



Title	10. 弾性波による八戸市の基盤探査
Author(s)	岡田, 広; OKADA, Hiroshi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 26, 147-167
Issue Date	1971-09-30
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.26.147">https://doi.org/10.14943/gbhu.26.147</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14013">https://hdl.handle.net/2115/14013</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p147-167.pdf



## 10. 弾性波による八戸市の基盤探査

岡 田 広

(北海道大学理学部一般教育)

— 昭和 46 年 4 月受理 —

### I. ま え が き

青森県八戸市は、1968年十勝沖地震による被害の大きかったところの一つである。当然のことながら、これを契機として、八戸市においても地震動の性質と地盤との関係が問題視されるようになり<sup>1)</sup>、そしてさらに、八戸市およびその周辺におけるくわしい地下構造を求めることが必要とされるにいたった。

1970年7月23日から7月28日にかけて、上記の要請にもよるが、また「構造物災害に対する地震動特性の研究」の1テーマとして、この研究グループの主なるメンバー\*の計画にもとづき、八戸地区でやや深い地層にいたる構造探査が行なわれた。ここで目標とされた探査深度は少なくとも500m以上、できれば1000m程度までであった。

今回の探査では予算の制約があったため、測線は1本しかもうけられなかった。したがってこの探査結果からただちに、地震動の性質と地盤との関係とか、被害の度合と地盤との関係とかが明確になるわけではない。

他方探査測線上の1点で、すでにSMAC型強震計による地震観測がなされていた<sup>2),3)</sup>、またこの地震で、十勝沖地震の余震観測や常時微動の測定がなされている<sup>4)</sup>。したがって今後これらの観測・測定結果と地下構造との定量的な考察を行なうことによって、構造探査のなされなかった他の地域においても種々の問題点が考察されることになるろう。

今回得られた地下構造とその点の地震動の性質との関係についてのくわしい考察は、後日にゆずることとし、ここでは主として地下構造の解析について述べることにする。

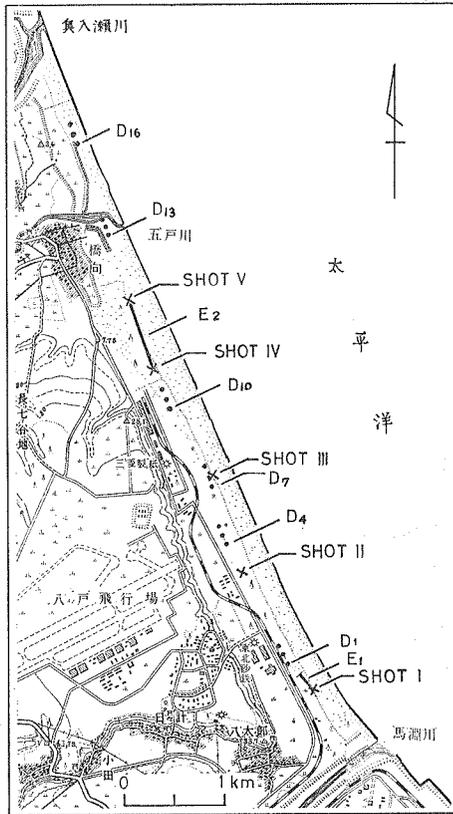
### II. 測線と観測について

#### 1. 測線位置

測線の展開場所は、青森県八戸市の北部・大字河原木にある工業専用地区から工業地域に

\* 実験の立案と実施段階までの計画には、主として次のものがあつた。大沢 胖 (東大震研)、酒井良男 (北大工)、小林啓美 (東工大)、嶋 悦三 (東大震研)、金井 清 (日大工)、田治米鏡二 (北大理)。

- 1) 田中貞二、長田甲斐男；八戸市内の各種地盤上における十勝沖地震の余震および常時微動の観測結果、震研彙報, 46 (1968), 1461-1478.
- 2) 土田 肇、山田通一郎、倉田栄一；港湾地域強震観測点資料 (その1)、港湾技研資料, No. 34 (1967), 59.
- 3) 土田 肇、倉田栄一、須藤克子；1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録、港湾技研資料, No. 80 (1969).
- 4) 田中、長田；前出1)。



第1図 測線の展開場所、爆発孔の位置および地震計設置点。●印はデータレコーダーで記録された地震計の設置点、—印は探鉱器の展開位置、×印は爆発孔の位置。

Fig. 1. Shot and observation points. Solid circle denotes observation point from which signals are recorded with magnetic tape recorder, thick line denotes a series of observation points from which signals are recorded with seismic prospecting instrument, and cross mark denotes shot point.

なお測線全体における各観測班の配置については、地形による条件、建造物による条件、震源による条件などに制約され、必ずしも満足すべき配置とはならなかった。

観測に使用した計器類は今回の実験参加者氏名と共に第1表にあげてある。各爆発点から測った観測点までの距離は第2表に示すとおりである。

### 3. 刻時について

刻時については、観測班全部を1本のlineで結ぶことができなかったため、各班個々にJJY受信機や携帯ラジオを用いて、JJY信号を記録することにした。

わたるところ、すなわち高館段丘の東縁部と海岸線との間で、かつ馬淵川から奥入瀬川付近にいたるところである。

この測線は長さが約6 kmで、海岸線とほぼ平行して南東から北西の方向に、かつ海岸線から約200 m入ったところにある。第1図に測線の展開場所および爆発孔や地震計の位置を示した。

### 2. 爆発点と観測点の位置

測線にもうけられた爆発点は全部で5点、観測点はデータレコーダーによるものと地震探鉱器によるものとを合わせて64点である。第1図に示すように、爆発点には測線の南側から順に shot I, shot II, ..., shot V なる記号を付し、観測点には同じく測線の南側から、データレコーダーについては各地震計毎に D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, ..., D<sub>18</sub> なる記号を付し、また地震探鉱器については編成班毎に E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> なる記号を付した。観測の時は、これらがデータレコーダーの場合3成分で1つの観測班が構成され、地震探鉱器の場合20ないし24成分で1つの観測班が構成された。地震計の配置は、データレコーダー班では3成分を約100 m間隔に、地震探鉱器班では5 mないし30 m間隔とした。各班ともこれら地震計の設置の際は、このような間隔をもとにして、各地震計ができるだけ shot I と shot V とを結ぶ直線上に並ぶように心がけた。

第1表 使用計器および実験参加者

Table 1. Recording instruments and participants.

観測点	地震計	記録方式	観測者
E <sub>1</sub>	28 V 4.5 V	三栄オシログラフ	角田智彦, 金子勝二 (大林組) 嶋悦三, 工藤一嘉, 野口静雄 (東大震研)
D <sub>1</sub> ~D <sub>3</sub>	4.5 V	データレコーダー SONY FMA-23S MA 33-4S	柳沢馬住 (東大震研)
D <sub>4</sub> ~D <sub>6</sub>	4.5 V	データレコーダー TEAC R-1761L	田中貞二 (東大震研), 小牧昭三 (埼玉大理工) 音田 功 (群馬大工)
D <sub>7</sub> ~D <sub>9</sub>	4.5 V	データレコーダー SONY PFM-15	小林啓美, 鏡味洋史 (東工大)
D <sub>10</sub> ~D <sub>12</sub>	1 V	データレコーダー SONY DFM-45	長能正武, 川守秀樹 (北大工)
E <sub>2</sub>	7.5 V 20 V	オシログラフ E. T. L	岡田 広, 前川 博, 殿内啓司 (北大理)
D <sub>13</sub> ~D <sub>15</sub>	1 V 4 V	データレコーダー SONY (改良)	五十嵐 亨 (北大理)
D <sub>16</sub> ~D <sub>18</sub>	1 V 4 V	”	森谷武男 (北大理)
爆発	田治米鏡二 (北大理), 本山満雄 (旭川工専), 中島 徹 (北大理)		
測量	小林啓美 (東工大)		
本部	大沢胖 (東大震研), 酒井良男 (北大工), 金井清, 田治見宏 (日大工), 嶋悦三 (東大震研)		

