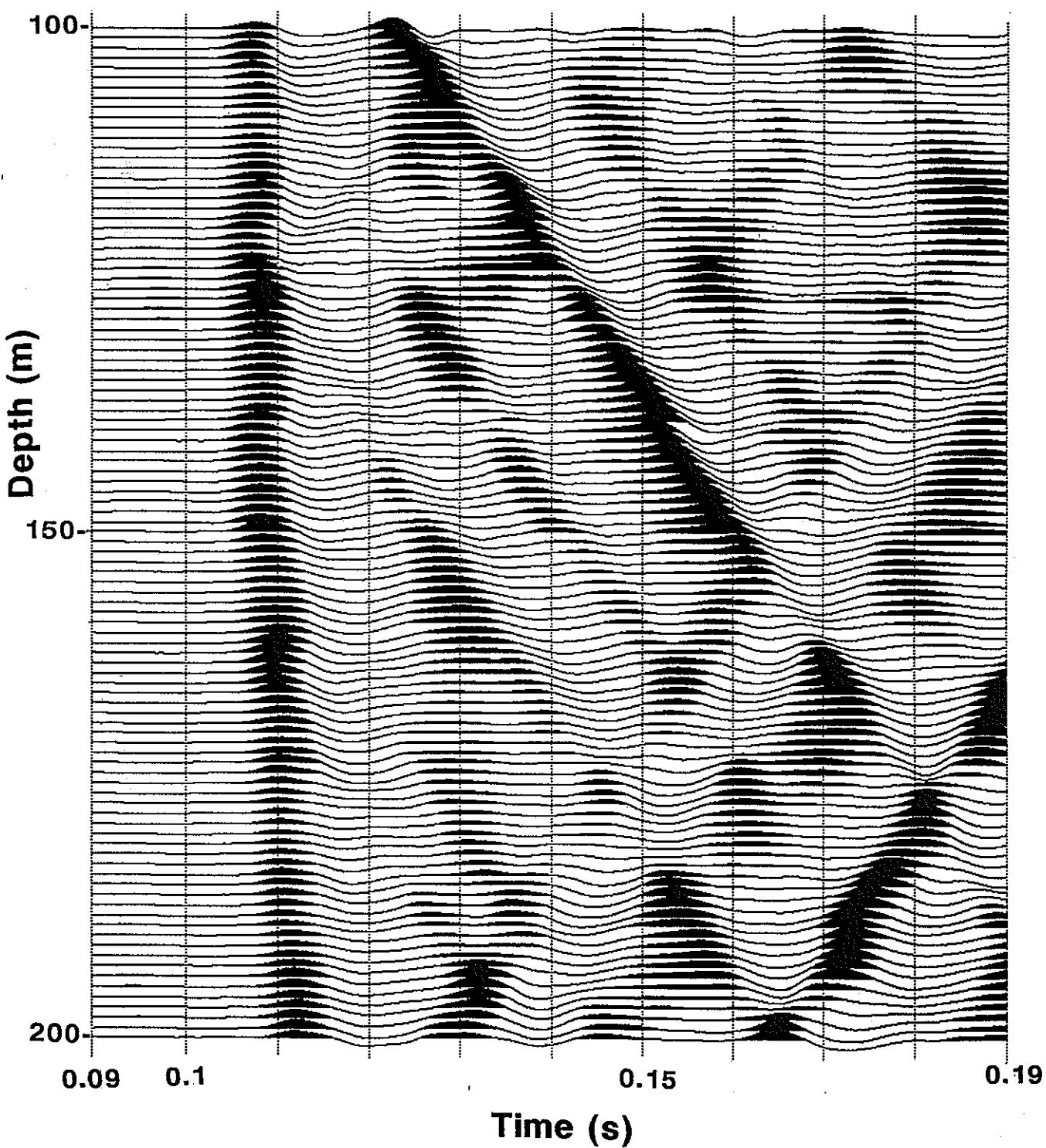


図-4-3-37 WD-4発震のV S P記録（深度100～200m）。スタック処理を行っている。

WD-4 stack

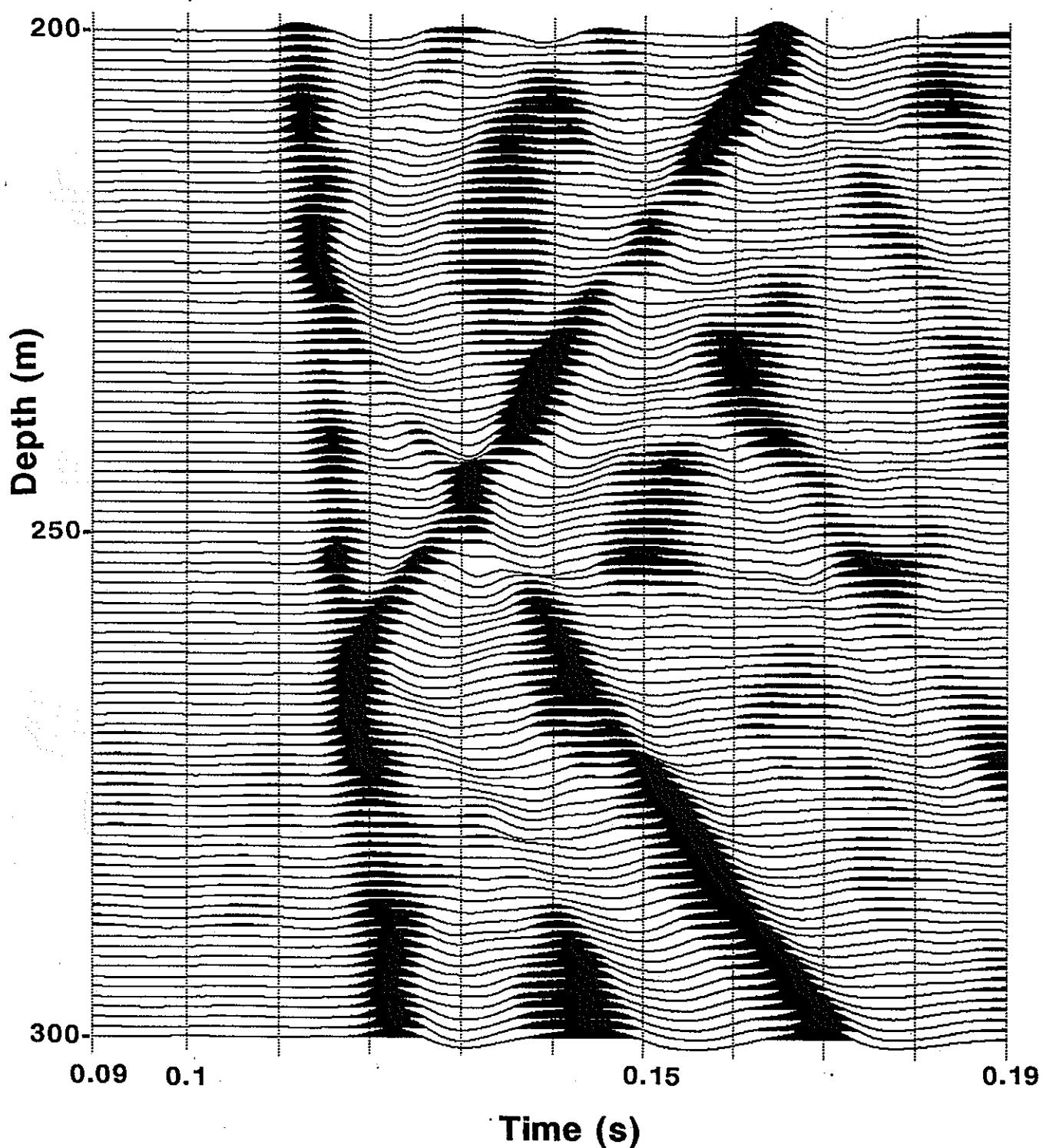


図-4-3-38 WD-4発震のV S P記録（深度200～300m）。スタック処理を行っている。

WD-4 stack

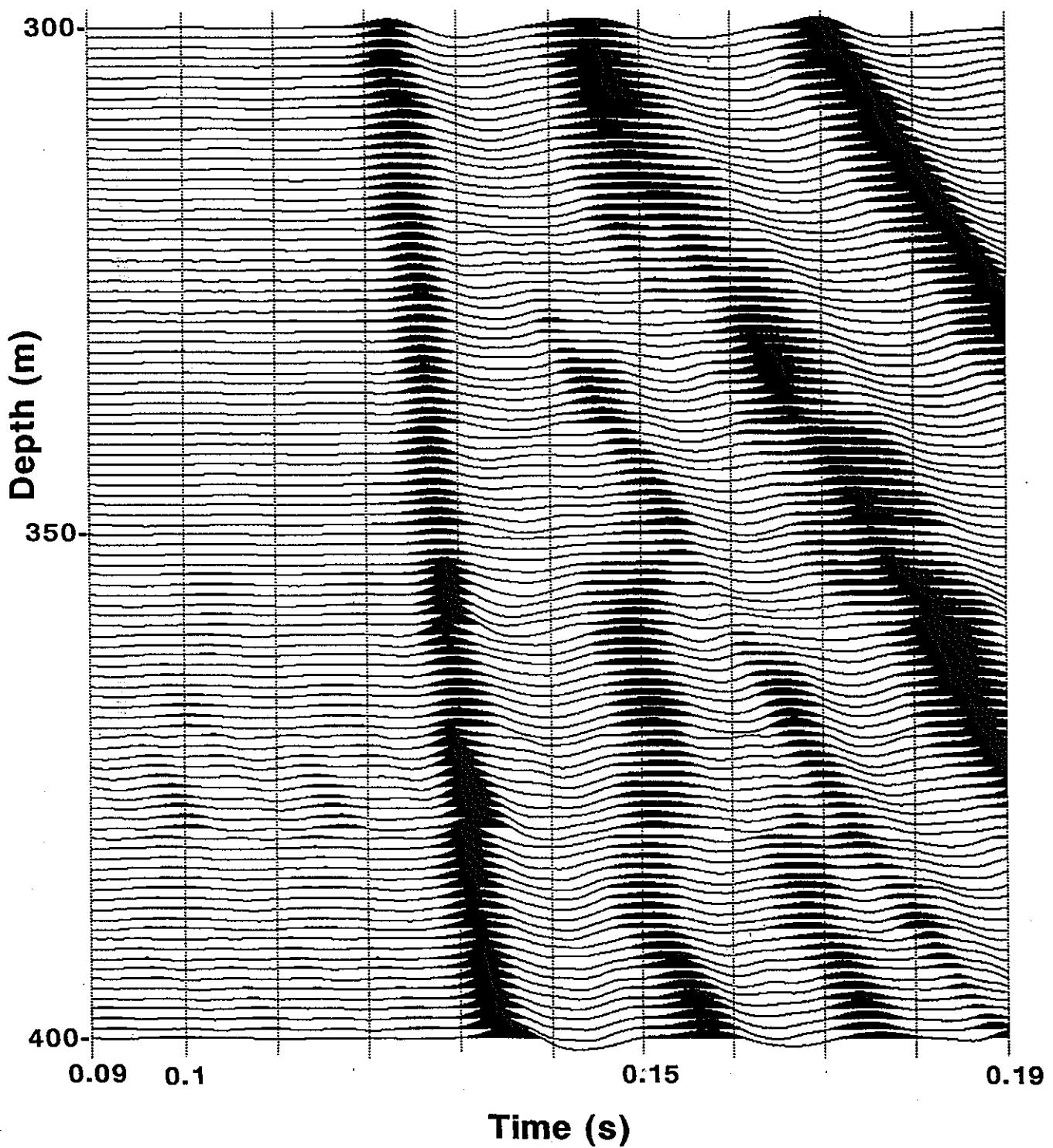


図-4-3-39 WD-4発震のV S P記録（深度300～400m）。スタッツク処理を行っている。

WD-4 stack

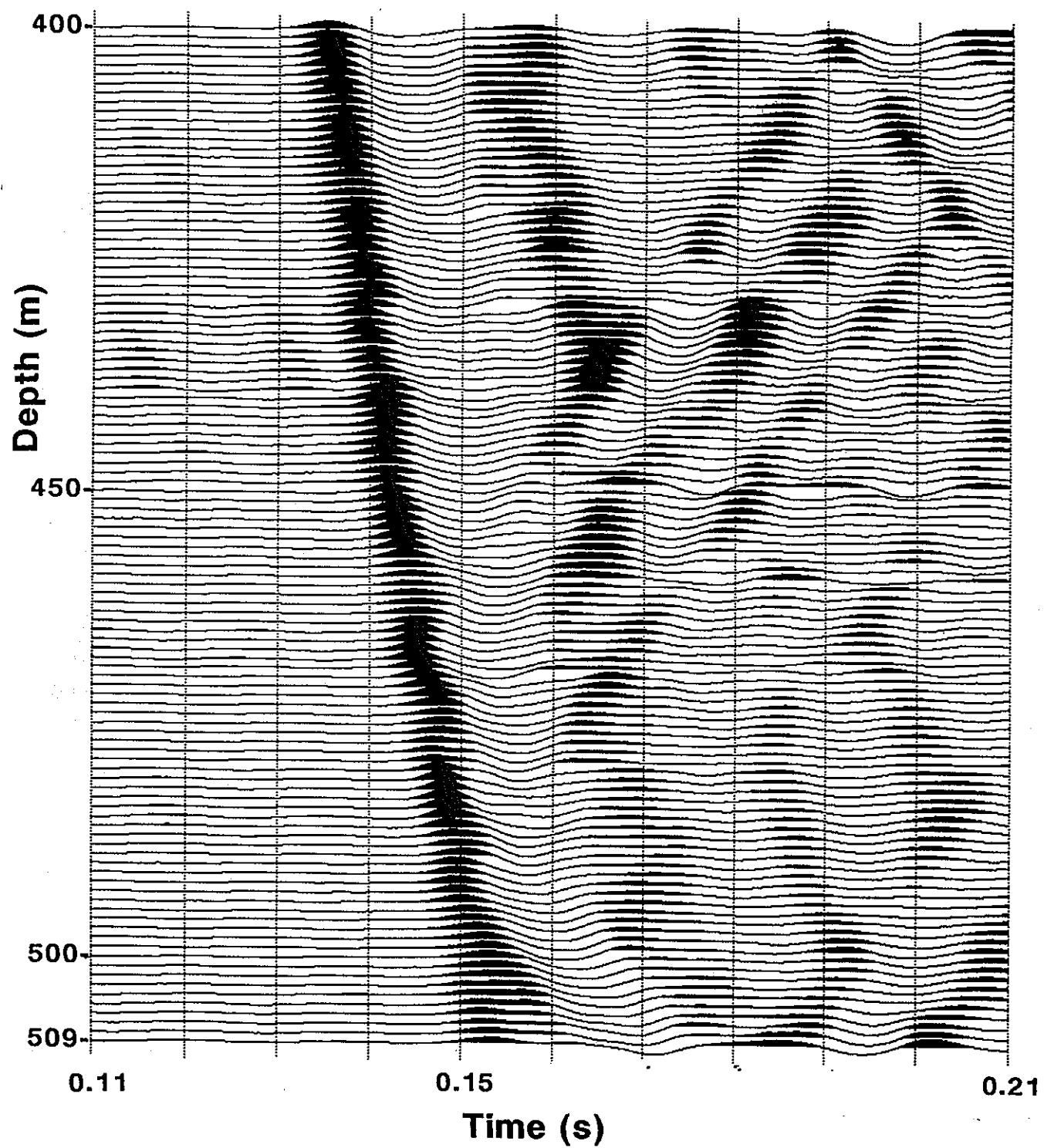


図-4-3-40 WD-4発震のV S P記録（深度400～509m）。スタック処理を行っている。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

