

人工地震による中部日本北部の地殻構造調査

—富山—上宝測線—

伊藤 潔・川崎 一朗・古本 宗充
磯部 英雄・和田 博夫
西 祐司・永井 直昭

SEISMIC SURVEY IN NORTHERN CHUBU DISTRICT, JAPAN

TOYAMA-KAMITAKARA LINE

By *Kiyoshi ITO, Ichiro KAWASAKI, Munemitsu HURUMOTO,*
Hideo ISOBE, Hiroo WADA,
Yuji NISHII and Tadaaki NAGAI

Synopsis

A seismic survey was carried out along a east-west line in northern Chubu district, October, 1991. Seismic waves from four explosions in the experiment were observed along another line of about 70 km extending in north and south directions from Shot-3 at the border of Toyama and Gifu Prefectures. 37 temporary stations were set along the line which crosses large active faults of Ushikubi and Atotsugawa faults. Although clear first arrivals from Shot-3 were recorded, no obvious delays in travel times were found at the faults. Records of Shots 1 and 2, about 85 and 135 km away from the line to the east, respectively, show clear later arrivals, which indicate reflected waves from middle of the crust beneath mountaneous region of central Honshu.

1. はじめに

中部地方北部をとる人工地震探査は、爆破地震動研究グループによっていくつか実施されているが^{2),4),5)}、今回の測線付近では実施されていない。この付近の人工地震による走時は手取川ダム建設の際の碎石爆破の観測によって得られたものがあるだけである^{10),11)}。

この地域は山地が険しく観測が困難であるが、跡津川断層など大きな活断層、火山が存在し、テクトニクな動きが活発だと思われる地域である。これらの地域の地殻構造の調査は、この地域のテクトニクスの理解、大地震の発生、火山活動等の解明のための基礎として重要であると思われる。

1991年10月に爆破地震動研究グループによって、金沢市—群馬県吾妻を結ぶ東西約 180 km の測線上で人工地震探査が実施された^{3),8),9)}。この爆破地震動を富山大、金沢大、地質調査所、富山气象台などとの共同で、富山から上宝に延びる南北約 70 km の測線上で観測し、地殻構造調査を実施した。それらの概要と予備的な解析結果を報告する。

2. 観 測

Fig. 1 に爆破点と観測点を示す。S3 から南北に37点の臨時観測点を設置し、S3 の波動とともに、他の爆破からの波をも記録した。この測線は地震活動が活発な牛首、跡津川断層を横切っている。S1, S2 からの波動は飛騨山脈を横切る fan shooting となり、S4 は反対からくる同様な測線となる。Table 1 には観測点の位置、観測者及び使用した記録器を示す。

地震計は固有周波数 2 Hz の上下動 (L22D) を用い、0.5~30 Hz で平坦な特性をもつアンプで増幅した後、FM, PCM, および 3 種類のデジタル記録器で収録した。デジタル記録はサンプリング 100, 200, 400 Hz のいずれかで、手動またはタイマーによって起動した。時刻の較正は全観測点とも JJY を用い、観測時に JJY が同時記録できない場合は、前後の較正值から時計の遅れ進みを内挿して補正した。観測点の位置は 5 千分の 1 および 2 万 5 千分の 1 の地図上で求めた。

3. 観 測 結 果

アナログ記録はサンプリング、100 Hz でデジタル化し、3 種類のデジタルレコーダの記録とともに同一フォーマットに変換して、パソコンで解析した。初動の読み取りはディスプレイ上で行った。その際、S/N 比の悪い記録はデジタル・フィルターを用いた。

Fig. 2-1~2-4 に S1~S4 の記録を示す。距離は S3 からの距離をとり、時間軸は速度 6 km/s で reduce している。S3 以外は 5-20 Hz のバンドパス・フィルターをかけたものである。S3 より南側の観測点は山中の険しい場所が多く、そのかわり岩盤がしっかりしているので、ノイズは低い。一方、S3 から北の観測点ではノイズが南側の 5 倍ほどあり、S1, S2 の初動はほとんど観測できなかった。ただし、後続波が観測された

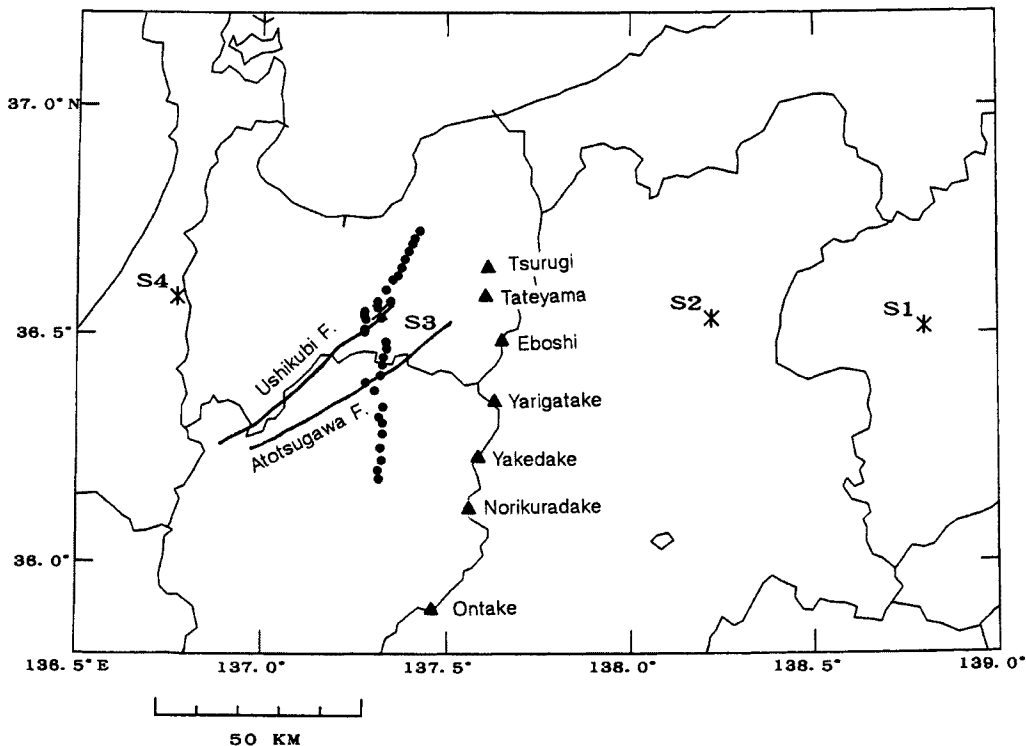


Fig. 1. Locations of shots and observation stations.

Table 1. Locations of shot and observation stations. Column 'Rec.' indicates the type of recorders used at the station; as PCM, pulse code modulation; FM, frequency modulation; EDR, DRF and DTC, digital recorders with 12-, 14- and 16-bits A-D converter, respectively.

