

## 霧島火山群における人工地震探査 —観測および初動の読みとり—

鍵山恒臣<sup>1)</sup>・筒井智樹<sup>2)</sup>・三ヶ田均<sup>1)</sup>・森田裕一<sup>3)</sup>・松島 健<sup>4)</sup>・井口正人<sup>5)</sup>・及川純<sup>1)</sup>  
山岡耕春<sup>6)</sup>・熊谷博之<sup>6)</sup>・西村裕一<sup>7)</sup>・宮町宏樹<sup>8)</sup>・渡辺 了<sup>9)</sup>・西村太志<sup>10)</sup>・高木朗充<sup>11)</sup>  
山本圭吾<sup>1)</sup>・浜口博之<sup>3)</sup>・岡田 弘<sup>7)</sup>・前川徳光<sup>7)</sup>・大島弘光<sup>12)</sup>・植木貞人<sup>3)</sup>・橋本忠一<sup>3)</sup>  
仁田交一<sup>3)</sup>・茂原 諭<sup>3)</sup>・中道治久<sup>3)</sup>・汐見勝彦<sup>10)</sup>・中原 恒<sup>10)</sup>・青木重樹<sup>3)</sup>・青地秀雄<sup>3)</sup>  
井田喜明<sup>1)</sup>・渡辺秀文<sup>1)</sup>・鬼澤真也<sup>1)</sup>・長田 昇<sup>1)</sup>・行田紀也<sup>1)</sup>・辻 浩<sup>1)</sup>・山口 勝<sup>1)</sup>  
増谷文雄<sup>1)</sup>・西富一平<sup>1)</sup>・井上智広<sup>1)</sup>・伊藤 渉<sup>1)</sup>・奥田 隆<sup>6)</sup>・宮島力雄<sup>6)</sup>・柴田元衛<sup>9)</sup>  
鬼頭 直<sup>9)</sup>・鶴我佳代子<sup>13)</sup>・前田実利<sup>13)</sup>・清水洋<sup>4)</sup>・松尾のり道<sup>4)</sup>・馬越孝道<sup>4)</sup>・内田和也<sup>4)</sup>  
奥村貴史<sup>4)</sup>・柴田 学<sup>4)</sup>・須藤靖明<sup>2)</sup>・吉川 慎<sup>2)</sup>・山田年広<sup>2)</sup>・森 健彦<sup>2)</sup>・松本良浩<sup>2)</sup>  
高山鐵朗<sup>5)</sup>・ムハマッド ヘンドラスト<sup>5)</sup>・平野舟一郎<sup>8)</sup>・八木原寛<sup>8)</sup>・上野 寛<sup>8)</sup>  
石原和彦<sup>11)</sup>・森 博一<sup>11)</sup>・平林順一<sup>14)</sup>・大場 武<sup>14)</sup>・野上健治<sup>14)</sup>・森 俊哉<sup>15)</sup>  
佐藤雅規<sup>15)</sup>・富永貞男<sup>13)</sup>

- 1)東京大学地震研究所 2)京都大学理学部 3)東北大学理学部 4)九州大学理学部  
5)京都大学防災研究所 6)名古屋大学理学部 7)北海道大学理学部 8)鹿児島大学理学部  
9)富山大学理学部 10)東北大学理学系研究科 11)気象庁 12)北海道大学理学系研究科  
13)広島大学理学部 14)東京工業大学草津白根火山観測所 15)東京大学理学部

(1995年10月9日受理)

