

速度コントラストの大きい地盤への  
 サイスマットモグラフィーの適用  
 ——適正なボーリング孔間隔ならびに  
 起振点および受振点間隔に関する検討——

今吉 隆・斎藤秀樹・高橋 亨

Application of Seismic Tomography to High Velocity Contrast  
 Media ——Some Considerations on an Appropriate Plan of  
 Borehole Spacing, Source Interval and Receiver Interval——

Takashi IMAYOSHI, Hideki SAITO and Toru TAKAHASHI

**Abstract**

It is well known that one of the practically important things for applications of seismic tomography to actual field investigations is to make an appropriate plan for the particular site. What one should consider to do this is different from site to site. One of the difficult situations for seismic tomography is the existence of high velocity contrast media, because first arrival rays bend extremely due to refraction in such media. Although the fact has long been known from experiences, it has not been discussed in detail as a problem in planning seismic tomography. This paper intended to clarify the effects of the presence of high velocity contrast layers in relatively homogeneous background and to give a practical guide with which one should consider for planning geometries of tomography measurements.

In 1990, Western Kentucky Petroleum Inc. established the Buckhorn Test Facility in Illinois, U.S.A., and OYO decided to utilize the facility for verification of its new geophysical exploration technologies. As part of the project the authors conducted crosshole seismic tomography at the site. The major target of the experiments was the Silurian Kankakee limestone formation whose high porosity portion could be an oil reservoir. The difficulty of this particular site was that the high velocity thin (7m thick) Kankakee formation had high contrast to the low velocity background shale formations.

Before the field measurements, a number of numerical experiments that simulated the velocity structure of the site had been conducted. The objective of these numerical experiments was to find an appropriate borehole spacing, source interval and receiver interval for the crosshole seismic measurements at this particular site. First, the effects of borehole spacing on tomographic reconstructions were examined. Four models were used, each of which had a different borehole spacing; 90m, 70m, 50m, and 30m. The background velocity of the model was 2.5km/sec and the velocity of a thin (7m thick) layer was 5.0km/sec. The result indicated that the borehole spacing should be less than 50m to delineate the high velocity thin layer. If the borehole spacing was more than that, the ray coverage became poor and blank zones in

which no ray paths existed appeared due to refraction. The second experiment was on the effects of differences in source interval and receiver interval. In addition to the 4m interval sources and receivers which were used in the first experiment, some more points were put at 2m intervals just around the high velocity layer. Two borehole spacing models, these were 30m and 50m, were used in this experiment. The results indicated that the high velocity layer was delineated more clearly by using denser source interval and receiver interval. Using this geometry, the next experiments were conducted to see if one could detect lateral velocity variation in the high velocity layer. Both 30m and 50m spacing cases could properly reconstruct velocity distribution within the high velocity layer. Finally, Gaussian random noises were added to the travelttime data. The result showed that the borehole spacing should be less than 30m to detect the lateral velocity variation in the high velocity layer.

As the results of the numerical experiments, the following guide lines were obtained for this particular site :

- (1) To delineate the high velocity thin layer, the borehole spacing had better be less than 50m and sources and receivers had better be put denser at least around the high velocity layer.
- (2) To detect lateral velocity variation in the high velocity layer, the borehole spacing had better be less than 30m in addition to the above condition.

According to the results of numerical experiments, the borehole spacing, source geometry and receiver geometry were planned at the Buckhorn Test Facility. Crosshole tomography was applied to two different borehole spacing sections at the site for verifying the results of numerical experiments. Case I used boreholes B and A whose spacing was 47m, and Case II uses B and D whose spacing was 26m. In both cases, a thin high velocity layer was clearly delineated at the same depth as the Kankakee formation was confirmed along the boreholes. With regard to the velocity distribution in the Kankakee formation, it could be reconstructed by only Case II as expected. The results of the numerical experiments were considered to be verified by the field experiments at the site.

The authors obtained a practical guide for planning geometries of seismic tomography in case of the presence of a high velocity thin layer. However, in engineering fields, investigations are often focused on the presence of low velocity layers in high velocity background. To give a practical guide to this problem, another set of numerical experiments were conducted to simulate such a situation. The results of the numerical experiments indicated that :

- (1) the reconstruction of a low velocity layer was not so difficult as the case of high velocity layer, because the rays passed denser even in the low velocity layer than the high velocity case if the velocity contrast and the thickness of the layer were same.
- (2) However, when the borehole spacing became longer, the performance of reconstruction got much worse than the case of the presence of the high velocity layer.

Further studies are needed to clarify the reasons of such phenomena by conducting both numerical and field experiments. The authors intend to continue the research on seismic tomography and to make it more practical and economical method for engineering purposes.

## 1 まえがき

サイスミックトモグラフィーを実際の調査に利用する際に、留意しなければならない重要な点の1つに、起振点や受振点を設置するためのボーリング孔間隔ならびに起振点および受振点間隔などに関する測定計画の適正化の問題がある。

一般的に、サイスミックトモグラフィーの原理上から

は、「対象断面内をできるだけ数多くの波線が多方向から通過するように測定計画を立てるべきである」といわれているが、具体的にどの程度までそれを実現すれば良いかは、調査の対象ごとに異なるものである。

例えば、速度構造がほぼ水平な層構造となっていると推定される場所では、2本の鉛直ボーリング孔を用いて、クロスホール測定を実施すれば、多くの場合、その目的が達せられる。しかし、大友(1986)は、上記のよう

な鉛直配置のボーリング孔では、鉛直に近い速度構造の場合に、速度分布を正確にとらえることが困難であることを述べている。したがって、調査計画を立案するに当たっては、ボーリング孔の掘削方向にしても、想定される速度構造に応じて、鉛直方向に限らず、水平方向あるいは傾斜方向に掘削するなど、ボーリング孔配置そのものを検討する必要がある (Saito et al., 1990)。

さらに、対象断面内の速度コントラストが大きい場合には、ボーリング孔の配置や起振点および受振点の配置を綿密に計画する必要がある。それは、速度コントラストが大きいほど、初動となる波が屈折波となることが多いため、波線が断面内の一部に集中しやすくなり、その結果、波線の分布に粗密が生じるからである。このことは、経験的には知られていることであるが、実際に検証した例は発表されていない。

そこで、筆者らは、速度が2.5km/secの地層中に速度が5.0km/secの薄い層があるような、速度コントラストが大きい地盤に対して、トモグラフィを適用する際のボーリング孔間隔ならびに起振点および受振点間隔が、解析結果に及ぼす影響を数値実験によって検討し、測定計画を立てる際の必要条件を求め、実験サイトにおける現地実験を実施し、その結果と対比することによって、計画の妥当性の検証を行った。

一方、土木関係の調査において、しばしば遭遇する断層や破碎帯が存在する場合のように、高い速度の地層中に低い速度の薄い層がある場合を想定し、数値実験によって同様の検討を行った。

## 2 低い速度の層中に高速度の薄層がある場合

### 2・1 実験サイトおよび地質概要

Western Kentucky Petroleum 社は、目下、石油を生産中の油田の一部に、「バックホーン実験サイト」と称する実験サイトを設置している。この実験サイトは、アメリカ・イリノイ州の西部、イリノイ堆積盆地の縁辺部に位置しており、その地質構造は、既往のボーリング調査によって、図-1に示すような層序であることがわかっている。さらに、各種検層結果とあわせて当サイトの地質概要をまとめると、以下のとおりである。

- ① 古生界の石灰岩と頁岩のほぼ水平な互層である。
- ② 深度約200mのところ分布する層厚7mのシルル系の石灰岩層は、カンカキー層と呼ばれている。この石灰岩層は水平方向に孔隙率が大きく変化しており、孔隙率の大きい部分の一部に石油が胚胎されている。