Station	Latitude	Longitude	H(m)	Rec.	Observers
78 P08	36° 43' 29.2"	137° 25' 38.7"	290	PCM	Y. Aoyama, K. Matsukage
77 P07	36 42 29.2	137 24 53.0	98	PCM	M. Furumoto, M. Mukai
76 P06	36 41 47.0	137 24 32.5	115	PCM	T. Nagao, R. Otani
75 P05	36 40 48.5	137 23 53.7	133	PCM	T. Kudo, H. Ishida
74 P04	36 39 44.1	137 23 14.5	125	PCM	Nomura, G. Ito
73 P03	36 38 38.9	137 22 44.3	195	PCM	M. Awara, R. Onishi
72 P02	36 37 35.3	137 22 06.3	170	PCM	M. Uchitu, K. Uno
71 P01	36 37 04.0	137 21 19.2	203	PCM	Y. Nishiyama, H. Nishiyama
42 K02	36 35 44.4	137 20 14.3	227	PCM	T. Nagai, H. Suzue
41 K01	36 34 11.6	137 20 56.4	257	PCM	T. Hihara, H. Takehashi
47 K07	36 34 10.3	137 18 52.8	235	EDR	K. Ito, K. Matsumura, Y. Asai, H. Isobe
01 H01	36 33 25.8	137 18 51.3	350	EDR	K. Ito, Y. Asai
02 H02	36 32 03.3	137 19 27.9	390	FM	K. Ito, Y. Asai
31 H3-1	36 32 52.8	137 16 46.0	260	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
32 H3-2	36 32 32.5	137 16 43.2	287	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
33 H3-3	36 32 19.9	137 16 42.8	287	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
40 H04	36 31 54.0	137 16 54.1	320	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
51 H5-1	36 30 37.2	137 16 45.2	538	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
52 H5-2	36 30 28.0	137 16 49.5	528	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
53 H5-3	36 30 25.2	137 16 47.6	525	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
54 H5-4	36 30 13.8	137 16 45.0	522	DTC	Y. Nishi, C. Oshima, M. Higuchi
61 W01	36 30 26.4	137 16 49.8	530	DRF	K. Watanabe, Y. Wada
62 W02	36 30 25.0	137 16 48.2	530	DRF	K. Watanabe, Y. Wada
06 H06	36 28 54.0	137 20 10.4	760	EDR	N. Hirano, I. Kawasaki, T. Morisada
07 H07	36 28 01.0	137 20 17.0	910	FM	N. Hirano, I. Kawasaki, T. Morisada
08 H08	36 26 53.0	137 19 46.0	980	EDR	N. Hirano, I. Kawasaki, T. Morisada
09 H09	36 25 53.0	137 19 36.0	1080	FM	N. Hirano, I. Kawasaki, T. Morisada
10 H10	36 24 30.3	137 19 20.3	410	FM	M. Koizumi
11 H11	36 23 31.7	137 16 52.0	355	FM	M. Koizumi
12 H12	36 22 30.5	137 18 22.0	806	EDR	M. Koizumi
13 H13	36 20 20.0	137 19 42.1	705	DRF	H. Wada, Y. Hiramatsu
14 H14	36 19 00.5	137 19 04.7	450	DRF	H. Wada, Y. Hiramatsu
15 H15	36 18 13.0	137 19 37.1	460	DRF	H. Wada, Y. Hiramatsu
16 H16	36 16 48.7	137 19 37.4	760	FM	T. Mikumo
17 H17	36 14 55.9	137 19 16.8	1120	FM	H. Wada, Y. Hiramatsu
18 H18	36 13 19.1	137 19 29.4	730	DRF	K. Simizu, S. Nakao
19 H19	36 12 01.1	137 18 53.3	640	DRF	K. Simizu, S. Nakao
20 H20	36 10 52.3	137 19 03.5	670	FM	K. Simizu, S. Nakao

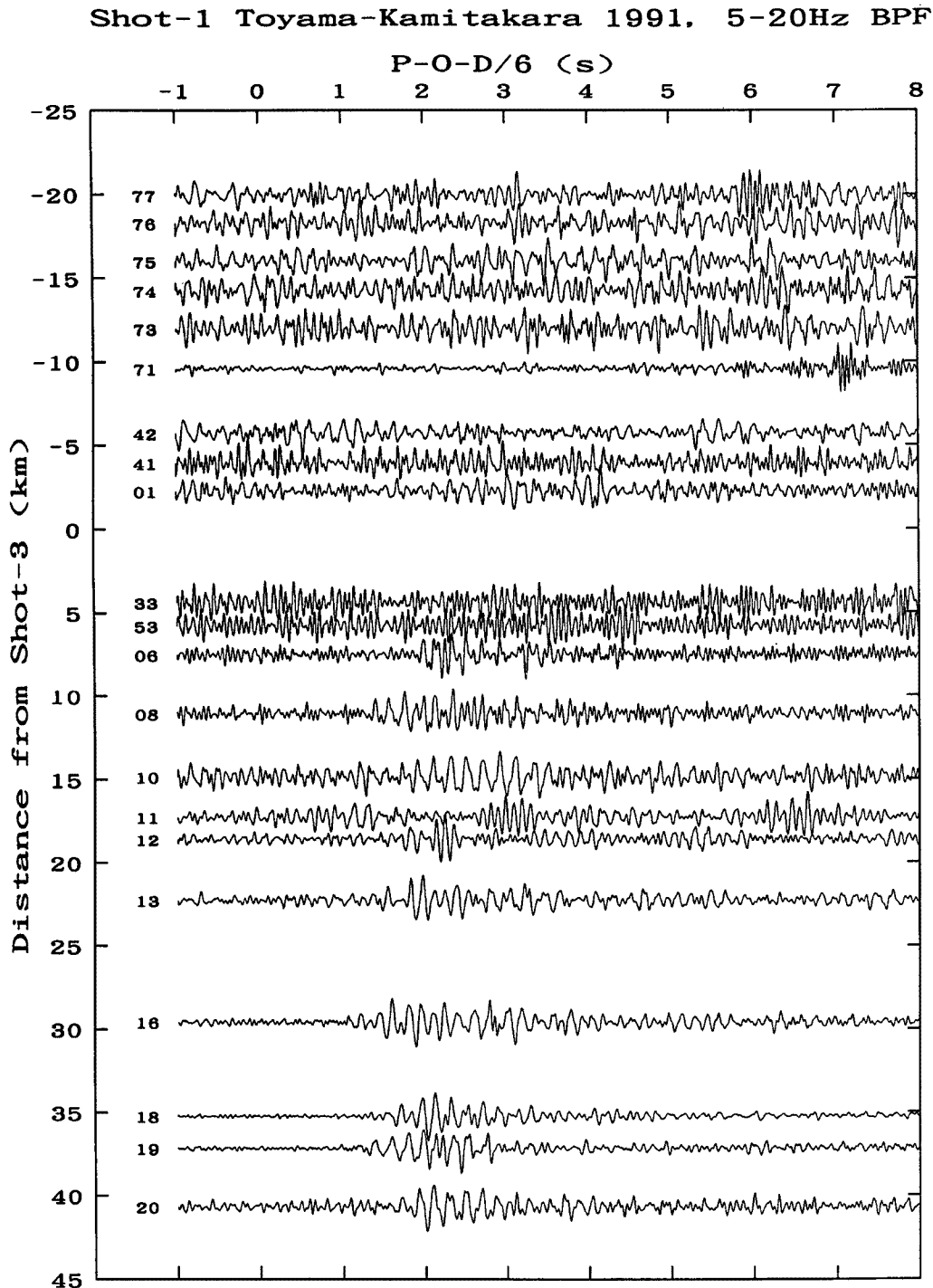


Fig. 2-1. Band-pass filtered record section of Shot-1 as indicated for distance from shot-3. Numbers refer to table 1. Time axis is reduced by a velocity of 6.0 km/s

