

跡津川断層系における人工地震による地殻構造調査

吉井弘治・伊藤 潔・松村一男・和田博夫・角野由夫*・藤澤洋輔

* 信州大学理学部

要 旨

跡津川断層系の茂住・祐延断層を横断する観測坑におけるトラップ波の検出を目的とした人工地震が茂住祐延断層上において実施された。この爆破地震動を茂住祐延・跡津川断層上、約40kmに展開した臨時観測点で観測し、地下構造調査を実施した。初動走時によって、表層付近の構造を決定した。また、反射波の解析によって、reflectiveな下部地殻の存在を見出し、特に深さ15および25km付近に顕著な反射面を検出した。

キーワード：跡津川断層, 茂住祐延断層, 人工地震探査, 地殻構造, 反射面

1. はじめに

2000年10月24日に、陸域地下構造フロンティア計画によって、トラップ波の検出を目的とした人工地震が実施された。跡津川断層系の茂住祐延断層を横断して掘削された観測坑における、トラップ波観測を目的としたものであったが、同時に跡津川断層系の地下構造調査をも視野に入れたものであった（安藤, 1998; 伊藤（久）・他, 1998）。跡津川断層系の周囲は山地が陰しく観測が困難であるため、以前は観測が不十分であったが、上記の計画によって定常地震観測点が増設され、より精密な震源が決定されるようになってきた（伊藤・他, 1998）。

これまでには、この地域周辺における地下構造調査は、Watanabe and Fukui (1980), 伊藤・他 (1993), 酒

井・他 (1992, 1993, 1996) などがあるが、跡津川断層に沿う測線での観測例はない。さらに震源決定の精度を上げ、跡津川断層における地震活動の詳細を知るためには、地下構造調査が不可欠である。跡津川断層の一部はクリープしていることも分かっており（国土地理院, 1991）、クリープ地域とその他の地域の相違も大地震発生の解明のための基礎として重要である。これらの目的のために、地殻構造の調査は有効であると考えられる。

われわれは、富山大および信州大と共同で、茂住・祐延断層および跡津川断層に沿って、茂住峠付近の発破点から南西に延びる全長約40kmの臨時観測点を展開し、この爆破地震動を観測することによって、地殻構造調査を実施した。本報告では、それらの概要と解析結果を報告する。

Table 1. Shot times, locations and charge size of four explosions.

Shot	Date	Time (h:m:s)	Latitude (° ' " N)			Longitude (° ' " E)			Height (m)	Charge (kg)
S-1	Oct.24,2000	22:02:01.163	36	26	57.81	137	19	20.28	1045	12.5
S-2	Oct.24,2000	22:22:02.380	36	26	54.17	137	19	27.00	1024	12.5
S-3	Oct.24,2000	22:12:01.072	36	27	27.81	137	20	17.70	929	100.0
S-4	Oct.24,2000	22:32:00.985	36	27	19.11	137	20	13.23	940	25.0

2. 観 測

発破の概要は、Table1 のとおりであり、発破地点を Fig.1 に示す。これらはトラップ波観測を目的としており、断層の東端で、断層上とやや離れた地点で、それぞれ2発ずつ実施された。Shot1 と Shot3 が約 1.6km 離れており、Shot3 がもっとも東に位置している。薬量は Shot3 が 100kg で、他は 12 または 24kg となっており、Shot3 は構造調査のために薬量を増したものである。

Fig.1 は観測が行われた跡津川断層付近の概略図であり、発破点とともに観測点を示す。測線を茂住・祐延断層および跡津川断層に沿って設置し、上記4発の発破を47点の観測点で記録した。全長約40kmで観測点間隔は約800mである。地形が非常に険しいために、観測計器の設置場所が限定され、Fig.1 に示すようなも

のになった。

地震計は全観測点とも固有周波数 2Hz の上下動 (L22D) を用い、データロガー (LS8000SH) によって 200Hz サンプルングで収録を行った。タイマー観測を実施し、予備の時間帯を含めて8回のウィンドウを開いて、それぞれ3分間のデータを記録した。時刻の較正には GPS を利用し、すべての観測点で時刻の誤差がサンプルング周期 (0.005 秒) 以下であることを確認している。観測点の位置は2万5千分の1の地図上で求めた。Table2 には観測点の位置、標高および設置場所の概況として、岩に固定 (rock)、コンクリートの基盤上に固定 (concrete)、土中埋設 (soil) の別を示してある。データは回収後、ワークステーションに転送し、時刻補正の後、WIN フォーマットに変換して読み取りを行った。また、波形は MATLAB を用いて処理した。

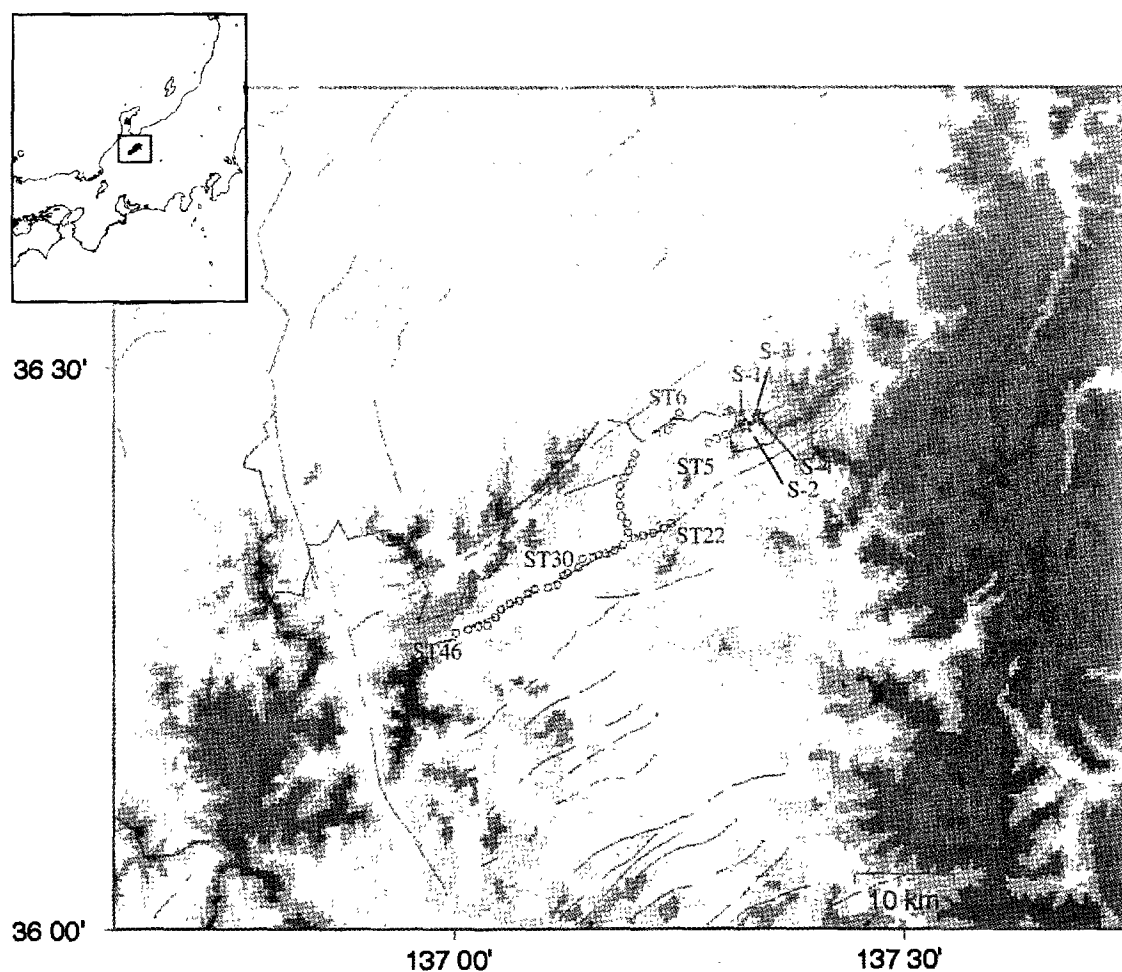


Fig. 1. Locations of shots (☆) and temporary observation stations (○) plotted in topographic map. Thin lines indicate faults and thick ones prefecture borders.