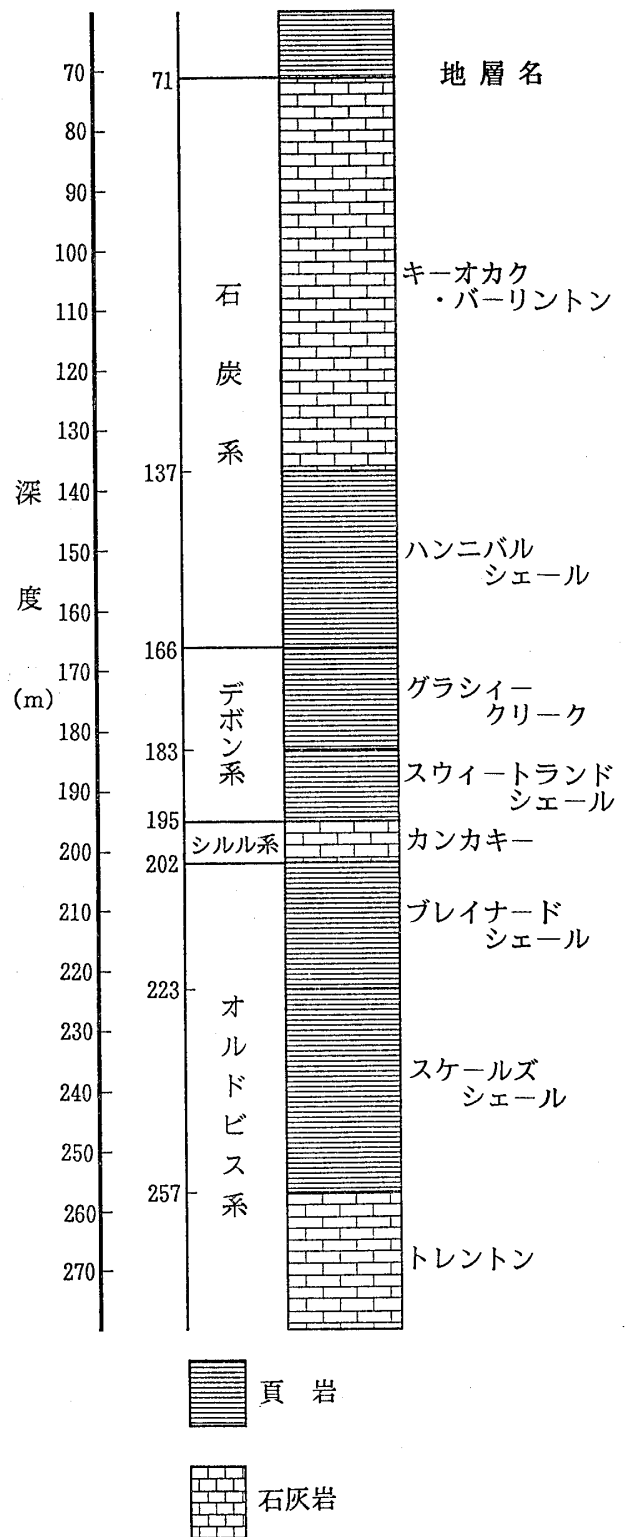


図-1 バックホーン実験サイトの層序  
Fig.1 Stratigraphy of the Buckhorn test site

- ③ サスペンションPS検層の結果によれば、頁岩および石灰岩の代表的なP波速度は、それぞれ、2.5km/secおよび5.0km/sec程度である。
- ④ さらに、上記の検層の結果によれば、カンカキー

層の孔隙率が大きい部分のP波速度は、孔隙率が小さい部分に比べ、数%から40%程度小さな値を示している。

2・2 ボーリング孔間隔ならびに起振点および受振点間隔に関する数値実験

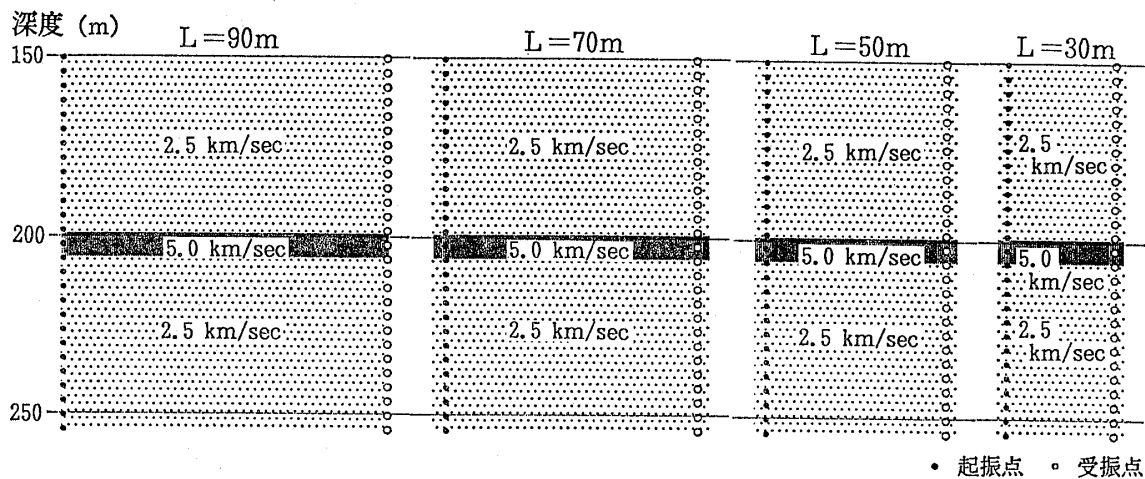
先に述べたように、バックホーン実験サイトにおいては、P波速度が2.5km/secの頁岩と5.0km/secの石灰岩とが互層をなしており、特に、深度200m付近にあるカンカキ層（石灰岩層）の厚さは、わずかに7mである。このように、速度コントラストの大きい地盤中に、高速度の薄層が分布している場合に、クロスホール測定によって、その分布状況を正しく再構成するために、ボーリング孔間隔や起振点および受振点間隔をどのように構成すればよいかを見極めることを目的として、一連の

数値実験を行った。

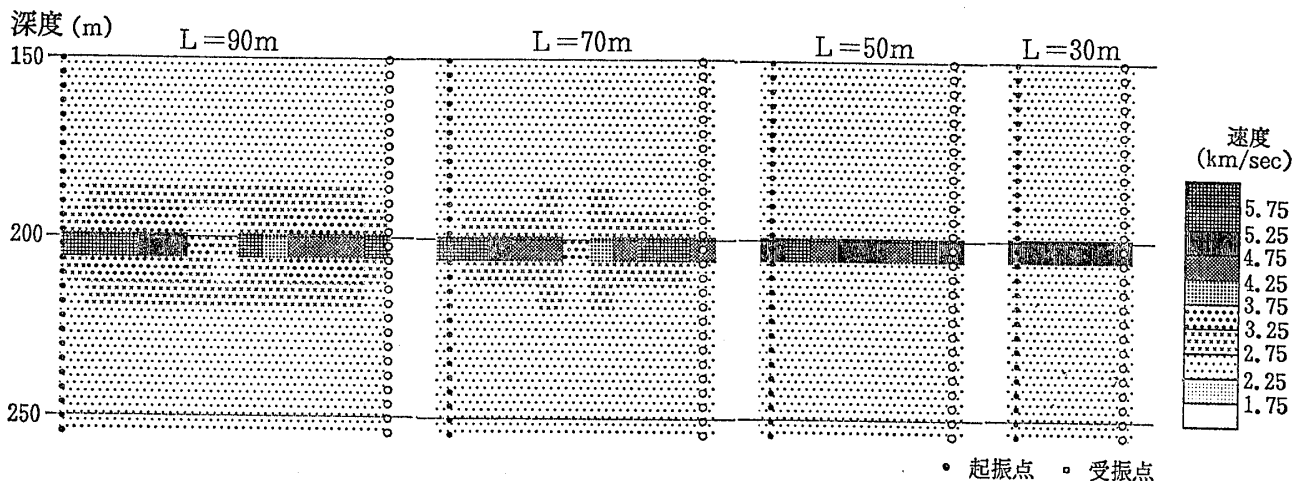
ボーリング孔間隔ならびに起振点および受振点間隔を検討するにあたって、実験サイトにあるカンカキ層を中心とした約100mの区間を数値実験の対象範囲とした。そのために、深度150~199m区間の速度を2.5km/sec、199~206m区間の速度を5.0km/sec、206~255m区間の速度を5.0km/secとし、低速度層の中に薄い高速度の層が水平に分布するモデル地盤を想定した。