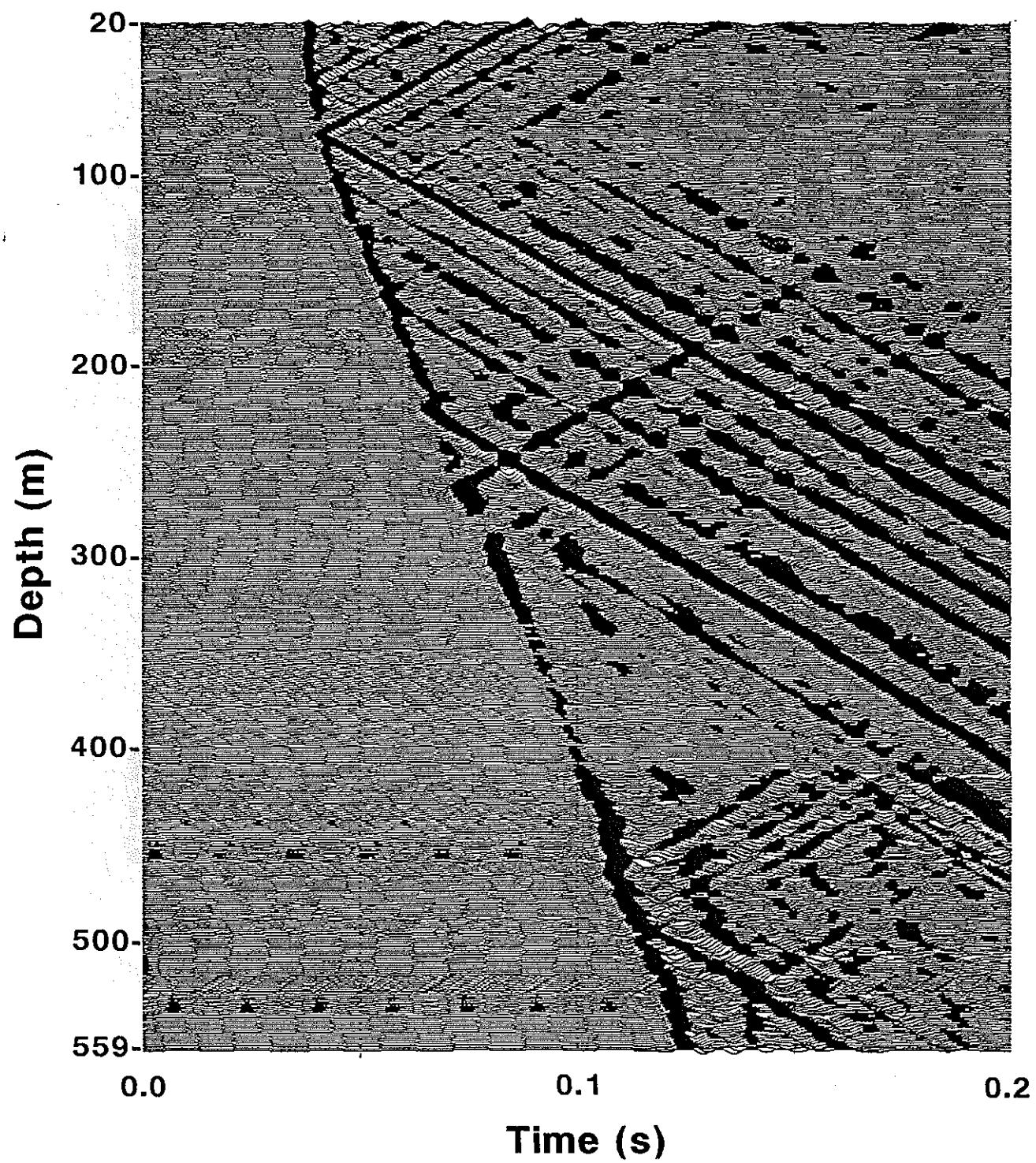


図-4-3-41 WD-1発震のVSP記録（深度20～559m）。スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

WD-4 stack + 100Hz L.C.F.

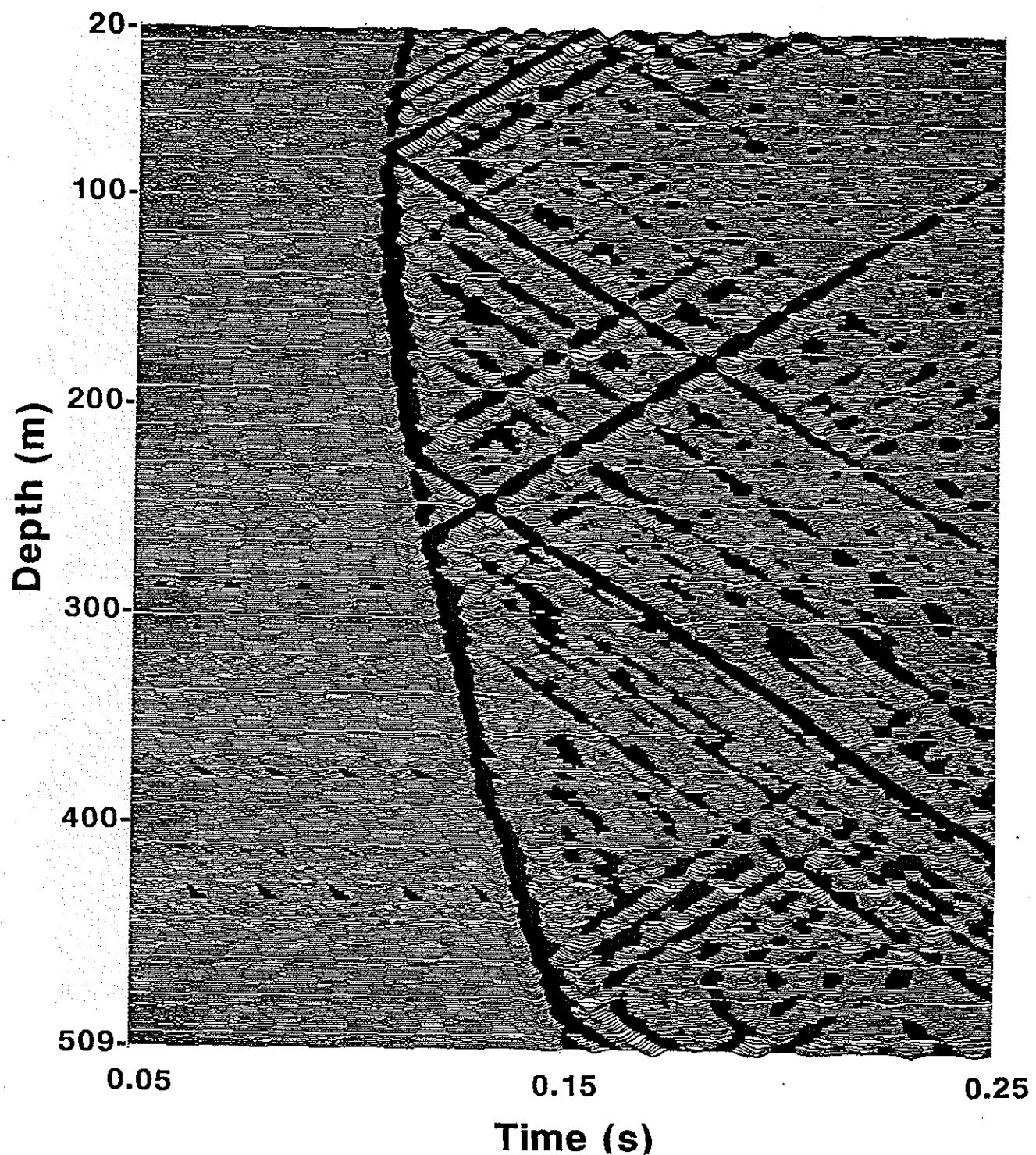


図-4-3-42 WD-4発震のV S P記録（深度20～509m）．スタック処理と100Hzローパスフィルタ処理を行っている。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

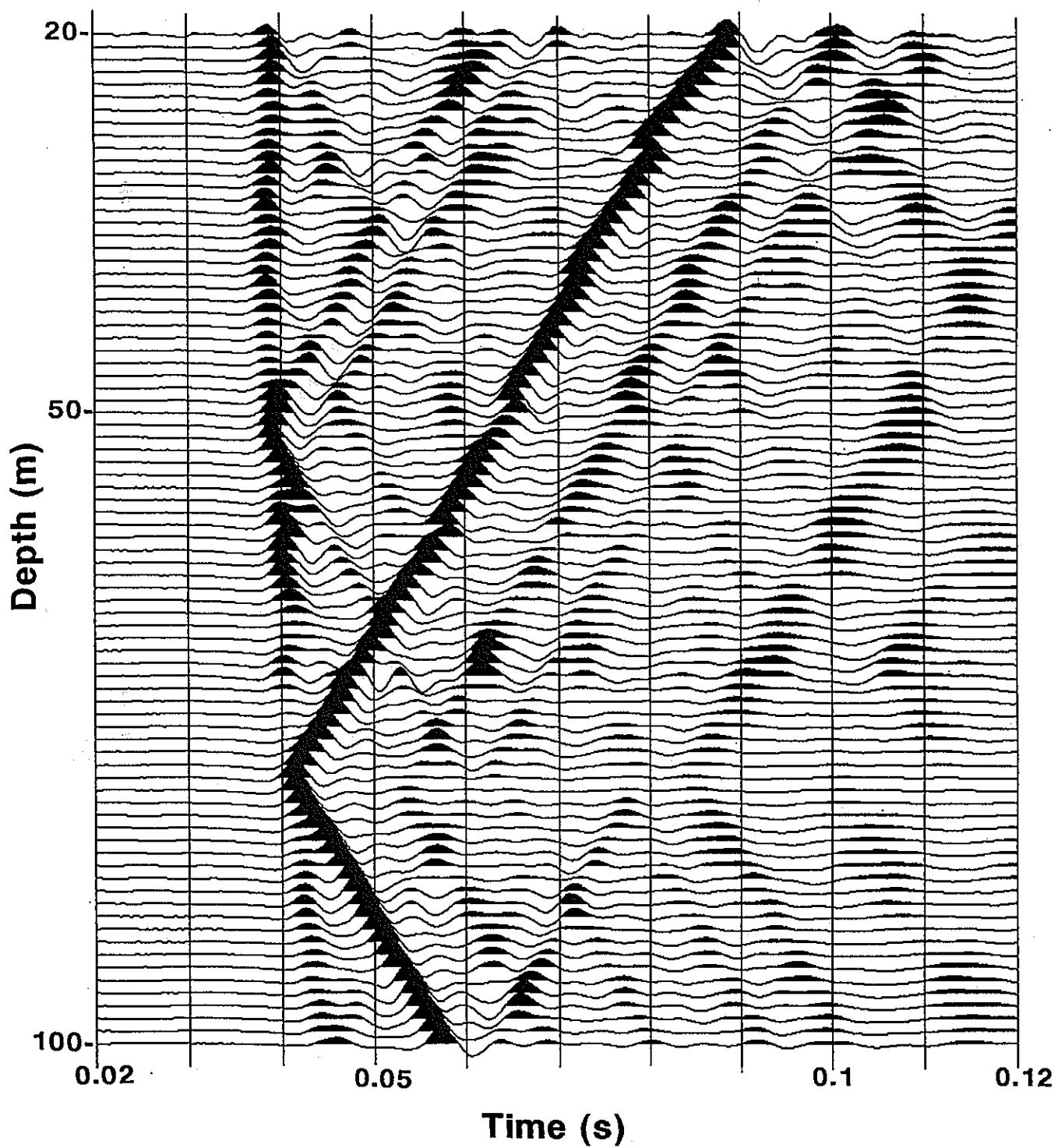


図-4-3-43 WD-1発震のV S P記録（深度20~100m）。スタック処理と100Hzローパスフィルタ処理を行っている。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

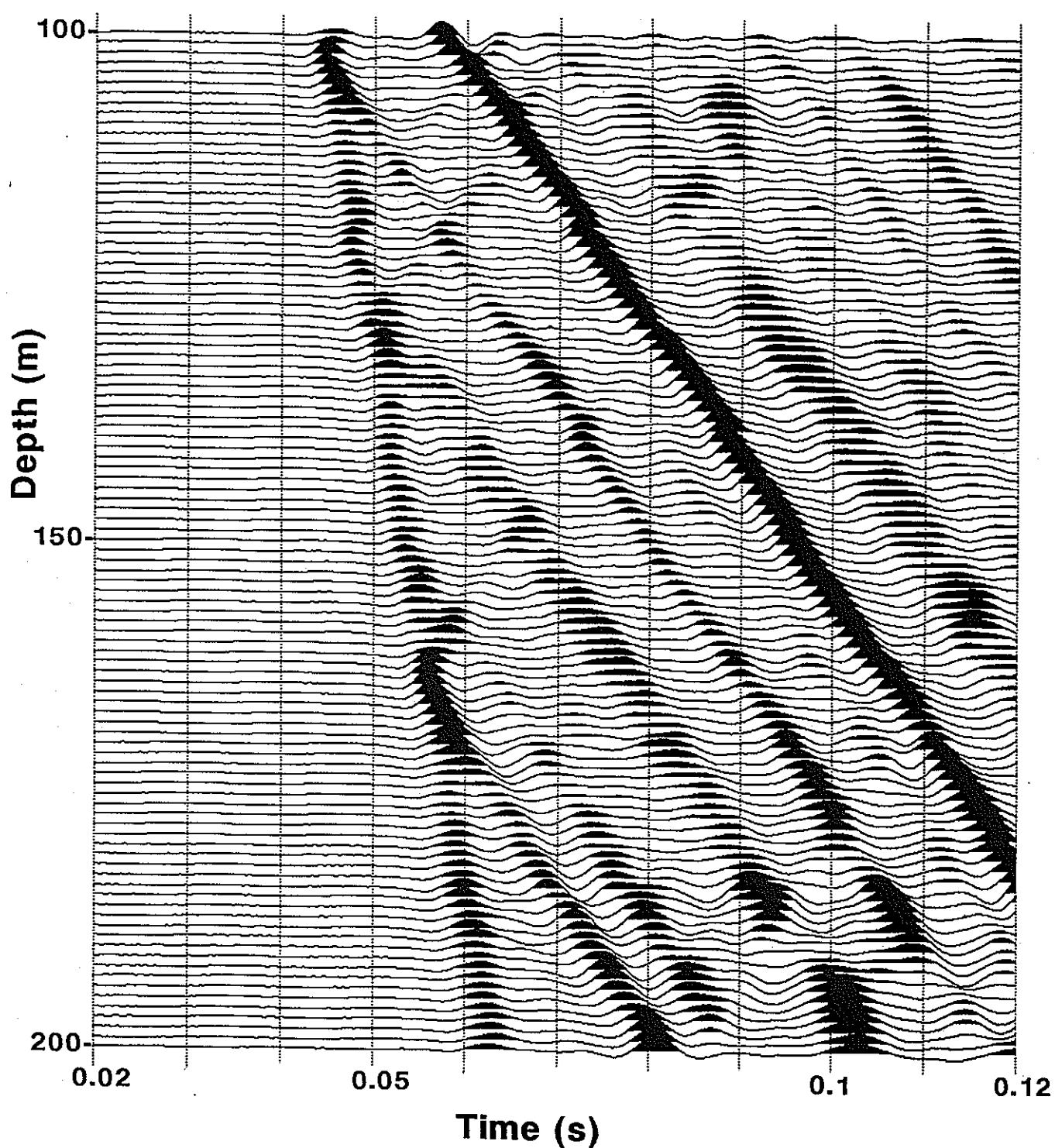


図-4-3-44 WD-1発震のV S P記録（深度100～200m）。スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