点もある。

Table 2 に読み取り値を示す。負の距離は S3 より北側の観測点を示す。また、A, B, C は読み取りの精度をおよそ±0.1, ±0.2および±0.5秒を目処にして示した。+-は地動の方向を示している。Fig. 3 には

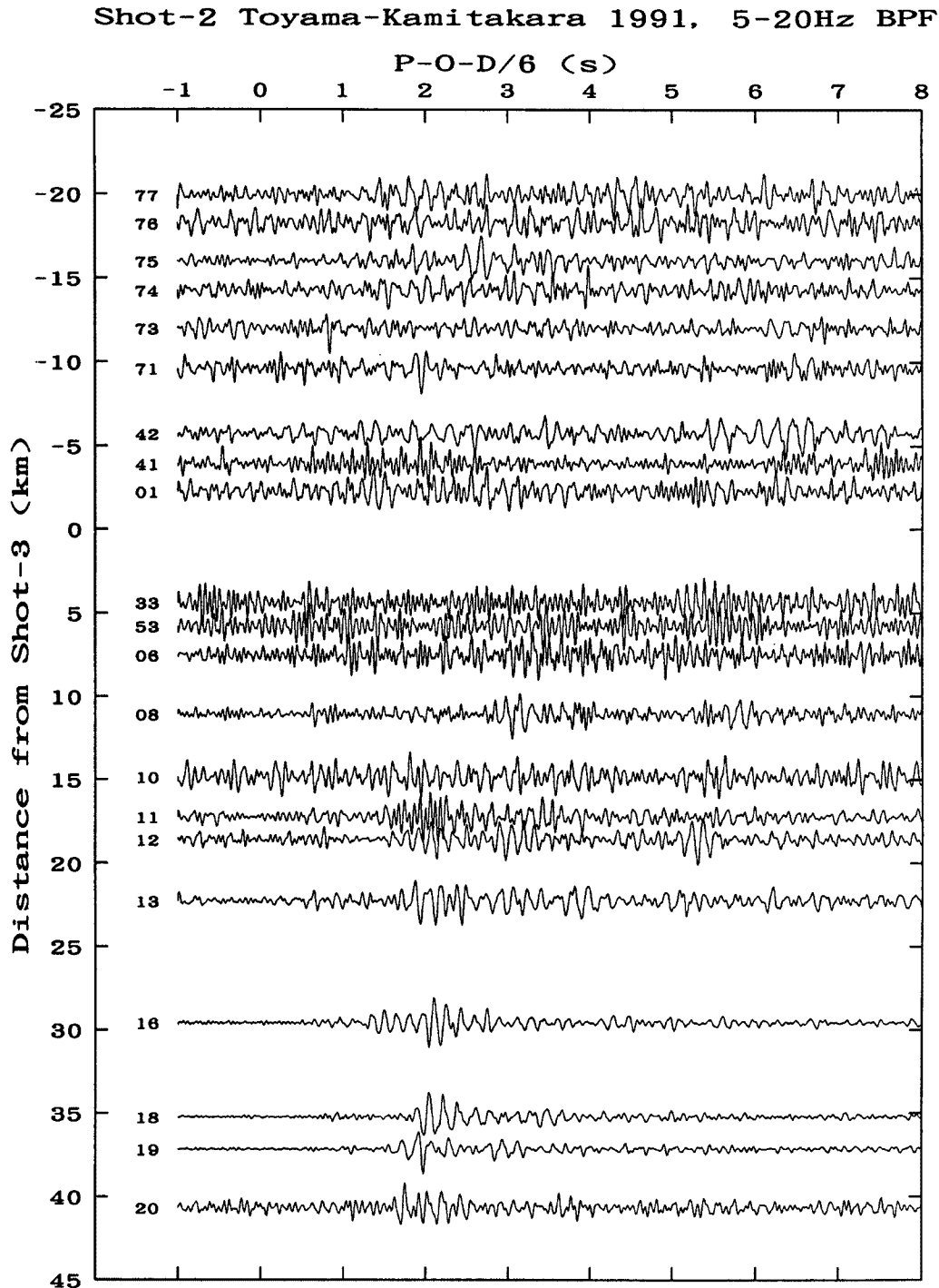


Fig. 2-2. Band-pass filtered record section of Shot-2 as indicated for distance from shot-3. Time axis is reduced by a velocity of 6.0 km/s

reduced travel time を S3 からの距離に対して示した。S3 だけは普通の走時図になるので、図中の直線で示す範囲のみかけ速度を示した。また、U と A のついた矢印はそれぞれ牛首、跡津川断層の位置 (Fig. 1 参照) を示している。