(1) ボーリング孔間隔に関する検討

ボーリング孔間隔の違いが高速度薄層の再構成に及ぼす影響を検討するために、ボーリング孔間隔が90m、70m、50mおよび30mの4つの場合について数値実験を実施した。図一2は、速度構造モデルと起振点および受振点の配置を示したものである。2.5km/secの速度をもつバックグラウンド中に、速度が5.0km/sec、層厚が7mの



図一2 4種類のボーリング孔間隔について検討した数値実験の速度構造モデルと起振点および受振点の配置  
Fig.2 The velocity structure models and source receiver geometries used in the numerical experiments on the four different borehole spacing



図一3 4つのボーリング孔間隔について検討した数値実験の再構成結果  
Fig.3 Reconstructed tomograms of the numerical experiments on the four different borehole spacing

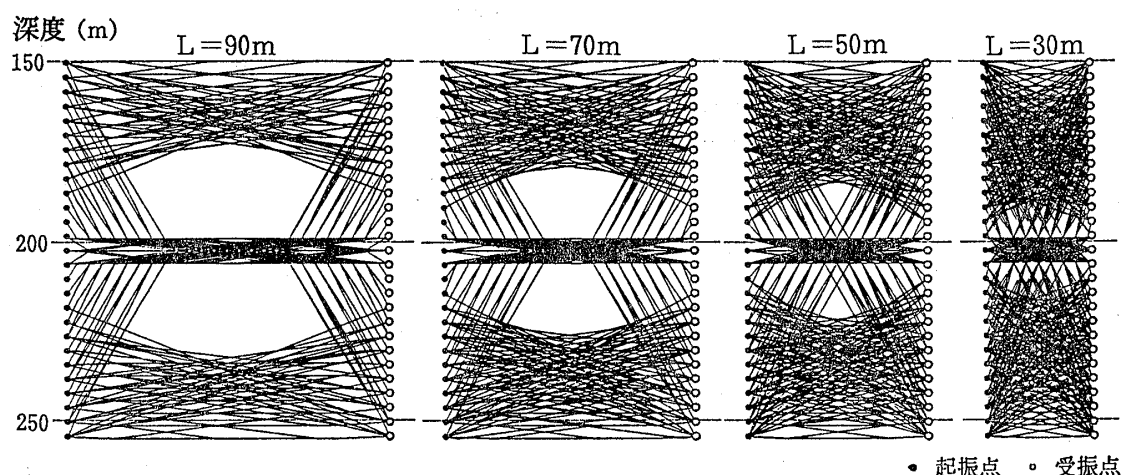


図-4 4つのボーリング孔間隔について検討した数値実験の速度構造モデルに対して計算された波線経路  
 Fig.4 Calculated first arrival ray paths for the velocity structure models used in the numerical experiments on the four different borehole spacing

高速度薄層が水平に分布するモデルである。そして、深度150.5mのところの最上部の起振点および受振点を設け、それぞれ下部に向かって4m間隔に27点を設置した。

これらの速度構造モデルに対して、ホイヘンスの原理に基づくレイトレーシング法 (Saito 1989) によって初動走時を計算し、これを入力データとした。データ数は、いずれのボーリング孔間隔の場合も729個である。再構成には、このレイトレーシング法と Damped Least Squares 法を交互に使用する反復法を用いた。解析に使用したセルは、一辺が7mの正方形とした。

図-3に、再構成結果を示す。ボーリング孔間隔が90mおよび70mの場合には、高速度層の存在は認められるものの、高速度層中およびその周辺においては、速度構造モデルに設定した速度値が再現されていない。一方、ボーリング孔間隔が50mの場合には、高速度層の速度に若干のばらつきが見られるが、高速度層の形状と低速度部の速度値は、速度構造モデルと同じであり、比較的良好な結果といえることができる。さらに、ボーリング孔間隔が30mの場合には、速度構造モデルとほとんど同じ結果となっている。

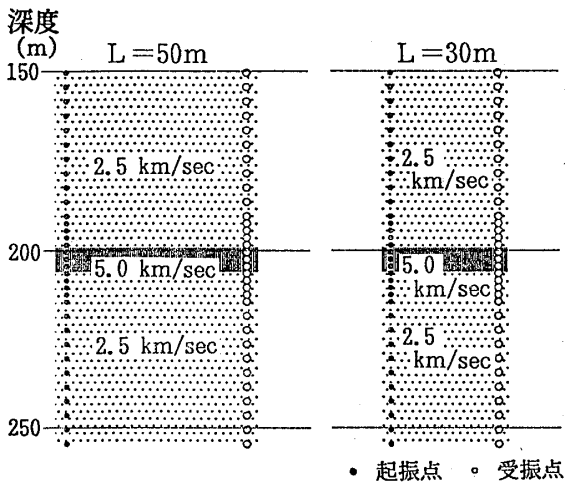
このような違いが生じる原因は、ボーリング孔間隔の違いによる波線分布密度の違いによって説明することができる。図-4は、それぞれのボーリング孔間隔についてのすべての波線経路 (モデルに対するレイトレーシング結果) を示したものである。この図から明らかなように、ボーリング孔間隔が大きいほど、波線が通過しない空白領域が大きくなっていることがわかる。ボーリング孔間隔が小さく、したがって空白領域も小さい30mの場合には、やや粗密はあるものの、対象領域全体が波線に覆われている。

## (2) 起振点および受振点間隔に関する検討

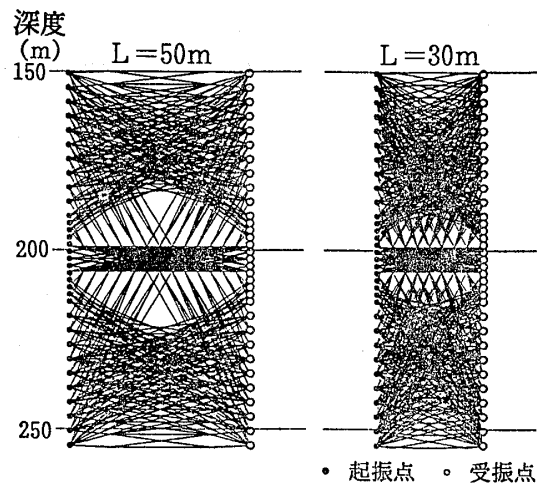
先の数値実験において比較的良好な結果が得られたボーリング孔間隔が50mおよび30mのモデルにおいて、高速度層を中心とした20mの深度範囲内の起振点および受振点間隔を小さくした数値実験を行った。すなわち、上から11番目 (深度190.5m) から17番目 (深度214.5m) までの各起振点あるいは受振点の間に、それぞれ6点を追加し、この範囲の起振点および受振点間隔を2mとした。これによって、総データ数は1089となり、前の場合のデータ数よりも360の増加となっている。

図-5は、上記の速度構造モデルにおける起振点および受振点の配置を示したものであり、図-6に再構成した結果を示す。この結果を、図-3に示した高速度層近傍の起振点および受振点間隔が4mの場合と比較すると、ボーリング孔間隔30mの場合には、全く同じ結果で、起振点および受振点間隔を小さくする必要がないことを示している。これに対して、ボーリング孔間隔50mの場合には、前の実験においては、高速度層内の速度が場所によって異なるような結果となっていたが、起振点および受振点間隔を小さくした実験の結果は、ボーリング孔間隔30mの場合と同様に、設定した速度構造モデルを再現しており、ボーリング孔間隔がこの程度の大きさの場合には、一部の起振点および受振点間隔を小さくすることによって、再現性を確保できることがわかった。