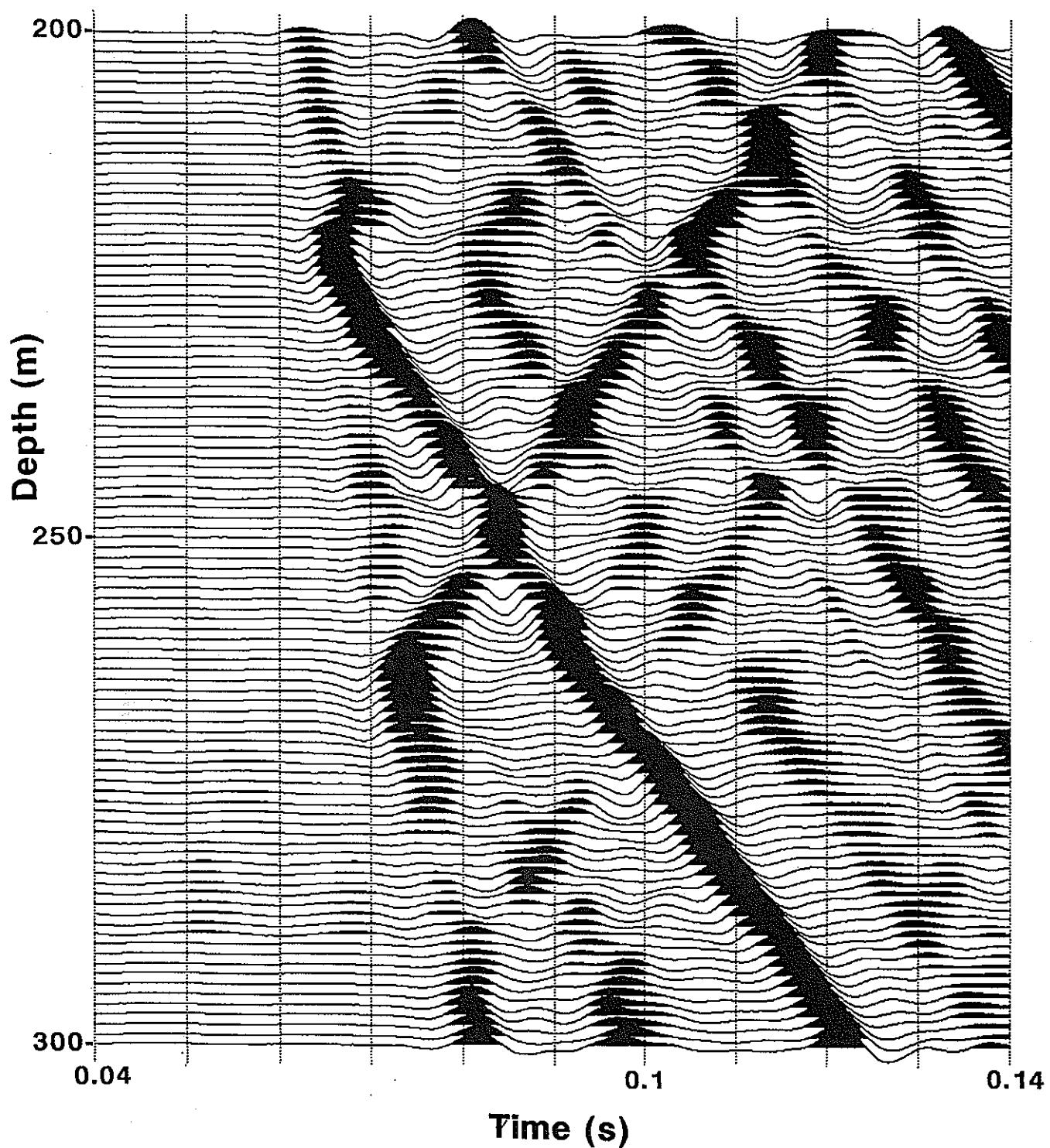


図-4-3-45 WD-1発震のV S P記録（深度200～300m）。スタッツ処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

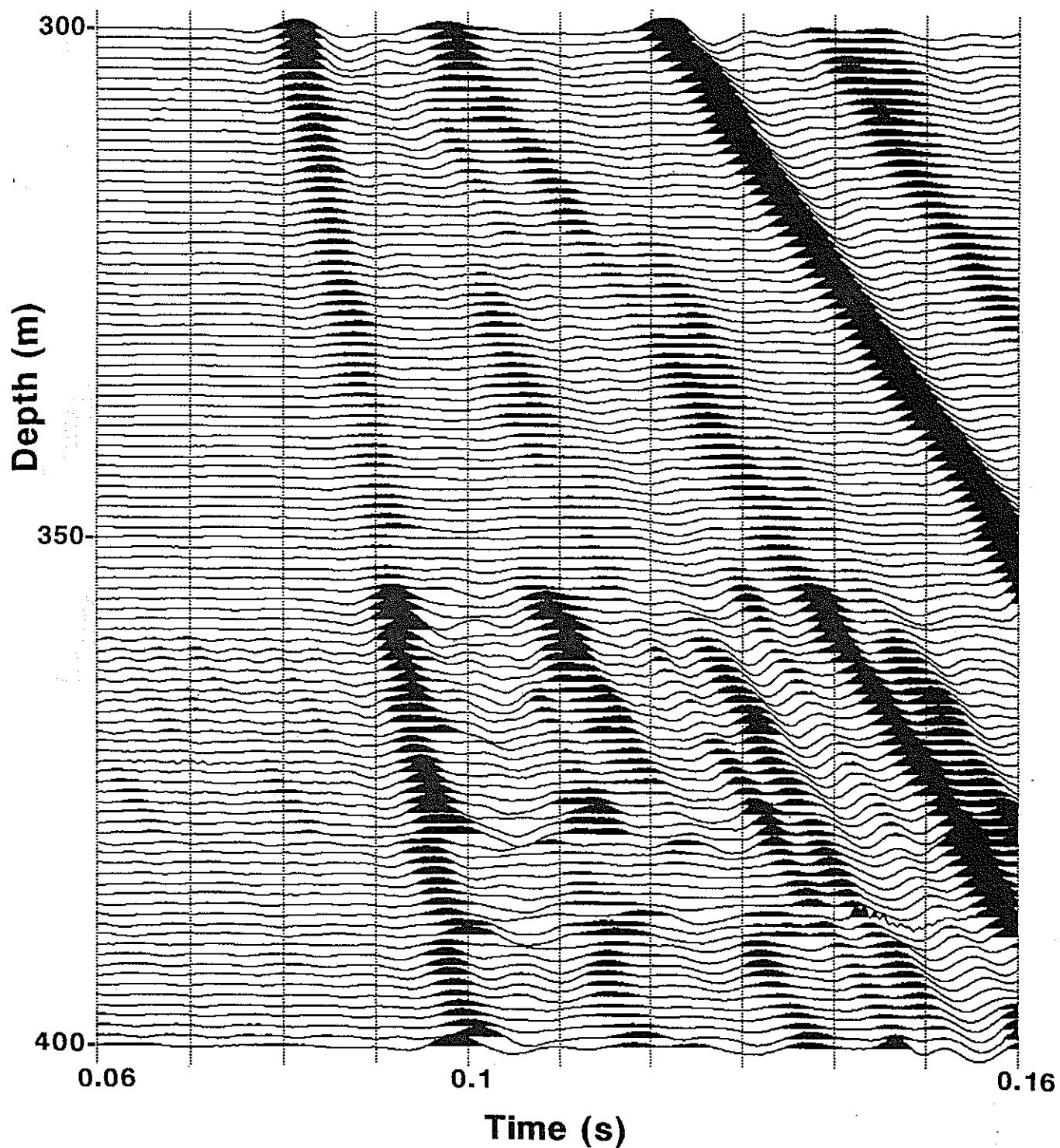


図-4-3-46 WD-1発震のV S P記録（深度300～400m）．スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

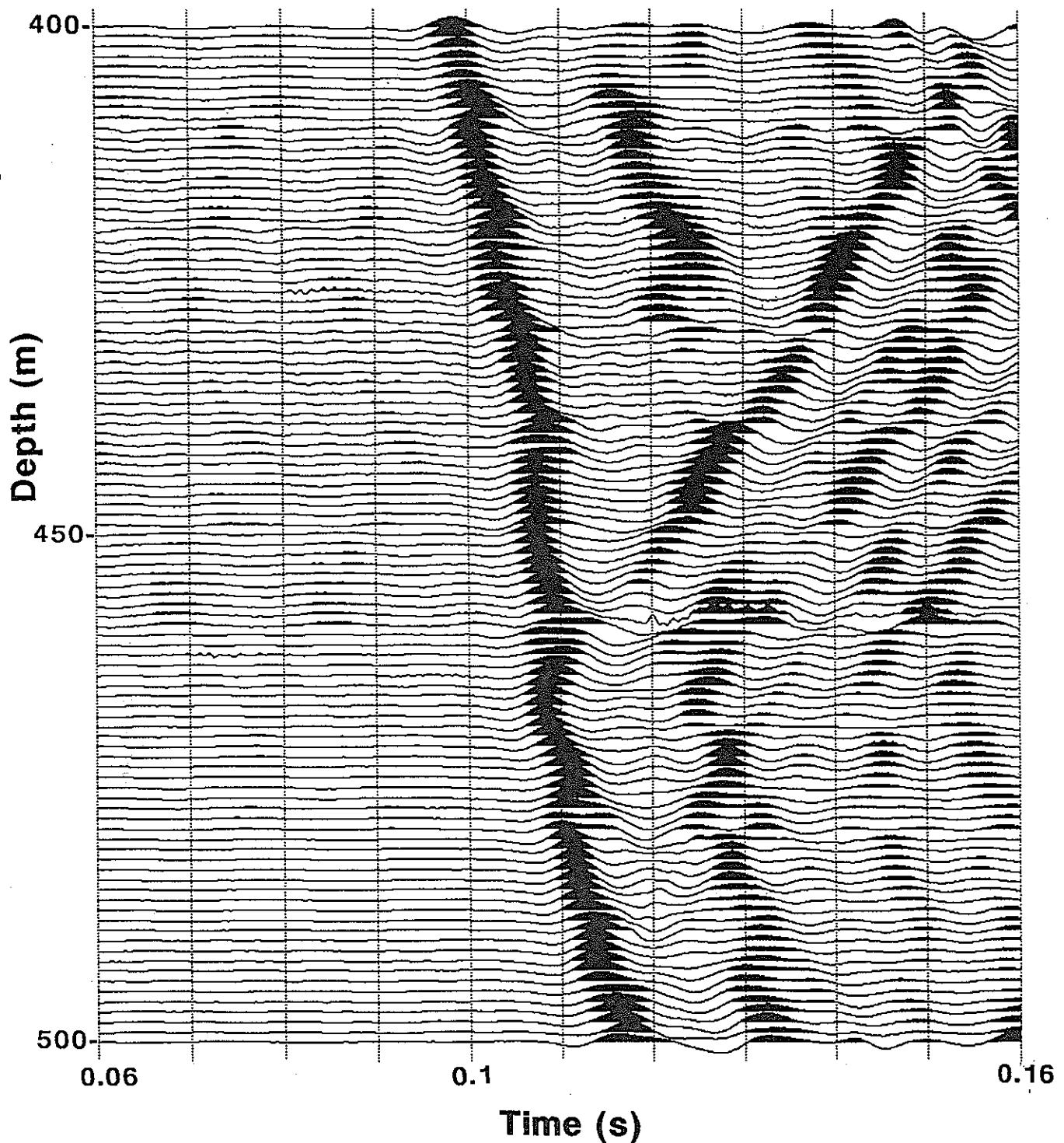


図-4-3-47 WD-1発震のV S P記録（深度400～500m）．スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-1 stack + 100Hz L.C.F.

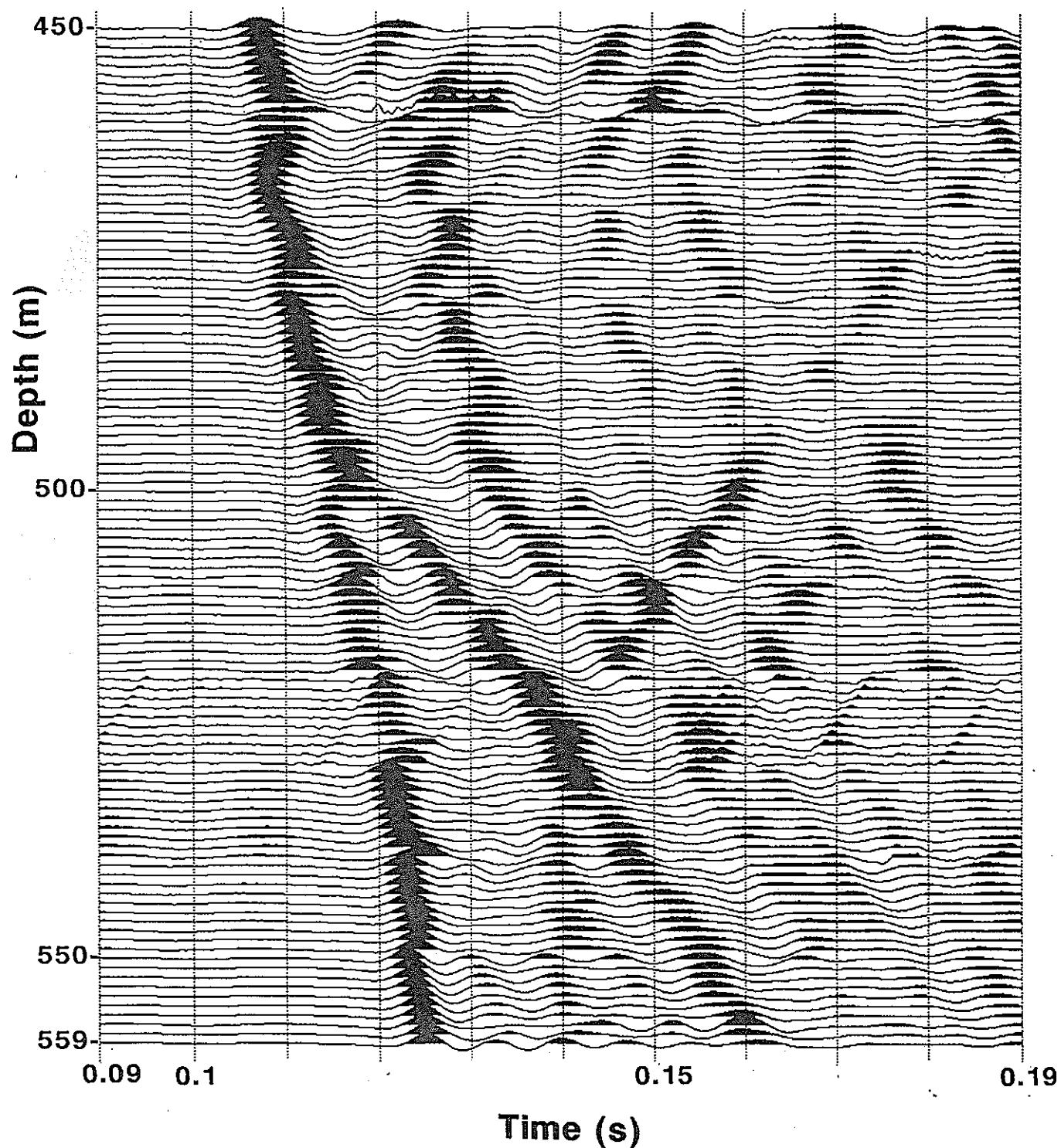


図-4-3-48 WD-1発震のV S P記録（深度450～559m）。スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-4 stack + 100Hz L.C.F.