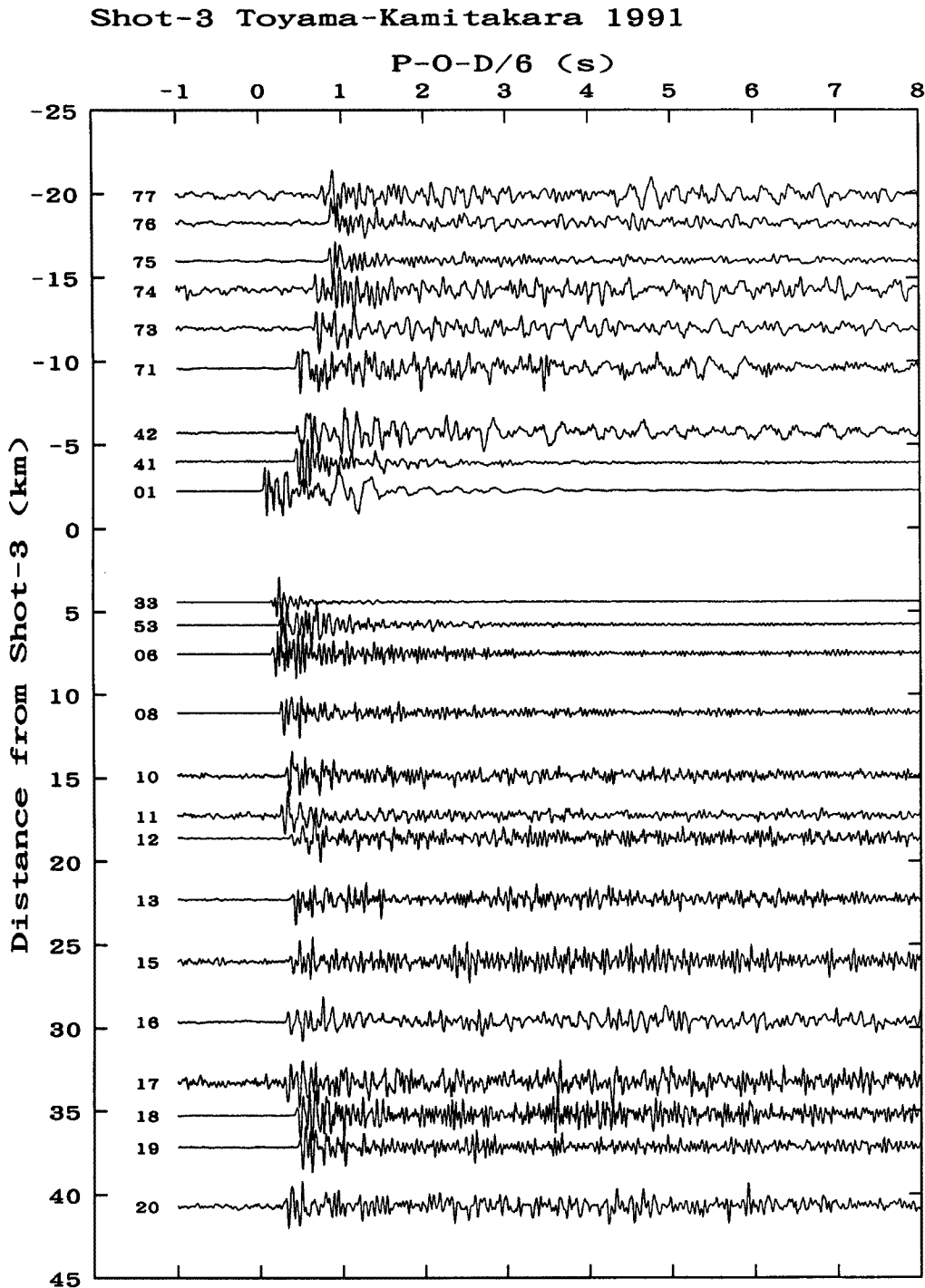


Fig. 2-3. Record section of Shot-3. Time axis is reduced by a velocity of 6.0 km/s

見かけ速度は S3 付近を境界として大きく異なる。北側ではみかけ速度 4.8~5.1 km/s の層が存在しているが、南側はかなり薄い。S3, S4 の走時の絶対値は shot time-term が異なるため違っているが、その変化の様子は酷似している。これはこの地域の表層の厚さの変化を表していると思われる。この厚さの見積には

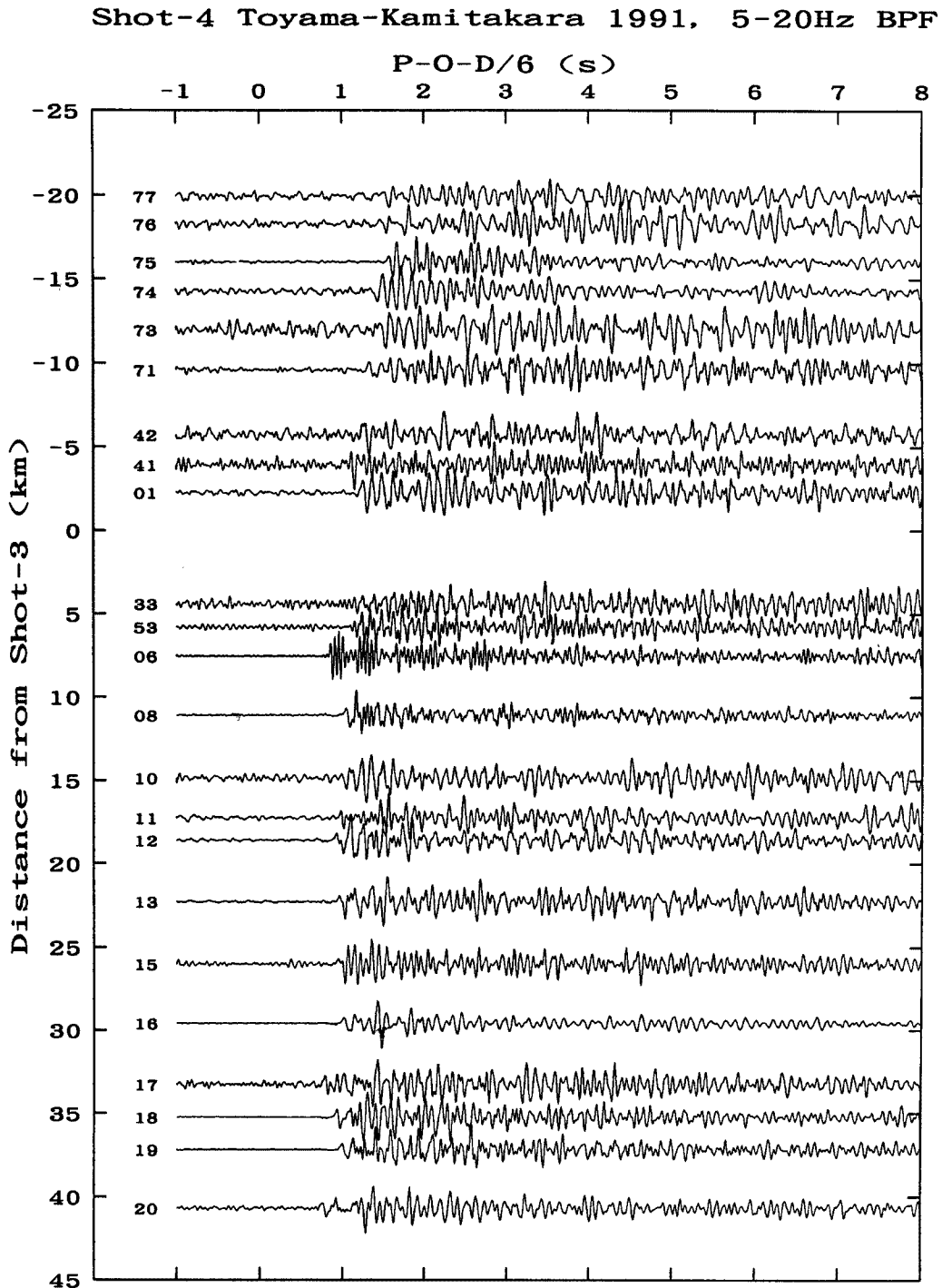


Fig. 2-4. Band-pass filtered record section of Shot-4 as indicated for distance from shot-3. Time axis is reduced by a velocity of 6.0 km/s

shot time-term が必要であるが、このデータのみではわからない。しかし、S3 から南の 6 km/s 層の intercept time は 0.2~0.3 s なので、この1/2を shot time-term と考えれば、基盤の速度を 6.0 km/s、表層を 4.8 km/s とし、北側の 6 km/s 層の intercept time, 0.6~0.8 s を用いて、北側の表層の厚さは 4~5 km となる。実

Table 2. Travel time data. Dist and Azim indicate a distance from the shot and an azimuth from the shot to the station, respectively. Negative distance means that the station locates in northern side of Shot-3. P-O and RT denote a travel time and its reduced one by a velocity of 6.0 km/s, respectively. Plus and minus show upward and downward ground motions of the picked arrivals, respectively. A, B and C indicate accuracy of readings as "very good", "good" and "fairly good", respectively.