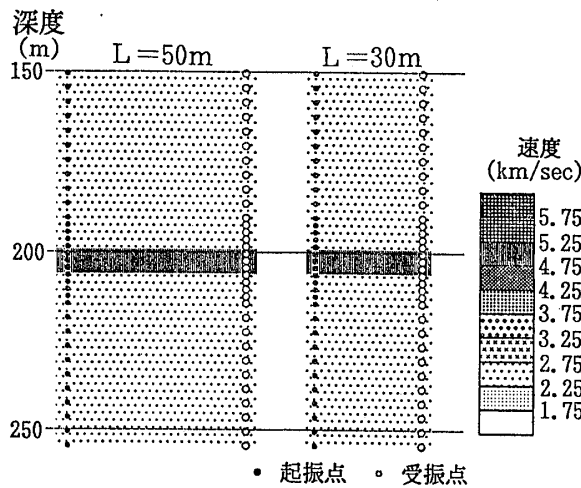
これは、起振点および受振点を追加したことによって、図-7に示すように、高速度薄層内の波線分布がより均質になるとともに、高速度薄層内のみを通過する波線の数が増えたためと考えられる。すなわち、高速度薄層内に起振点および受振点が共に含まれている波線は、先の起振点および受振点間隔が4mの場合には1波線で



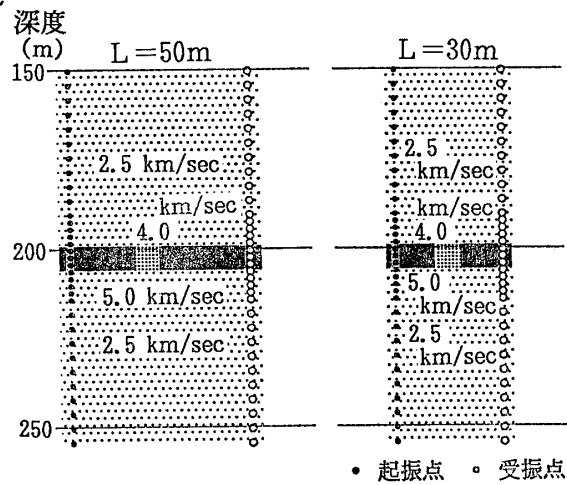
図一五 起振点および受振点間隔について検討した数值実験の速度構造モデルと起振点および受振点の配置  
Fig.5 The velocity structure models and source receiver geometries used in the numerical experiments on the source receiver spacing



図一七 起振点および受振点間隔について検討した数值実験の速度構造モデルに対して計算された波線経路  
Fig.7 Calculated first arrival ray paths for the velocity structure models used in the numerical experiments on the source receiver spacing



図一六 起振点および受振点間隔について検討した数值実験の再構成結果  
Fig.6 Reconstructed tomograms of the numerical experiments on the source receiver spacing



図一八 低速度帯を想定した数值実験の速度構造モデルと起振点および受振点の配置  
Fig.8 The velocity structure models and source receiver geometries used in the numerical experiments which assumed the presence of a low velocity zone

あったが、起振点および受振点を追加したことによって9波線となっている。

(3) 高速度層中に低速度帯がある場合の検討

以上に述べた数值実験によって、高速度層の近傍の起振点および受振点の配置を密にすることによって、ボーリング孔間隔が50m以内であれば、高速度薄層の分布状態を正確に知ることができるという見通しを得たので、図一八に示すように、高速度層中に低速度帯が存在する場合のモデルについて、その再現性の検討を行った。

この場合のモデルとしては、先のモデルと同様に、2.5km/secの速度をもつバックグラウンドの中に、速度が5.0km/sec、層厚が7mの高速度層が水平に分布する

ものとし、高速度層の孔間中央部付近に、4.0km/secの速度値をもつ低速度帯（高速度層の速度値5.0km/secの80%に当たる速度）を想定した。

この低速度帯は高速度層中の一部の層厚全体を置き換える形で挿入することとし、図一八に示すように、ボーリング孔間隔50mの場合は、左側のボーリング孔から21mのところを中心とし、また、ボーリング孔間隔30mの場合は、同じく15mのところを中心として、両者ともに

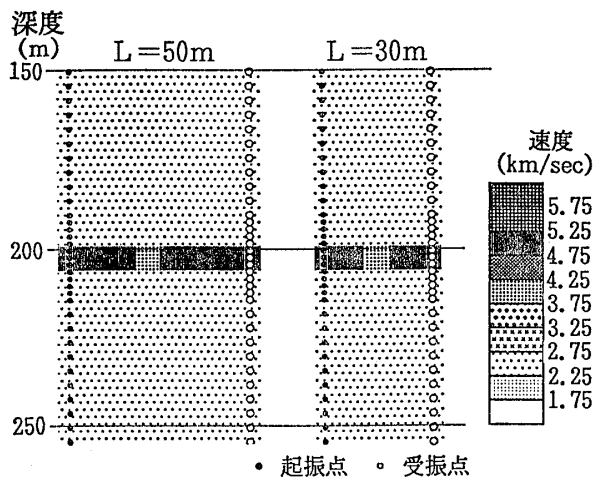


図-9 低速度帯を想定した数値実験の再構成結果

Fig.9 Reconstructed tomograms of the numerical experiments which assumed the presence of a low velocity zone

横幅を7mとした。

なお、起振点および受振点の配置は、先に記した高速度層近傍におけるそれらの間隔を2mとしたものを用いることにした。

図-9は再構成した結果である。このようなモデルの場合、ボーリング孔間隔が30mの場合でも、50mの場合でも、高速度層の形状およびその中の低速度帯は正確に再現されており、また、バックグラウンドおよび高速度層内ともに、モデルの速度値と同じような値が得られている。

(4) ノイズを含む走時データを使った場合の検討

以上に示した数値実験においては、入力データとして理論走時を使用しており、データにはノイズが含まれていない。しかし、実際のフィールドデータには、必ず何らかのノイズが含まれている。したがって、フィールドデータに対応するものとして、理論走時に人工的にノイズを加えたものを用いて、2・2節の(2)および(3)におけるものと同じモデルに対して入力し、ノイズの影響を評価するための数値実験を実施した。

ここに、使用したノイズは、0.1msecの標準偏差をもつ正規分布のランダムノイズである。

図-10は、速度(5.0km/sec)が一様な高速度層のモデルに対する再構成結果であり、図-11は、5.0km/secの高速度層の中に4.0km/secの低速度帯を含むモデルに対する再構成結果を示したものである。両者ともに、高速度層そのものの分布形状は良好に再構成されている。

図-10に示す結果を、図-6に示すノイズを含まない理論走時による結果と比較すると、ボーリング孔間隔30mの場合は、同じ結果が得られており、ノイズを含むフ

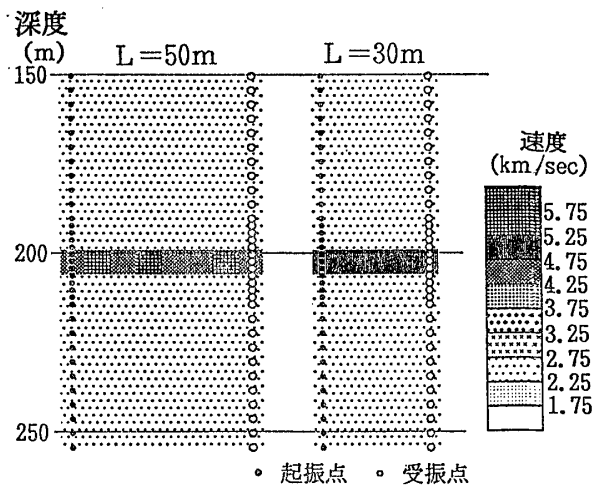


図-10 ノイズを含むデータを使用した数値実験の再構成結果(低速度帯のない場合)

Fig.10 Reconstructed tomograms of the numerical experiments using the traveltime data which contained noises. Low velocity zone does not exist in the model