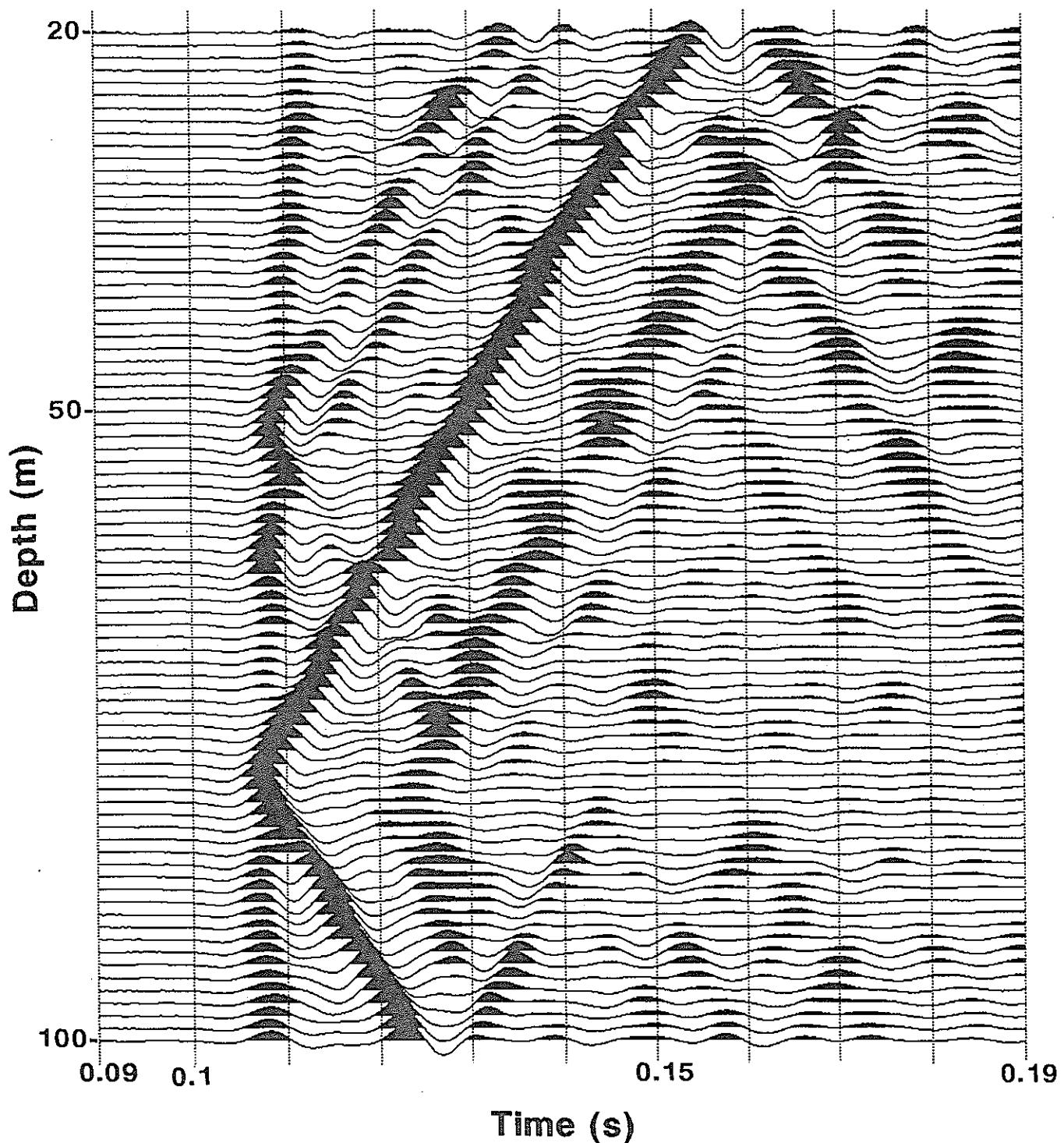


図-4-3-49 WD-4発震のV S P記録（深度20～100m）．スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-4 stack + 100Hz L.C.F.

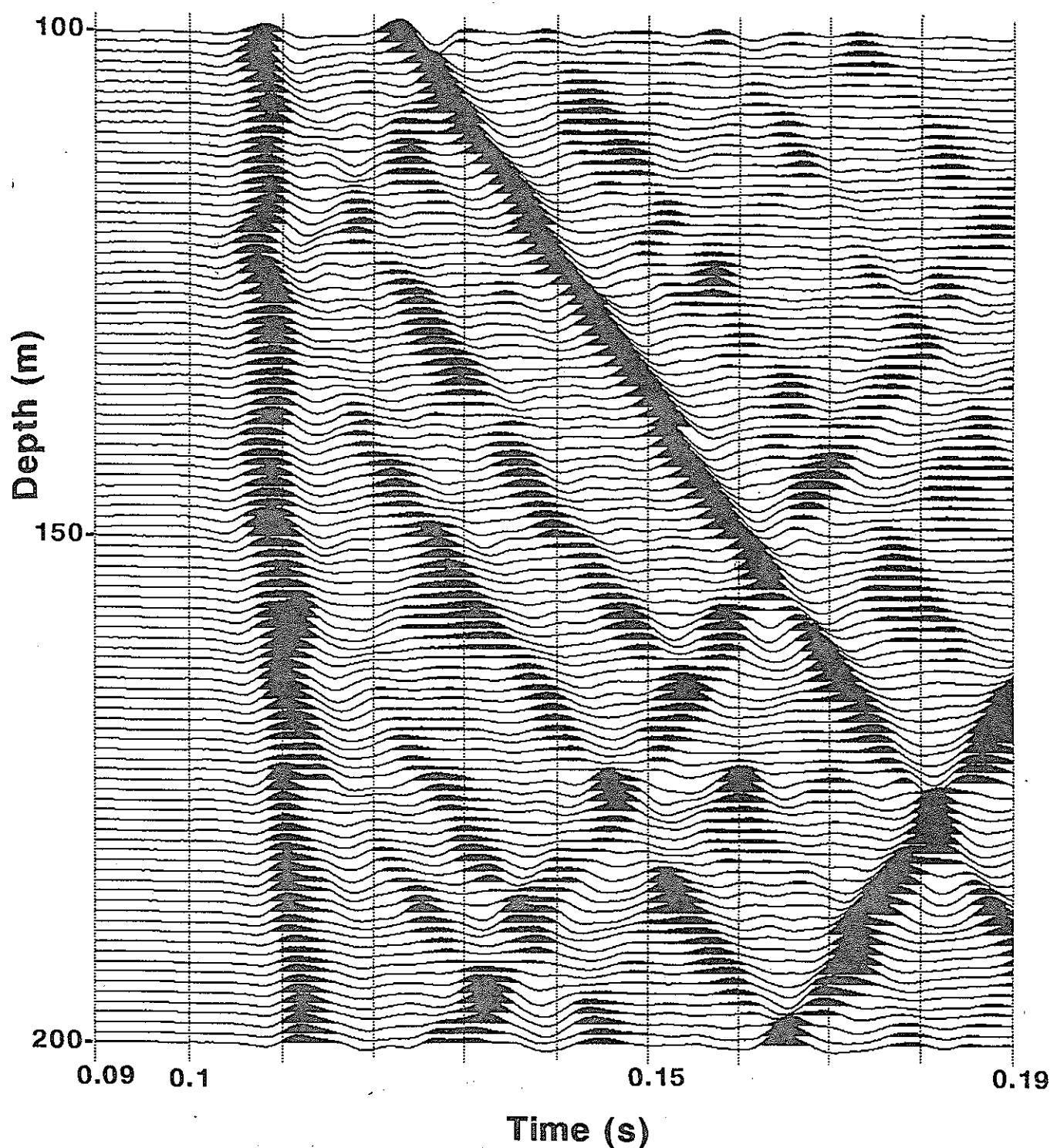


図-4-3-50 WD-4発震のV S P記録（深度100～200m）．スタック処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

WD-4 stack + 100Hz L.C.F.

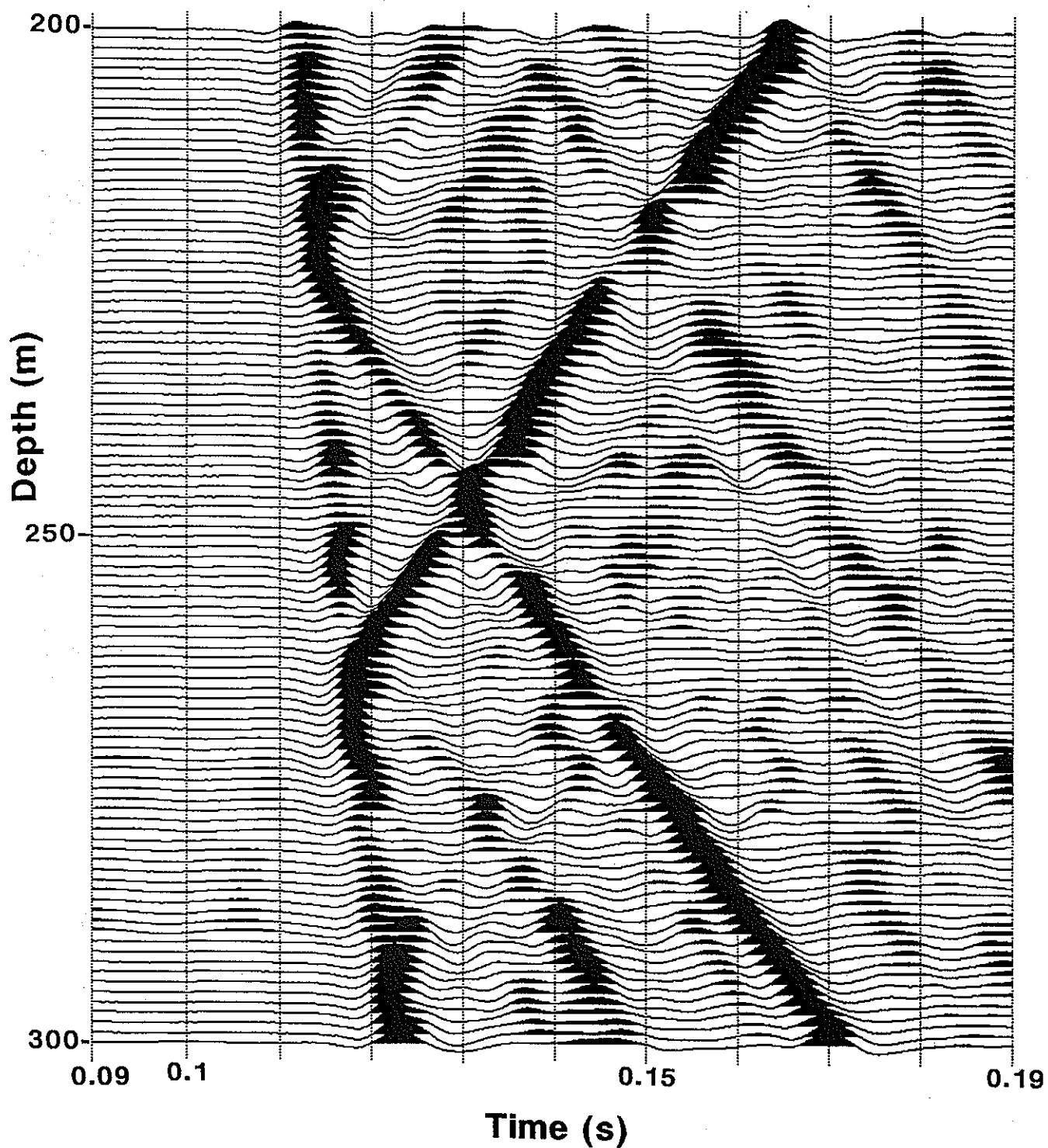


図-4-3-51 WD-4発震のV S P記録（深度200～300m）。スタッツ処理と100Hzローパスフィルタ処理を行っている。

WD-4 stack + 100Hz L.C.F.

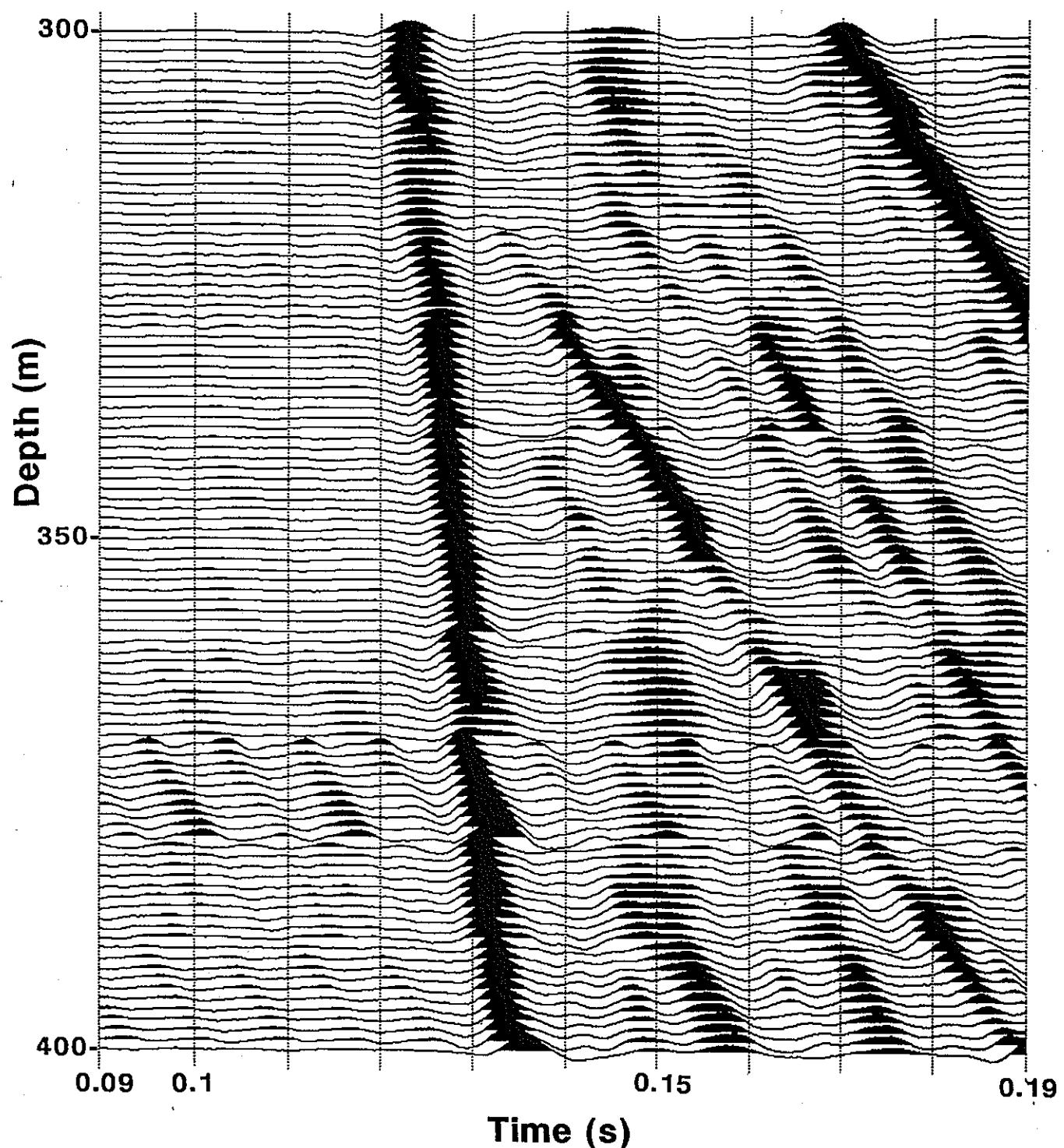


図-4-3-52 WD-4発震のV S P記録（深度300～400m）．スタック処理と100Hzローパスフィルタ処理を行っている。

WD-4 stack + 100Hz L.C.F.