Stn	Dist	Azim	P-O	RT	Stn	Dist	Azim	P-O	RT
<i>Shot-1</i>					10 H10	14.847	179.9	2.74+A	0.26
06 H06	131.443	268.4	22.59 C	0.90	11 H11	17.257	194.7	3.07+A	0.19
08 H08	133.030	266.8	22.77 C	0.60	12 H12	18.603	184.5	3.44+A	0.39
10 H10	133.385	265.2	23.27 C	1.04	13 H13	22.276	179.8	4.04+A	0.33
12 H12	135.254	263.7	22.93 C	0.39	15 H15	25.996	179.9	4.66+A	0.33
13 H13	134.213	262.0	23.78 C	1.41	16 H16	29.585	179.9	5.19+A	0.26
18 H18	136.737	256.7	24.12 C	1.33	17 H17	33.261	180.0	5.69+A	0.15
19 H19	138.596	256.0	24.28 C	1.18	18 H18	35.223	179.9	6.25+A	0.38
20 H20	138.197	254.5	24.69 C	1.66	19 H19	37.154	182.1	6.61+A	0.42
<i>Shot-2</i>					20 H20	40.669	180.0	6.99+A	0.21
06 H06	79.354	266.0	13.88 C	0.65	<i>Shot-4</i>				
08 H08	81.111	263.4	14.18 C	0.66	77 P07	-58.605	75.4	11.28-B	1.51
10 H10	81.707	260.8	14.99 C	1.37	76 P06	-58.136	77.1	11.26 C	1.59
11 H11	86.364	260.1	15.87 C	1.48	75 P05	-56.349	78.6	10.94+A	1.55
12 H12	83.854	258.5	14.72 C	0.74	74 P04	-55.921	80.5	10.67-B	1.35
13 H13	83.196	255.8	15.33 C	1.46	73 P03	-54.246	82.2	10.43+B	1.38
16 H16	85.331	251.0	14.83+C	0.61	71 P01	-52.475	84.1	10.03+B	1.28
18 H18	87.371	247.5	15.25 B	0.69	42 K02	-50.736	87.9	9.66+B	1.20
19 H19	89.442	246.8	13.93 C	0.98	41 K01	-50.814	90.1	9.43+B	0.96
20 H20	89.674	244.3	15.57 C	0.60	47 K07	-47.820	90.1	9.11 C	1.14
<i>Shot-3</i>					01 H01	-47.861	92.3	9.22+A	1.24
77 P07	-19.926	22.3	4.03+B	0.71	31 H3-1	44.982	94.7	8.69+A	1.19
76 P06	-18.258	24.3	3.89+A	0.85	32 H3-2	44.980	94.8	8.62+A	1.12
75 P05	-15.995	22.3	3.51+A	0.84	33 H3-3	44.983	94.8	8.62+A	1.12
74 P04	-14.248	24.8	3.01+A	0.63	51 H5-1	45.451	99.4	8.66+A	1.08
73 P03	-11.971	22.4	2.67+A	0.67	52 H5-2	45.466	99.4	8.68+A	1.10
71 P01	-9.595	18.3	2.05+A	0.45	53 H5-3	45.463	99.5	8.70+A	1.12
42 K02	-5.738	15.2	1.39+A	0.43	54 H5-4	45.462	99.5	8.69+A	1.10
41 K01	-3.931	24.1	1.07+A	0.41	61 W01	45.467	99.5	8.69+A	1.11
47 K07	-3.847	338.8	0.71+A	0.07	62 W02	45.464	99.5	8.69+A	1.11
01 H01	-2.260	322.0	0.41+A	0.03	06 H06	51.928	102.3	9.49+A	0.83
31 H3-1	4.388	270.2	0.86+A	0.13	08 H08	51.506	106.7	9.60+A	1.02
32 H3-2	4.395	269.4	0.86+A	0.13	10 H10	52.661	110.6	9.72+A	0.94
33 H3-3	4.397	268.9	0.86+A	0.13	11 H11	49.306	114.4	9.13+A	0.91
51 H5-1	5.762	229.6	1.13+A	0.17	12 H12	52.731	115.0	9.71+A	0.92
52 H5-2	5.772	229.4	1.16+A	0.20	13 H13	55.781	117.8	10.23+A	0.93
53 H5-3	5.781	229.3	1.18+A	0.22	15 H15	57.606	121.0	10.52+B	0.92
54 H5-4	5.809	229.1	1.26+A	0.29	16 H16	59.545	124.0	10.89+A	0.97
61 W01	5.775	229.3	1.16+A	0.20	17 H17	61.643	126.8	10.98+B	0.71
62 W02	5.781	229.3	1.16+A	0.20	18 H18	62.868	128.3	11.36+A	0.88
06 H06	7.527	168.6	1.39+A	0.14	19 H19	62.970	130.4	11.44+A	0.94
08 H08	11.079	179.5	2.09+A	0.24	20 H20	66.341	132.0	11.72+A	0.66

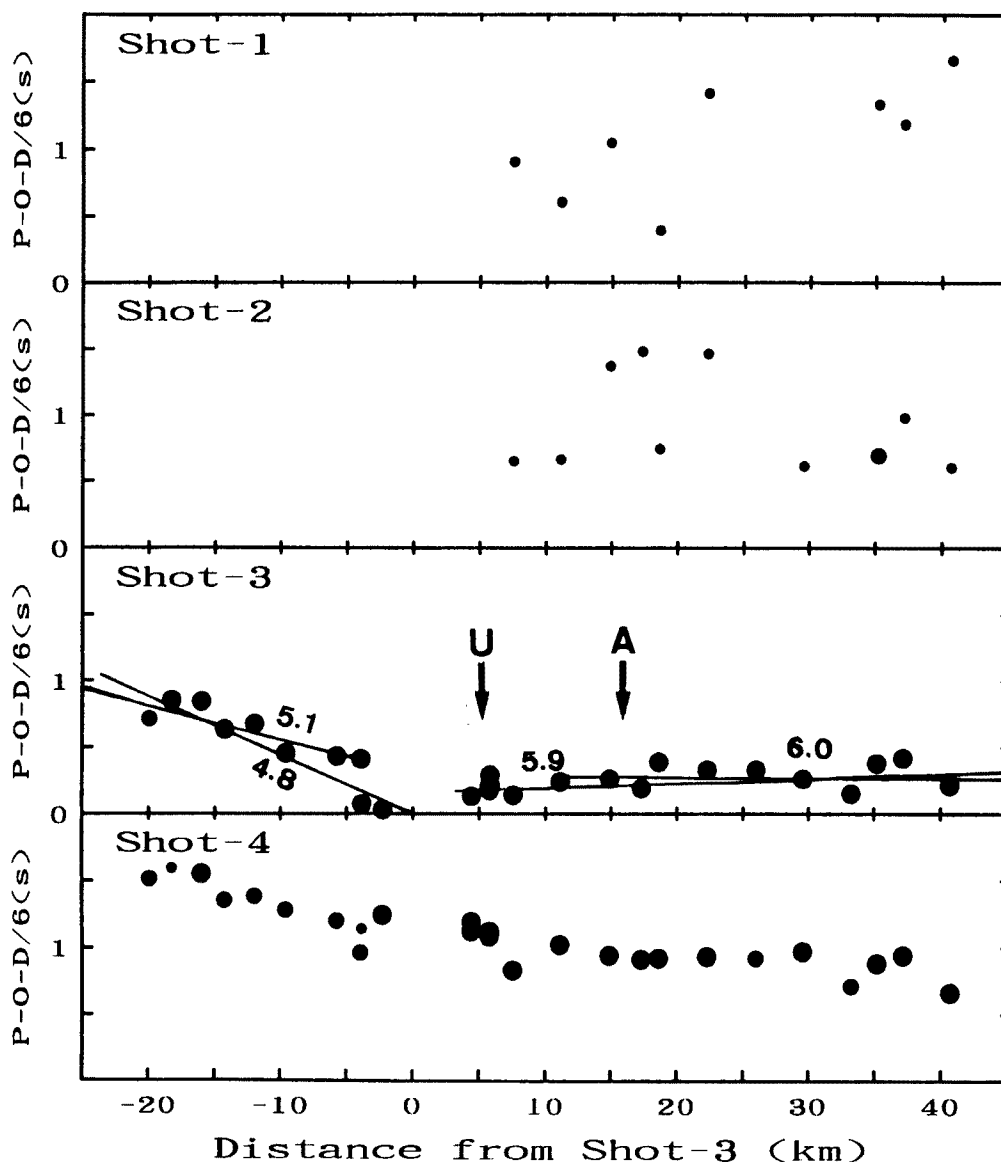


Fig. 3. Reduced travel time against distance from Shot-3. Reduction velocity is 6.0 km/s. Numerals for Shot-3 denotes apparent velocities and arrow heads with a letter U or A indicate locations of the Ushikubi and Atotsugawa faults.