Table 2. Locations of observation stations and their site condition.

Station		Latitude (° ' " N)			Longitude (° ' " E)			Height (m)	Site situation
1	ST01	137	19	07.40	36	26	59.80	1045	rock
2	ST02	137	18	43.90	36	26	44.60	860	rock
3	ST03	137	18	06.00	36	26	27.60	605	soil
4	ST04	137	17	29.50	36	26	14.40	550	concrete
5	ST05	137	16	55.30	36	26	01.00	495	rock
6	ST06	137	14	57.60	36	27	34.40	250	concrete
7	ST07	137	14	35.00	36	27	07.30	250	rock
8	ST08	137	14	13.90	36	26	41.00	235	concrete
9	ST09	137	13	30.00	36	26	27.90	250	soil
10	ST10	137	13	13.10	36	26	09.70	240	soil
11	ST11	137	12	48.60	36	25	43.30	270	soil
12	ST12	137	12	02.30	36	25	23.60	320	soil
13	ST13	137	11	49.50	36	24	53.70	320	soil
14	ST14	137	11	36.30	36	24	30.30	320	concrete
15	ST15	137	11	19.00	36	24	08.50	320	concrete
16	ST16	137	11	00.50	36	23	41.10	310	concrete
17	ST17	137	11	02.40	36	23	14.20	340	concrete
18	ST18	137	11	02.20	36	22	36.10	330	concrete
19	ST19	137	11	07.50	36	22	04.50	320	concrete
20	ST20	137	11	29.00	36	21	41.30	380	concrete
21	ST21	137	11	34.90	36	21	11.30	380	concrete
22	ST22	137	14	27.20	36	21	40.20	1020	soil
23	ST23	137	13	58.90	36	21	25.20	960	soil
24	ST24	137	13	14.20	36	21	12.00	800	rock
25	ST25	137	12	35.30	36	21	01.40	630	rock
26	ST26	137	11	59.40	36	20	53.70	510	concrete
27	ST27	137	11	10.40	36	20	29.90	410	soil
28	ST28	137	10	40.80	36	20	15.10	400	concrete
29	ST29	137	10	04.90	36	20	04.00	420	soil
30	ST30	137	09	12.70	36	19	52.00	410	rock
31	ST31	137	08	32.70	36	19	46.80	510	concrete
32	ST32	137	08	16.20	36	19	21.00	425	concrete
33	ST33	137	07	32.10	36	19	03.00	620	concrete
34	ST34	137	07	17.20	36	18	55.40	580	concrete
35	ST35	137	06	53.20	36	18	27.10	590	soil
36	ST36	137	06	17.60	36	18	18.10	510	soil
37	ST37	137	05	23.90	36	18	13.20	470	concrete
38	ST38	137	04	55.10	36	17	58.00	490	concrete
39	ST39	137	04	22.10	36	17	33.40	500	soil
40	ST40	137	03	43.50	36	17	24.30	500	concrete
41	ST41	137	03	07.80	36	17	06.50	510	soil
42	ST42	137	02	43.40	36	16	41.20	540	concrete
43	ST43	137	02	10.30	36	16	16.10	540	soil
44	ST44	137	01	37.30	36	16	11.70	560	concrete
45	ST45	137	00	57.00	36	16	01.10	700	rock
46	ST46	137	00	07.10	36	15	50.80	890	concrete
47	ST50	137	09	35.40	36	20	00.60	440	concrete

3. 観測結果

Figs.2-1~4 に、得られたデータの波形を示す。横軸は発破点からの距離で、縦軸は速度 6km/s で reduce した走時である。発破の行われた時刻が午後 10~11 時であったので、道路沿いでは車のノイズなどによってシグナルが不明瞭になってしまったところもある。しかし、薬量の少ない Shot2 でも、7 割以上の点で初動が明瞭に観測された。薬量の大きい Shot3 では、初動だけでなく、反射波だと思われる後続波も観測することができた。

Table3 に、初動の読み取り結果を示す。ノイズレベルおよび相の明瞭度を考慮して、 ± 0.01 秒、 ± 0.03 秒の精度を目安に A、B のランクをつけた。これより悪いものはランク C とし、その他に初動が不明瞭だが、その時刻に波動が到達していることが確実なものをランク D とした。これらの読み取り値をプロットした走時図を Fig.3 に示す。Fig.2 と同様に、横軸が発破点からの距離、縦軸が速度 6km/s で reduce した走時である。また、丸の大きさは読み取りの誤差に対応している。

Fig.3 に見られるように、Shot1 および Shot2 では、発破点と観測点が近距離にあるので、距離 5km くらいまで表層の直達波が観測されている。その見かけ速度は、4.5km/s である。また、基盤構造を伝播する波の見かけ速度は、すべてのショットを平均すると約 5.8km/s である。

4. 表層～基盤の構造

得られた初動走時と表層および基盤の見かけ速度を用いて、次に示す式から観測点のタイムタムを求め、地下構造を推定した。

$$na_i + \sum_{j=1}^n b_j = \sum_{j=1}^n s_{ij}$$

$$mb_j + \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{i=1}^m s_{ij}$$

ここで、 a_i と b_j はそれぞれ発破点および観測点下のタイムタム、 n および m はそれぞれ発破点と観測点の数である。 $s_{ij}=t_{ij}-\Delta_{ij}/v_2$ で、 t_{ij} は発破 i と観測点 j の間の走時、 Δ_{ij} は両者の震央距離、 v_2 は基盤の速度である。

今回の観測では発破点が偏っており、また、逆側線がないので基盤の速度が決まらないため、次の 3 通りの仮定をして、観測点のタイムタムを求め、表層の厚さを比較した。すなわち、 $v_2=5.8, 5.9$ および 6.0km/s のとき、それぞれ、 $\Sigma a=0.044, 0.041$ および 0.039 である。仮定した Σa の値は、近接した Shot1 とそれに最も近い観測点のタイムタムが等しくなると考えて推定したものである。こうして

得られたタイムタムを、表層の速度を 4.5km/s として深さに変換し、観測点の標高とともにプロットしたのが Fig.4 である。表層の速度は、Shot1 および Shot2 の発破点近くの走時から求めた値である。基盤の深さは速度が $5.8, 5.9$ および 6.0km/s の場合を仮定してプロットしている。また、非常に険しい山岳地形であるために測線が曲がっているが、そのため測線が断層を横切っている。断層付近での表層の変化を調べるために、構造・地形のデータを測線の端と端をつなぐ直線に投影して構造を調べた。特に、測線が分岐している部分では、観測点を南北に分けて、それぞれを別のグラフにプロットした。これらの結果、測線が分岐している部分 A と B で特によく分かるが、表層の厚さは地形図から予想される堆積層の厚さに対応した深さを示している。断層を測線が横切っている場所においても、その両側で走時の違いは 0.1s 程度である。この違いが断層の両側の表層の深さの差であるとしても、その差は 1km 程度となる。これ以上に顕著な断層は検出されなかった。

5. 反射波

Shot3 の記録 (Fig.2-3) に見られる後続波は、他の同様な人工地震探査の結果などを考慮すると、地殻中・下部からの反射波である可能性が高い。これらの後続波を反射波と考えてより詳しく調べるために、観測記録に種々のフィルターをかけて、多くの観測点で共通に見られる波を検出した。その結果、 10Hz および 18Hz のローパスフィルターをかけると、Fig.5 および Fig.6 に示すような波が見られることが分かった。Fig.5 および Fig.6 は、地殻の平均的な弾性波速度を 6km/s としてノーナルムーブアウト (NMO) 補正を行ったものである。NMO 補正によって、オフセット距離のある反射波の走時を、オフセットゼロの走時に変換することで、反射面の深さおよび形状を推定することが容易になる。