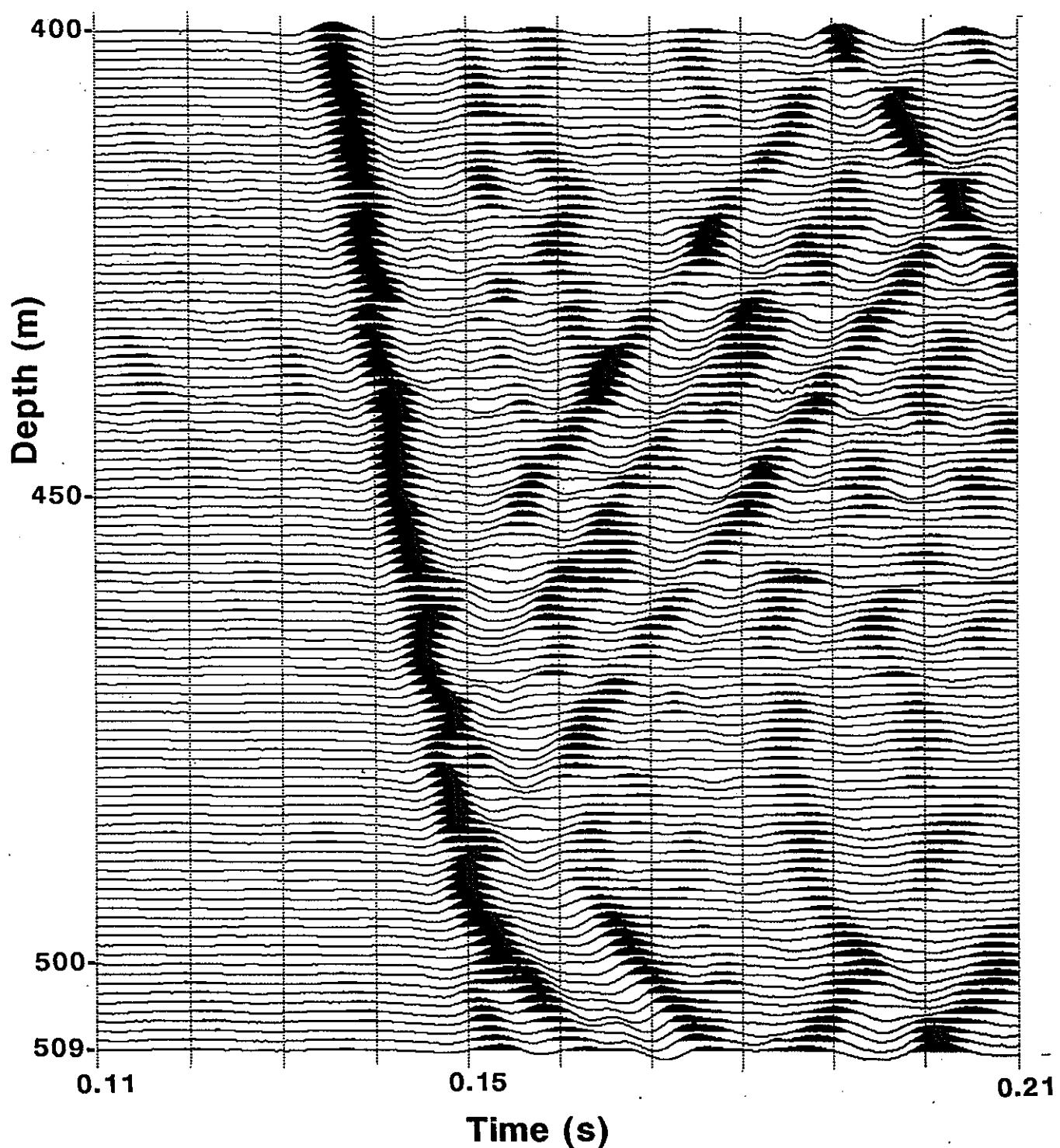


図-4-3-53 WD-4発震のV S P記録（深度400～509m）．スタッツ処理と100Hzローカットフィルタ処理を行っている。

5. 発破震源データを用いたチューブ波解析

5-1 チューブ波解析による透水性亀裂の特性

ハイドロフォンVSP実験により観測されたチューブ波を用い、チューブ波発生深度に透水性亀裂が存在するとし、亀裂の走向、傾斜角、透水係数を求める解析を行った。解析には、表-5-1-1に示す、平成6年度と平成7年度に実施した受振深度20~609mの4つの発破震源のオフセットVSP記録を用いた。これらのオフセットVSP記録を図-5-1-1~図-5-1-4に示す。図-5-1-1は平成6年度のSH-1号孔発震の記録（深度20m~400m）と今回のSH-1A号孔発震の記録（深度401m~609m）をあわせ、図-5-1-2は平成6年度のSH-2号孔発震の記録（深度20m~400m）と今回のSH-2A号孔発震の記録（深度401m~609m）をあわせ、図-5-1-3と図-5-1-4はそれぞれSH-3号孔発震及びSH-4号孔発震の平成6年度の記録（深度20m~400m）と今回の記録（深度401m~609m）をあわせている。

4つのオフセットVSP記録すべてにチューブ波の発生が確認されたのは15深度（図-4-3-54に丸印付矢印で示す）である。この15のチューブ波発生深度について、解析を行った。解析に用いた亀裂モデルは、第3章に示したBeydoun et al. (1985) の平行平板亀裂モデルである。解析に入力する観測値は、チューブ波とP波の振幅比、地層のP波及びS波伝播速度、P波の坑井への入射角などである。チューブ波とP波の振幅比は、それぞれのチューブ波発生深度において、4つのオフセットハイドロフォンVSP記録から求めた。P波とS波の伝播速度は、速度検層、S波VSP実験（工業技術院地質調査所・動力炉・核燃料開発事業団(1994)）から求め、P波の坑井への入射角はハイドロフォンVSP記録における初動P波の見かけ速度から求めた。なお、解析方法の詳細は3章に説明している。

15個のチューブ波発生深度のうち、219~224m、264~270m、467~469mは区間全体からチューブ波が発生している可能性があることを、前節で述べた。この区間に亀裂又は破碎帯がどのように存在するかということが、亀裂モデルの適用など解析手法に影響を与える。今回は、区間の上端と下端の深度に亀裂が存在することを仮定し、区間の上端と下端から発生しているチューブ波の振幅を用いて、それについて解析を行った。ただし、区間467~469mの下端（469m）から発生しているチューブ波は他のチューブ波と波形が重なり振幅が求められなかったので、上端（467m）についてのみ解析を行った。

亀裂の走向、傾斜角、透水係数を求めた解析結果を表-5-1-2に示す。透水係数は、3章で説明した

ように亀裂モデルから得られる理論曲線とV S P記録から求めた振幅比との比較から求めた。理論曲線上に振幅比をプロットした例を図-5-1-5, 6に示す。V S P記録から求めた振幅比と理論曲線の周波数依存性を比較すると、図-5-1-5の場合、振幅比は高周波数になるに従い小さくなる傾向を示し、Beydoun et al. (1985) の理論モデルから求めた理論曲線と同じ傾向を示す。しかし、図-5-1-6の場合、振幅比の周波数依存性は理論曲線と一致しない。このように、今回の解析では理論曲線と実際のデータの周波数依存性は一致しなかった場合もあったが、実際の透水係数はプロットした振幅比の範囲内にあるとし、その範囲を表-5-1-2に示している。振幅比と理論曲線の周波数依存性が異なる場合には、表中に*印を付している。

5-2 チューブ波解析結果とB T V記録の比較

これまでの検討により、チューブ波発生深度は、検層で異常を示す深度やコア解析から割れ目帯と判断された深度とよく対応することがわかっている。ボアホールテレビ（以下B T Vと略す）は、坑井内のテレビカメラにより坑壁を光学的に撮影することにより、坑壁に現れる亀裂を直接マッピングできる特徴がある。AN-I号孔で取得されたB T V記録（動力炉・核燃料開発事業団（1995））を用いて、

- 1) チューブ波発生深度に亀裂が存在するか
- 2) 存在するとすれば亀裂にどのような特徴が見られるのか
- 3) チューブ波解析によって求めた亀裂の走向と傾斜角の値がB T V記録から読み取られる亀裂の値と対応するのか

について予備的な検討を行うこととする。

B T V記録では、坑壁を横切る平板状の亀裂は正弦波形で示される。深度20~609mのV S P記録で検出された39のチューブ波発生深度（すべてのオフセットV S P記録で検出された15深度と一部のオフセットV S P記録でのみ検出された24深度をあわせた深度）すべてにおいて、B T V記録で亀裂が認められる。B T V記録で検出される亀裂の特徴とチューブ波の発生深度の関係を見ると以下の点が指摘できる。まず、B T V記録では、多くの深度で1m当たり複数の亀裂が観察されており、チューブ波の発生深度と1つの亀裂を対応させることが困難な場合がある。また、チューブ波の発生深度には明瞭で亀裂幅の大きな亀裂が存在する傾向がある。しかしながら、チューブ波の発生深度と亀裂幅の大きい明瞭な亀裂とが1対1で対応するのではなく、亀裂幅の小さい亀裂しか存在しない深

度からもチューブ波は発生し、一方、チューブ波が発生していない深度に亀裂幅の大きな明瞭な亀裂が存在する場合もある。つまり、BTVの記録に現われる亀裂の幅・亀裂の明瞭性の特徴については、チューブ波を発生する亀裂と、それ以外の亀裂とを区別する有意な違いは見られない。

さらにチューブ波の発生深度に存在する亀裂の特徴を詳しく検討するために、チューブ波の発生深度の上下0.5mの範囲内を選んでBTV記録を観察した。上下0.5mの範囲としたのは、ハイドロフォンVSPの受振間隔が1mであり、チューブ波発生深度の分解能を1mと考えたからである。観察の結果、VSP記録から求めたチューブ波の発生深度に存在する亀裂は、3つに分類することができる。すなわち、(1)連続性の良い亀裂が1つだけ存在する場合、(2)複数の連続性の良い亀裂が存在する場合、(3)ある区間にわたり坑壁の崩落があり変質が進んでいる場合である。(3)では亀裂の連続性が悪く亀裂を個々に認識することが困難なこともある。ここでは(3)を破碎帯と定義する。これら3つに分類したBTV記録の例を図-5-2-1～3に示す。表-5-2-1に39のチューブ波発生深度における亀裂の分類結果を示す。表中に、チューブ波解析を行った深度ではその結果も付記している。

次に、チューブ波解析を行った深度について、チューブ波解析とBTV記録による亀裂の走向、傾斜角の値の比較を行う。上記の3つの亀裂の分類に従い、まず、BTVで単一の亀裂が確認された219m、297mについての結果を示す。チューブ波解析結果とBTV記録からそれぞれ得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に表示した結果が図-5-2-4、5である。297mのチューブ波解析結果の走向（傾斜方位）と傾斜角はともに、BTV記録の値とよく一致している。219mでは、走向が約50°異なるが、傾斜角の値はほぼ一致する。

複数の亀裂が存在する場合について比較する。表-5-2-1に示すように、チューブ波発生深度のうち約8割でBTV記録により複数の亀裂が観察されている。チューブ波発生深度の複数の亀裂について、どの亀裂が透水性を支配しているのかBTV記録からは決定できない。そのため、チューブ波解析結果と比較する時には、BTV記録でチューブ波発生深度に見られるすべての亀裂を用いることとした。両者から得られた亀裂の傾斜方位と傾斜角を極座標に表示した例を図-5-2-6、7、8に示す。図-5-2-6に示す121mの場合、BTV記録で見られる3つの亀裂は、走向と傾斜角がほぼ同じ値であり、チューブ波解析から求めた結果もこの値とほぼ対応する。しかし、チューブ波解析とBTV記録の値が一致するこのような例は少なく、両者の走向と傾斜角の値が一致しないことが多い。両者の値が一致しない例が図-5-2-7、8である。図-5-2-7の52mの場合、BTV記録から求めた複数の亀裂の走向と傾斜角の値にはばらつきがあり、図-5-2-8の164mの場合、BTV記録から求めた複数の亀裂の走向と傾斜角の値はほぼ同じ値を示す傾向にあるが、いずれも、チューブ波解析結果と一致しない。

破碎帯が存在する場合、B T V記録で明瞭な亀裂を確認することが困難な場合があり、検出された亀裂の走向と傾斜角の値の信頼性が低いと推定される場合もある。従って、チューブ波解析結果との比較は、明瞭な亀裂が存在する場合に比べて、破碎帯が存在する場合には慎重に行う必要がある。ここでは、B T Vで比較的亀裂が明瞭に確認できた467mにおいて、両者の値を比較した結果を図-5-2-9に示す。この深度では、走向が異なる低角と高角の2種類の明瞭な亀裂がB T V記録により確認できる。チューブ波解析結果は、B T V記録による高角の亀裂の傾斜角とほぼ一致するが、走向は約90°異なる。

以上のチューブ波解析とB T V記録の比較から、チューブ波発生深度に单一の亀裂が存在する場合には、事例が少ないが、両者の走向と傾斜角の値はほぼ一致する傾向を示した。しかし、複数の亀裂が存在する場合や破碎帯が存在する場合の多くは、両者の値が異なることがわかった。両者の値が異なるという結果を検討する必要があるが、それには、両者の値が一致すべきであるという観点の検討と、両者の値が異なって求められることは解析上意義のあるという観点の検討の2つがあると考える。まず、チューブ波解析結果がB T V記録で検出された亀裂の値と一致すべきである、言い換えれば、今回のチューブ波解析は誤った値を求めていると考えるならば、この原因として、観測誤差などにより解析入力値が誤っていることや解析モデルが現実に則していないことなどが挙げられる。解析入力値の誤差については、振幅比に観測誤差と思われる15%程度の誤差を与えることでは解析結果は概ね大きく変化しないことがいくつかの計算例で示された。また、解析に用いる亀裂モデルに関しては、モデルをより現実に近付けるために考えられるいくつかの亀裂モデルの改良点が、解析結果の走向／傾斜角の値にどのような影響を与えるのかについては現在のところ不明である。つまり、両者の値が一致すべきであるという観点からの検討では、これまでのところ決定的なことは明らかではない。

次に、チューブ波解析でB T V記録の亀裂と異なる値が求められることは意味があるとする観点から検討した。B T V記録で見られるチューブ波発生深度の複数の亀裂が透水性を持つとすると、チューブ波解析では、深度方向の分解能の制限により、これらの亀裂の特性を区別せず、複数の透水性亀裂の平均的な特性、あるいは、透水性亀裂が分布する空間全体の平均的な流体の流れの特性を求めていくと考えられる。例えば、図-5-2-6に示す深度52mの場合、チューブ波解析による亀裂の走向は、B T V記録の複数の亀裂の走向の平均的な値であるために、チューブ波解析では複数の透水性亀裂の平均的な値を求めていく可能性がある。しかし、図-5-2-7に示す深度164mの場合には、B T V記録による亀裂の走向・傾斜角の値が存在する範囲にチューブ波解析の結果の値は存在しないため、両者の値が異なることを上記の解釈で説明することは困難である。今回のB T V記録との比較において、チュー

ブ波解析は、複数の透水性亀裂による流体の流れの平均的な特性（走向・傾斜角）を求めてい るとい う解釈が可能な場合もあるが、すべての場合に適用できるとは限らない。この他に、両者の値が異なるこ とに意味があるとする観点では、V S P 実験に用いるP 波の波長を考慮すると、チューブ波解析 は、坑壁から数m離れた領域までの透水性の影響を受けている可能性があることが挙げられる。つま り、坑壁に現れない透水性亀裂が坑壁に見える亀裂とネットワーク的につながっていることや、坑壁 から離れたところで透水性亀裂の走向や傾斜角が変化することがあれば、チューブ波解析で得られる 特性は、坑壁で見ているB T V 記録の亀裂の特性と異なると考えられる。

表-5-1-1 チューブ波解析に用いたマルチオフセット
ハイドロフォンVSPデータ

実験年度	受振深度	震源位置（発破孔名）
平成6年度	20~400m	SH-1, SH-2, SH-3, SH-4
平成7年度	401~609m	SH-1A, SH-2A, SH-3, SH-4

表-5-1-2 チューブ波解析による透水性亀裂の走向、傾斜角、透水係数
(透水係数に*印をつけた深度では振幅比と理論曲線の周波数依存性が異なる)

チューブ波発生深度 (m)	透水性亀裂特性		
	走向	傾斜角	透水係数 (md)
1. 52	N33W	24NE	200~1500 *
2. 61	N52E	3SE	50~500 *
3. 79	N39W	3SW	200~800
4. 103	N50W	33SW	10~60
5. 121	N71W	56S	5~60 *
6. 123	N54W	4SW	20~200 *
7. 164	N27W	60W	200~1500
8. 219~224			
219	N11E	89E	10~200 *
224	N1E	82W	300~1500
9. 264~270			
264	N16E	88W	100~400
270	N13W	59W	50~1000 *
10. 297	N17W	65W	100~2000 *
11. 305	NS	78W	100~1500 *
12. 467~469			
467	N12E	87W	50~500
13. 478	N37W	22SW	30~200 *
14. 492	N2E	83W	200~1200
15. 549	N83E	24N	10~50 *