## 1994 Explosion Experiment in Kirishima Volcanoes

Tsuneomi KAGIYAMA<sup>1)</sup>, Tomoki TSUTSUI<sup>2)</sup>, Hitoshi MIKADA<sup>1)</sup>, Yuichi MORITA<sup>3)</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>4)</sup>, Masato IGUCHI<sup>5)</sup>, Jun OIKAWA<sup>1)</sup>, Koshun YAMAOKA<sup>6)</sup>, Hiroyuki KUMAGAI<sup>6)</sup>, Yuichi NISHIMURA<sup>7)</sup>, Hiroki MIYAMACHI<sup>8)</sup>, Toru WATANABE<sup>9)</sup>, Takashi NISHIMURA<sup>10)</sup>, Akimichi TAKAGI<sup>11)</sup>, Keigo YAMAMOTO<sup>1)</sup>, Hiroyuki HAMAGUCHI<sup>3)</sup>, Hiromu OKADA<sup>7)</sup>, Tokumitsu MAEKAWA<sup>7)</sup>, Hiromitsu OSHIMA<sup>12)</sup>, Sadato UYEKI<sup>3)</sup>, Keiichi HASHIMOTO<sup>3)</sup>, Koichi NITA<sup>3)</sup>, Satoshi SHIGEHARA<sup>3)</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>3)</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>10)</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>10)</sup>, Shigeki AOKI<sup>3)</sup>, Hideo AOCHI<sup>3)\*</sup>, Yoshiaki IDA<sup>1)</sup>, Hidefumi WATANABE<sup>1)</sup>, Shin-ya ONIZAWA<sup>1)</sup>, Noboru OSADA<sup>1)</sup>, Noriya GYODA<sup>1)</sup>, Hiroshi TSUJI<sup>1)</sup>, Masaru YAMAGUCHI<sup>1)</sup>, Fumio MASUTANI<sup>1)</sup>, Ippei NISHITOMI<sup>1)</sup>, Tomohiro INOUE<sup>1)</sup>, Wataru ITO<sup>1)</sup>, Takashi OKUDA<sup>6)</sup>, Rikio MIYAJIMA<sup>6)</sup>, Motoei SHIBATA<sup>9)</sup>, Tadashi KITO<sup>9)</sup>, Kayoko TSURUGA<sup>13)</sup>, Mitoshi MAEDA<sup>13)</sup>, Hiroshi SHIMIZU<sup>4)</sup>, Norimichi MATSUO<sup>4)</sup>, Kodo UMAKOSHI<sup>4)</sup>, Kazunari UCHIDA<sup>4)</sup>, Takashi OKUMURA<sup>4)</sup>, Manabu SHIBATA<sup>4)</sup>, Yasuaki SUDO<sup>2)</sup>, Shin YOSHIKAWA<sup>2)</sup>, Toshihiro YAMADA<sup>2)</sup>, Takehiko MORI<sup>2)</sup>, Yoshihiro MATSUMOTO<sup>2)</sup>, Tetsuro TAKAYAMA<sup>5)</sup>, Muhamad HENDRASTO<sup>5)</sup>, Shuichiro HIRANO<sup>8)</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>8)</sup>, Hiroshi UENO<sup>8)</sup>, Kazuhiko ISHIHARA<sup>11)</sup>, Hirokazu MORI<sup>11)</sup>, Jun-ichi HIRABAYASHI<sup>14)</sup>, Takeshi OBA<sup>14)</sup>, Kenji NOGAMI<sup>14)</sup>, Toshiya MORI<sup>15)</sup>, Masaki SATO<sup>15)</sup> and Sadao TOMINAGA<sup>13)</sup>

- 1)Earthquake Research Institute, University of Tokyo 2)Faculty of Science, Kyoto University  
3)Faculty of Science, Tohoku University 4)Faculty of Science, Kyushu University  
5)Disaster Prevention Reserach Institute, Kyoto University 6)Faculty of Science, Nagoya University  
7)Faculty of Science, Hokkaido University 8)Faculty of Science, Kagoshima University  
9)Faculty of Science, Toyama University 10)Graduate School of Science, Tohoku University  
11)Japan Meteorological Agency 12)Graduate School of Science, Hokkaido University  
13)Faculty of Science, Hiroshima University 14)Tokyo Institute Technology  
15)Faculty of Science, University of Tokyo

(Received October 9, 1995)