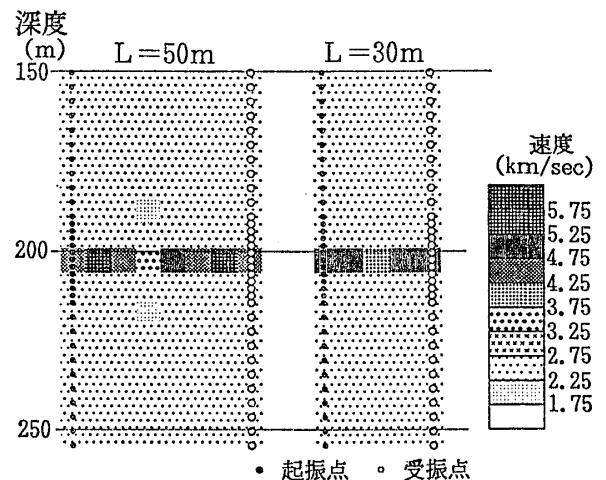


図-11 ノイズを含むデータを使用した数値実験の再構成結果(低速度帯のある場合)

Fig.11 Reconstructed tomograms of the numerical experiments using the traveltime data which contained noises. A low velocity zone exists in the model

ィールドデータによっても、再現性は確保されることが予想される。しかしながら、ボーリング孔間隔50mの場合は、ノイズを含むことによって、高速度層中の速度にばらつきが見られる。この結果は、高速度層近傍の起振点および受振点間隔が4mである場合の結果(図-3)と比較すると、おおむね、同じ程度の再現性とみなすことができる。

一方、図-11に示す結果を図-9に示すノイズを含まない理論走時による結果と比較すると、ボーリング孔間

隔30mの場合は、同じ結果が得られており、ノイズを含むフィールドデータによっても、高速度層中に存在する低速度帯の速度値および位置を明瞭に判別できることを示している。しかし、ボーリング孔間隔50mの場合に、ノイズを含まない理論走時による結果(図-9)では、良好な再現性を示しているのに対して、図-11における高速度層中の速度分布を見ると、モデルと同じ位置に低速度の部分には存在しているが、その速度値はモデルの値よりも小さくなっており、その両側でモデルより大きな速度値が現われている部分がある。したがって、高速度層中の20%程度の速度変化を正確に再構成するのは難しいといえる。

2・3 数値実験の結果のまとめ

バックホーン実験サイトにおけるカンカキー石灰岩層のように、速度コントラストの大きい地盤を対象としたサイズミックトモグラフィーの適用上の留意点を明らかにすることを目的として、一連の数値実験を実施した。その結果、留意すべき点は、つぎの2点であることがわかった。

- ① 高速度層形状を再構成するためには、ボーリング孔間隔を50m以内とし、起振点および受振点を高速度層近傍で、密に配置すべきであること。
- ② 高速度薄層中の速度変化(低速度帯)を確実にとらえるためには、起振点および受振点を高速度層近傍で密に配置するとともに、ボーリング孔間隔を30m程度とする必要があること。

2・4 現場測定および解析結果

上述のように、低い速度の層の中に高速度の薄層がある場合に、高速度層を対象としてサイズミックトモグラフィーを実施する際の留意点を数値実験から求めたが、果たして、それらの条件が満足されれば、実際の現場測定においても、数値実験において再構成された結果と同等の結果が得られるかどうかを検証するため、2・1に述べたバックホーン実験サイトにおいて、現場実験を実施した。

この実験サイトにおいては、図-12に示すように、目下稼働中の油井#5と、この井戸から南へ102m離れたところにボーリング孔Eが掘削されていた。サイズミックトモグラフィーの実験とともに行われた他の実験用とも併せて、A、B、CおよびDの四本の孔を深度約270mまで掘削した。これらの孔のうち、油井#5から15mおよび36mの距離にあるA孔およびD孔においては、カンカキー層内に油徴が認められたが、D孔からわずか26

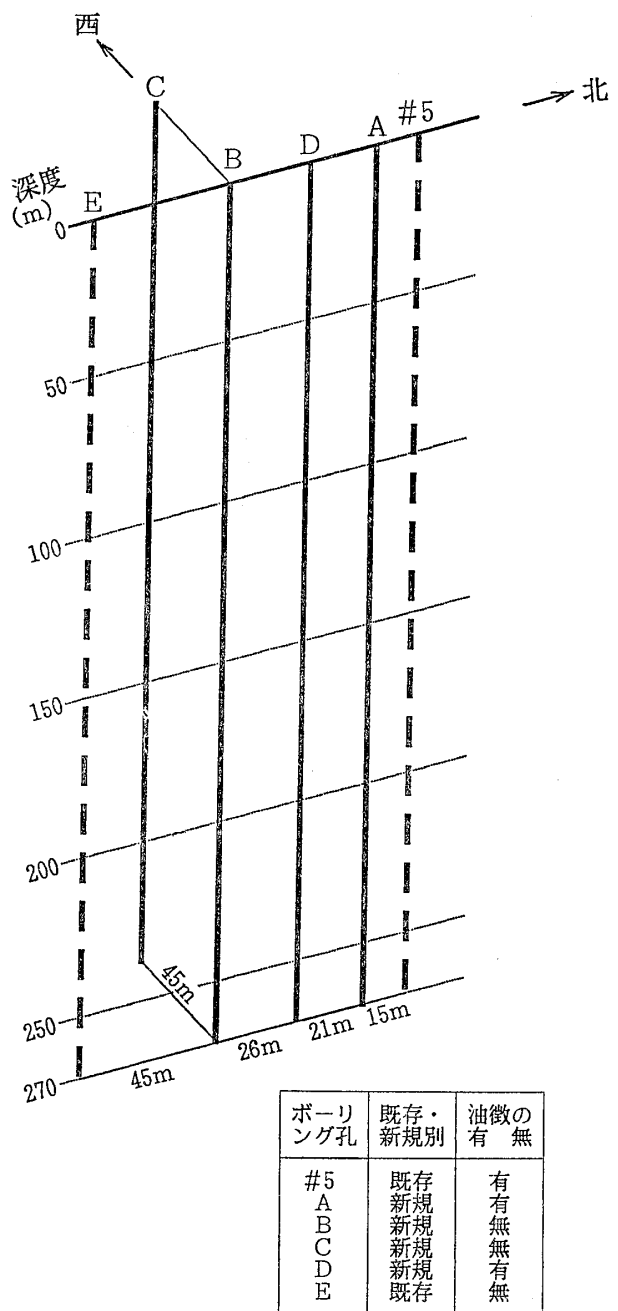


図-12 バックホーン実験サイトにおけるボーリング孔配置  
Fig.12 The arrangement of boreholes at the Buckhorn test site

m離れたB孔には全く認められなかった。したがって、このD孔とB孔の間に孔隙率が変化する箇所があるものと推定された。

(1) 測定ジオメトリ

サイズミックトモグラフィーは、図-12に示すボーリング孔のうち、B-A間(ケースI, ボーリング孔間隔47m)とB-D間(ケースII, ボーリング孔間隔26m)の2つの断面を対象とした。そして、ケースIでは、深



度約80mから260mまでを測定範囲とし、ケースⅡでは、深度約140mから240mまでを測定範囲とした。

先に述べた数値実験の結果を踏まえて、いずれの場合も、受振点間隔を2mとした。また、起振点は、4m間隔を基本としたが、カンカキ層を含む深度177mから205mまでの28mの間では、いずれの場合も2m間隔とした。なお、ケースⅠでは、深度131m以浅および241m以深の部分では、10m間隔とした。また、データの品質向上を目的として、往復走時を測定するようにした。したがって、ケースⅠでは、起振点71点、受振点236点で、1671個のデータを得ることになり、ケースⅡでは起振点66点、受振点99点で、1584個のデータを得ることになった。