第2表 爆発孔と観測点との間の距離, 単位は m  
(測線の南から北へ向けて+とした)

Table 2. Distance of observation points from shot point.

shot	I	II	III	IV	V	
E <sub>1</sub>	S	0	-1364	-2305	-3486	-4208
	N	223	-1158	-2105	-3285	-4005
D <sub>1</sub>	361	-1042	-1995	-3173	-3895	
D <sub>2</sub>	461	-933	-1887	-3063	-3787	
D <sub>3</sub>	571	-817	-1774	-2947	-3672	
D <sub>4</sub>	1577	217	-761	-1923	-2648	
D <sub>5</sub>	1677	316	-663	-1824	-2547	
D <sub>6</sub>	1776	415	-573	-1725	-2447	
D <sub>7</sub>	2211	866	-91	-1276	-1995	
D <sub>8</sub>	2302	955	-17	-1190	-1909	
D <sub>9</sub>	2437	1093	137	-1052	-1770	
D <sub>10</sub>	2980	1624	685	-509	-1233	
D <sub>11</sub>	3080	1726	786	-408	-1130	
D <sub>12</sub>	3181	1827	886	-307	-1030	
E <sub>2</sub>	S	3484	2124	1180	-5.5	-729
	N	4207	2853	1907	726	0
D <sub>13</sub>	4995	3641	2691	1510	787	
D <sub>14</sub>	5094	3472	2793	1611	889	
D <sub>15</sub>	5196	3843	2894	1712	992	
D <sub>16</sub>	5807	4455	3504	2327	1605	
D <sub>17</sub>	5906	4555	3604	2428	1705	
D <sub>18</sub>	6006	4659	3706	2530	1809	

今回の実験期間中、JJY の受信状況は必ずしも良好ではなく、結局観測班全部にわたって刻時が正確に対応つけられるものは稀であった。しかしそのうち shot I と shot V の2つの場合は、解析に必要な条件は満足されていた。

#### 4. 爆発点資料

爆発時刻は、原則として爆発点と最寄の観測班とを line で結び、オンログラフないしテープレコーダーに記録させた。shot III の場合は爆発点で独立にビシグラフを用意し、これに記録させた。

爆発時刻は人工的雑振動の少ない真夜中に選んだ。各爆発の爆発時刻や爆発深度および薬量は、第3表に示してある。

第3表 爆発に関する資料 (1970年7月)

Table 3. Shot time, depth of shot, charge size, etc. (July, 1970)

爆 発 時 刻	爆 発 孔	爆発深度 (m)	薬 量 (kg)	詰 物	爆 発 状 況
25日0時04分59.927秒	II	12 ~ 14	6	砂	吹出し無し
25 2 04 59.997	III	17 ~ 22	12	水	ケーシング飛出し
25 4 05 06.020	IV	14 ~ 18	12	水	ケーシング飛出し
27 1 05 00.945	I	27 ~ 38	30	水	ケーシング飛出し
27 3 05 01.187	V	20 ~ 32	21	水	水のみ吹出し
27 3 35	V	11 ~ 14	7.5	砂	水のみ吹出し
27 4 15	IV	2.5 ~ 3	1.5	砂	砂 飛 散

既存のボーリング資料を参照すると、予定した測線では深度10mで固い砂層が存在するようなので、爆発孔を掘る際に、深度12~14mまでは孔径10cmのエスロンパイプをケーシングとして埋め、それ以深については孔径8.5cmで素掘りとした。

使用した爆薬はダイナマイト桐3号で、750gr単位に包装されたものを用いた。この単位の包みは直径が5cmで、長さが30cmである。爆薬の埋設には薬量10kgにつき約1.5時間を要した。

#### 5. 観 測 条 件

観測点 D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> の班は商業用の交流電源が得られず、観測には携帯用発電機を使用した。そのためにこれによる雑振動が絶えず、かんじんの観測時にあまり gain を上げることができない状態であった。したがってこれら3観測点では、いずれの爆発についても初動は記録されず、later phase のうち振幅の大きいものだけが記録される結果になった。

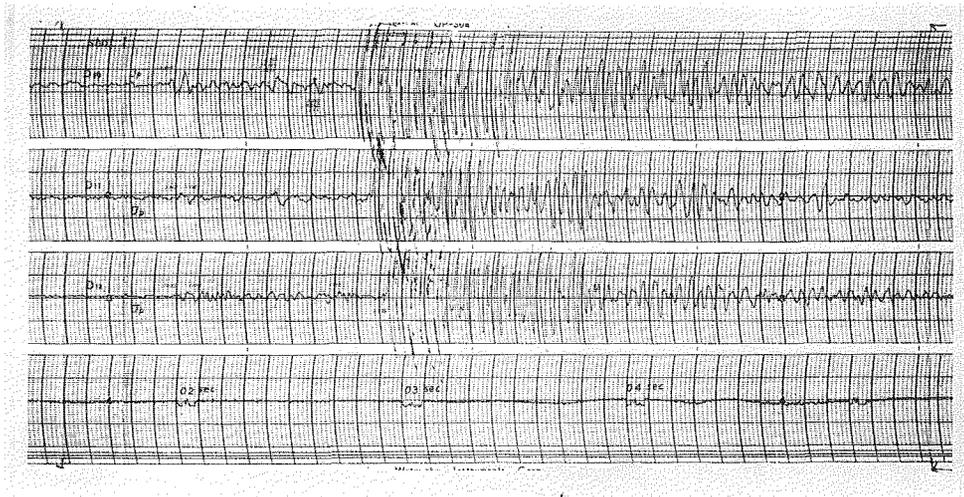
他方観測点 D<sub>13</sub> から D<sub>18</sub> にかけては、間歇的ではあるが海岸の波による雑振動が割合大きく、観測への支障が若干あった。ここでは雑振動と signal の到着が丁度重なり合った時もある。

## III. 記録について

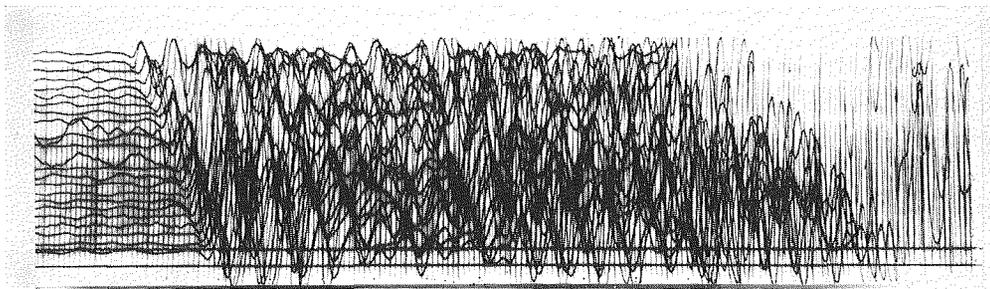
得られた記録の例を第2図に示しておく。これらの記録をはじめ、全体として記録上特に目立った点をあげると、次のとおりである。

(1) いずれの爆発の場合も、ある程度観測点が離れると、初動、2~3個の later phase, そして直接波とそれぞれ互いに分離よく記録されている。

(2) 初動と2~3個の later phase は 割合小さい振幅であるが、いずれもほぼ同じ位の大きさである。それに比べて、直接波の振幅は非常に大きく、かつ減衰が小さい。



(a)



(b)

第2図 shot I のときの記録例

- (a) データーレコーダによる記録、爆発孔からの距離： $\Delta=3.0\sim 3.2$  km  
 (b) 地震探鉱器 (E.T.L.) による記録： $\Delta=3.5\sim 4.2$  km

Fig. 2. Example of seismograms for shot I.

- (a) Seismogram obtained with magnetic tape recorder.  
 (b) Seismogram obtained with seismic prospecting instrument.