## Abstract

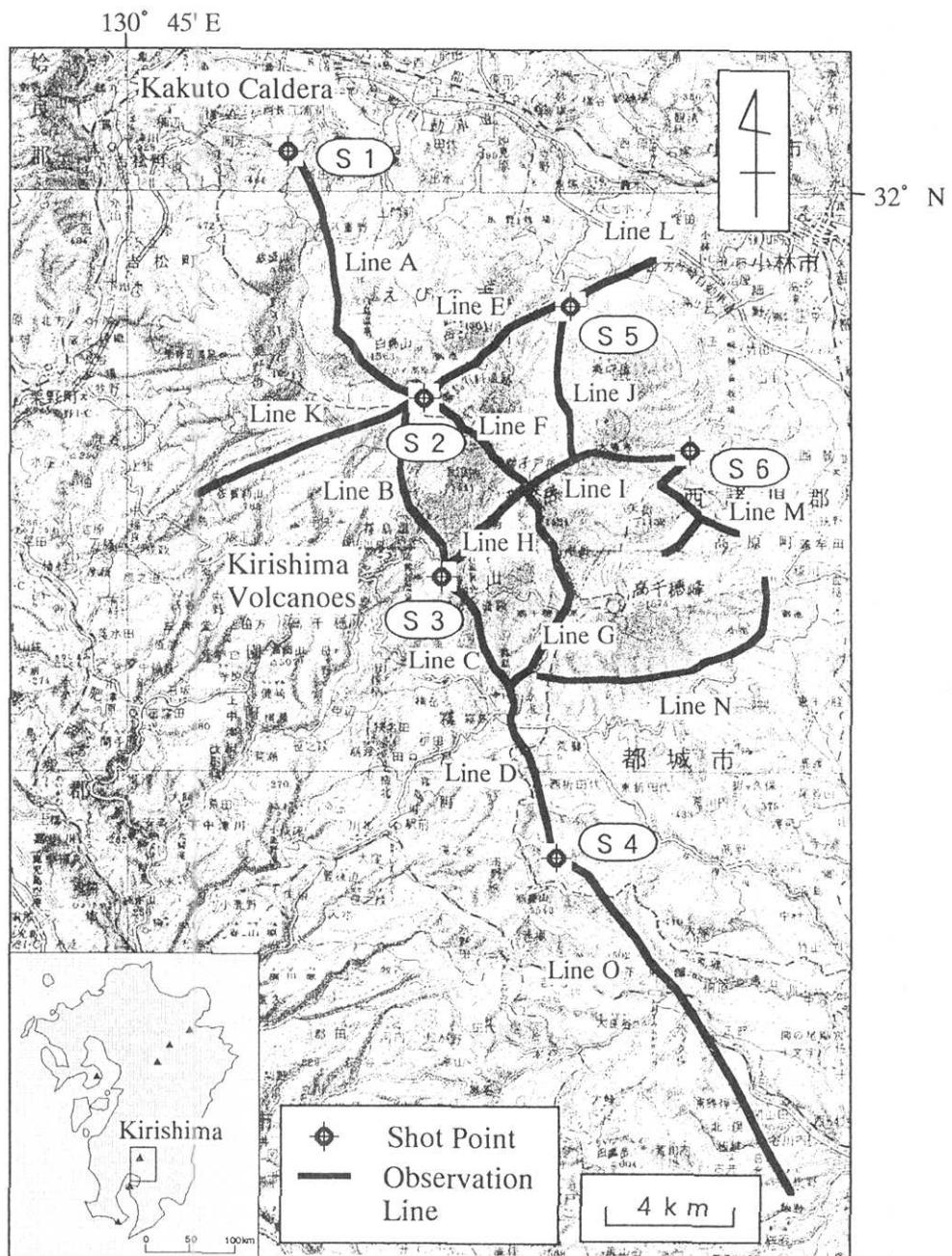
In recent years, investigations on the structures of volcanoes have been noteworthy for further understanding volcanic processes, including locations of magma reservoirs, magma rising process before eruptions and causes of related phenomena. In 1994, a joint experiment was conducted on Kirishima Volcanoes, Southern Kyushu, to reveal the structure and the magma supply system by a group of scientists from national universities under the National Research Project for the Prediction of Volcanic Eruptions. The experiment was carried out by seismological, electromagnetic and other geophysical methods. The following seven papers including this one present some results of the experiments. This paper outlines a seismic explosion experiment in Kirishima, and presents all data on the first motion. An extensive explosion seismic experiment was conducted on December 1, 1994. Observations were made along a 30-km major line lying in the NNW-SSE direction and other sub-lines which cross the major line in and around the Kirishima Volcanoes. Along these lines, 6 shots with a charge size of 200-250 kg, and 163 temporary observations were arranged by many universities and institutes. A newly developed data logger was used for these temporal observations, and the position of each site was determined by GPS. All 6 shots were successfully fired, and clear onset and significant phases were observed at most observation sites. A travel time diagram suggests that a high velocity layer crops out south of the Kirishima Volcanoes, while in the Kirishima Volcanoes, this layer is covered with a lower velocity layer, which is thick at the northern part. It is also suggested that a structural discontinuity exists between S3 and S4.