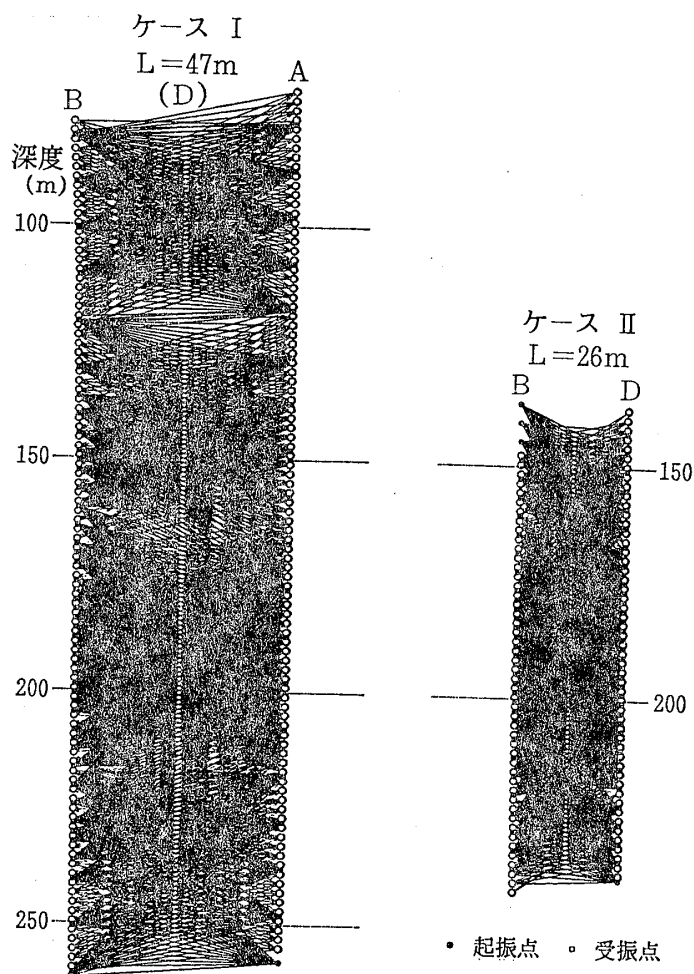
図一13に、両ケースの起振点および受振点の配置と観測パターンを示す。

## (2) 測定方法と解析手法

測定に当たっては、少量(15~20g)のダイナマイトを用いて起振し、受振器としては、多連式の孔中浮遊型ジオフォン(上下動成分のみ、固有周波数28Hz)を使用した。応用地質梯製 McSEIS-1600をデータ収録装置とし、各チャンネルともに、0.04msecのサンプリング間隔で、2048ポイントの波形データをA/D変換して収録した。

得られた記録の一例を図一14に示す。この記録は、B孔の深度189m(カンカキ層上面よりやや上部)で起振し、D孔の深度174mから220mまでの区間で受振したものである(受振点間隔は2m)。これによれば、深度174mから180mまでの4点では直接波が、深度182mから188mまでの4点ではヘッドウェーブが、また、深度190m以深では透過波が、初動として認められる。

解析に使用する走時は、上記のような波の経路による区別は行わず、初動としての走時である。データの品質



図一13 B-A および B-D 断面で実施したクロスホールトモグラフィーの観測パターン

Fig.13 Observation patterns of the crosshole tomography applied to the B-A and B-D sections

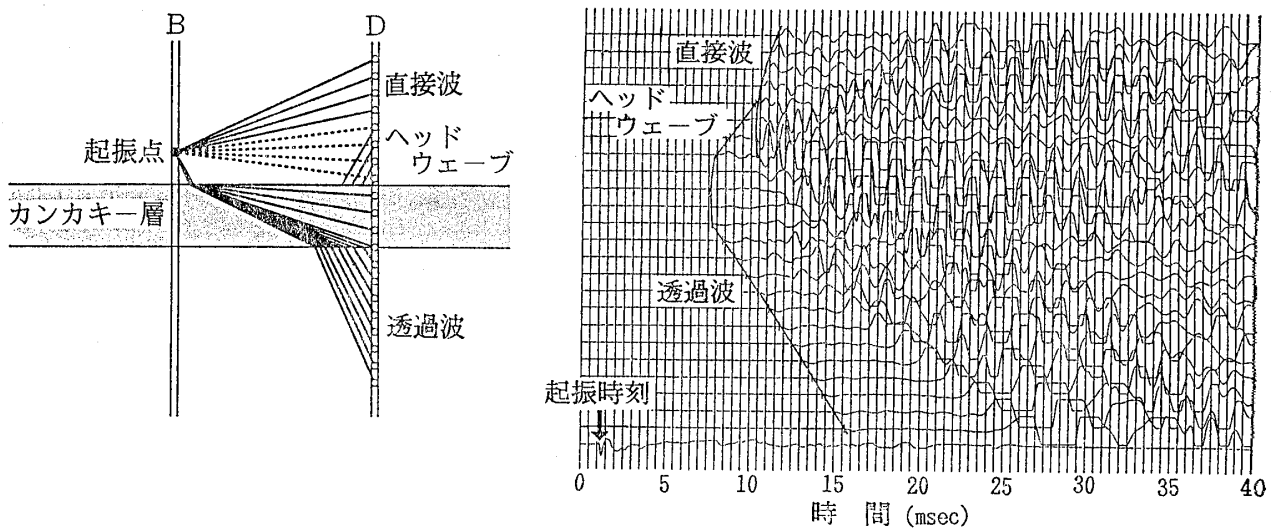


図-14 カンカキー層近傍で取得した代表的な波形記録と初動となる波の波線経路模式図

Fig.14 Typical waveform data obtained around the Kankakee formation and the schematic diagram of these first arrival ray paths

向上を目的として、往復走時を測定しているのので、屈折法地震探査における往復走時の調整と同様の考え方で、最小二乗法的に起振ごとに走時の調整を行った。最終的には、この往復走時の差の標準偏差は、ケースⅠにおいては0.3msec程度、ケースⅡにおいては0.06msec程度となった。数値実験で想定したノイズの大きさ(標準偏差0.1msec)と比較すると、ケースⅠではそれより大きく、ケースⅡでは約1/2となっている。ケースⅡについては、サンプリング間隔が0.04msecであることも考え合わせると、非常に精度の良い現場測定といえる。

解析の初期モデルは、サスペンションPS検層から求めたP波速度を水平方向に線形補間することによって求めた。ケースⅠではA孔およびB孔の、ケースⅡではB孔およびD孔のサスペンションPS検層の結果を利用した。解析は、数値実験の場合と同様に、反復法によって行った。ただし、ここでは同時反復法(SIRT)を使用した。なお、ケースⅠおよびケースⅡで解析に使用したセルの大きさは、それぞれ、2m(深度方向)×4m(水平方向)および1m×1mであった。

### (3) 解析結果

ケースⅠおよびケースⅡの反復回数と走時残差(再構成結果に対する理論走時と観測走時の二乗平均残差)の関係を図-15に示す。また、深度140mから深度240mまでの範囲の解析結果(再構成像)を図-16に示す。この図の右側には、D孔において実施されたサスペンションPS検層の結果と、ケースⅡのトモグラフィーによって再構成されたD孔沿いのセルの速度値を合わせて示してある。

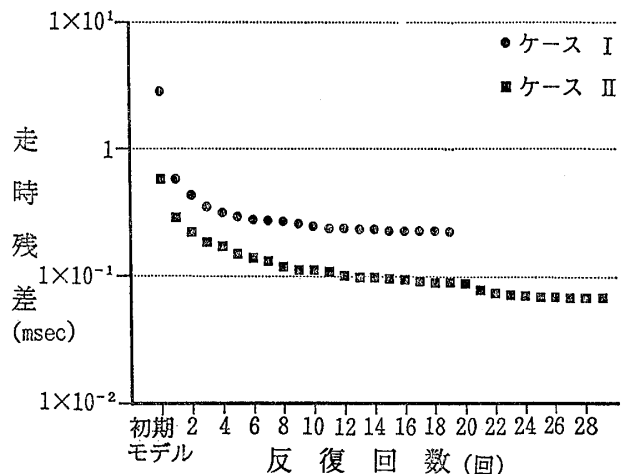


図-15 反復回数ごとの走時残差の減少状況

Fig.15 Traveltime residuals as a function of the iteration number

これらの結果から次のような結論が得られた。

- ① 図-15によれば、ケースⅠおよびケースⅡのいずれの場合でも、反復回数が増すとともに走時残差は減少した。ケースⅠでは15回程度、ケースⅡでは25回程度で、走時残差の変化は小さくなり、収束したものと判定した。
- ② 図-16において、トモグラフィーによる結果をD孔におけるサスペンションPS検層の結果と比較すると、ケースⅠおよびケースⅡのいずれの場合も、第一の目的であった高速度薄層(カンカキー層)の深度および層厚は、ほぼ正しく解析されたものと評価できる。
- ③ ボーリング孔間隔が47mのケースⅠの場合には、