際は北に向かって深くなっている可能性もあるので、この値は一応の目安である。

S3 から南の観測点でのみかけ速度は 5.9~6.0 km/s で、手取川ダムの碎石爆破から東に延びる測線での結果^{10),11)}、6.15 km/s より遅いが、両者のデータのばらつきを考慮するとおおよそ一致している。また、上述のように 6 km/s より遅い表層は 1 km 程度である。このように S3 から南の地域は表層が薄く、地表近くまで 6 km/s が達していることが分かる。また、Fig. 3 の牛首、跡津川断層の位置付近の走時を見ても、その付近で走時の極端な遅れはない。

Figs. 2-1, 2-2 には P-O-D/6 の 2 s 付近に顕著な later phase が見られる。これらの性質を明らかにするため、Fig. 4 に比較的 S/N 比のよい全記録のレコード・セクションを示す。図に矢印で示すように、顕著な波は地殻中部からの反射であると解釈できる。この様子を明らかにするために Figs. 5-1, 5-2 に S1, S2 に

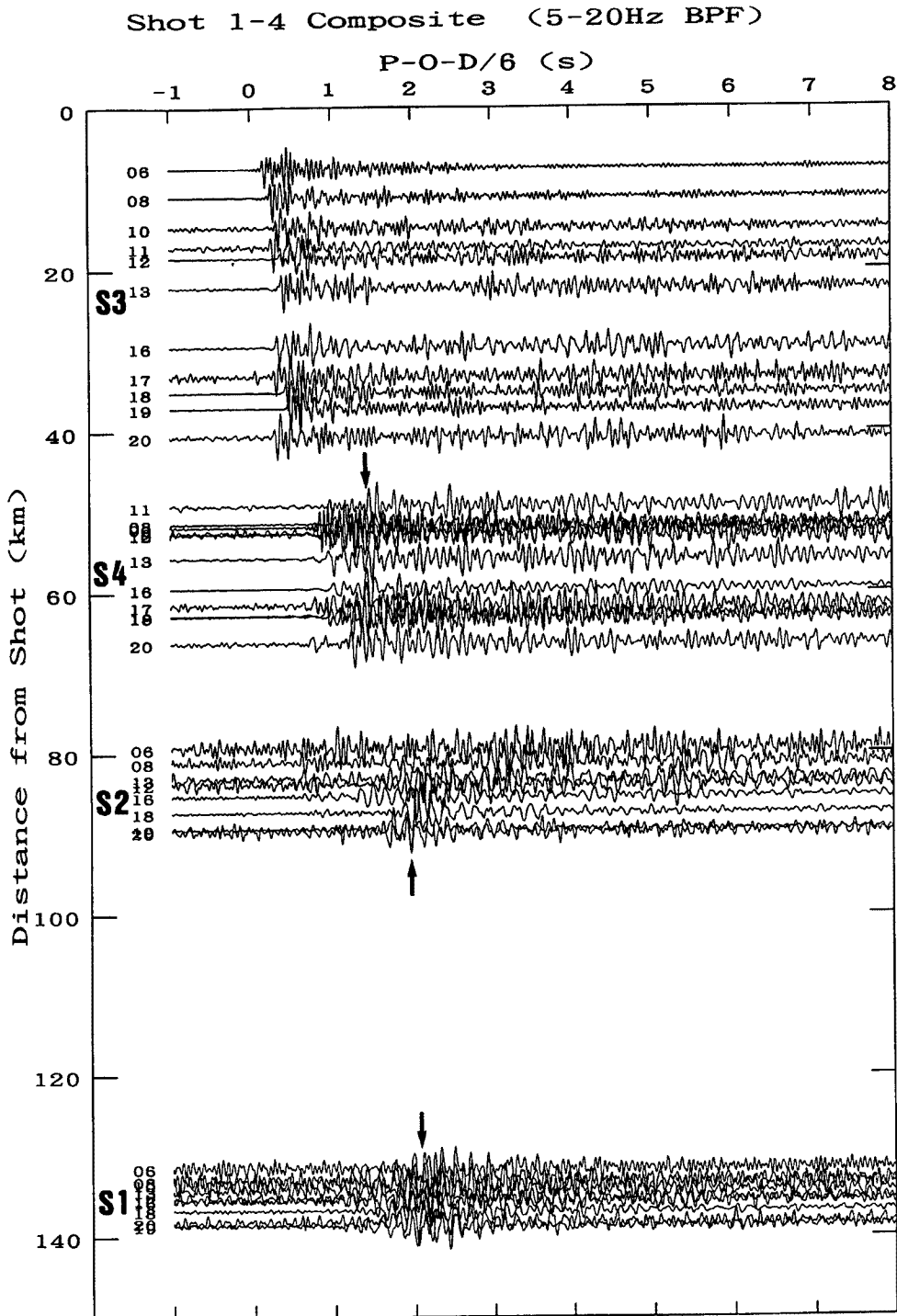


Fig. 4. Composite record section of well-recorded waves for shots 1-4. Arrow heads show clear later arrivals.

対する normal move-out 補正をした結果を示す。その際、5-20 Hz の band-pass filter を用い、上部地殻の平均速度としては 6.0 km/s を仮定している。距離は S3 からの距離をとってあるので、通常の反射の record section とは異なっている。fan shooting の反射の断面なので、方位による相違も大きいですが、概略的には S1