## 1. はじめに

霧島は南九州の鹿児島県と宮崎県の県境に位置し、少なくとも20数個の火山からなる火山群である。その活動史の研究から、複数の火山が地学的時間スケールではほぼ同時に噴火していることが明らかにされており(井村, 1994), 霧島を構成するそれぞれの火山のマグマがどのように供給されているか興味が持たれている(鍵山, 1994a)。近年、霧島の構造とマグマ供給系を明らかにするための研究が進められ、その結果は7編の論文(鍵山, 1994b; 井村, 1994; 鍵山・他, 1994; 歌田・他, 1994; HASHIMOTO *et al.*, 1994; 山本・他, 1994; 及川・他, 1994)として公表されている。こうした事前の調査に基づき、1994年秋に第5次火山噴火予知計画により火山体の構造探査が行われた。この調査は、人工地震による探査、遠地地震による探査、電磁気構造探査からなり、重力調査や火山化学的調査、地質・岩石学的調査などとも連携して行われた。本稿に続く7編の報文は、これらの調査結果や研究活動の成果のうち、特に容量の大きい資料等を中心に報告するものである。本稿は、この人工地震探査の概要を述べるとともに、得られた地震波形記録、初動読みとり値などの基本的なデータを報告する。これらのデータから得られた構造、およびその他のマグマ供給系に関する新たな知見等は、別に報告する予定である。

## 2. 人工地震探査の目的

霧島火山群・加久藤カルデラの地震波速度構造の研究は、MINAKAMI *et al.* (1969)が、加久藤カルデラに発生する地震により同カルデラの構造を提出している他、宮崎・他(1978)が、霧島の南東方約30kmの鹿児島県末吉町で行われた爆破を用いて、霧島周辺の深さ数kmまでの構造を提出している。この結果は、霧島火山観測所の震源決定にも使われ、霧島・加久藤地域の地震・火山研究に一定の役割を果たしてきたが、爆破点が遠方にあるため、霧島火山群浅部の速度構造は正確には求められていない。また、構造に傾斜や不連続等が存在する可能性も指摘されているが、その詳細は、データ不足のため明らかとなっていない。この問題は、霧島火山群



の内外に適当に配置された爆破点と稠密な観測点があれば解決する事が可能であろう。歌田・他(1994)は、比抵抗構造の研究から、硫黄山や新燃岳などの火山周辺では深さ約10km以深に比抵抗の低い層が広く分布し、火口直下では2~3kmまで浅くなっていることを報告している。これに対して、山本・他(1994)は、震央距離が数100km程度の自然地震により、霧島周辺の3次元速度構造を求め、霧島の主要な火山列の下部に低速度域が存在する事を指摘し、及川・他(1994)は、霧島火山群の北東部の比較的浅い部分に地震波を減衰させる領域が存在することを指摘しているが、観測点が少ないため、不均質構造を十分に示したものとはなっていない。こうした背景から、この人工地震探査では、第1に、深さ2~3kmまでの構造を屈折法により正確に決定することを目標とし、第2に、反射波がうまく捉えられた場合には深さ10kmくらいまでの速度構造を求める事を目標とした。また、第3に、霧島火山群の主要な火山下部に反射面などの異常が見られるかどうか、またあるとすればどれくらいの範囲に広がっているかを把握することも目標とした。

### 3. 人工地震探査の概要

爆破は、1994年12月1日未明にFig.1に示す6点で行われた。爆破点は全てGPSにより測量を行い、薬頭深度は検尺により測定している。それぞれの爆破点の緯度、経度、薬頭の標高、薬量、爆破時刻はTable 1に示すとおりである。これらの爆破による地震動を観測するためにFig.1の測線上に163点の臨時観測点を設けた。測点間隔は、約500mとしたが、爆破点S2とS3を結ぶ測線Bにおいて約250m、調査領域の周辺部にあたる測線K, L, M, N, Oでは約1kmとした。これらの観測点のうち、測点番号1から150までの150点については、GPSによる測量を行い、その結果は、松島・他(1995)に示されている。測点151から測点163までの13点については測点間隔が長いこと、周辺に位置を特定しやすい目標が多いことから簡易GPSを併用しつつ地形図上で位置を読みとった。13点の位置はTable 2に示す。