(3) 表面波はほとんど記録されていない。

なお解析の便宜上、種々のデータレコーダーによってとられた種々のテープスピードの記録を、全て一旦 SONY FMA-23S, MA-33-4S で編集し、新たにこの編集テープから解析用の記録を紙送り 10 cm/sec で再生した。

#### IV. 観測点 $E_2$ 付近の構造

第1図からわかるように、観測点  $E_2$  は地震計展開位置の両端がそれぞれ shot IV と shot V である。したがってこの両端爆発による走時から、観測点  $E_2$  の下のだいたいの構造は求められる。

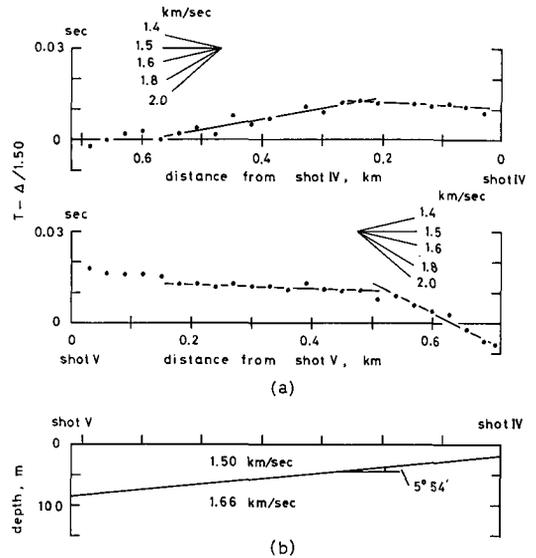
shot IV および shot V のときに得られた観測点  $E_2$  の走時プロットは第3図(a)のとおりである。ただしこの図には解析の便宜上、速度 1.5 km/sec で reduce した走時をあげた。

shot IV の爆発のとき、発火機の一部故障のために、爆発の瞬間にガルバー側に異常電流が流れ、初動部分の波形がいくらか乱れた。第3図(a)の shot IV のときの走時にややバラつきが多いのは、そのためかと思われる。

第3図(a)の走時図から、shot IV の場合見掛速度 1.48 km/sec と 1.59 km/sec が得られ、shot V の場合見掛速度 1.52 km/sec と 1.75 km/sec が得られた。したがってこの走時図からは観測点の下に少なくとも2つの層の存在が推定される。なお shot

IV と shot V のいずれの場合も走時曲線が原点を通らないのは、爆発点が地表下にあることによるものと思われる。たとえば、仮りに速度 1.5 km/sec の最表層内に爆発点があったとすれば、走時  $T_0$  の示す intercept time は妥当な値となる。

いま2層構造を仮定してこれらの走時図から構造を求めてみると、結果は第3図(b)に示すようになる。すなわち、最表層の速度は 1.50 km/sec、第1層の速度は 1.66 km/sec である。なおこれら2つの層の境界の深さは shot IV のところで約 20 m、shot V のところで約 90 m で、この面の傾きは  $5^{\circ}54'$  で南上がりである。これは後に示すようにより深いところの境界面がもつ傾き方と同じである。



第3図 (a) shot IV および shot V のときの  $E_2$  における走時図。ただし走時は速度 1.5 km/sec で reduce してある。

(b) 観測点  $E_2$  のところの構造

Fig. 3. Reduced travel time curves for shot IV and shot V at the spread  $E_2$  (a), and the structure derived (b).

## V. 測線全体の構造解析

解析には III. に述べる方法で再生した記録と観測点  $E_1$ ,  $E_2$  の原記録を用いた。なお再生の際、種々のフィルターをとおしながら特に目立つ phase の波形を二、三検討した。そしてそのうちのいくつかは読取りの補助として用いた。

今回の実験における全記録を再生してみたところ、JJY をも含めて解析に使用しうる条件をほとんどの観測点が満足しているのは、shot I, shot II および shot V の3つの場合であった。このうち shot I と shot V の場合の記録を用いて構造を求めた。そして shot II の場合の記録は解析時の補助として用いた。まず走時の読取りを容易にするために、shot I と shot V の場合のデータレコーダーによる記録について、走時図に相当する記録図を作った。それが第4図(a)と第4図(b)である。なお第4図(a)には、 $E_2$  での記録のうちからいくつかを選び出し、それらを他の記録と時間軸が等しくなるように複製し、合わせてそれものせておいた。

このように記録図を作って見直してみると、初動をはじめいくつかの later phase の対応のよさがよくわかる。それらの phase の走時は図に見られるようにはほぼ直線的である。そこで特に多くの観測点にわたって対応のよいものに、見掛速度の小さい方から順に  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  なる記号を付した。

記録をよく見ると、 $T_1$  の波は振幅が非常に大きくかつ立上がり鋭いこと、また high frequency の成分が卓越していることがわかる。記録紙で測ったこの波の立上がり付近の周期は約  $2.6 \times 10^{-2}$  sec である。一方、初動やその後の 2, 3 の later phase は振幅は小さく、見掛周期は  $T_1$  のものより長く、約  $5.0 \sim 6.0 \times 10^{-2}$  sec である。

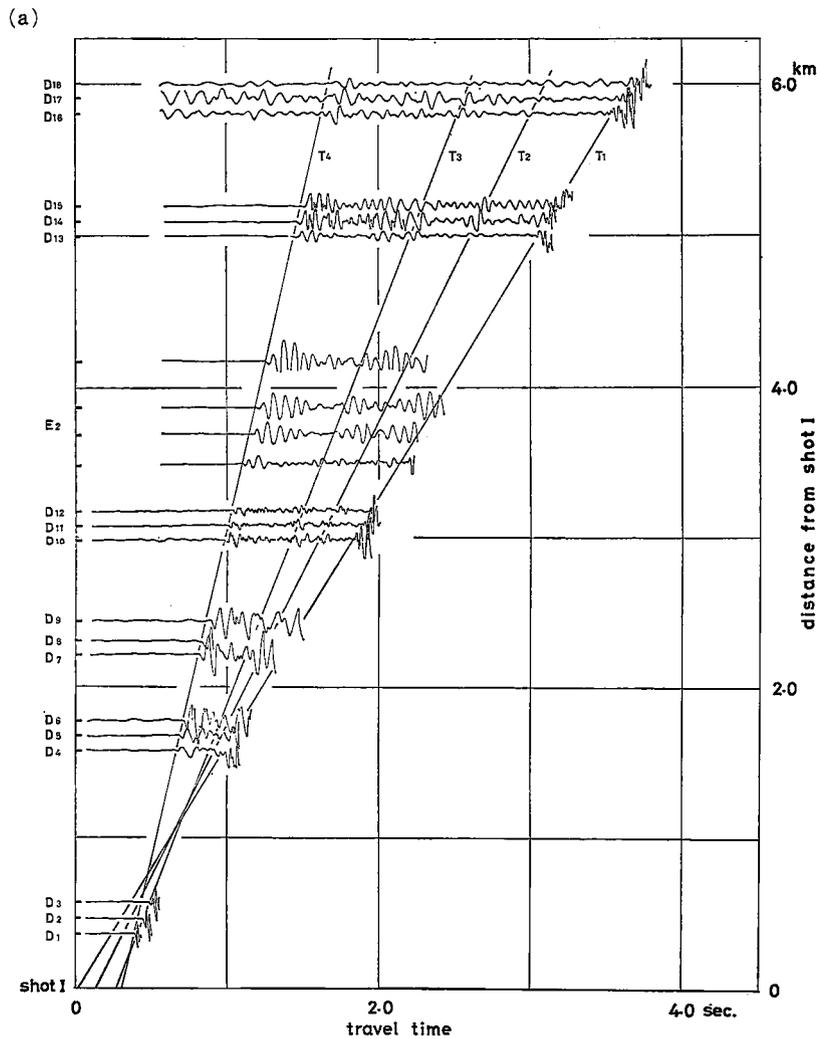
波形や振幅を考慮してこれらの phase の対応のよさに優劣をつけると、よい方から順に  $T_1$ ,  $T_4$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , となる。

一般に later phase の読取りには、立上がりまたは到着時の不明確さや、観測条件（観測計器、地震計設置状況の違い）からくる波形の多様性の問題が生じる。今回、再生時にフィルターの使用によってこのような問題点の検討を行なってみたが、原記録に勝る質的向上はあまり見られなかった。そこで解析では、波形の優劣もあるので、一応3種類の構造モデルを考えてみた。