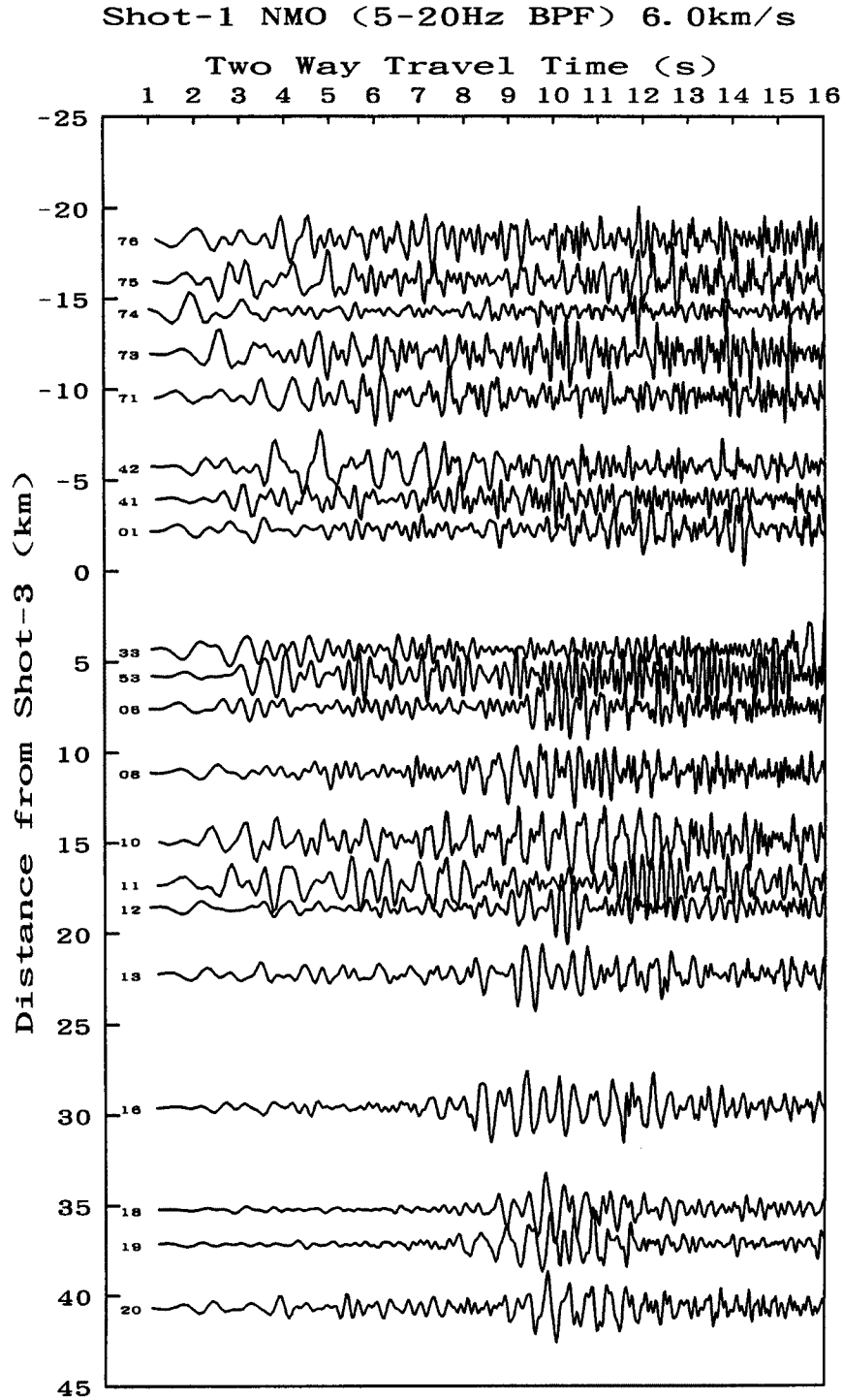


Fig. 5-1. Nomal-move-out corrected record-section for Shot-1 as indicated for distance from Shot-3. Reflected waves are seen at 8-9s of two-way travel time.

の顕著な反射波は往復走時7-8s付近に、S2には6-7s付近に見られる。これらの図では利得補正は行っていないので、later phaseがいかにか大きいか分かる。これらは水平層を仮定するとそれぞれおよそ21-24 km, 18-21, の深さに対応する。ただし、上部地殻の構造が不明なのでこの深さは数kmは変化するであろう

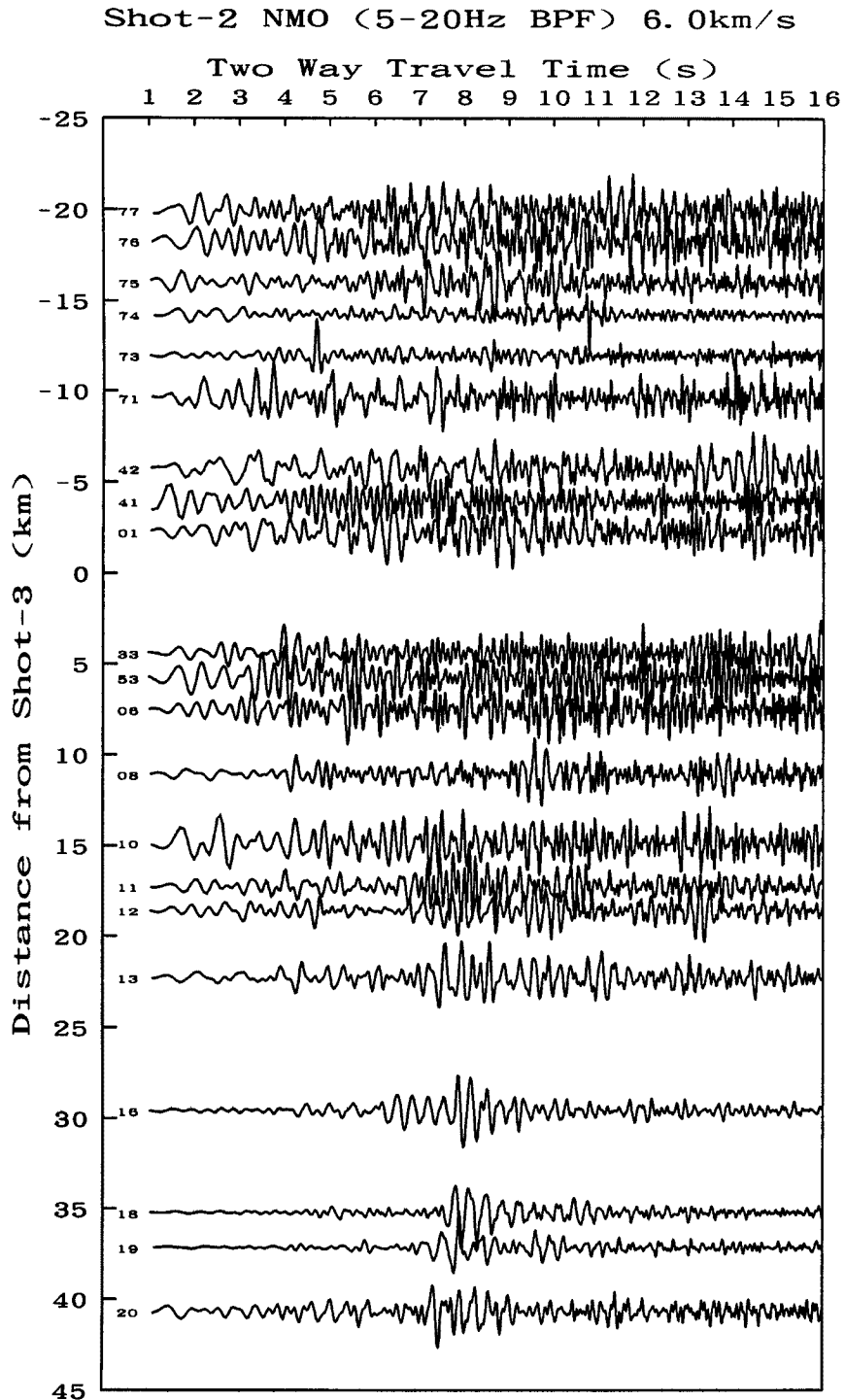


Fig. 5-2. Normal-move-out corrected record-section for Shot-2 as indicated for distance for Shot-3. Reflected waves are seen at 6-7s of two-way travel time.