以上の観測点のうち、測点1~150では、特性を統一するため、Mark Products社製L-22D型地震計（固有周波数2.2Hz、コイル抵抗約2.2kΩ）をダンピング定数0.7で用い、測点151から163についても同じ仕様の地震計を用いている。また、一部の観測点では同じ仕様の水平動地震計を用いた3成分観測も行った。観測波形は、すべて本調査のために新たに開発された白山工業社製のData Mark LS8000(森田・他, 1994)により、サンプリング間隔4msで収録した。本装置は、GPSにより校正された時刻管理の下にデータを収録するため、すべてのデータは1msの精度を保証されている。

爆破に関わる爆破孔のボーリングおよび爆破作業は、応用地質株式会社の請負で行われた。爆破孔は、直徑12cm以上、深さ40~45mであり、内径10.5cm、厚さ0.5cmの鋼鉄製パイプで底

Table 1 Shot times, locations and charge sizes of 6 explosions in the 1994 Kirishima experiment.

Shot	Date	Time	Latitude ( ° ' " )	Longitude ( ° ' " )	Height ( m )	Charge ( kg )
	1994	JST	N	E		
S1	Dec. 1	02:02:05.704	32-00-41.32	130-48-13.39	312.44	250
S2	Dec. 1	02:07:05.258	31-56-27.91	130-50-47.74	1167.43	200
S3	Dec. 1	02:12:05.702	31-53-14.61	130-51-21.96	893.77	200
S4	Dec. 1	02:17:05.470	31-48-27.04	130-53-40.77	325.66	250
S5	Dec. 1	02:22:05.013	31-58-05.39	130-53-53.19	544.71	200
S6	Dec. 1	02:27:05.407	31-55-29.25	130-56-30.48	636.96	200

Table 2 Locations of temporary observation sites for the line O in Fig.1.

Site	Latitude ( ° ' " )	Longitude ( ° ' " )	Height ( m )
	N	E	
151	31-48-11	130-54-47	340
152	31-47-12	130-55-07	290
153	31-46-50	130-55-34	290
154	31-46-32	130-55-57	270
155	31-46-14	130-56-30	250
156	31-45-45	130-56-27	300
157	31-45-19	130-56-53	260
158	31-44-47	130-57-10	280
159	31-44-20	130-57-21	250
160	31-44-03	130-57-29	220
161	31-43-31	130-57-43	250
162	31-43-13	130-58-24	245
163	31-43-04	130-59-04	200

までケーシングされている。使用した爆薬は200~250kgの海底爆破用ダイナマイトで、各爆破孔底部まで装填の後、予定時刻に爆破された。また、爆破作業と並行して、爆破点からほぼ100m間隔で6台の地震計を展開する小測線を各爆破点について1~4本とり、地表付近の地震波速度の測定を行った。この観測のために設置した地震計の配置図をFig.2に、また、各爆破点における走時図をFig.3に示す。

#### 4. 観測結果

記録されたデータは、パーソナルコンピューター(IBM社製、Think Pad 750など)に転送した後、ワークステーションに集め、火山体構造探査グループ共通のフォーマットへの変換(三ヶ田・他, 1995)を施した後、参加者へネットワークなどを介して配布された。初動の読みとり作業には、15名があたり、各人が事前に読みとった値をワークステーションの画面上に波形とともに表示しながら全員が検討する方式で最終読みとり値を確定する作業を行った。なお、波形データの表示および初動の読みとりには、この作業のために新たに開発された共通読みとりソフトウェア(筒井・他, 1995)を使用した。