NMO 補正によって後続波の解析を行う際には、振幅の大きな初動がノイズになってしまうため、初動の振幅を小さくする処理を行った。実際は、初動の読み取り値までが 0 、立ち上がりから 1 秒は $\{\sin(\pi t - \pi/2) + 1\}/2$ の半周期分、 1 秒後以降が 1 であるような関数をかけている。ただし、反射波の振幅は大きく明瞭であるのでゲイン補正は行っていない。 10Hz のローパスフィルターをかけた NMO 図 (Fig.5) には、往復走時 $7\sim 8$ 秒に反射波がみられ、 $9\sim 10$ 秒までコーダが続いている。 18Hz のローパスフィルターをかけた NMO 図 (Fig.6) には、往復走時 $4\sim 5$ 秒に顕著な反射波があることが分かる。これらの結果によると、全体的に下部地殻は reflective であり、深さ $15, 25\text{km}$ 付近に顕著な反射面が存在しているようである。

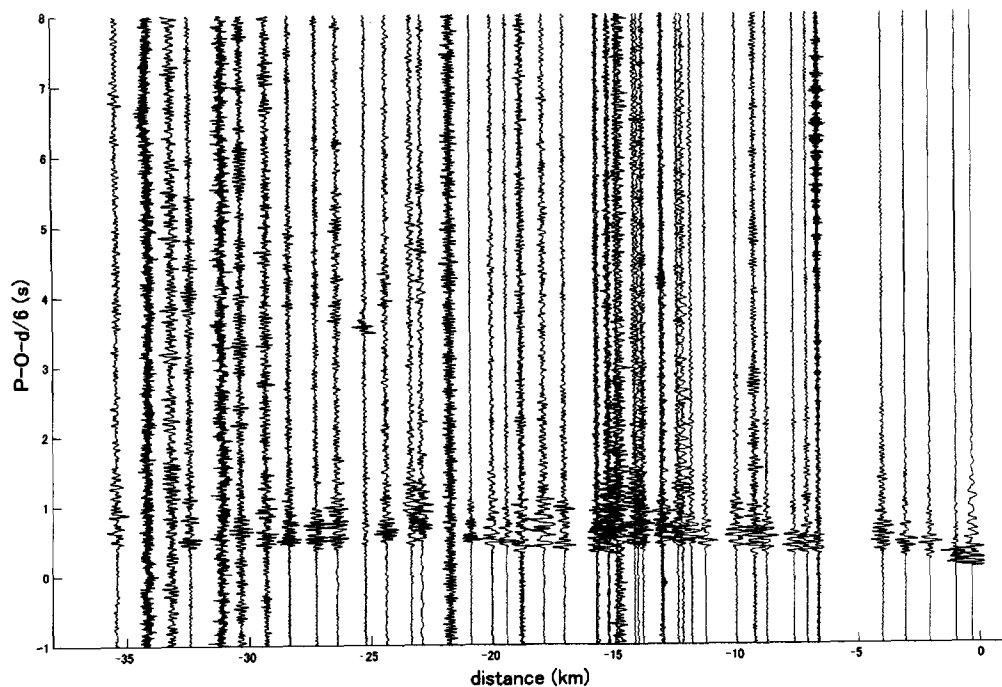


Fig. 2-1. Record sections of Shot1. Time axis is reduced by a velocity of 6.0km/s.

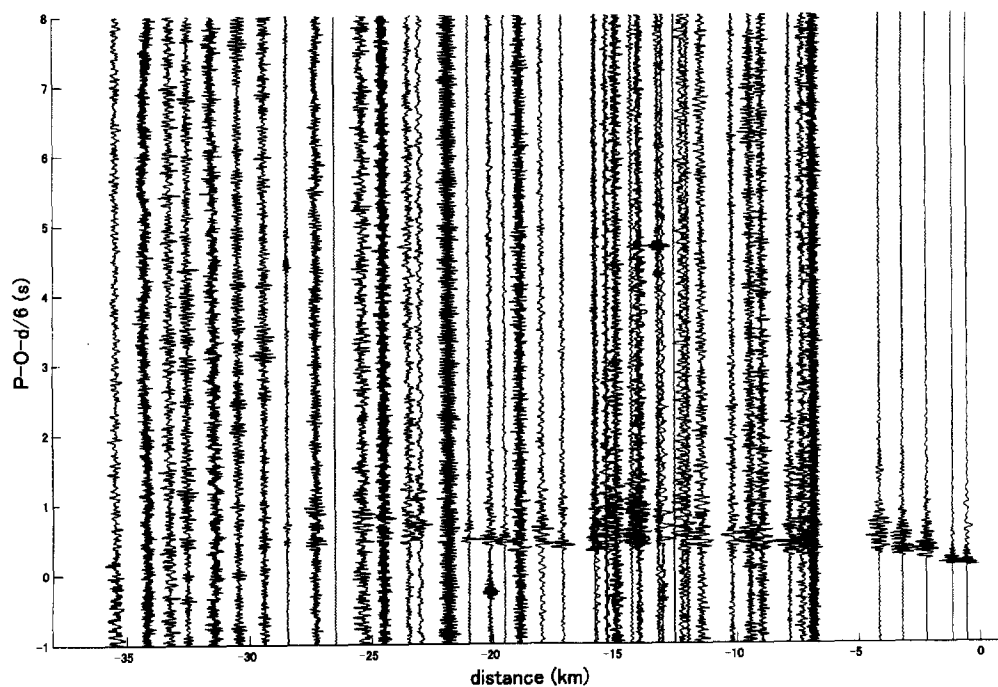


Fig. 2-2. Record sections of Shot2. Time axis is reduced by a velocity of 6.0km/s.

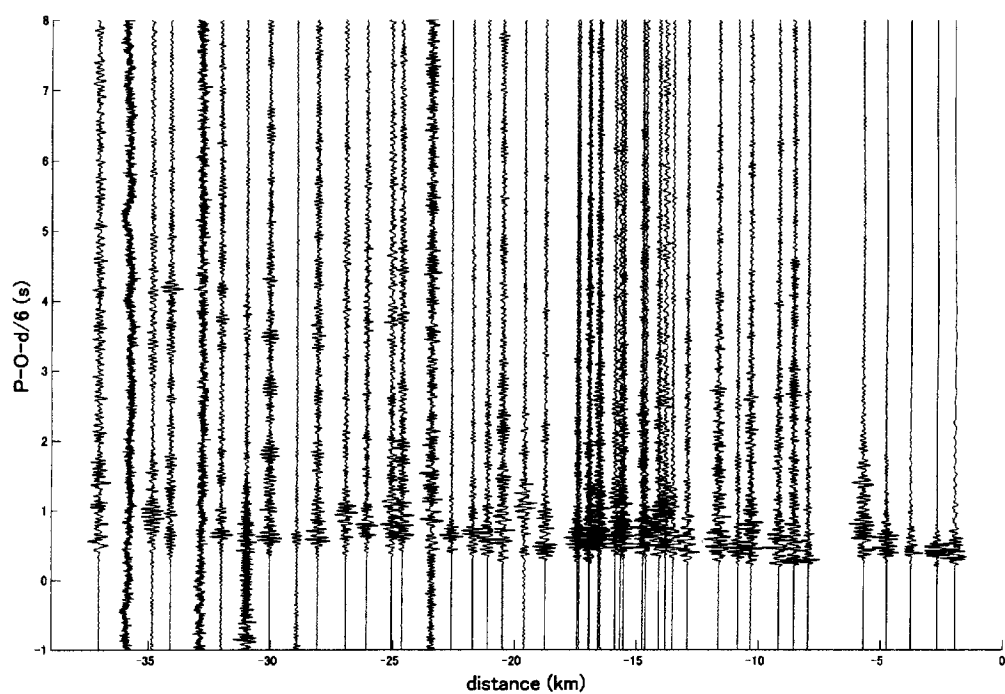


Fig. 2-3. Record sections of Shot3. Time axis is reduced by a velocity of 6.0km/s.