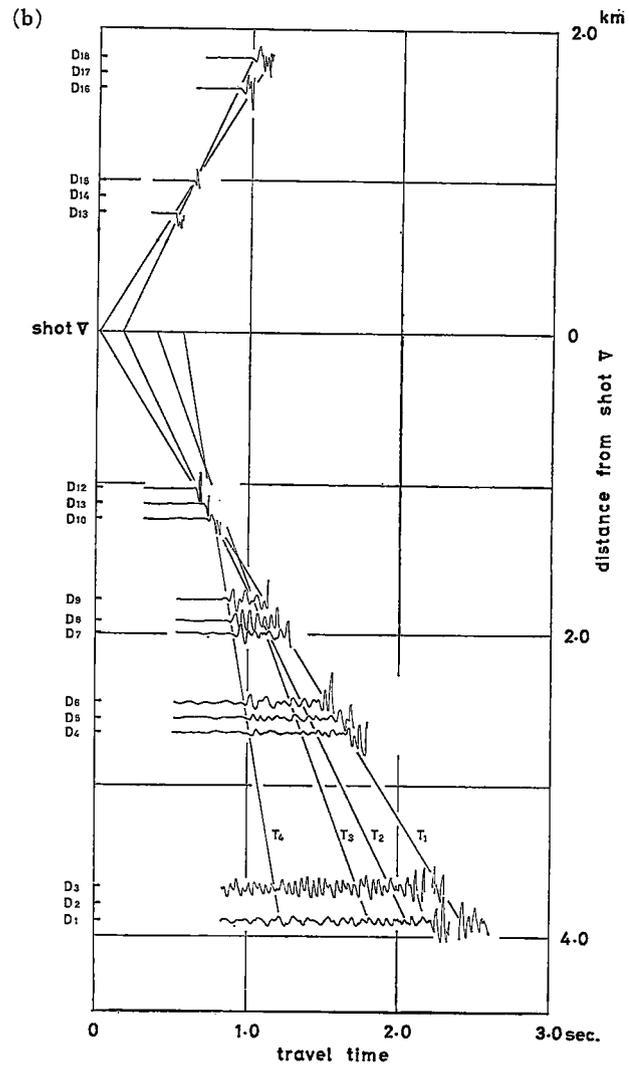
### 1. 走時図

第4図に示した記録図を参照しながら、対応のよい4つの phase についての走時を読みとった。なお later phase の読取りでは、対応のついた later phase の最初の山または谷となる部分が初めてゼロ線を切るところをその波の到着時と定めた。得られた走時図は第5図のとおりである。図には shot I の時の走時は○印、shot V の時の走時は●印で示してある。

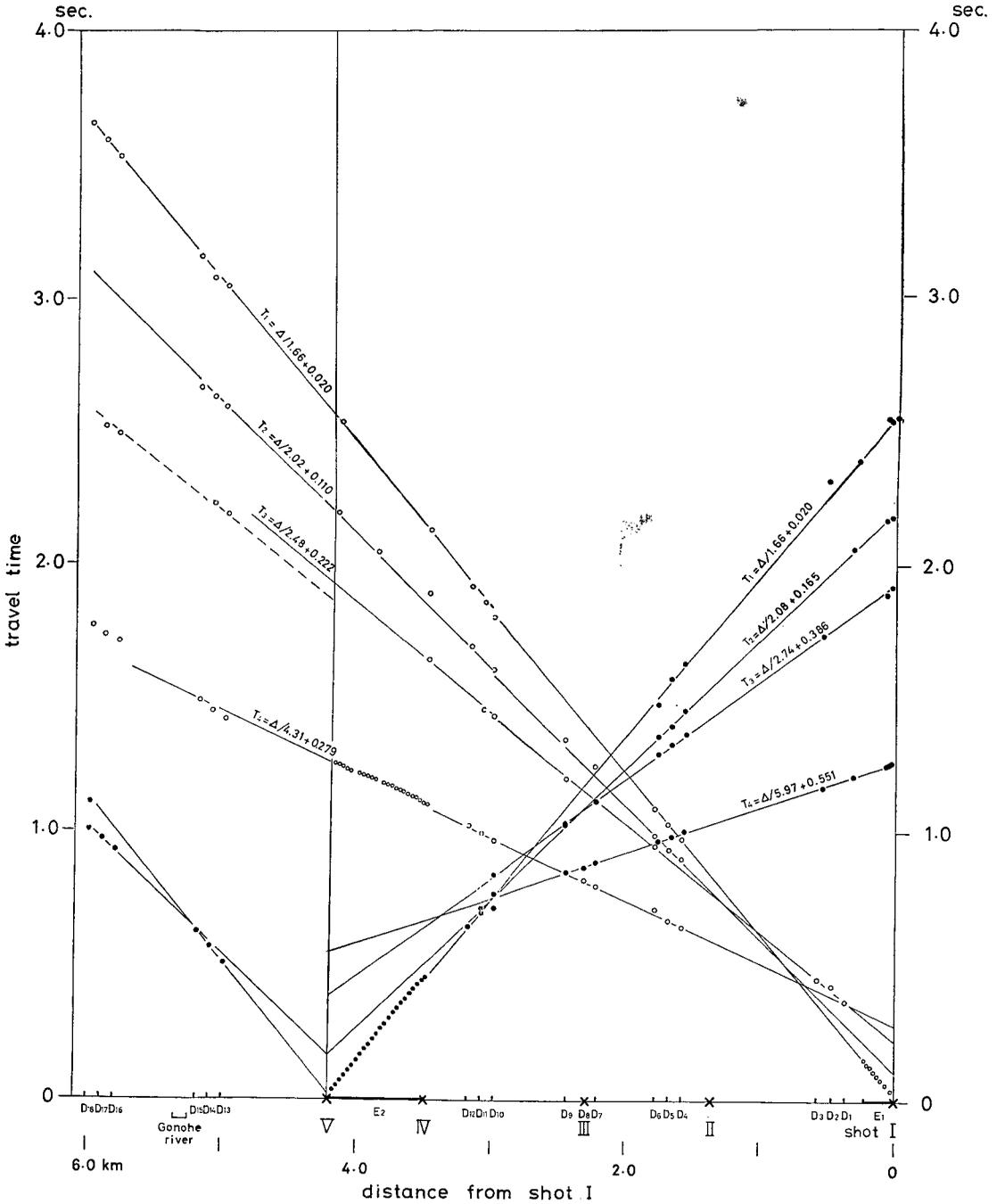
shot I の時、 $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  では、 $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_4$  の phase が観測されなかった。これは観測時に gain を下げすぎたためと思われる。また観測点  $D_{13} \sim D_{18}$  の記録には、走時  $T_3$  にわずかなだて、やや長周期の波が混入している。したがってこれらの観測点における走時  $T_3$  の



第4図 (a) shot I の場合の各観測点における記録  
Fig. 4. (a) Paste-up of seismograms for shot I.



(b) shot V の場合の各観測点における記録  
(b) Paste-up of seismograms for shot V.



第5図 shot I と shot V のときの走時図

○印は shot I の場合、●印は shot V の場合である。

Fig. 5. Travel time curves for shot I and shot V.