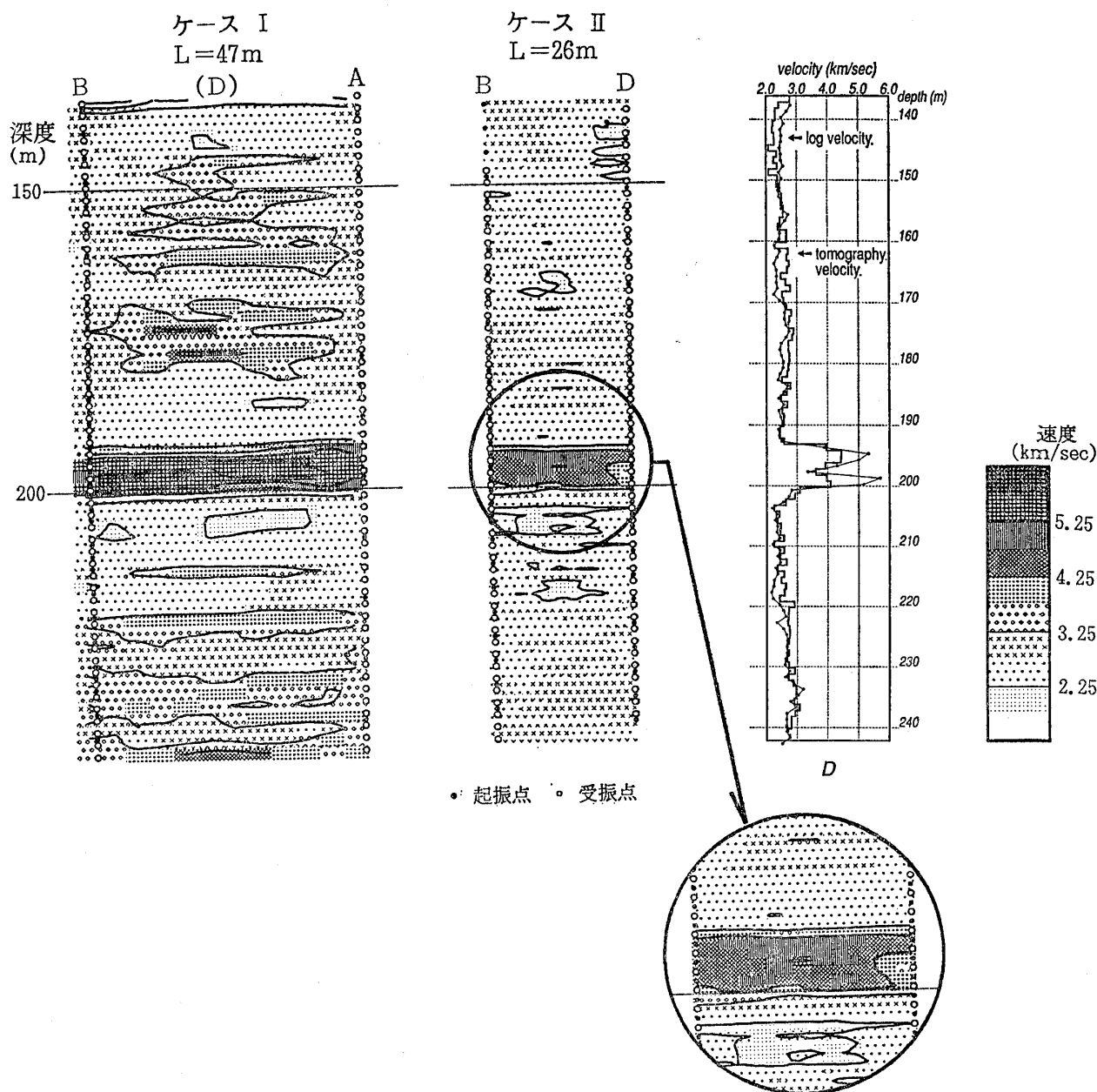


図-16 B-A および B-D 断面の再構成結果  
Fig.16 Reconstructed tomograms of the sections B-A and B-D

高速度層内部に、局所的に速度が 6.0 km/sec 以上を示す高速度域がみられる。この現象は、数値実験においても、ボーリング孔間隔の大きい場合 (50m) には認められており、層厚に比してボーリング孔間隔を大きくとったことによって、解析過程で発生した偽像といえる。

④ ケース II では、カンカキ層の形状が明瞭に再構成されるとともに、D 孔において油徴が認められた深度 198m 付近に、低速度部が検出された。この低速度部の深度および速度値は、サスペンション PS 検層によって求められた値ともよく一致する。この

ことは、数値実験で予測されたように、カンカキ層内の速度変化 (低速度帯) がとらえられたことを示しており、実験計画において採用したボーリング孔間隔や起振点および受振点間隔が妥当であったものと考えられる。

### 3 高い速度の層中に低速度の薄層がある場合の数値実験について

以上の数値実験および実験サイトでの検証実験を通して、サイスミックトモグラフィーを速度コントラストの

大きい地盤に適用する際の、いくつかの留意点を明らかにした。2章においては、実験サイトにみられた高速度薄層を対象とした問題を扱ったが、土木分野においては、その逆の場合、すなわち低速度層の検出を目的とした調査が多い。そこで、今回の実験から得られた知見をもとに、速度コントラストの大きい低速度薄層の再構成について、数値実験による検討を行った。

使用したモデルの速度構造は、図-17に示すように、

速度値5.0km/secのバックグラウンド中に、層厚7m、速度値2.0km/secの低速度層が水平に分布すると想定した。解析の対象とした深度範囲は、この低速度層を中心とした約100mとし、ボーリング孔間隔は、70mおよび50mの2ケースとし、また、起振点および受振点間隔はすべて4mとした。したがって、起振点および受振点の配置は、高速度の薄い層がある場合の数値実験のときと同じである。

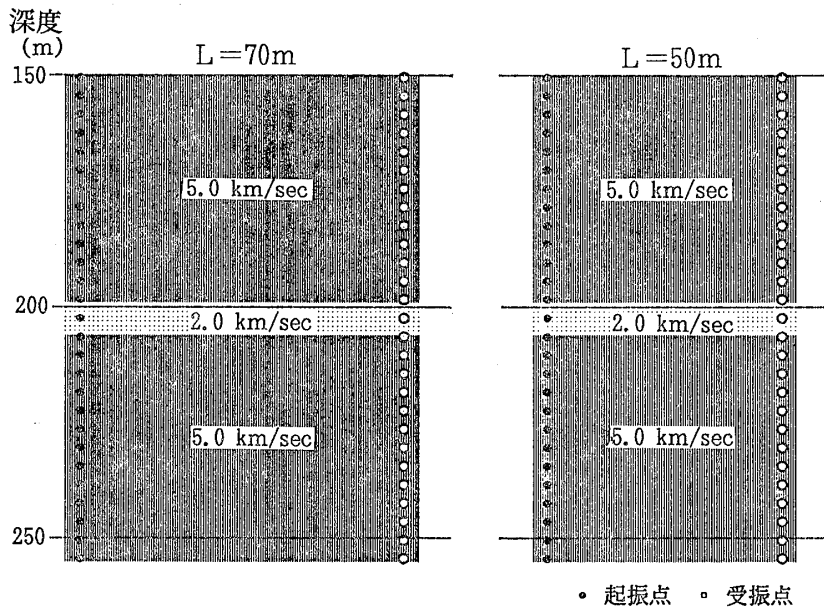


図-17 低速度薄層を想定した数値実験の速度構造モデルと起振点および受振点の配置  
 Fig.17 The velocity structure models and source receiver geometries used in the numerical experiments for the presence of a low velocity thin layer