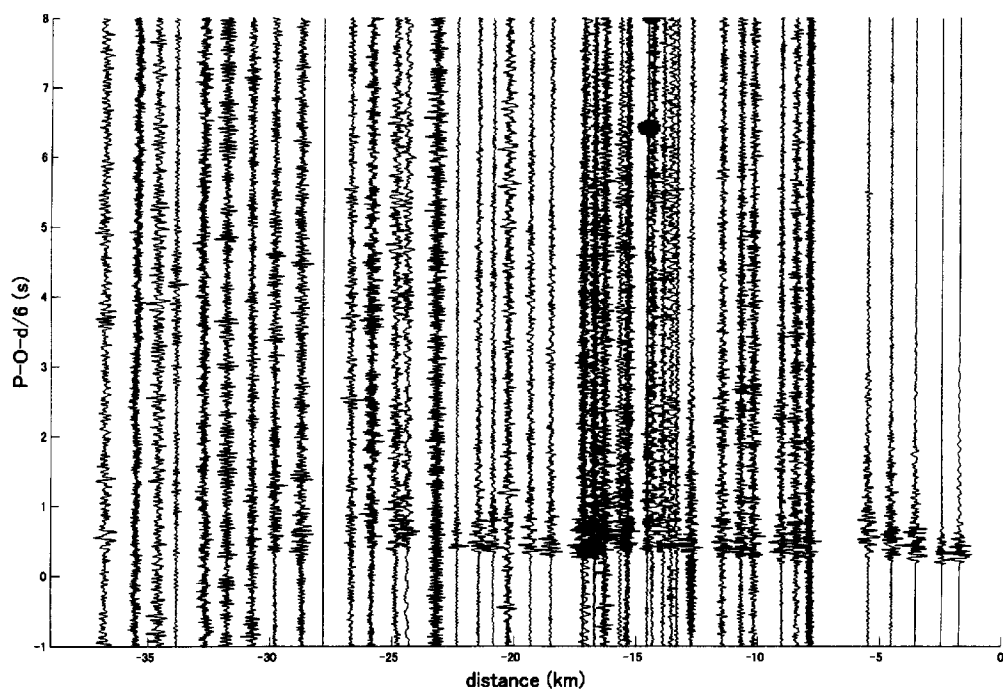


Fig. 2-4. Record sections of Shot4. Time axis is reduced by a velocity of 6.0km/s.

Table 3. Travel time data. T-O and RT indicate travel times and their reduced ones by a velocity of 6km/s, respectively. A, B and C indicate quality of readings as “very good”, “good” and “fairly good”, respectively. D indicates that a signal, which may not be a first arrival, can be recognized at least at the time.

Shot 1					Shot 2				
Station	Distance (km)	Azimuth (°)	T-O (s)	RT (s)	Distance (km)	Azimuth (°)	T-O (s)	RT (s)	
1 ST01	0.327	280.9	0.125	A 0.071	0.541	288.6	0.169	A 0.079	
2 ST02	0.993	245.8	0.265	A 0.100	1.137	254.9	0.293	A 0.104	
3 ST03	2.071	243.3	0.524	A 0.179	2.200	248.1	0.545	A 0.178	
4 ST04	3.066	244.1	0.730	A 0.219	3.195	247.4	0.738	A 0.206	
5 ST05	4.013	244.1	0.944	C 0.275	4.141	246.7	0.940	B 0.250	
6 ST06	6.637	279.8	1.386	B 0.280	6.845	280.4	1.366	D 0.225	
7 ST07	7.109	272.4	1.444	A 0.259	7.306	273.2	1.453	D 0.235	
8 ST08	7.647	266.1	1.533	A 0.259	7.831	267.0	1.538	B 0.233	
9 ST09	8.772	264.0	1.763	B 0.301	8.952	264.8	1.787	C 0.295	
10 ST10	9.264	260.8	1.837	B 0.293	9.436	261.6	1.961	D 0.388	
11 ST11	10.021	256.8	2.012	B 0.342	10.184	257.6	1.849	D 0.152	
12 ST12	11.288	255.1	2.233	B 0.352	11.446	255.9	2.233	D 0.325	
13 ST13	11.861	251.2	2.369	B 0.392	12.008	252.0	2.440	C 0.439	
14 ST14	12.418	248.5	2.493	B 0.423	12.557	249.3	2.534	D 0.441	
15 ST15	13.074	246.5	2.678	C 0.499	13.207	247.3	2.575	D 0.374	
16 ST16	13.847	244.0	2.640	C 0.332	13.972	244.8	2.688	C 0.359	
17 ST17	14.188	240.9	2.731	B 0.366	14.303	241.7	2.737	C 0.353	
18 ST18	14.799	237.0			14.901	237.7			
19 ST19	15.246	233.6	2.868	A 0.327	15.336	234.4	2.856	B 0.300	
20 ST20	15.265	230.3	2.843	A 0.299	15.343	231.1	2.830	B 0.273	
21 ST21	15.764	227.4	2.908	A 0.281	15.831	228.1	2.915	B 0.277	
22 ST22	12.212	216.7	2.414	C 0.379	12.240	217.8	2.503	D 0.463	
23 ST23	13.008	218.0	2.558	B 0.390	13.041	219.0	2.562	C 0.389	
24 ST24	14.029	220.6	2.727	A 0.389	14.071	221.4	2.749	B 0.404	
25 ST25	14.916	222.6	2.941	C 0.455	14.966	223.4	3.037	D 0.543	
26 ST26	15.704	224.4	2.944	B 0.327	15.760	225.2	2.950	C 0.323	
27 ST27	17.086	225.6	3.174	A 0.326	17.147	226.3	3.178	B 0.320	
28 ST28	17.933	226.2	3.319	A 0.330	17.996	226.9	3.367	C 0.368	
29 ST29	18.820	227.3	3.444	C 0.307	18.887	228.0	3.450	C 0.302	
30 ST30	20.037	229.1	3.758	B 0.419	20.110	229.7	3.701	C 0.349	
31 ST31	20.902	230.5	3.920	B 0.436	20.980	231.1	3.902	B 0.405	
32 ST32	21.728	229.6			21.803	230.2			
33 ST33	22.926	230.3	4.304	B 0.483	23.004	230.9	4.314	C 0.480	
34 ST34	23.362	230.5	4.300	B 0.406	23.440	231.0	4.341	C 0.434	
35 ST35	24.381	229.8	4.541	B 0.478	24.457	230.3			
36 ST36	25.240	230.6	4.445	D 0.238	25.319	231.1			
37 ST37	26.381	232.2	4.778	B 0.381	26.466	232.6			
38 ST38	27.236	232.3	4.891	C 0.352	27.321	232.8	4.901	D 0.347	
39 ST39	28.351	232.2	5.152	B 0.427	28.435	232.6	5.146	C 0.407	
40 ST40	29.285	232.9	5.272	D 0.391	29.372	233.3			
41 ST41	30.327	233.1	5.588	D 0.534	30.414	233.4			
42 ST42	31.283	232.6			31.369	233.0			
43 ST43	32.409	232.4	5.778	B 0.377	32.495	232.8			
44 ST44	33.147	233.1			33.235	233.4			
45 ST45	34.148	233.7			34.238	234.0			
46 ST46	35.342	234.4	6.337	C 0.447	35.434	234.8			
47 ST50	19.436	228.6	3.625	B 0.386	19.508	229.2	3.622	B 0.371	