読取値はあまり精度のよいものではない。走時図に鎖線を入れたところが丁度それにあっている。しかしまたまこの鎖線が一応  $T_3$  の走時曲線と平行になっているので、 $T_3$  の走時に関係する層が、観測点  $D_{13}$  から観測点  $D_{18}$  にかけて階段状に浅くなっているという考え方も成り立つ。それを確かめるためには逆測線の走時が必要であるが、今回の実験ではそれは得られていない。そこで shot II の場合の観測点  $D_{13} \sim D_{18}$  の  $T_3$  の走時でこれを検討してみた。ところがこの場合には  $T_3$  の走時にくいちはなく、これらは他の観測点にもとづく  $T_3$  の走時曲線の延長上によくのっていることがわかった。したがって今回の解析では、この走時のくいちはたまたま雑振動の混入によるものとみなし、特に考慮にはいれないことにした。

その他各 phase の走時は図に見られるようによい直線性を示している。したがってこれら各走時を爆発点からの距離の一次式で近似することにした。第 5 図の走時図から得られた shot I と shot V の時の走時式、それから同様にして走時図から得られた shot II のときの shot II と shot V との間について求めた走時式は次のとおりである。

shot I の場合、

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 4/1.66 + 0.020 \\ T_2 &= 4/2.02 + 0.110 \\ T_3 &= 4/2.48 + 0.222 \\ T_4 &= 4/4.31 + 0.279 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

shot II の場合、

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 4/1.67 + 0.020 \\ T_2 &= 4/2.02 + 0.120 \\ T_3 &= 4/2.46 + 0.253 \\ T_4 &= 4/4.30 + 0.353 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

shot V の場合、

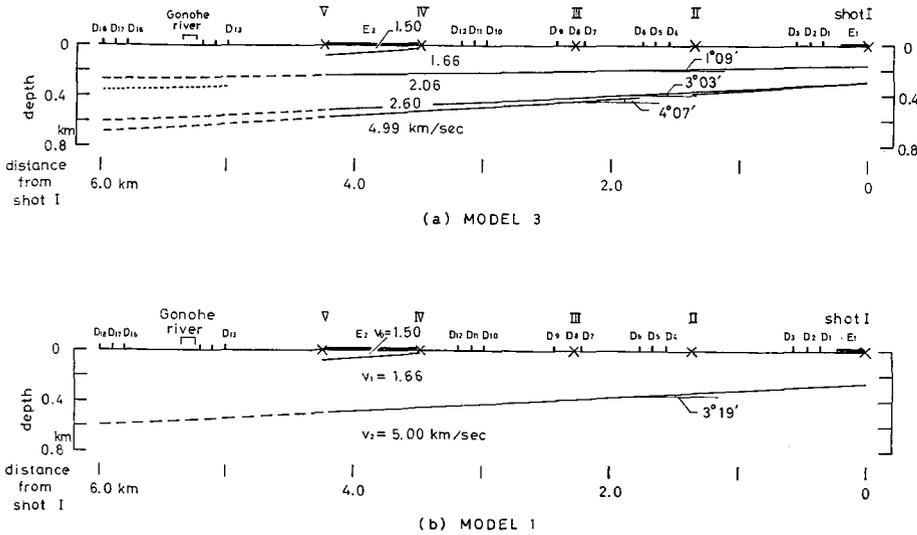
$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 4/1.66 + 0.020 \\ T_2 &= 4/2.08 + 0.165 \\ T_3 &= 4/2.74 + 0.386 \\ T_4 &= 4/5.97 + 0.551 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## 2. 構造のモデル

上に得られた走時から、波形の優劣を考慮して種々の later phase を適当に採用した場合の構造モデルをいくつか求めてみた。

### 1) 4層構造モデル (MODEL 3)

初めに走時  $T_1, T_2, T_3, T_4$  を使った場合の構造を求める。ところで走時式 (1), (2), (3) のいずれの場合も、走時  $T_1$  の intercept time が 0.02 sec ある。この intercept time は極く表



第6図 (a) 4層を仮定して求めた構造  
(b) 2層を仮定して求めた構造

Fig. 6. (a) Structure assuming four-layered model to apply.  
(b) Structure assuming two-layered model to apply.

面付近の層と爆発深度とに関係すると思われるが、今回の解析ではこれを無視することにする。そのことによる各層までの深さの計算値に与える影響は、最も大きい場合で約 20 m 浅い見積りとなる。

走時式(1)と(3)より求められた構造 (MODEL 3) は第6図(a)のようになる。各層の速度は次のとおりである。

- 第1層： 1.66 km/sec
- 第2層： 2.06 km/sec
- 第3層： 2.60 km/sec
- 第4層： 4.99 km/sec

第4層までの深さは、shot I 付近で約 280 m, shot V 付近で約 570 m である。地表面を基準としてこれより傾きを求めると、結果は約 4° で南側へ向って浅くなる。また各層は第6図(a)で見られるように、南へ行くにしたがって薄くなる。たとえば shot I 付近では第3層の厚さは数 m に減じてしまう。この第3層は観測点 E<sub>2</sub> の下での厚さが約 50~60 m である。shot V より北側の構造は、逆走時がないので正確には求められないが、南側からの構造がそのままの傾向で観測点 D<sub>18</sub> まで続くものと仮定したときの構造は、図の点線で示したようになる。

一方 shot II と shot V との場合の走時式(2)と(3)から同様にして構造を求めると、結果は第6図(a)の shot II と shot V との間の構造に一致する。

以上4層構造を仮定して求めたものを MODEL 3 とする。

## 2) 3層ないし2層構造のモデル (MODEL 2, MODEL 1)

すでに述べたように later phase については少なからず問題点がある。そこで波形の質と対応のよさとかを考慮しながら、適当な later phase を選び出して、これらによる3層構造ないし2層構造を求めてみる。

走時式(1)と(3)の走時  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_4$  を用いて3層構造を求めると、各層の速度は、

第1層: 1.66 km/sec

第2層: 2.60 km/sec

第3層: 5.00 km/sec

となり、第3層までの深さは shot I 付近で約 250 m, shot V 付近で約 510 m となる。この第3層上面の傾きは約  $5^\circ$  で南上がりである。この3層構造を仮定し求めたものを MODEL 2 とする。

次に記録上最も明瞭だった phase の走時  $T_1$  と、遠方で初動として観測された phase の走時  $T_4$  とを用いて2層構造を求めると、各層の速度は、

第1層; 1.66 km/sec

第2層: 5.00 km/sec

となり、速度 5.00 km/sec 層までの深さは shot I 付近で約 250 m, shot V 付近で約 490 m となる。この層の上面の傾きは約  $3^\circ 20'$  で南上がりである。得られた構造を第6図(b)に示しておく。この構造を MODEL 1 とする。

以上求めた3種類の構造をまとめると第4表のようになる。

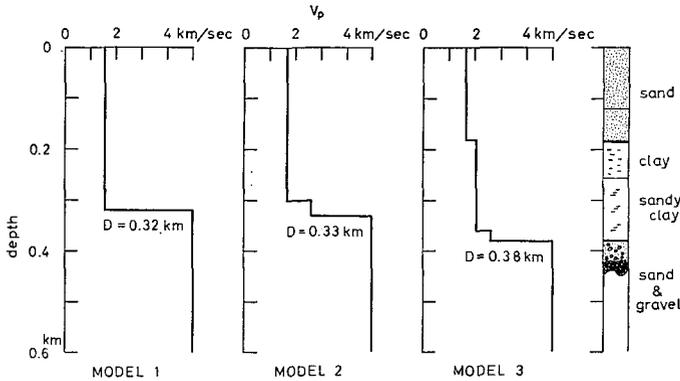
第4表 各種構造モデルのまとめ

Table 4. Summary of models of the structure derived.

モデル	層	速 度 (km/sec)	層の厚さ (km)		深 さ (km)		地表面に 対する傾斜			
			shot I	shot V	shot I	shot V				
1	1	1.66	0.25	0.49	0.25	0.49	$3^\circ 19'$			
	2	5.00								
2	1	1.66	0.24	0.42	0.24	0.42	$1^\circ 11'$			
	2	2.60	0.01	0.09						
	3	5.00						0.25	0.51	$4^\circ 53'$
3	1	1.66	0.16	0.23	0.16	0.23	$1^\circ 09'$			
	2	2.06	0.13	0.28						
	3	2.60	$\approx 0$	0.05				0.28	0.52	$3^\circ 03'$
	4	4.99							0.57	$4^\circ 07'$

### 3. 構造とボーリング資料との対比

測線の shot II 付近には港湾技術研究所が設置した SMAC 型強震計があり<sup>5)</sup>、これによって記録された 1968 年十勝沖地震およびその余震のスペクトルがすでに発表されている<sup>6)</sup>。それが今回求められた構造によってどの程度説明し得るかは興味ある問題の 1 つである。しかしこの点に関する考察は別の機会にゆずることとし、そのときの参考のために強震計が置かれている付近の構造、すなわちその速度分布図を第 7 図に示しておく。図中の D の値は最下層までの深さを意味する。



第 7 図 shot II 付近について求められた各構造モデルと shot II より約 700 m 南方におけるボーリング柱状図

Fig. 7. Model of the structure derived near shot point II and columnar section at 700 m southward from shot point II.