Fig.4a~4fに各爆破点の爆破に対応するS1からS4に至る測線における振動波形を示す。S6の爆破振動がやや弱いことを除けばほとんどすべての観測点に有意な振動が到達していることがわかる。Table 3a~3fに示す読みとりには、ノイズレベルや立ち上がりの明瞭度を考慮してその読みとり値のランクを付加している。ここで、ランクAは、過半数の読みとり者が立ち上がりが明瞭で読みとり精度が10ms以内であると判断したもの、ランクBは、過半数の読みとり者が、読みとり精度30ms以内と判断したもの、ランクCは、それ以下の精度の読みとり値である。また、ランクLは、立ち上がりが不明瞭で、明らかに地震波が到達したと判断される読みとりを意味し、ランクXは、観測データが得られなかった場合および地震波の到達を確認できなかった場合を意味する。これらの読みとり値のうち、S1~S4におけるショットを南北方向の

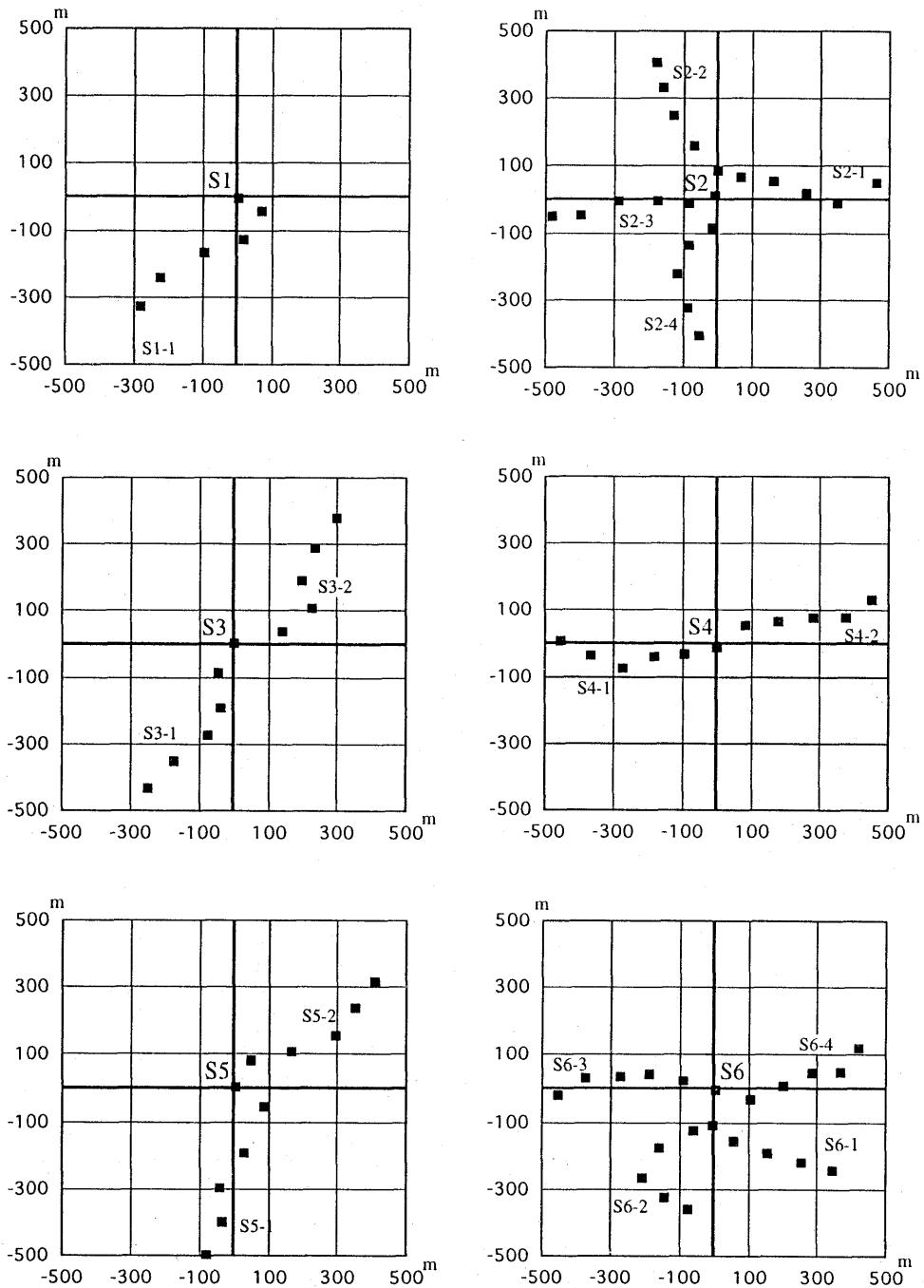


Fig.2 Array observation net for each shot.