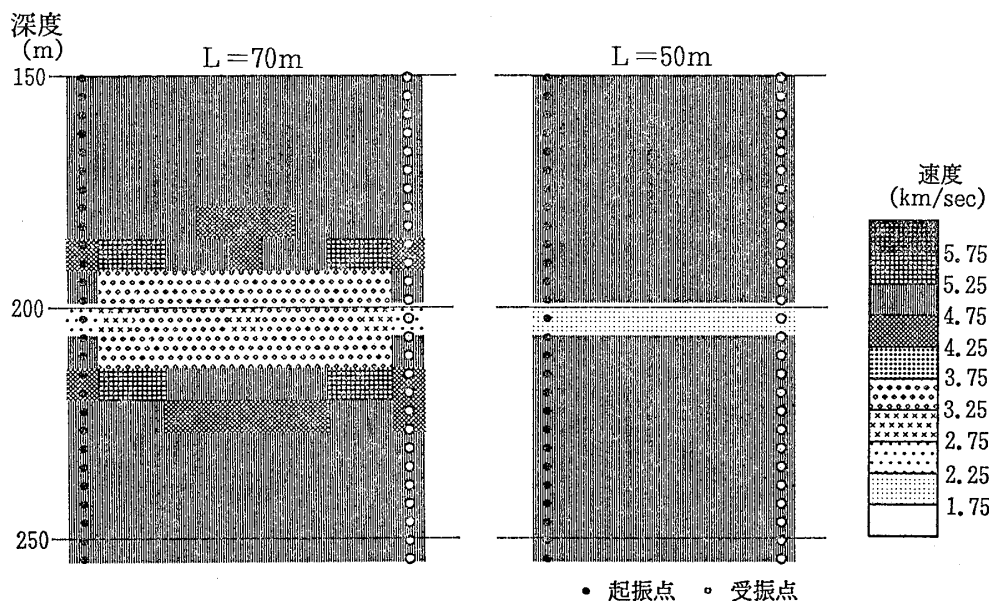
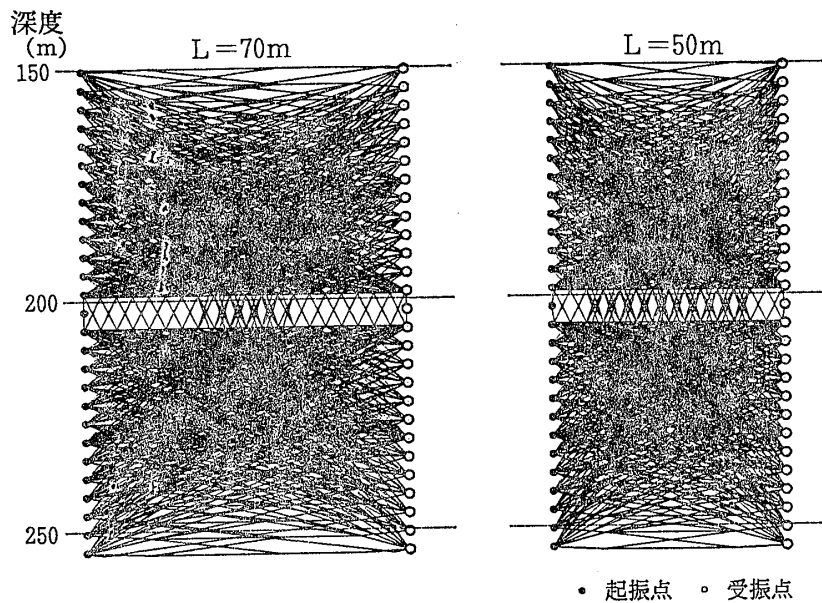


図-18 低速度薄層を想定した数値実験の再構成結果  
 Fig.18 Reconstructed tomograms of the numerical experiments for the presence of a low velocity thin layer



図一19 低速度薄層を想定した数値実験の速度構造モデルに対して計算された波線経路  
 Fig.19 Calculated first arrival ray paths for the velocity structure models used  
 in the numerical experiments for the presence of a low velocity thin layer

再構成結果を図一18に示す。まず、ボーリング孔間隔70mの再構成結果を見ると、モデルとして層厚7mの低速度層を想定したにもかかわらず、21mの厚さ（解析の際のセル3列分）にわたって低速度層が分布しており、また、その速度値も、モデルにおける設定値2.0km/secに対して3.0 km/sec以上の値を示すなど、モデルとは大きく異なる結果となっている。これに対して、ボーリング孔間隔50mの場合は、非常に良好な再構成結果が得られている。このように、低速度薄層が存在する場合でも、適切なボーリング孔間隔と起振点および受振点間隔を設定することによって、良好な再構成結果が得られることがわかった。

ところで、先に述べた高速度薄層が存在する場合の数値実験において、起振点および受振点間隔をすべて4mとした場合には、図一3に示したように、ボーリング孔間隔が50mの場合には、高速度層中の速度値にばらつきがあった。これに対して、低速度薄層が存在する場合は、ボーリング孔間隔が50mの場合に限っていえば、速度コントラストがより大きいにもかかわらず、良好な再構成結果が得られている。

この原因の1つは、図一19に示すように、低速度薄層内の波線分布の密度は、高速度の部分に比べて粗になっているけれども、高速度薄層が存在する場合に見られるような大きな空白域はなく（図一4参照）、波線が均等に分布していることから、やはり、波線分布の密度の違いにあると考えられる。

しかしながら、図一19に示されているボーリング孔間隔70mの場合とボーリング孔間隔50mの場合の波線分布を比較するとき、両者の再構成結果における質的相違を単純に波線分布の違いだけで説明するには難がある。この原因は、ボーリング孔間隔や起振点および受振点の配置などの条件と、速度層の層厚や速度コントラストなどの相対的な関係にあるものと想像するが、具体的には、今後、多くの数値実験や現場実験を通して、確認していかなければならない課題と考える。

#### 4 あとがき

ここでは、一般に、サイスミックトモグラフィーにおいて、再構成が難しいと考えられている速度コントラストの大きい地盤を対象とし、その問題点や解決策を測定計画の観点から議論した。実験サイトでクロスホールトモグラフィーを実施するにあたり、まず、数値実験によって孔間距離や起振点および受振点の配置を検討した上で測定計画を立て、現場測定を実施し、実際のデータの解析を行った。その結果、数値実験によって検討した事項を、現場実験によって検証することができた。その結果として、トモグラフィー調査を成功に導く鍵は、測定計画にあることがわかった。

さらに、ここで得た知見を土木分野の物理探査に有効に利用するために、バックホーン実験サイトの場合とは逆に、岩盤中の断層あるいは破碎帯のように、低速度薄

層が存在する場合の数値実験も試みた。その結果、高速層が存在する場合と比べて、波線分布がより均一になるため、良好な再構成結果が得られるという面と、ボーリング孔間隔を適切に設定しないと、再構成が難しくなるという面の両面を知ることができた。

今後、多くの現場経験を通して、効果的かつ経済的なサイスマックトモグラフィ調査の実現を目指していきたい。

#### 謝 辞

ここに述べた現場実験の実施にあたっては、Western Kentucky Petroleum Inc. に多大な御助力をいただいた。ここに、記して感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 大友秀夫(1986): ジオトモグラフィ技術の現況 物理探査 Vol.39 No.6, pp.58~71.
- Saito, H. (1989): Traveltimes and ray paths of first arrival seismic waves: computation method based on Huygens' principle, Exp. Abstr. 59th SEG Annual Meeting, pp.244~247.
- Saito, H., H. Shima, T. Toshioka, S. Kaino, and H. Ohtomo (1990): A case study of geotomography applied to a detailed investigation of a highway bridge foundation, Geophysical Applications for Geotechnical Investigations, ASTM STP 1101, F. Paillet and W. Saunders, Eds., pp.17~34.