この図の右端に、港湾 SMAC 地点より約 700 m 南方の八戸温泉で掘られたボーリングの柱状図<sup>7)</sup>をあげてみた。このボーリング地点に最も近いところは観測点 D<sub>3</sub> や D<sub>4</sub> であるが、この付近では観測点間隔が非常に大きく、求められた構造が最も不正確なところと考えられる。そのために第 7 図には特にボーリング地点に相当するところの構造を選ばずに、比較的信頼のおけるところで、かつ最もボーリング地点に近いところの構造を図に示した。すなわちそれは SMAC 地点の構造である。したがって第 7 図における速度分布図とボーリング柱状図との対比は定量的には行なえないが、定性的な対比は可能かと思われる。

第 7 図における 3 種類のモデルを互いに比較してみると、次のような特徴がある。

i) MODEL 1 の速度分布と MODEL 2 の速度分布とはあまり違いはない。MODEL 2 では中間に速度 2.60 km/sec の層をはさんだために、その分だけ最下層が MODEL 1 の場合よりは深くなっている。しかしその違いはわずか 10 m 位である。

ii) MODEL 3 では最下層までの深さが 380 m で MODEL 2 の場合より約 50 m 深くな

5) 土田, 山田, 倉田; 前出 2).

6) 土田, 倉田, 須藤; 前出 3).

7) 経済企画庁; 土地分類基本調査「八戸」の内表層地質図 (5 万分の 1), 経済企画庁, 1965.

る。これらの構造モデルとボーリング柱状図とを対比してみても、図からわかるように、いずれも層の間に一対一の対応はない。ところで、ボーリング柱状図にはかなり細かい地層区分が示されているので、これをもう少し大まかな区分にしてみると、上から順に、主として sand から構成されている第1層、主として clay から構成されている第2層、それから sand and gravel から構成されている第3層という区分が可能かと思われる。ボーリング柱状図にある太線がこの区分のときの境界である。このようにしてボーリング柱状図と構造モデルとを対比しなおしてみると、境界の深さについては問題が残るが、MODEL 3 の速度分布がボーリングによる層の構成とよく対応しているように見える。すなわち、

sand の層： 1.66 km/sec

clay の層： 2.06 km/sec

sand and gravel の層： 5.00 km/sec

という対応が見つく。ところでこの場合、sand and gravel の層が 5 km/sec という異常に高い速度値をもつことがあり得るだろうかという疑問が生じる。しかし今回の実験だけからはこの疑問に答えることはできない。今後の地震探査とボーリング資料との蓄積を待たねばならないだろう。

以上が今回の実験の結果得られた構造である。実は、この地震探査の実施前、既存のボーリング資料を参照していた限りでは、速度 5 km/sec の層が、今回得られたように 500 m という浅いところに存在することは予想できなかった。すなわち八戸市の基盤と思われる層は、速度が 3~4 km/sec で、深さは少なくとも 1 km 以上はあるだろうと想像していた。しかしこの予想も特別根拠あつてのことではないから、今回の結果を予想外のことと行って、特に疑問視するにはあたらないだろう。

他方地質調査の資料<sup>8)</sup>によれば、この八戸市付近は、中生代の火山活動が活発だった時期に、古生代からこの時期にかけて生成された堆積層を火山岩類が被ってしまった、と解釈されている。しかしこの資料ではその堆積層の厚さや火山岩類の厚さについてはふれていない。今深さの量的な値を問わないとすれば、我々が求めた深さ 500 m 付近の速度 5 km/sec の層は板状に発達したその種の火山岩類層であるという解釈も成り立ちうる。しかし今の段階ではそれを確かめることはできない。

## VI. 考 察

### 1. 地質との対応

この付近の地質調査<sup>9)</sup>によれば、基盤岩類層は新井田川から南にかけて急に浅くなるもの

8) 東北大学理学部地質学古生物学教室災害調査グループ；地震に伴う自然現象と災害—青森県東北部における“1968年十勝沖地震”の実例について—, 東北大地質学古生物学研報 No. 67 (1969), 1-98.

9) 東北大学理学部地質学古生物学教室災害調査グループ；前出8).

と推定されている。鮫付近ではその深さが約 30 m ということである。この基盤岩類層が北から南へかけて次第に浅くなるという推定は、今回求められた構造が持つ特徴と一致している。

またこの付近のブーゲー異常<sup>10)</sup>は、今回の測線の北端に近い五戸川近辺では 115 mgal を示し、それより南下するにしたがって異常は直線的に大きくなり、測線の南端部では約 130 mgal に達する。すなわちブーゲー異常から想像される構造も硬いものが北から南へかけて浅くなる傾向がうかがえる。ブーゲー異常に強く寄与するものの存在は、我々の探査深度よりはもっと深いところにあるかと思われるが、とにかく北側から南下するにしたがって、種々の層が一致して浅くなる傾向がうかがえるということは興味深い。

このように各層が南上がりという傾向を予想した場合、速度 5 km/sec の層はどの辺で地表に現われることになるだろうか？ 今、これを見積ってみよう。ただしここではこの層は測線下の傾斜のまま直線的に南側へ続くものという極めて単純な仮定をもうける。その場合この層は shot I の地点から約 3.6 km 南側の点で地表へ達することになる。この概算結果を試みに地質図<sup>11)</sup>に照合してみると、速度 5 km/sec の層は、先第三系中・古生層に対応することになる。この結果より更に類推するならば、速度 2 km/sec の第 2 層は鮮新統に相当することになる。このような対応は、測線の南端から約 4 km 南側へ至る間に、構造が南側に向かって急に深くなるような変化がない限り成り立つように思われる。

ところでこのような対応は、速度 5 km/sec の層が火山岩類ではないかという V. 3. での推定とは相入れないものである。だとすれば、どちらがより妥当な推定であるかが問題になる。しかしこれについては更にくわしい探査がなければ結論は出し得ない。ただし、服部保正の調査結果<sup>12)</sup>を参照すると、V. 3. における推定よりは、ここで推定したような地層と速度との対応の方が一応妥当なように思われる。

## 2. より深部の層について

今回求められた走時図および構造にもとづいて、より下の層について若干の検討を試みた。

いま速度 5 km/sec の層の下にそれより速い速度の層を考え、その速度層の存在しうる深さの最小値を見積ってみた。簡単のために、すでに求められた構造を平行層と仮定し、速度 5 km/sec の層までの深さを 500 m、その間の層の平均速度を 1.7 km/sec とする。このとき第 3

第 5 表 推定された第 3 層の速度と第 3 層までの深さとの関係

Table 5. Possible relation between a depth to the substratum and its velocity.