(to be continued)

Table 3. (continued)

Shot 3						Shot 4					
Station	Distance (km)	Azimuth (°)	T-O (s)	RT (s)		Distance (km)	Azimuth (°)	T-O (s)	RT (s)		
1 ST01	1.951	243.8	0.538	A	0.213	1.743	250.0	0.474	A	0.184	
2 ST02	2.688	240.3	0.621	A	0.173	2.464	244.4	0.575	A	0.164	
3 ST03	3.767	240.5	0.831	A	0.203	3.542	243.4	0.783	A	0.193	
4 ST04	4.759	241.6	1.006	A	0.213	4.537	243.9	0.949	B	0.193	
5 ST05	5.706	242.0	1.196	A	0.245	5.484	244.0	1.182	B	0.268	
6 ST06	7.971	271.5	1.554	A	0.226	7.871	273.4	1.524	C	0.212	
7 ST07	8.555	265.8	1.626	A	0.200	8.428	267.5	1.604	C	0.199	
8 ST08	9.172	261.0	1.713	A	0.184	9.022	262.5	1.685	B	0.181	
9 ST09	10.318	259.7	1.927	B	0.207	10.163	261.1	1.939	C	0.245	
10 ST10	10.843	257.2	2.018	A	0.211	10.677	258.4	2.040	B	0.261	
11 ST11	11.638	253.9	2.176	A	0.236	11.458	255.1	2.144	C	0.234	
12 ST12	12.917	252.8	2.374	A	0.221	12.732	253.8	2.434	C	0.312	
13 ST13	13.517	249.4	2.542	A	0.289	13.320	250.3	2.601	C	0.381	
14 ST14	14.090	247.2	2.656	A	0.308	13.884	248.0	2.653	C	0.339	
15 ST15	14.756	245.4	2.795	B	0.336	14.544	246.2	2.721	B	0.297	
16 ST16	15.537	243.3	2.858	B	0.269	15.318	244.0	2.825	C	0.272	
17 ST17	15.887	240.5	2.956	A	0.308	15.658	241.2	2.914	C	0.304	
18 ST18	16.501	237.0	3.173	C	0.423	16.262	237.6				
19 ST19	16.945	234.0	3.080	A	0.256	16.698	234.5	3.045	B	0.262	
20 ST20	16.956	231.0	3.060	B	0.234	16.701	231.4	3.014	A	0.231	
21 ST21	17.444	228.3	3.134	A	0.227	17.182	228.7	3.094	A	0.230	
22 ST22	13.821	219.2	2.579	B	0.276	13.542	219.5	2.664	D	0.407	
23 ST23	14.627	220.2	2.695	B	0.257	14.351	220.5	2.754	C	0.362	
24 ST24	15.668	222.3	2.903	A	0.292	15.395	222.7	2.925	C	0.359	
25 ST25	16.569	224.0	3.070	B	0.309	16.299	224.4	3.171	C	0.455	
26 ST26	17.368	225.6	3.164	A	0.269	17.101	226.0	3.169	D	0.319	
27 ST27	18.757	226.6	3.393	A	0.267	18.492	227.0	3.357	B	0.275	
28 ST28	19.607	227.1	3.582	C	0.314	19.343	227.5	3.536	B	0.312	
29 ST29	20.499	228.1	3.646	B	0.230	20.237	228.5				
30 ST30	21.724	229.7	3.928	A	0.307	21.465	230.1	3.901	B	0.324	
31 ST31	22.593	231.0	4.134	B	0.369	22.338	231.4	4.091	B	0.368	
32 ST32	23.417	230.2	4.308	C	0.405	23.159	230.5				
33 ST33	24.617	230.8	4.500	A	0.397	24.362	231.1	4.411	C	0.351	
34 ST34	25.054	230.9	4.513	A	0.337	24.798	231.2	4.494	C	0.361	
35 ST35	26.070	230.3	4.734	B	0.389	25.813	230.6	4.696	D	0.394	
36 ST36	26.932	231.0	4.831	B	0.342	26.677	231.3				
37 ST37	28.078	232.5	4.994	B	0.314	27.826	232.8	5.151	D	0.513	
38 ST38	28.932	232.6	5.215	C	0.393	28.681	232.9	5.071	D	0.291	
39 ST39	30.047	232.4	5.286	B	0.278	29.795	232.7	5.293	B	0.327	
40 ST40	30.983	233.1	5.572	D	0.408	30.733	233.4				
41 ST41	32.025	233.3	5.919	C	0.582	31.775	233.5				
42 ST42	32.980	232.8				32.729	233.1				
43 ST43	34.106	232.6	5.987	B	0.303	33.855	232.9				
44 ST44	34.845	233.3	6.204	C	0.397	34.596	233.5				
45 ST45	35.847	233.8				35.599	234.1				
46 ST46	37.042	234.6	6.563	B	0.389	36.796	234.8	6.472	D	0.339	
47 ST50	21.121	229.3	3.816	B	0.296	20.862	229.6	3.792	B	0.315	

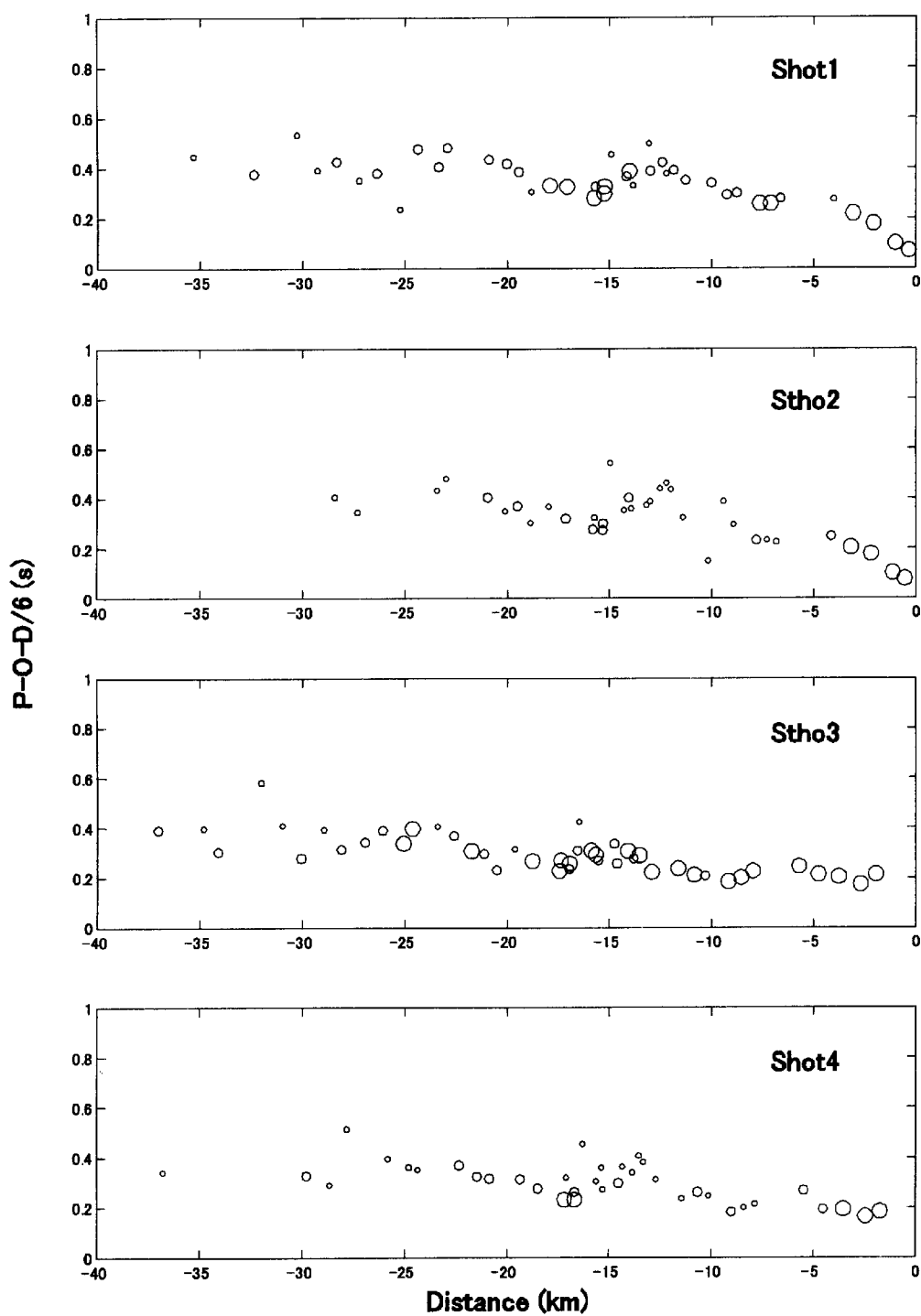


Fig. 3. Travel times of four explosions plotted against the distance from each shot. Time axes are reduced by a velocity of 6.0 km/s. Accuracy of readings is indicated by the size of a circle; A: large, B: middle, C: small.