SH-1A + SH-1

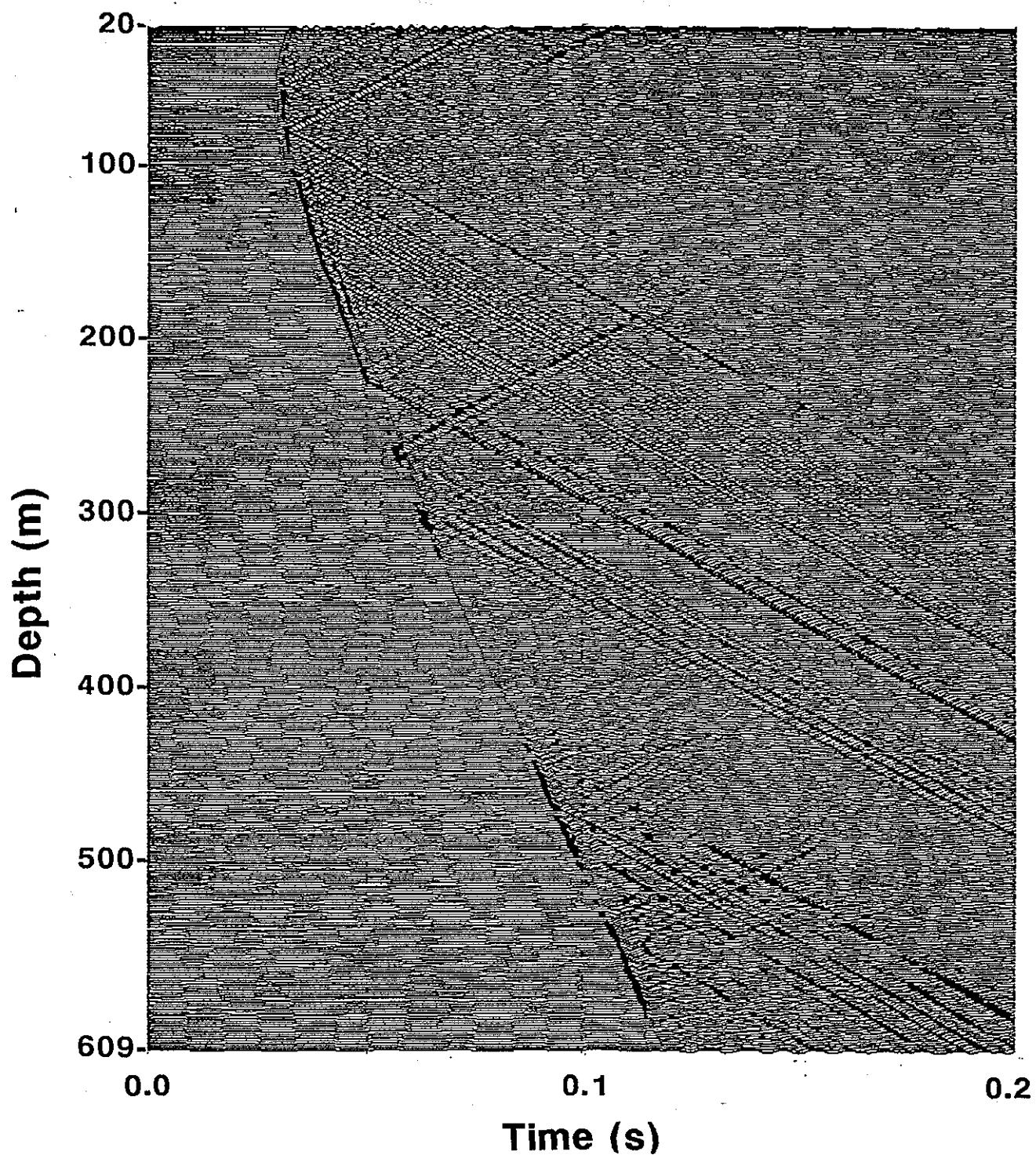


図-5-1-1 H6年度取得のSH-1号孔発震の記録（深度20～400m）と今回のSH-1A号孔発震の記録（深度401～609m）をあわせたV S P記録。各トレースごとに振幅を規格化しているため、図全体で相対振幅は保存されていない。