第 3 層の速度 (km/sec)	5.5	5.8	6.0	6.2
第 3 層までの深さ (km)	1.1	1.3	1.4	1.4

10) 地質調査所資料による。

11) 東北大学理学部地質学古生物学教室・災害調査グループ；前出 8)。

12) 服部保正；屈折波走時曲線の解析法についての研究，地質工学，第 2 輯 (1962)，5-68。

服部保正；弾性波探査法 (弾性波伝播速度について)，地質工学，第 2 輯 (1966)，117-126。

番目の層の速度をパラメーターとして、たとえば、 $V_3=5.5, 5.8, 6.0, 6.2$  km/secなどを仮定すれば、その層までの深さは第5表に示すようになる。第3番目の層の速度が実際にどの程度であるか現在不明であるが、この計算結果から推定するところ、第3番目の層は深くても2 km未満のところ存在しそうである。

### 3. 得られた構造にもとづくレイリー波の Medium Response の試算

上に求められた地下構造と表面波との関係について、最後に若干の考察を行なってみたい。

地震動災害に大きな役割をもつ地震波は、実体波であるかあるいは表面波であるかは、議論の大きくわかれるところである。しかしいずれの波の方を重視するにせよ、地震動災害の観点からいえば、対象とする地点が地震動に対しいかなる振動特性（たとえば、スペクトルや周期頻度曲線など）を示すかが重要である。

今回は、求められた構造について、表面波のうちレイリー波の Amplitude Response Function を計算してみた。その計算は HARKRIDER の方法<sup>13)</sup>によった。なおこの Amplitude Response Function は震源に関係せず構造だけでできるところから、Medium Response Function とも呼ばれている<sup>14)</sup>。以後ここではこれを Medium Response と呼ぶことにする。この Medium Response は表面波の位相速度と群速度がわかれば求められる量である<sup>15),16)</sup>。このような量を計算することによって、我々が求めた構造が表面波のどの程度の周期範囲に大きく関係するものかわかることになる。今回はこの点について検討してみた。なおラブ波に関する Medium Response は、くわしい S 波の速度構造がわかってから計算する予定である。レイリー波の Medium Response を計算するには、P 波の速度構造だけでは不充分であって、S 波の速度構造や各層の密度も必要である。しかもこの Medium Response に関係する位相速度は、媒質内の諸定数のうち S 波の速度に最も大きく左右される<sup>17)</sup>。しかし今のところ、厳密な Medium Response と構造との関係を知るのではなく、むしろその関係の定性的な考察なので、今回の計算では、必要な S 波の速度や密度は他の資料にもとづいて推定した。すなわち第1層の S 波速度として、速度検層の調査結果（鉄道技研の報告による）にある深さ 20 m 以下の値 430 m/sec を採用し、より下部の層の S 波速度は土木物探研究会の資料<sup>18)</sup>によった。

13) D. G. HARKRIDER; Surface Waves in Multilayered Elastic Media I. Rayleigh and Love Waves from Buried Sources in a Multilayered Elastic Half-Space, *Bull. Seis. Soc. Am.* **54** (1964), 627-679.

14) D. G. HARKRIDER, and D. L. ANDERSON; Surface Wave Energy from Point Sources in Plane Layered Earth Models, *Jour. Geophys. Res.*, **71** (1966), 2967-2980.

15) D. G. HARKRIDER; 前出 13).

D. G. HARKRIDER, and D. L. ANDERSON; 前出 14).

16) D. G. HARKRIDER; Surface Waves in Multilayered Elastic Media. Part II. Higher Mode Spectra and Spectral Ratio from Point Sources in Plane Layered Earth Models, *Bull. Seis. Soc. Am.* **60** (1970), 1937-1987.

17) たとえば, J. BRUNE, and J. DORMAN; Seismic Waves and Earth Structure in the Canadian Shield, *Bull. Seis. Soc. Am.* **53** (1963), 167-210.

18) 土木物探研究会; S 波速度について, *物理探鉱*, **23** (1970), 179-182.

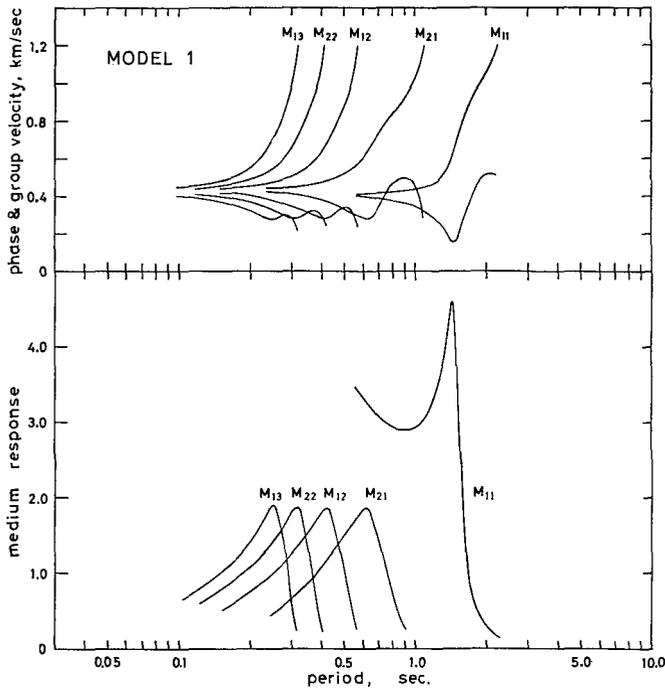
19) G. P. WOOLLARD; Crustal Structure from Gravity and Seismic Measurements, *Jour. Geophys. Res.* **64** (1959), 1521-1544.

第6表 Medium Response を計算する際に用いた各モデルの定数  
 Table 6. Constants used in a calculation of Rayleigh medium responses for each model of the structure.

モデル	層	厚さ (km)	$V_p$ (km/sec)	$V_s$ (km/sec)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	ポアソン比
1	1	0.32	1.66	0.43	1.7	0.46
	2		5.00	2.80	2.5	0.27
2	1	0.30	1.66	0.43	1.7	0.46
	2	0.03	2.60	1.10	2.1	0.39
	3		5.00	2.80	2.5	0.27
3	1	0.18	1.66	0.43	1.7	0.46
	2	0.18	2.06	0.72	2.0	0.43
	3	0.02	2.60	1.10	2.1	0.39
	4		4.99	2.80	2.5	0.27

また密度は WOOLLARD の結果<sup>19)</sup> を参照して推定した。

以上レイリー波の Medium Response を計算する際に与えた地下構造の各モデルの定数をまとめて第6表に示した。なお計算の際、各層の境界は水平とみなし、かつこれら境界面は S 波速度や密度についても共通であると仮定した。実際に計算した構造の層厚については、第7図



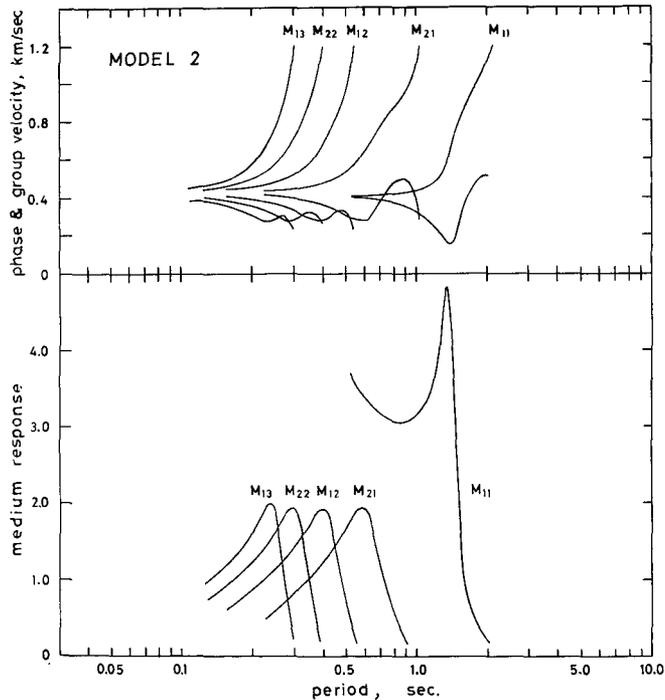
第8図 MODEL 1 について求めたレイリー波の分散曲線と Medium Response  
 Fig. 8. Dispersion curves and medium responses of the first five modes of Rayleigh waves for MODEL 1.