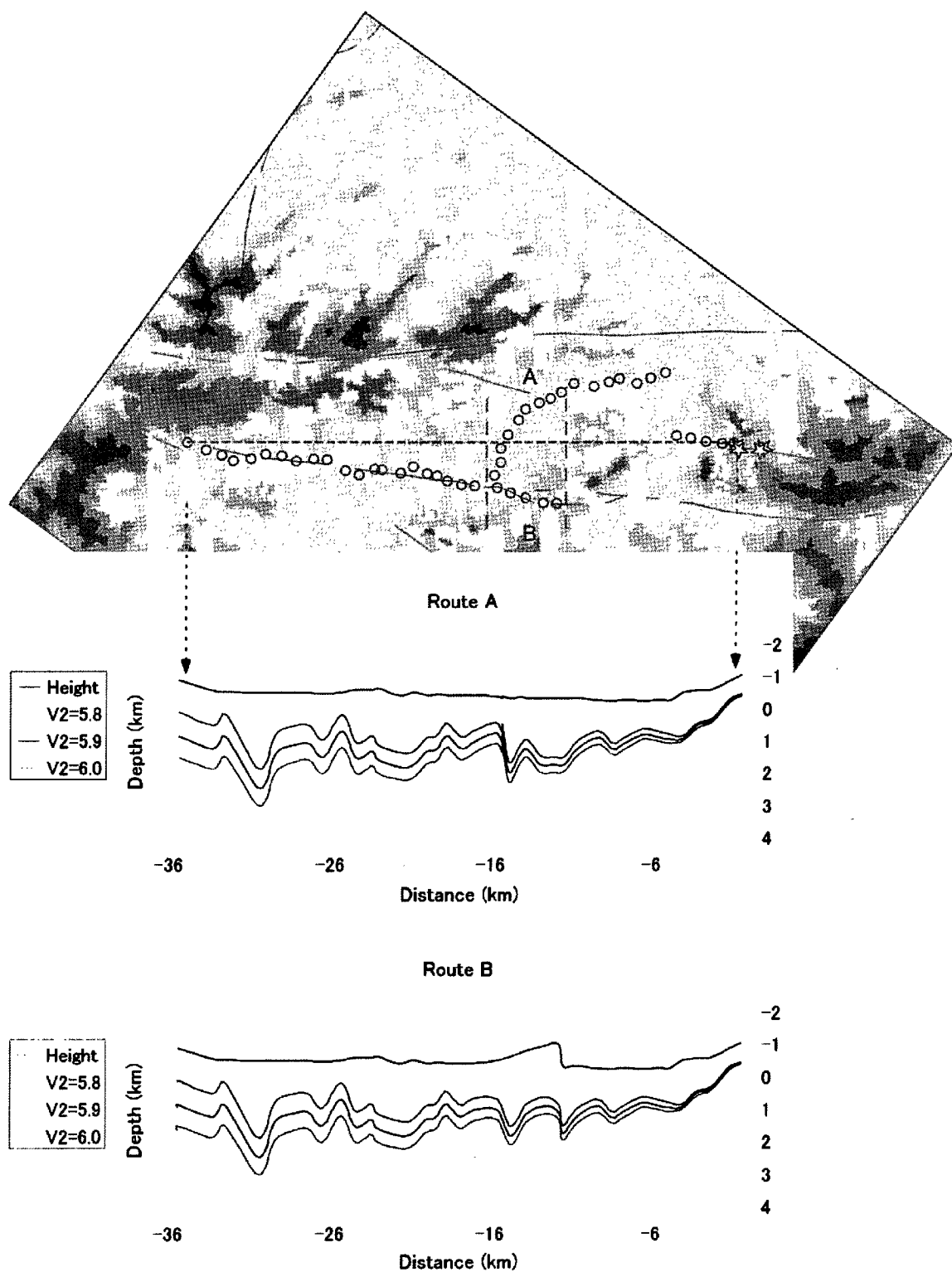


Fig. 4. Locations of shots and stations and depth of a surface layer along the measuring line derived from four explosions. Depths are calculated from the time-terms assuming the velocity of the surface layer 4.5 km/s and the second layer 5.8, 5.9 and 6.0 km/s. Results of two branches, route A and B of the measuring line are plotted in different graphs.

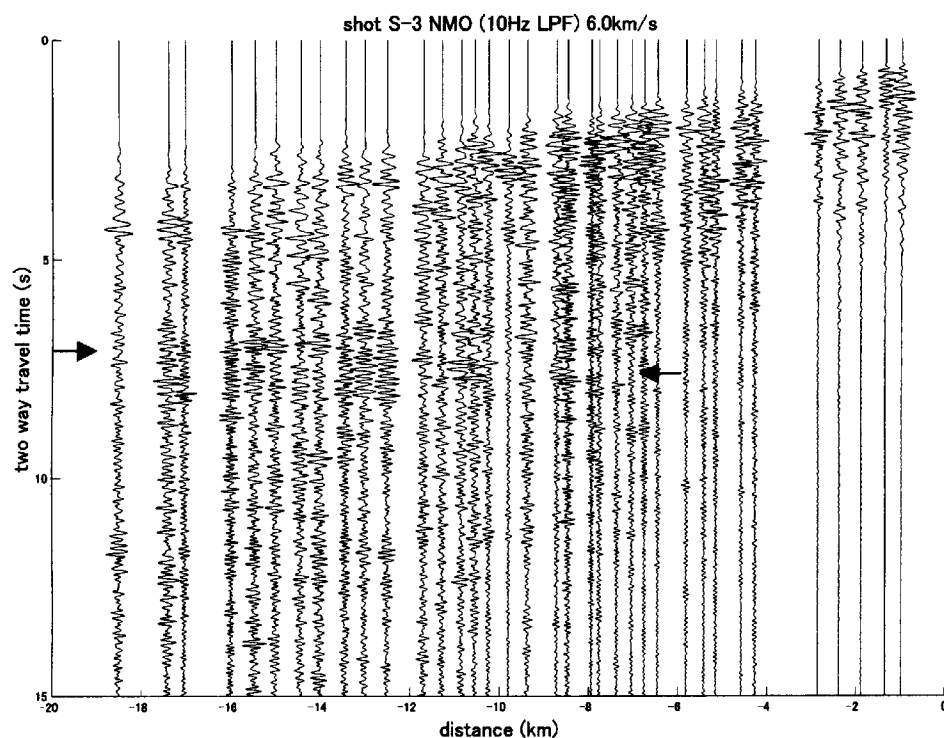


Fig. 5. Normal-move-out (NMO) corrected record section for shot 3. 10Hz low pass filter is applied before NMO correction. Reflected waves are seen at 7-8s of two way travel time.