SH-2A + SH-2

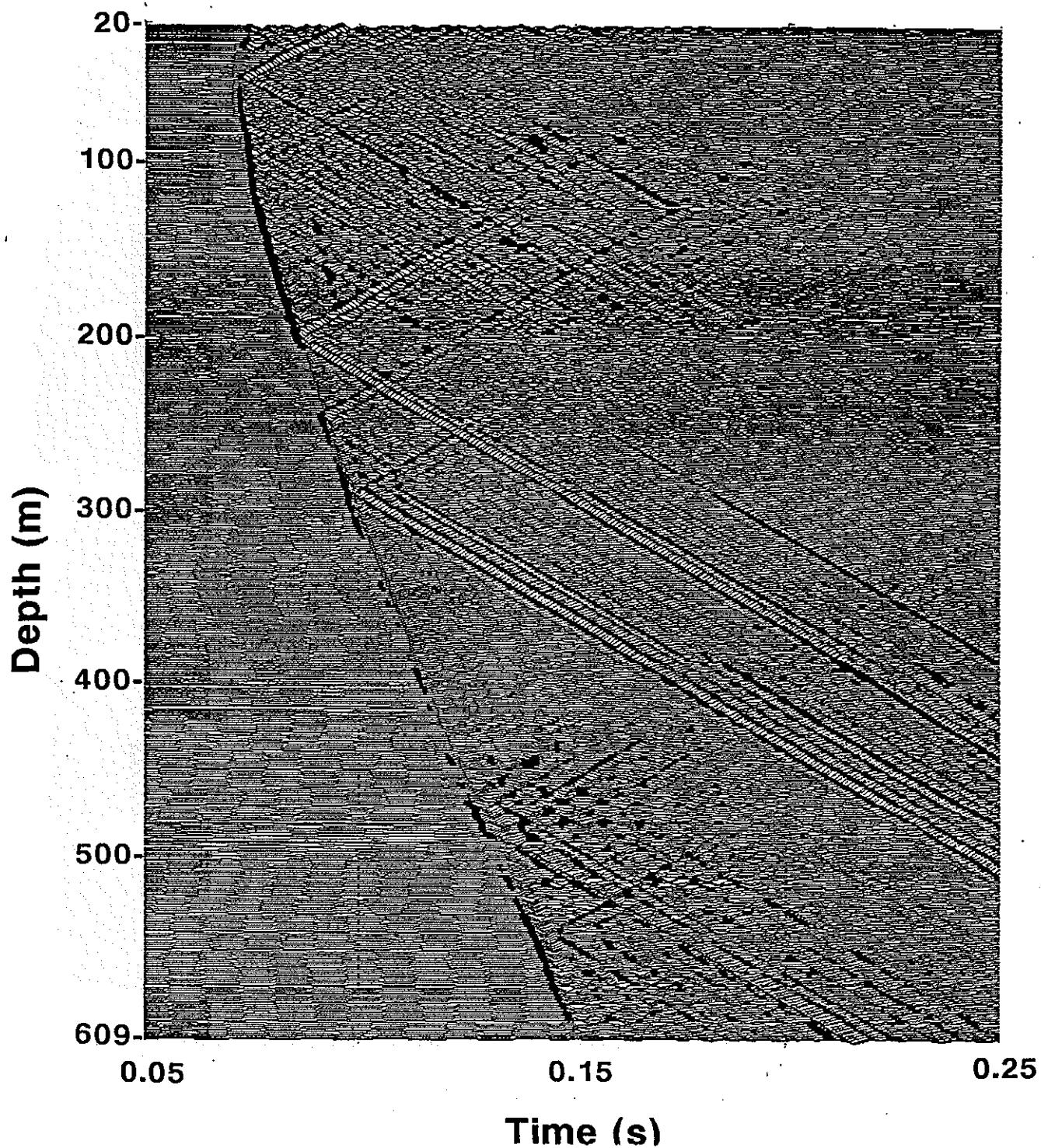


図-5-1-2 H6年度取得のSH-2号孔発震の記録（深度20～400m）と今回のSH-2A号孔発震の記録（深度401～609m）をあわせたVSP記録。

SH-3

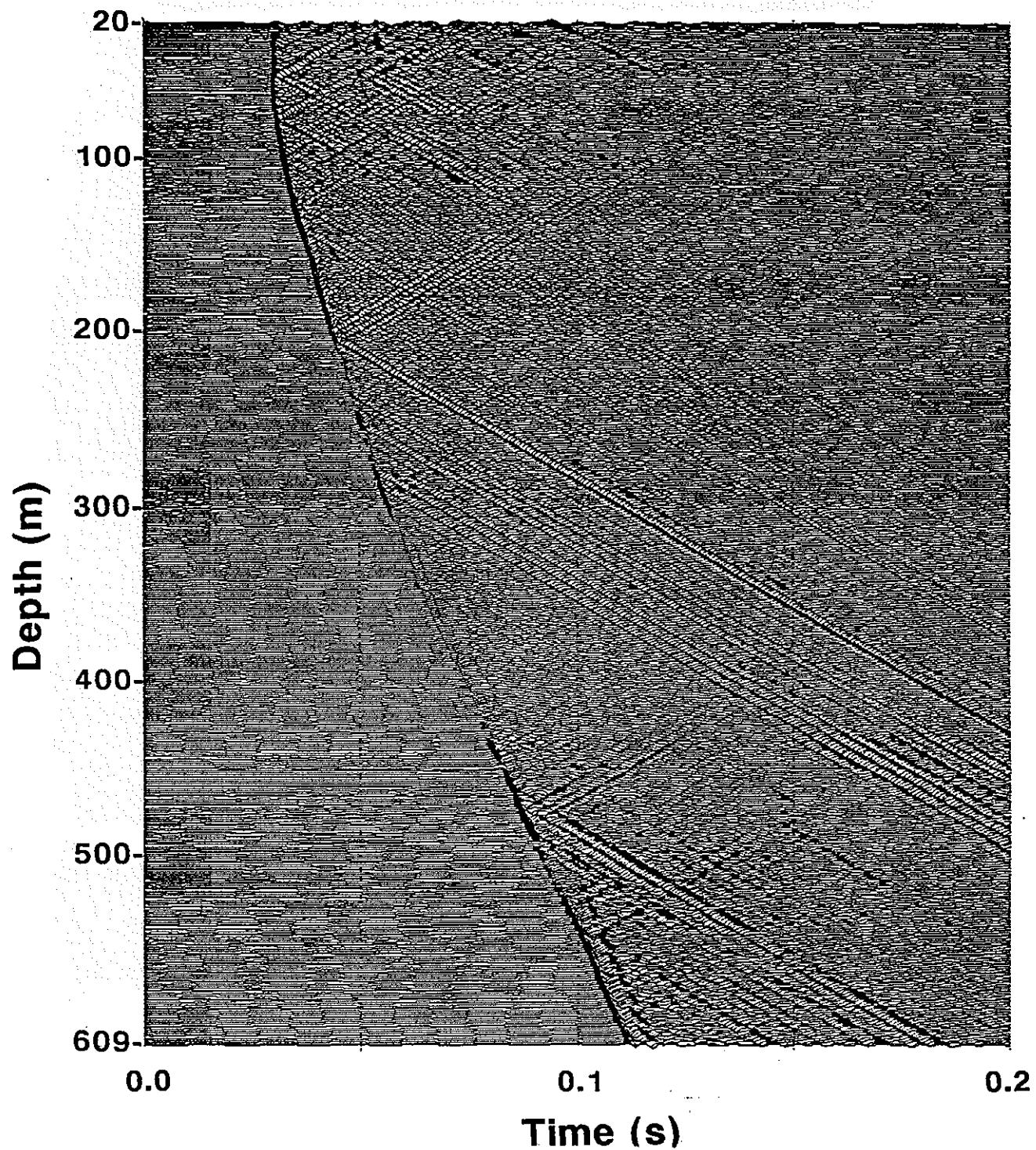


図-5-1-3 H6年度取得のSH-3号孔発震の記録（深度20～400m）と今回のSH-3号孔発震の記録（深度401～609m）をあわせたV S P記録。

SH-4

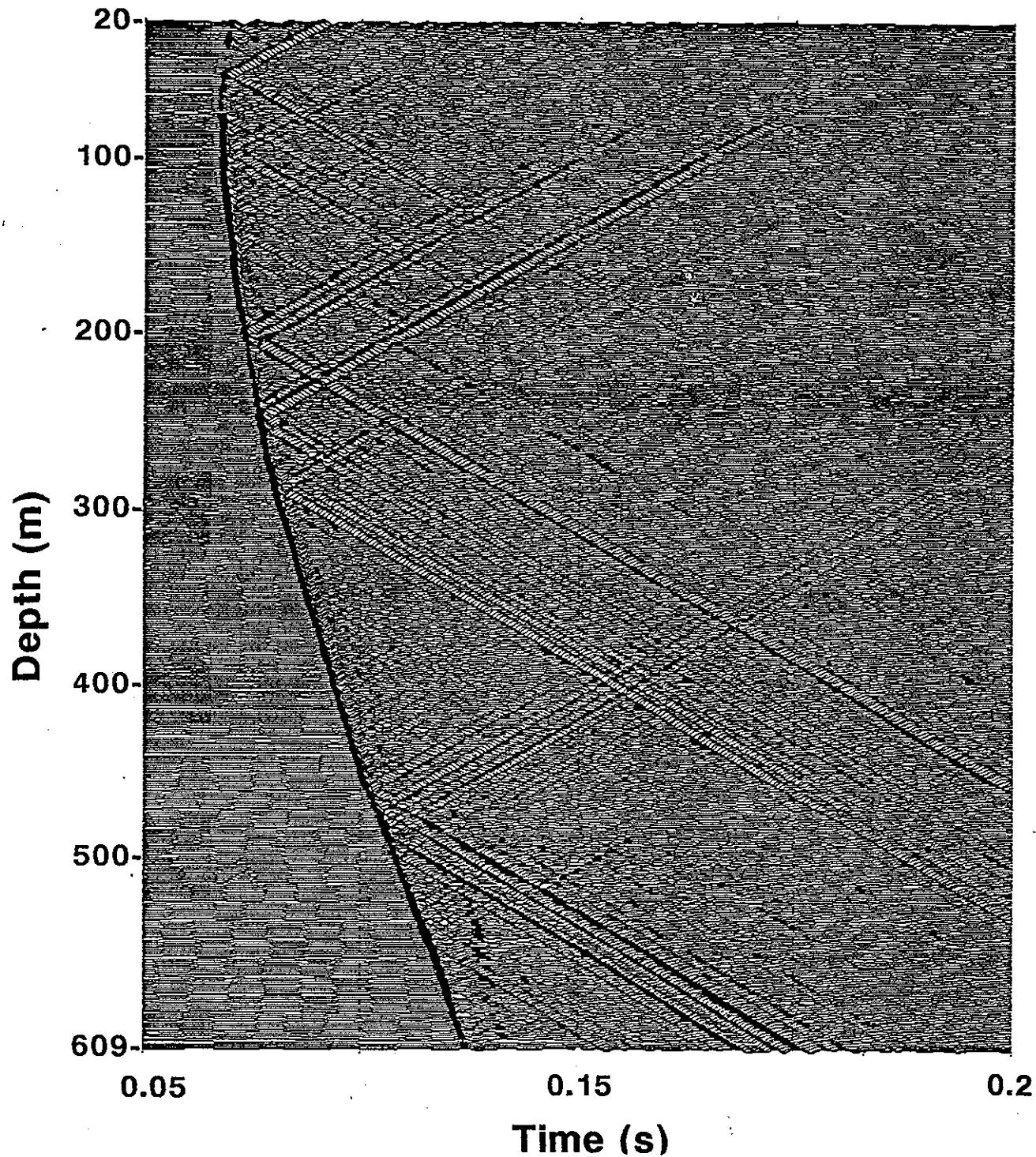


図-5-1-4 H6年度取得のSH-4号孔発震の記録（深度20～400m）と今回のSH-4号孔発震の記録（深度401～609m）をあわせたV S P記録。

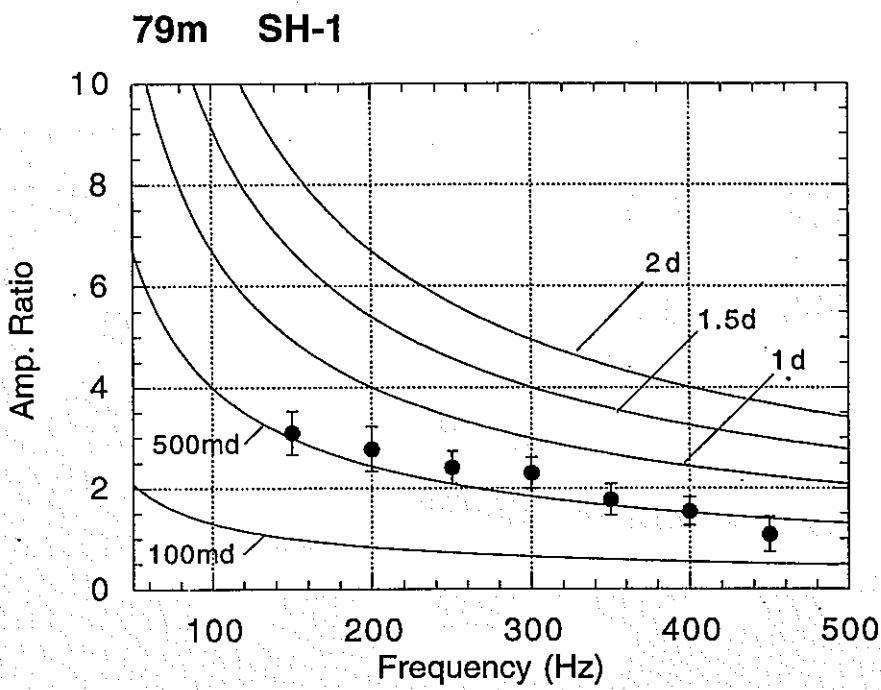


図-5-1-5 Beydoun et al. (1985) のモデルに用振幅比、周波数及び透水係数の関係を示す理論曲線と VSP から求めた振幅比（黒丸）の比較。深度79m, SH-1震源の場合。

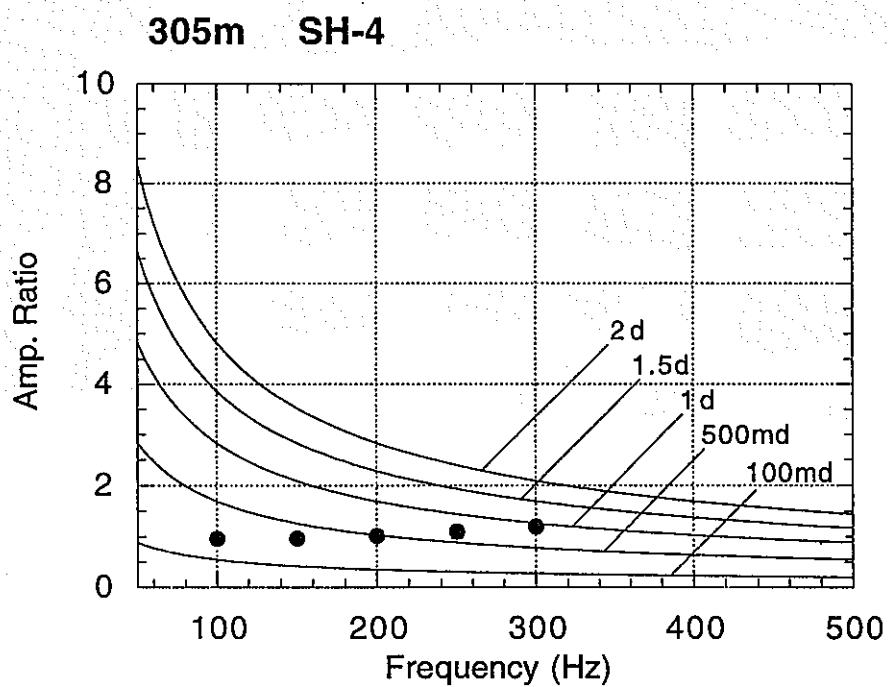


図-5-1-6 深度305m, SH-4震源の場合の理論曲線と振幅比の比較。

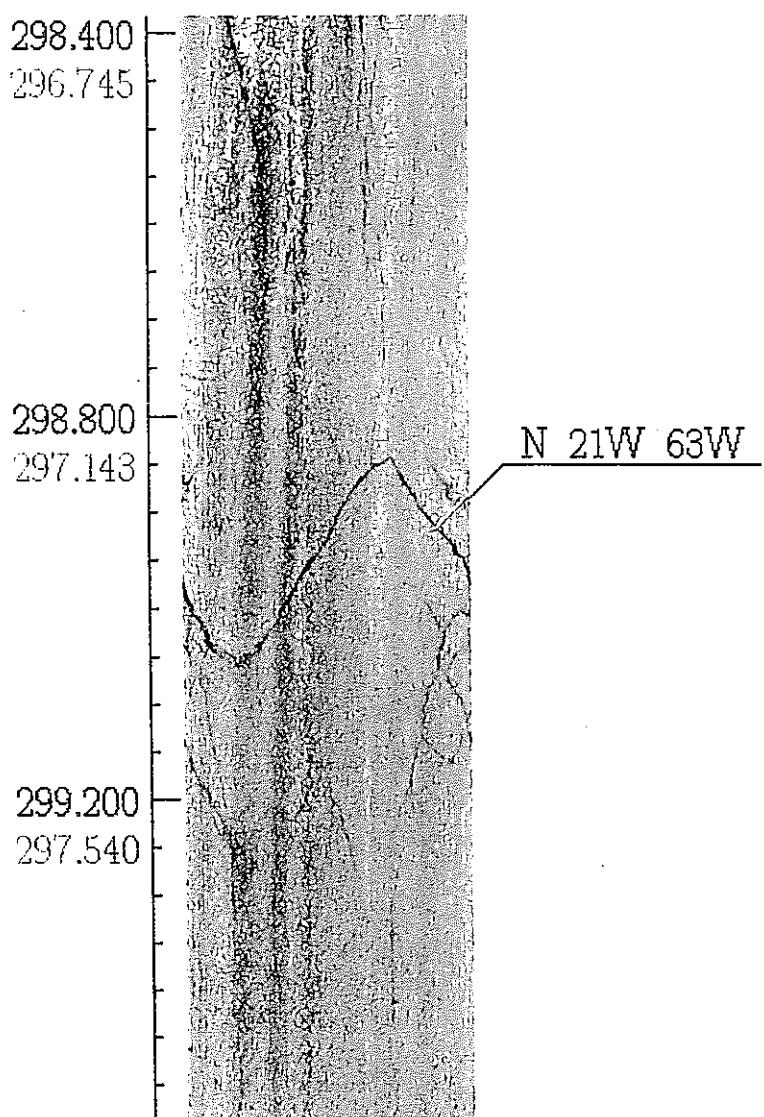


図-5-2-1 チューブ波発生深度のBTV記録の例。単一の亀裂が存在する場合。赤い数字が補正後の正しい深度を示す。

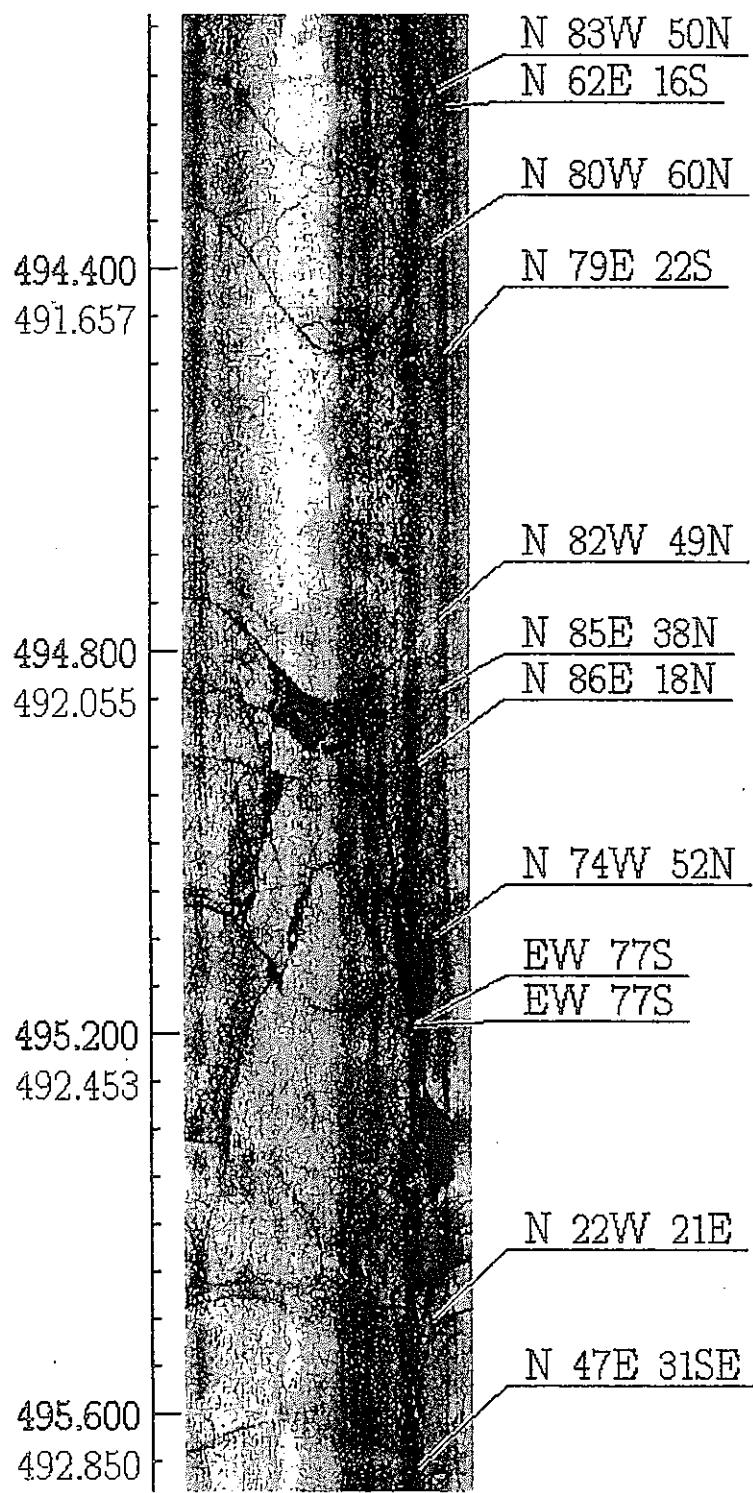


図-5-2-2 チューブ波発生深度のBTV記録の例。複数の亀裂が存在する場合、赤い数字が補正後の正しい深度を示す。

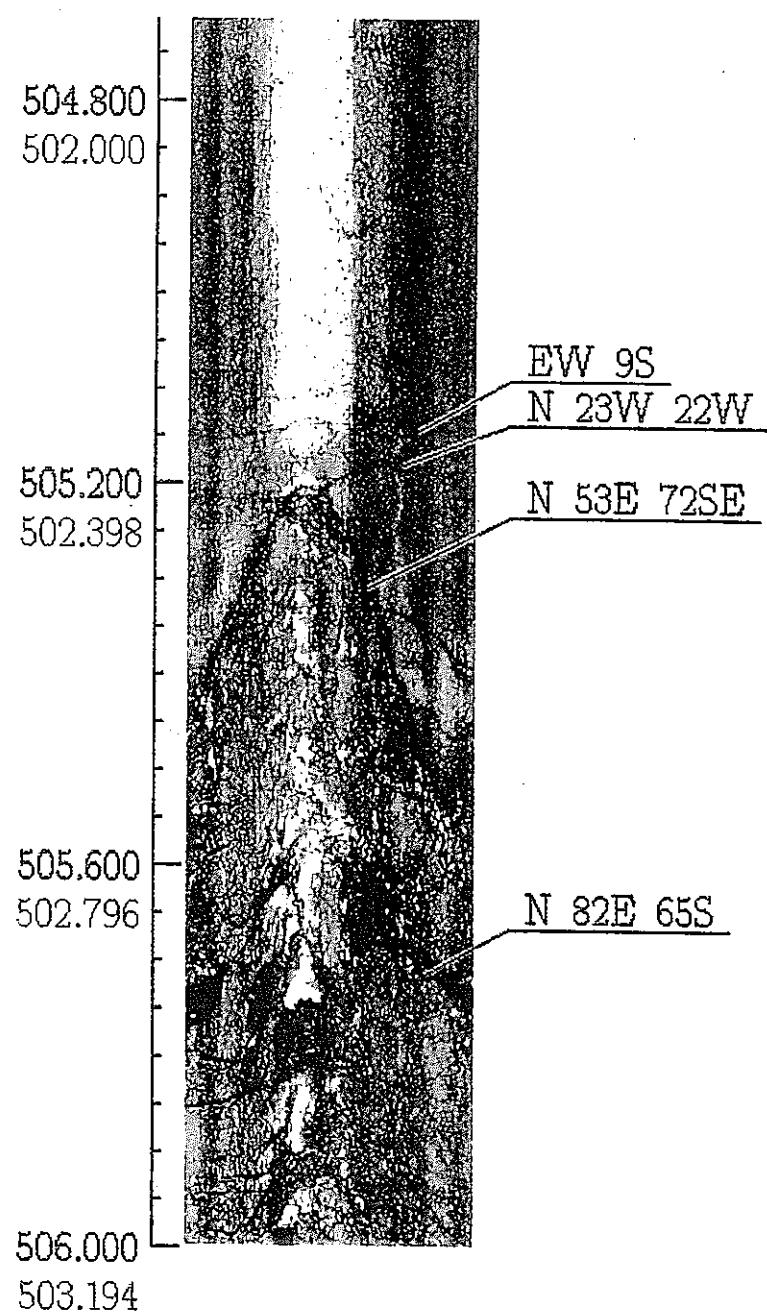


図-5-2-3 チューブ波発生深度のBTV記録の例。破碎帯が存在する場合。赤い数字が補正後の正しい深度を示す。

表-5-2-1 B T V 記録によるチューブ波発生深度の亀裂の分類とチューブ波解析結果

チューブ波発生深度 (m)	B T V 記録による 亀裂の分類	チューブ波解析結果		
		走向	傾斜角	透水係数 (md)
1.	39	Fractures		
2.	52	Fractures	N33W	24 200~1500 *
3.	61	Fractures	N52E	3 50~500 *
4.	79	Fractures	N39W	3 200~800
5.	103	Fracture Zone	N50W	33 10~60
6.	121	Fractures	N71W	56 5~60 *
7.	123	Fractures	N54W	4 20~200 *
8.	130	Fractures		
9.	150	Fractures		
10.	155	Fractures		
11.	164	Fractures	N27W	60 200~1500
12.	168	Fractures		
13.	171	Fractures		
14.	175	Fractures		
15.	200	Fractures		
16.	209	Fractures		
17.	219~224			
	219	Single Fracture	N11E	89 10~200 *
	224	Fracture Zone	N1E	82 300~1500
18.	254	Fractures		
19.	264~270			
	264	Fractures	N16E	88 100~400
	270	Fractures	N13W	59 50~1000 *
20.	280	Fractures		
21.	297	Single Fracture	N17W	65 100~2000 *
22.	305	Fractures	NS	78 100~1500 *
23.	313	Single Fracture		
24.	357	Fractures		
25.	411	Fractures		
26.	422	Fractures		
27.	430	Fractures		
28.	436	Single Fracture		
29.	441	Single Fracture		
30.	452	Fractures		
31.	467~469			
	467	Fracture Zone	N12E	87 50~500
32.	478	Fracture Zone	N37W	22 30~200 *
33.	482	Fractures		
34.	486	Fractures		
35.	492	Fractures	N2E	83 200~1200
36.	503	Fracture Zone		
37.	531	Fractures		
38.	549	Fractures	N83E	24 10~50 *
39.	552	Fractures		