に示す shot II 付近のものを採用した。

計算結果は第8図, 第9図, 第10図に示すように, 各モデルに対して,  $M_{11}$  から  $M_{13}$  までの5つの mode について行なった。これらの図には, Medium Response を求めるにあたって用いた位相速度ならびに群速度も参考までにあげておいた。ただし位相速度が 1.2 km/sec より大きいところについては, Medium Response が非常に小さくなるので省略した。これらの図では, Medium Response 極大の周期は群速度極小の周期にはほぼ等しくなっている。しかし逆に群速度極小が必ずしも Medium Response 極大に対応するとは限らない。試験的にいろいろな構造について同種の計算を行なってみたところ, Medium Response 極大の周期を荒く見積る程度ならば, 一般に群速度曲線を求めておけば充分のようである。

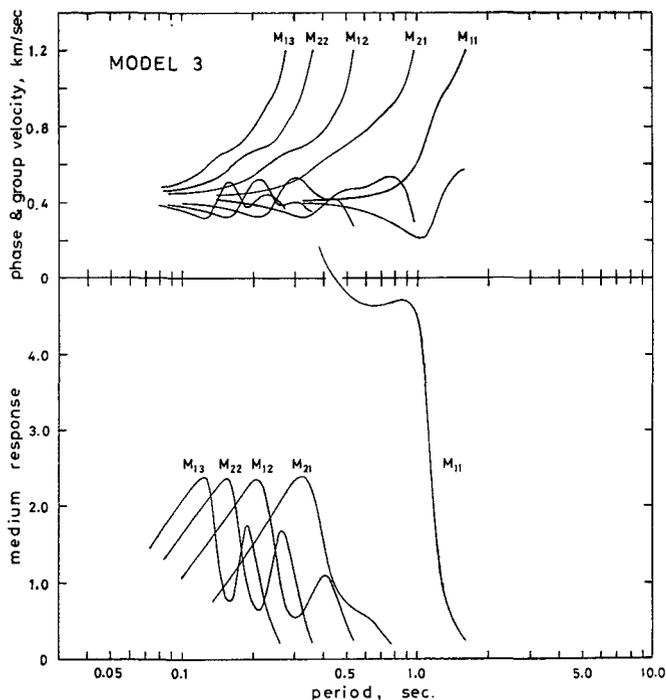
今回求められた地下構造に起因するレイリー波の周期の上限は, これらの図からわかるように, モデルによる違いは多少あるが高々 2 sec 程度である。したがってもし周期 2 sec 以上の振動を問題にする場合, ここではレイリー波に限っているが, より深部の構造すなわち約 400 m 以深の構造を求めておくことが必要である。

各モデルを比較してみると, MODEL 1 と MODEL 2 の Medium Response はあまり違いはないが, MODEL 3 のそれはやや異なった形を示している。MODEL 3 の Medium Response は他のモデルのものより複雑な形をしており, そして各 mode の卓越周期は他のモデルよりや



第9図 MODEL 2 について求めたレイリー波の分散曲線と Medium Response

Fig. 9. Dispersion curves and medium responses of the first five modes of Rayleigh waves for MODEL 2.



第10図 MODEL 3 について求めたレイリー波の分散曲線と Medium Response

Fig. 10. Dispersion curves and medium responses of the first five modes of Rayleigh waves for MODEL 3.

や短かくなっている。現在実測データがないので、この Medium Response によって、どのモデルがこの辺の構造として最適であるかは判定できない。しかし現在は表面波の Medium Response や実体波による構造のレスポンスなどが比較的容易に計算し得るので、実測されたスペクトルをできるだけ多く集め、これを説明し得る最適の構造をこの方面から求めるというのも実際的な方法の1つである。

## VII. 後 記

今後この種の弾性波探査を行なう時の参考のために、今回の弾性波探査を行なって気づいた補足的な点を2, 3記しておく。

調査地域の地理的条件にも種々左右されるかと思うが、この程度の規模の測線長および観測点数があった場合は、地震計の間隔は200 m ないし300 m 位にし、観測点配置の均等化を計るべきである。今回の実験では観測点間が極端に広いところがあり、解析にこのことが影響しているところもある。

探鉱器のような多成分観測が可能な場合は、dynamic range を少しでも広くするように、観測点数を半減させても増幅器の gain を low gain と high gain の2段階に分けて観測することが望ましい。

爆発関係では、扱う火薬量が今回のように多くなる場合は、火薬のそうてん作業と shot mark の記録作業とは分けて、それぞれ別々のメンバーで行なうべきである。安全対策と精度のよい観測とは同じウエイトで配慮されなければならない。

タイムマーク関係では、JJY の受信はできるだけ携帯ラジオでなく、専用の受信機によるよう心がけねばならない。周波数の選択は迅速に行なわねばならないからである。

以上は改めるべき最低限の事柄である。その他観測計器の統一とか検定とかは言うまでもなく実施の方向へ努力せねばならないことである。

### VIII. ま と め

青森県八戸市で、深さ 500 m から 1000 m までの構造を求めることを目的として、弾性波探査を行なった。展開した測線長は約 6 km で、爆発点は 5 カ所にもうけた。しかし解析に使用し得たものは、shot I, shot II および shot V の 3 カ所のものであった。観測点は全体で 64 カ所で、データーレコーダーや地震探鉱器を用いて記録した。構造を求めるにあたっては、観測点相互の対応が比較的よい later phase を用いた。その結果得られた構造のモデルは、2 層構造、3 層構造および 4 層構造の 3 種類であるが、総合的な判断によればこのうち 4 層構造モデルが今回の測線の構造として最も適当である。

なおこの構造と地質との対応は、必ずしも明確ではないが、次のように推定された。すなわち、

- 第 1 層： 1.7 km/sec……沖積層
- 第 2 層： 2.1 km/sec……鮮新統
- 第 3 層： 2.6 km/sec……？
- 第 4 層： 5.0 km/sec……先第三系（中・古生層）

である。このような速度と地質との対応は今までに得られているこの種の結果と矛盾するものではない。

得られた構造で誘起されるレイリー波の卓越周期の最大は、Medium Response の計算結果から推定するところ、約 1.5 sec である。

謝辞 この探査は昭和 45 年度文部省特定研究費（代表東大震研大沢胖）を基にして行なわれた。予備調査および交渉は、東大震研大沢胖教授、北大工学部酒井良雄教授、東京工科大学部小林啓美教授、東大震研嶋悦三教授、北大理学部田治米鏡二教授らが行なった。探査にあたっては八戸市役所、特に建設部長巻石蔵氏から全般的な御配慮をいただいた。測定用の土地使用については、三菱製紙八戸工場および新産業都市建設事業団の協力をいただいた。また、第二港湾建設局八戸港事務所長河西輝夫氏のお世話になった。爆発孔の作孔は建設コンサルタント K.K. が請負ったが、爆薬装填直前の孔さらいまでの責任を持って貰った。上記の関係者各位に感謝する。

なお Medium Response の計算は北大大型計算機センターの FACOM 230-60 によった。

## 10. A Seismic Refraction Survey in Hachinohe City, Aomori Prefecture

By Hiroshi OKADA

(Department of General Education, Faculty of Science, Hokkaido University)

Explosion seismic observations were carried out to determine the underground structure having a depth of several hundreds of meters in the industrial area in Hachinohe city, Aomori prefecture.

A profile six kilometers long and parallel to the coast line was provided to the north of the city. Four shot points and sixtyfour geophones were prepared on the profile.

To determine the structure, later refracted arrivals as well as first arrivals were tentatively used. Taking the first refracted arrivals alone into account, two-layered model is derived. On the other hand, if the first and the later refracted arrivals are used, three and/or four-layered model are derived. However, within the limits of this experiment, it is difficult to determine the most reliable model among them. Comparing the models with data of a columnar section near the shot point II and the geology about the experimental site, a four-layered model was taken as a reasonable structure. This model shows that all layers gradually reduce the thickness toward the south end of the profile and a depth to the substratum is 0.28 km at the south end of the profile while it is 0.57 km at the north end of the profile. The thickness-velocity relationship deduced near the shot point II in this model is as follows :

the first layer : 0.18 km of 1.66 km/sec material,  
the second layer : 0.18 km of 2.06 km/sec material,  
the third layer : 0.02 km of 2.60 km/sec material,

and

the fourth layer : 4.99 km/sec material.

Referring to the geology, the following correspondence between each of the layers and the geology is presumed :

the first layer : the Alluvium bed,  
the second layer : the Pliocene series,  
the third layer : unknown,

and

the fourth layer : the Pre-Tertiary system.

An estimation of predominant period in Rayleigh waves excited in models obtained was tentatively attempted on the basis of medium response function. Rayleigh medium responses show that a predominant period of fundamental mode is expected in the range from 0.9 sec to 1.5 sec.