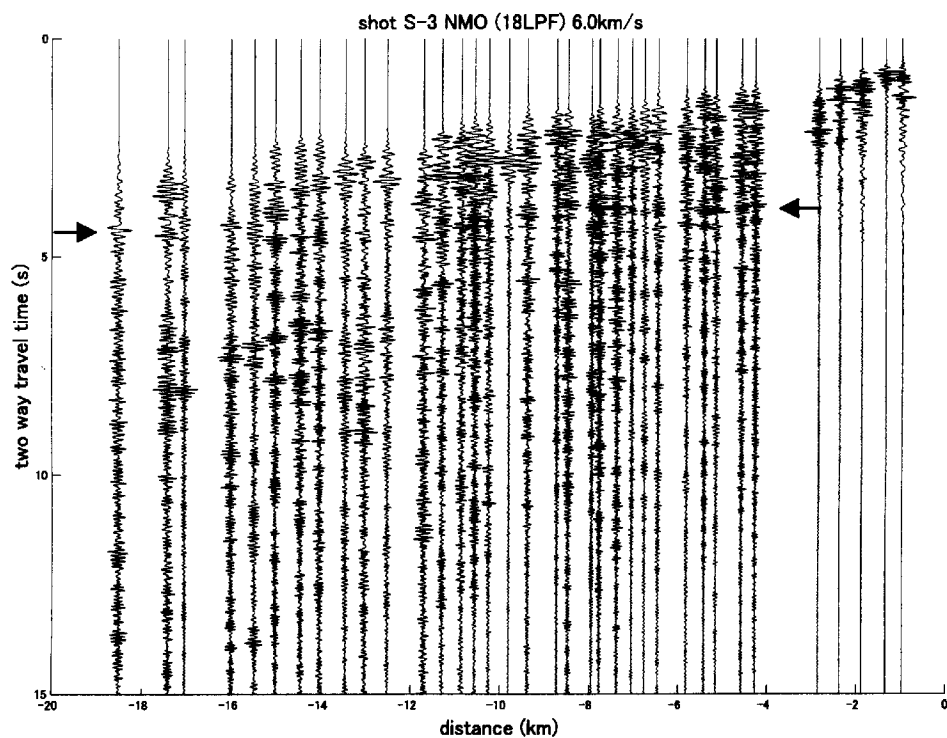


Fig. 6. Normal-move-out (NMO) corrected record section for shot 3. 18Hz low pass filter is applied before NMO. Reflected waves are seen at 4-5s of two way travel time.

さらに、これらの反射面を、この地域における地震分布の断面図に重ねてみると (Fig.7), 浅い反射面が概略的に地震発生層の下限のやや下方に位置していることが分かる。このことは、反射面の成因を考える際の、有力な手がかりとなると思われる。これは火山付近の中部地殻反射面に見られる性質と同じである (Matsumoto and Hasegawa, 1996, 1997)。

6. 考 察

今回の観測では逆測線がないために、基盤の速度を決めることはできなかった。爆破地震動研究グループによって行われた、金沢-吾妻測線の人工地震による構造探査の解析結果 (酒井・他, 1993) では、基盤の速度はほぼ全域で 5.9km/s と求められている。跡津川断層付近の表層の速度については、伊藤・他 (1993) があるが、その結果によると基盤速度は 5.9-6.0km/s と求められている。三雲・他 (1989) や、根岸 (1996) による自然地震を用いた 3 次元速度構造解析では、跡津川断層周辺の地震波速度が 5.8-6.0km/s 程度に見積もられている。これらのことから、Fig.4 に示すように、今回得られた表層の厚さについて ± 1 km 程度の変化は議論できないであろう。また、NMO 補正 (Fig.5 および Fig.6) を行う際にも、地殻の平均的な速度として 6km/s を仮定しているため、反射面の深さについても浅い反射面で $\pm 1-2$ km, 深い反射面で $\pm 3-4$ km 程度の誤差はあると考えられる。今回の実験の逆測線でデータを得ることができれば地殻浅部の、さらに大規模な人工地震探査が行われれば地殻下部までの精度の高い速度構造を得ることができ、反射面の深さの精度を上げることができるであろう。

Fig.7 に見られるように、地震波反射面が地震発生層下限のやや下方に位置していることは、主に火山付近で見られる自然地震の S 波反射面と同じである (Matsumoto and Hasegawa, 1996, 1997)。火山地域で見られる反射面のもう一つの特徴は、反射面および地震発生層の下限ともに火山の中心に向かって浅くなっていることである。このような地震発生層下限と反射面の深さ変化が調和的であるような結果は、他の地域でも見られるようである (Nishiwaki et al., 1989; Inamori et al., 1992)。今回観測を行った測線に沿う方向の地震分布断面においても、地震発生層の下限と (Fig.7), 反射面の深さ変化 (Fig.6) もほぼ平行である。地震発生層については、その下限が脆性-塑性境界に関連するといった議論があるが (Ito, 1999), 反射面の性質についてより多くの知見を得ることができれば、この議論にも何らかの拘束を与えられると考えられる。そのためにも、反射面の深さ精度の向上は必須であり、前述の

ように詳細な速度構造を得るための観測が望まれる。

Fig.6 および Fig.7 では、それぞれ周波数帯域の異なるフィルターをかけることで、異なる深さからの反射波と考えられる波群を検出している。実際、Fig.6 に見られるものは Fig.7 で見られるものよりもコードを長く引いていることが分かる。このことは、他の人工地震探査でも見出されているような、reflective な下部地殻が (吉井, 1990), この地域にも存在していることを示している。また、反射面そのものの理解のために、Fig.6 の反射波が Fig.7 の反射波に比べて低周波であるのは、より深いところからの波であるために高周波が減衰しているだけの現象であるのか、あるいは、それぞれの反射体の特性によるものなのかを調べることは重要である。今までに行われた人工地震探査でも、地殻中・下部からの反射波と考えられる波群が検出された例はあるが (例えば、西南日本地殻構造研究グループ, 1992 など), それらについて Matsumoto and Hasegawa (1996) が行っているような周波数解析から、反射面の特性について調べ、それぞれの深さ分布を比較することなどが考えられる。

7. おわりに

跡津川断層付近で行われた人工地震を観測することにより、この地域での基盤構造を得ることができた。得られた表層の深さは、概略的に堆積層をあらわしているものと考えられ、顕著に断層に起因するような構造は見られない。また、反射波について NMO による解析の結果、Reflective な下部地殻の存在が認められ、特に深さ 15, 25km 付近に顕著な反射面が見られることがわかった。深さ 15km 付近に見られる反射面は、地震発生層下限のやや下方に位置している。これら 2 つの反射面の違いは興味深いところであり、これまでに得られている地殻中・下部からの反射波の周波数特性と、推定される反射面の深さについての関係を調べることは有用であろう。

謝 辞

トラップ波調査グループの伊藤久男, 西上欽也, 水野高志の 3 氏には、人工地震の利用を快諾していただき、また、爆破点位置および爆破時刻を使用させていただきました。陸域地下構造フロンティア, 核燃料サイクル研究機構, 三井コンサルタント (MINDECO) の関係者の方には、この実験に際しいろいろお世話になりました。下記の富山大学, 信州大学の学生の方々には観測に参加していただきました。ここに記して謝意を表します。