297m

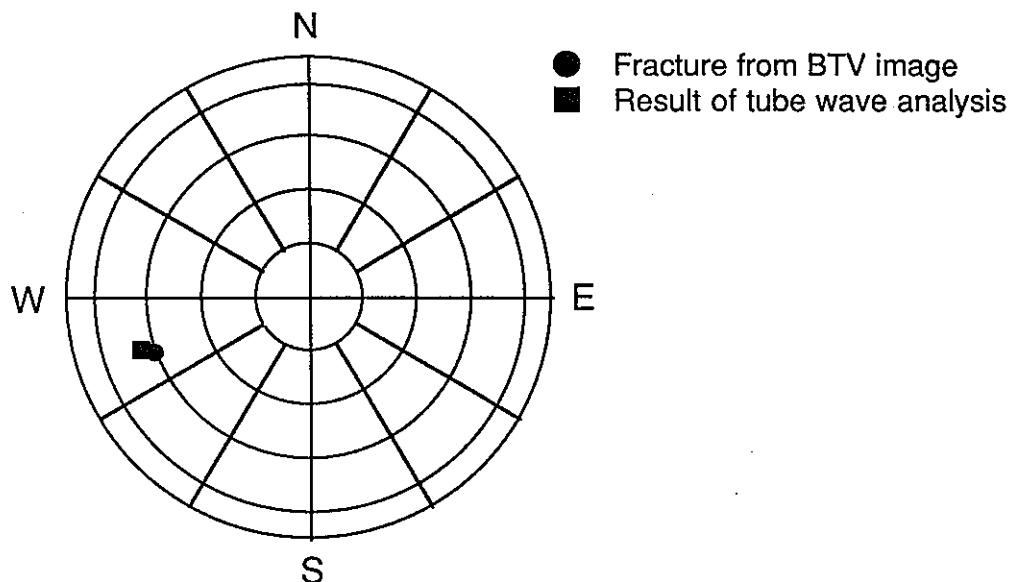


図-5-2-4 深度297mにおける、チューブ波解析結果とBTV記録から得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に示す。半径方向が傾斜角（0～90°），円周方向が傾斜方位を示す。黒丸がBTV記録の値、黒四角がチューブ波解析結果である。

219m

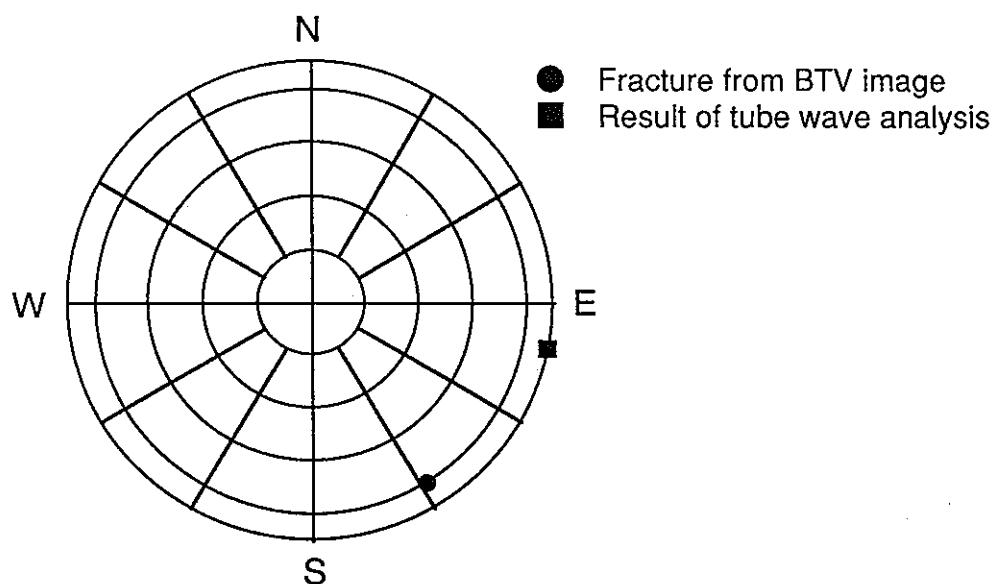


図-5-2-5 深度219mにおける、チューブ波解析結果とBTV記録から得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に示す。

121m

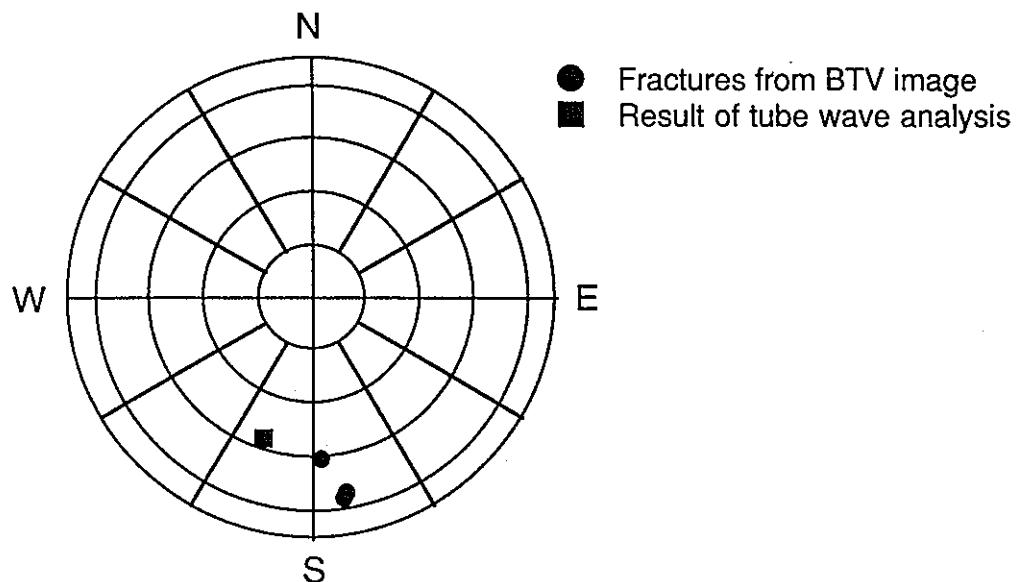


図-5-2-6 深度121mにおける、チューブ波解析結果とBTV記録から得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に示す。

52m

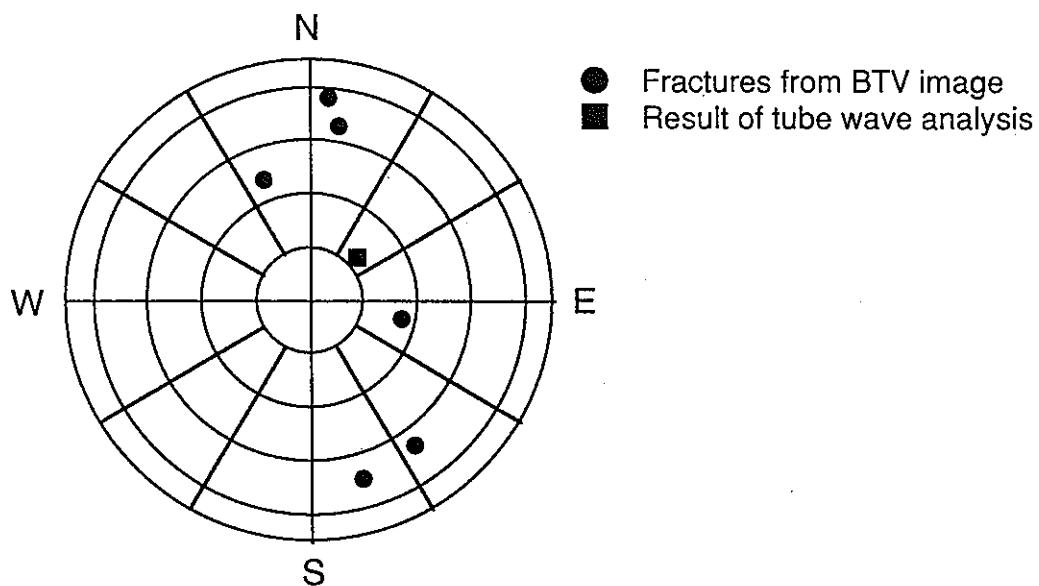


図-5-2-7 深度52mにおける、チューブ波解析結果とBTV記録から得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に示す。

164m

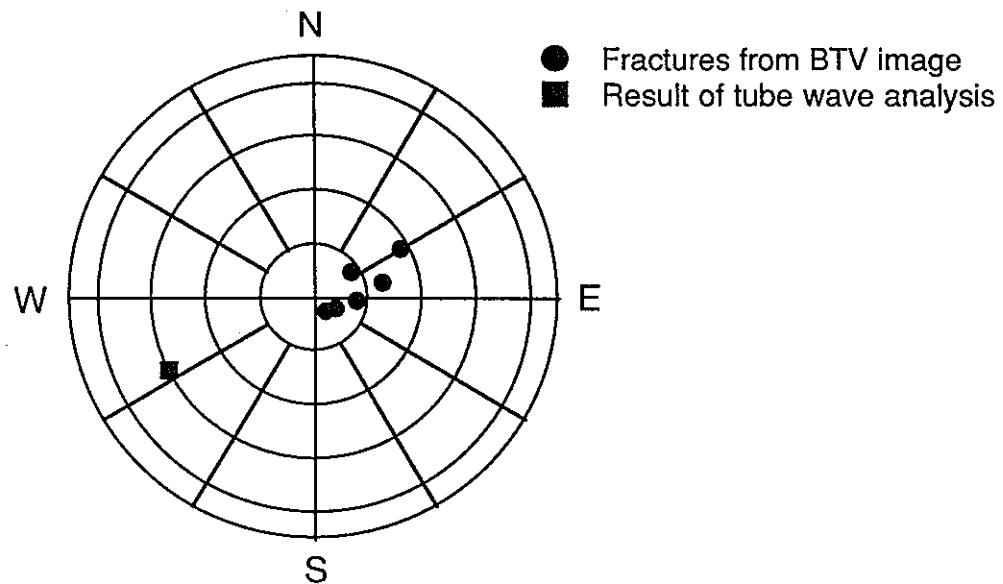


図-5-2-8 深度164mにおける、チューブ波解析結果とBTV記録から得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に示す。

467m

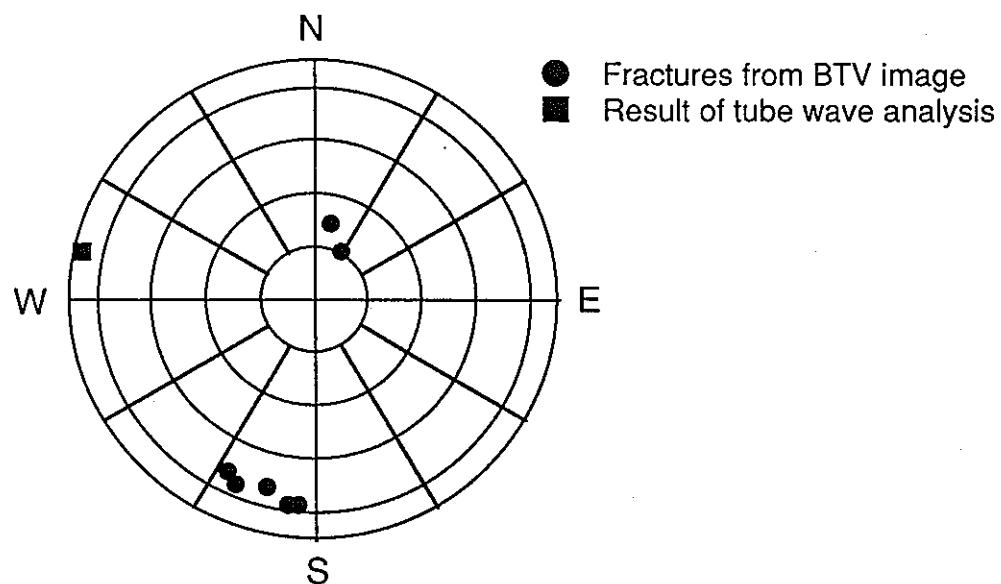


図-5-2-9 深度467mにおける、チューブ波解析結果とBTV記録から得られた亀裂の傾斜方位（走向と直交する方向）と傾斜角を極座標に示す。

6. まとめと今後の課題

平成7年度に、AN-1号孔を受振孔とする、発破震源と重錐落下震源の2種類の震源を用いたマルチオフセットハイドロフォンVSP実験を行った。発破震源の記録から、深度400m～609mの15深度でチューブ波が初動P波から発生しているのが観測された。各種検層結果とチューブ波発生深度を比較すると、前回実験の深度409mまでの結果と同様に、検層で大きな異常を示す深度と明瞭なチューブ波が発生深度はよく一致しており、これらの深度に透水性亀裂の存在が推定される。

重錐落下震源の記録において、初動P波が深度559mまで到達し、深度20m～559mの19深度でチューブ波が発生することを確認できた。発破震源と同様に、重錐落下震源を用いたVSP実験から透水性亀裂を検出することが有効であることが示された。チューブ波の発生深度を求めるときには、S/N比の向上と分解能の向上を目的としたスタック処理とローカットフィルタ処理を行った。ただし、これらの処理にもかかわらず、発破震源の記録で確認されたチューブ波の発生を確認できない場合があった。

平成6年度と7年度の4つのオフセットVSP記録から求められるチューブ波とP波の振幅比を用いて、深度20～609mにおける15のチューブ波発生深度について、透水性亀裂の走向、傾斜角、透水係数を求めた。透水係数の多くは100mdのオーダーで求められた。

チューブ波が発生する深度をBTV記録により観察した。その結果、すべてのチューブ波発生深度に亀裂が存在することが確認できたが、BTV記録ではチューブ波を発生する亀裂とそうでない亀裂を区別する有意な違いは見られないことがわかった。また、チューブ波発生深度の亀裂は、単一の亀裂、複数の亀裂、破碎帯に分類することができた。チューブ波解析から求めた透水性亀裂の走向と傾斜角の値をBTV記録の亀裂の値と比較すると、両者の値がほぼ一致する場合もあるが、一致しない場合もあることがわかった。両者の値が一致しないことの原因について、チューブ波解析では複数の透水性亀裂の平均的な特性を把握している可能性があることなどの検討を行ったが、決定的なことはまだ明らかでない。

今後、チューブ波解析結果と水理試験結果などの坑井データとの比較について検討を進める必要がある。さらに、チューブ波解析で用いる透水性亀裂のモデルについて考察を進める。

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.
- 動力炉・核燃料開発事業団 (1995) : ボアホールテレビジョン装置によるAN-1号孔の岩盤割れ目の特性調査 (0~500m区間) 画像データ集 (その1), PNC PJ7417 95-001(2).
- 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, Geoexploration, 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 (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.
- 木口・伊藤久男・桑原保人・中尾信典・大湊隆雄 (1996) : ハイドロフォンVSPによる透水性亀裂の検出と透水係数の評価, 物理探査, 49, 285-296.
- Kiguchi, T., Ito, H., Kuwahara, Y., Nakao, S. and Ohminato, T. (1995) : Evaluation of permeable fractures by multi-offset hydrophone VSP, Geotherm. Sci. & Tech., 5, 21-29.
- 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一, PNC PJI518 94-001.
- 工業技術院地質調査所・動力炉・核燃料開発事業団 (1995) : 地質調査所・動燃事業団 共同研究報告書—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) -, PNC PY7615 95-001.
- 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, 山川稔 (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) 一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一, 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回学術講演会予稿集.

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析一岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして一, 応用地質, 30, 11 - 22.