う。さらに詳細にみると到来方向によって違いがある。観測点53付近を境に北側の観測点では南の観測点より、later phase が顕著であることが分かる。しかし、北側でも反射波が観測されていることは確実である。また、反射波の様子から反射面は北側の下部地殻では数多く存在するように見える。さらに、S4 からの反

射波は存在するが、S1, S2 程顕著ではない。このように、この地域の反射面が確かに存在することと、それらが地域的に大きく変化していることを示している。この変化を明らかにするためには、1 km より狭い間隔での高密度の観測を必要とする。一方、立山、焼岳など北アルプスを通過する初動が大きく減衰することが観測されている^{6),9),12)}。この反射面の変化が、上記の減衰帯と関連することも考えられる。

4. おわりに

中部地方北部の下部地殻には地震波の反射面が存在することが明らかになった。また、飛騨山脈付近ではそれらの構造が大きく変化していることが分かった。今後、速度の不均質とともに、反射面の地域的相違、波の減衰構造を調査することによって、大地震、火山、テクトニクスとの関連が把握されるであろう。三雲・他⁷⁾は3次元速度構造の解析から飛騨山脈下に低速度の地域を見いだした。安藤¹⁾はマントルにS波の変異異方性をマントルに見出し、これをマントル・ダイアピルに結び付けて解釈している。これらを総合し、今回の結果を含めて想像できる構造モデルの一つを Fig. 6 に示す。今後、モデルの当否の判定を含めて、詳細な調査が望まれる。

謝 辞

本実験にご援助いただいた株式会社パスコ、株式会社富山ボーリングおよび田村科学技術振興財団に心から感謝いたします。神岡鉱業株式会社には坑道を利用させていただいた。お世話いただいた桜井若葉、滑川正朗、藤井広太郎氏および関係者の方々に感謝いたします。この爆破実験は爆破地震動研究グループ（代表者、東京大学地震研究所、吉井敏剋）によって実施された。爆破の利用を快諾していただき、爆破点位置および爆破時刻を使用させていただいた爆破地震動研究グループの方々に感謝いたします。

なお、この実験の参加者およびおもな任務分担は次の通りである。所属は観測当時のものである。

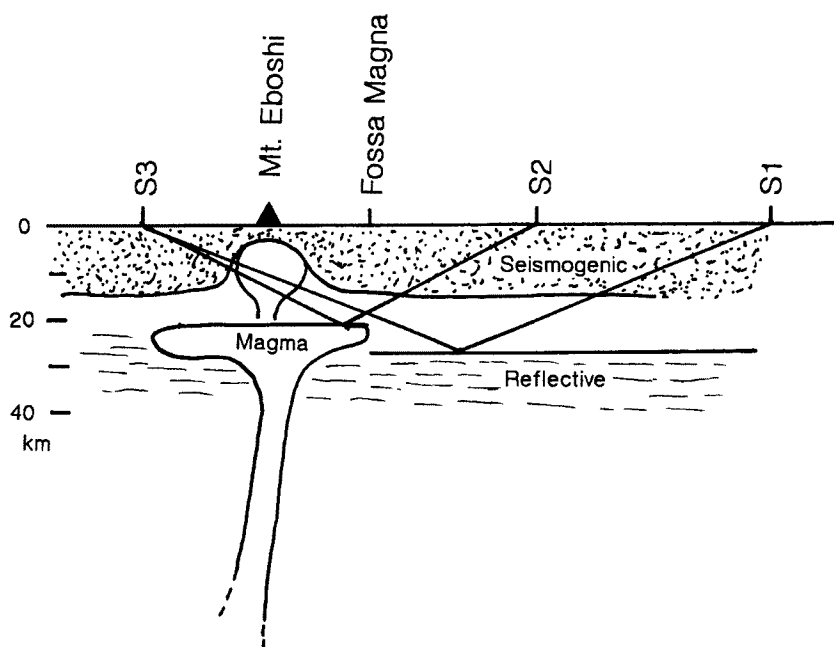


Fig. 6. Schematic view of crustal structure beneath northern part of the Chubu district, across the Hida mountains.

企 画：川崎一朗，伊藤 潔，古本宗充，長尾年恭，和田博夫

観測点調査：川崎一朗，当舍利行，伊藤 潔，浅井康弘，森定 尚，大島主税，古本宗充

観測参加者：浅井康弘，磯部英雄，川崎一朗，樋口昌由，森定 尚，大島主税（以上富山大），伊藤 潔，小泉 誠，平松良浩，平野憲雄，松村一男，三雲 健，中尾節郎，清水公一，和田博夫，和田安男，渡辺邦彦（以上防災研），青山雄一，粟原 勝，古本宗充，石田勇人，伊藤吾一，工藤 健，西山英樹，西山吉介，向井麻紀子，松影香子，野村宜武，長尾年恭，大谷 竜，卯野勝之，内津 将（以上金沢大），日原達彦，永井直昭，鈴江浩成，竹橋春江（以上富山気象台），西 祐司（地質調査所）

記録整理：伊藤 潔，磯部英雄，川崎一朗，松村一男

解 析：伊藤 潔，磯部英雄，川崎一朗

地震学会講演発表：川崎一朗

参 考 文 献

- 1) 安藤雅孝：地震波から見たマントルダイアピル，火山2，第31巻，1986，pp. 45-53.
- 2) Aoki, H.: Crustal structure in the profile across central Japan as derived from explosion seismic observations, J. Phys. Earth, Vol. 20, 1972, pp. 216-223.
- 3) 爆破地震動研究グループ：中部日本地域における爆破地震動の観測，地震学会講演予稿集，No. 2，1992，p. 11.
- 4) Hotta, H., S. Murauchi, T. Usami, E. Shima, Y. Motoya and T. Asanuma: Crustal structure in central Japan along longitudinal line 139°E as derived from explosion-seismic observations, Bull. Earthq. Res. Inst, Univ. of Tokyo, Vol. 42, 1964, pp. 533-541.
- 5) Ikami, A., T. Yoshii, S. Kubota, Y. Sasaki, A. Hasemi, T. Moriya, H. Miyamachi, R. S. Mats'ura: A seismic-refraction profile in and around Nagano Prefecture, central Japan, J. Phys. Earth, Vol. 34, 1986, pp. 457-474.
- 6) 勝俣 啓・ト部 卓・溝上 恵：飛驒山脈下の地震波減衰特性，地震学会講演予稿集，No. 1，1990，p. 104.
- 7) 三雲 健・平原和朗・竹内文朗・和田博夫・佃 為成・藤井 巖・西上欽也：1989，飛驒地方の3次元上部地殻構造と活断層および地震活動，月刊地球，第11号，1989，pp. 90-96.
- 8) 酒井慎一・岩崎貴哉・飯高 隆・吉井敏剋・山崎文人・桑山辰夫：人工地震による中部日本地域の地殻構造，吾妻一金沢測線，地震学会講演予稿集，No. 2，1992，p. 12.
- 9) 酒井慎一・岩崎貴哉・飯高 隆・吉井敏剋・山崎文人・桑山辰夫：人工地震による中部日本地域の地殻構造，吾妻一金沢測線，その2，地球惑星科学関連学会1993年合同大会予稿集，1993，p. 174.
- 10) 和田博夫・三雲 健・小泉 誠：飛驒地方北部特に跡津川断層付近の地震活動と発震機構，地震2，第32巻，1979，pp. 281-296.
- 11) Watanabe, K. and H. Fukui: Upper crustal structure in the northwestern Chubu district, Japan as derived from the Tedoru-River Quarry blasts, Bull. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Vol. 30, 1980, pp. 31-52.
- 12) 山崎文人・山岡耕春・山田 守・藤井 巖・中村 勝・沖村康之・名和一成・大林政行・青木治三：北アルプス焼岳近傍の地震波減衰構造モデル，地震学会講演予稿集，No. 2，1992，p. 5.