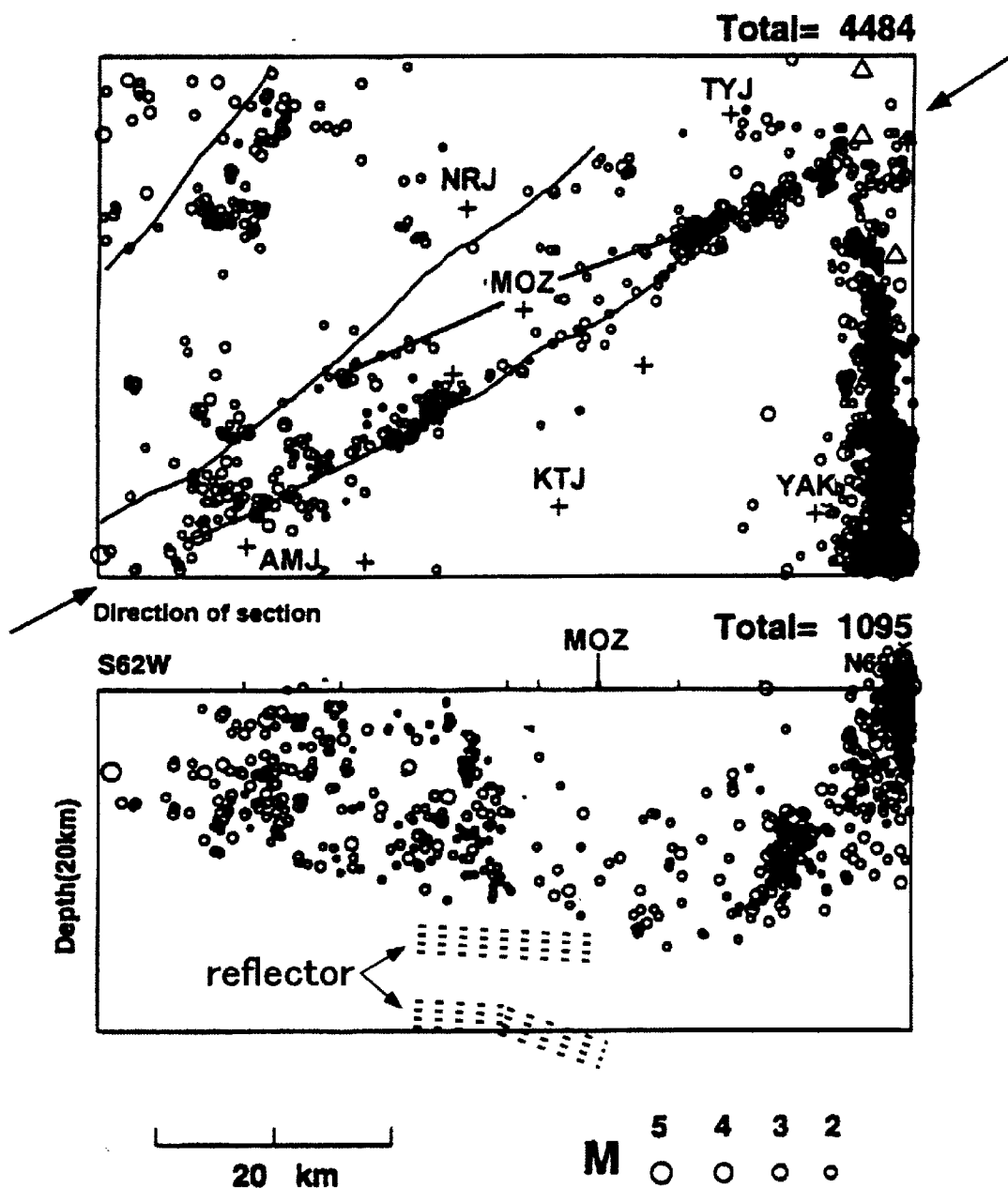


Fig. 7. Distribution of earthquakes near the Atotsugawa fault system and reflectors derived in this paper.

なお、この実験の参加者は、次のとおりである。所属は観測実施当時のものである。

企画：伊藤 潔・和田博夫・松村一男・角野由夫・藤澤洋輔・吉井弘治

観測点予備調査：和田博夫

観測参加者：伊藤 潔・和田博夫・松村一男・吉

井弘治・藤澤洋輔（以上、京大防災研）、島田祐輝・藤井健一・安藤教宣・上野友岳・加藤昌孝・本田幸子（以上、信州大学理学部）、位寄弘美（富山大学理学部）

記録整理・解析：吉井弘治・伊藤 潔

本報告執筆：吉井弘治・伊藤 潔

参考文献

- 安藤雅孝 (1998): 活断層帯での地殻活動研究 (地震フロンティア研究) 概要, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.127-132.
- 伊藤久男・西上欽也・桑原保人 (1998): トラップ波から断層のつながりを追う, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.154-159.
- 伊藤 潔・川崎一郎・古本宗充・磯部英雄・和田博夫・西 祐司・永井直昭 (1993): 人工地震による中部日本北部の地殻構造調査 (富山ー上宝測線), 京都大学防災研究所年報, 第 36 号, B-1, pp.325-338.
- 伊藤 潔・和田博夫・和田一成 (1998): 地震活動で断層の動きを追う, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.136-141.
- 国土地理院 (1991): 地震予知連絡会会報, 45, pp.422-424.
- 酒井慎一・岩崎貴哉・飯高 隆・吉井敏尅・山崎文人・桑山辰夫 (1992): 人工地震による中部日本地域の地殻構造ー吾妻ー金沢測線ー, 地震学会講演予稿集, No.2, pp.12.
- 酒井慎一・岩崎貴哉・飯高 隆・吉井敏尅・山崎文人・桑山辰夫 (1993): 人工地震による中部日本地域の地殻構造ー吾妻ー金沢測線ーその 2, 地球惑星科学関連学会 1993 年合同大会予稿集, pp.175.
- 酒井慎一・岩崎貴哉・飯高 隆・吉井敏尅・山崎文人・桑山辰夫 (1996): 爆破地震動による中部日本地域の地殻構造, 月刊地球, Vol.18, No.2, pp.104-109.
- 西南日本地殻構造研究グループ (1991): 近畿地方北部における人工地震探査, 京都大学防災研究所年報, 第 34 号, B-1, pp.263-277.
- 西南日本地殻構造研究グループ (1992): 近畿地方北部における人工地震探査 (続), 京都大学防災研究所年報, 第 35 号, B-1, pp.347-358.
- 根岸弘明 (1996): 中部山岳地域の地殻内速度構造, 月刊地球, Vol.18, No.2, pp.85-91.
- 松本 聡・長谷川昭 (1997): 日光白根山周辺域における S 波反射面の分布, 火山, 42, 2, pp.127-139.
- 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): 飛騨地方の 3 次元上部地殻構造と活断層及び地震活動, 月刊地球, Vol.11, No.2, pp.90-96.
- 吉井敏尅 (1990): 屈折法爆破地震波形に反射法的処理 (演旨), 地震学会講演予稿集, 2, pp.91.
- Ito, K. (1999): Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes, Tectonophysics, 306, pp.423-433.
- Matsumoto, S., Hasegawa, A. (1996): Distinct S-wave reflector in the mid-crust beneath Nikko-Shirane volcano in northeastern Japan, J. Geophys. Res., 101, pp.3067-3083.
- Watanabe, K., Fukui, H. (1980): 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, pp.31-52.

Seismic survey at the Atotsugawa fault system in Honshu, Japan

Koji YOSHII, Kiyoshi ITO, Kazuo MATSUMURA, Hiroo WADA, Yoshio SUMINO*, Yosuke FUJISAWA

* Faculty of Science, Shinshu University

Synopsis

Explosions aiming at surveying fault gauge by trapped waves were conducted at the Mozumi fault, central Honshu, Japan in October 2000. We observed seismic waves of the explosions at 47 stations in about 40km line along the Atotsugawa fault system. We obtain the structure of surface layer from the result of first arrival analysis. And from an analysis of later arrivals we found clear reflected phases at 4-5 and 7-8 seconds of two-way travel-times. The crust deeper than 15km, beneath the seismogenic layer is reflective as a whole and there exist strong reflective layers at about 15 and 25km depth in the reflective crust.

Keywords: Atotsugawa fault, Mozumi-Sukenobu fault, seismic survey, velocity structure, seismic reflector