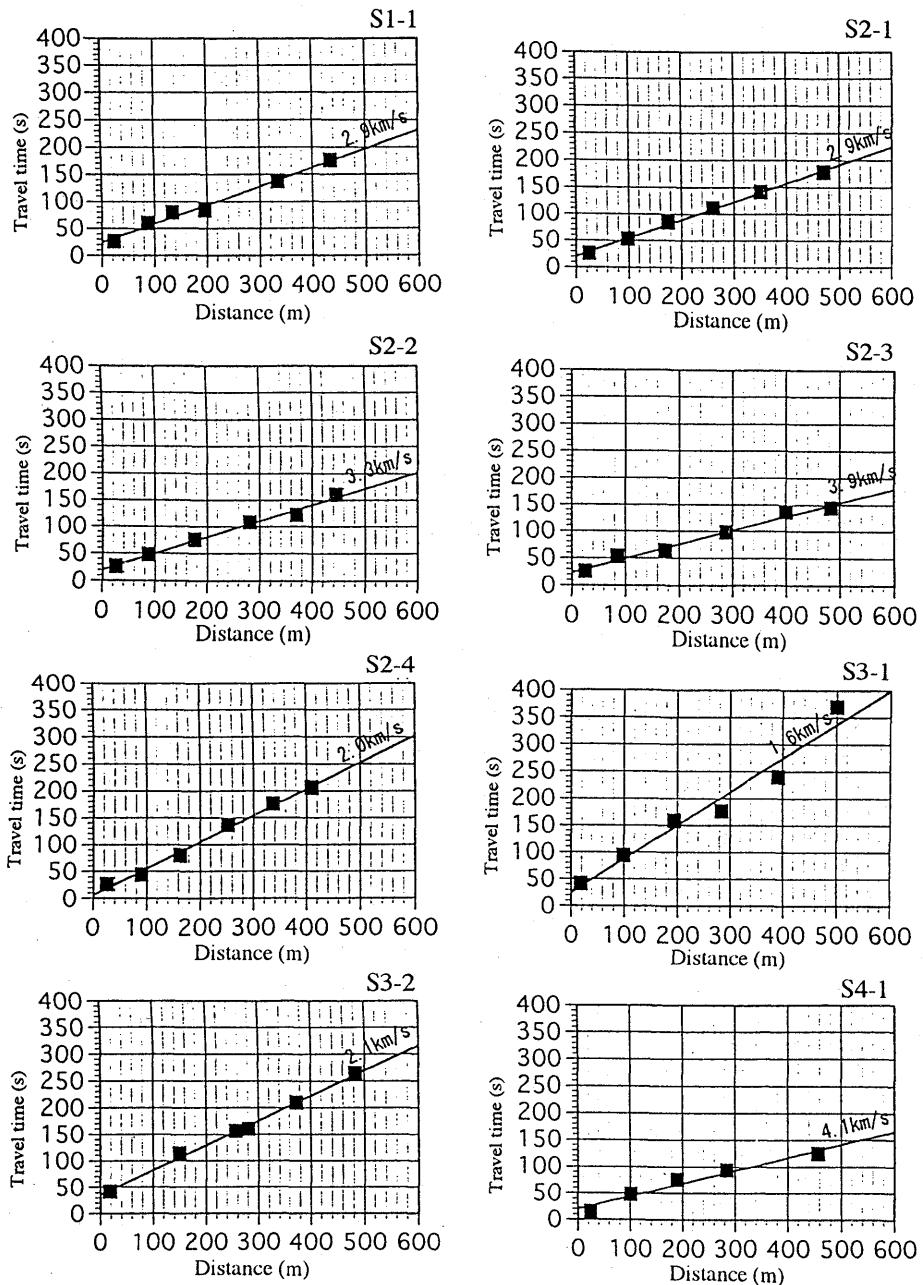


Fig.3a Travel time diagrams near the shot points.

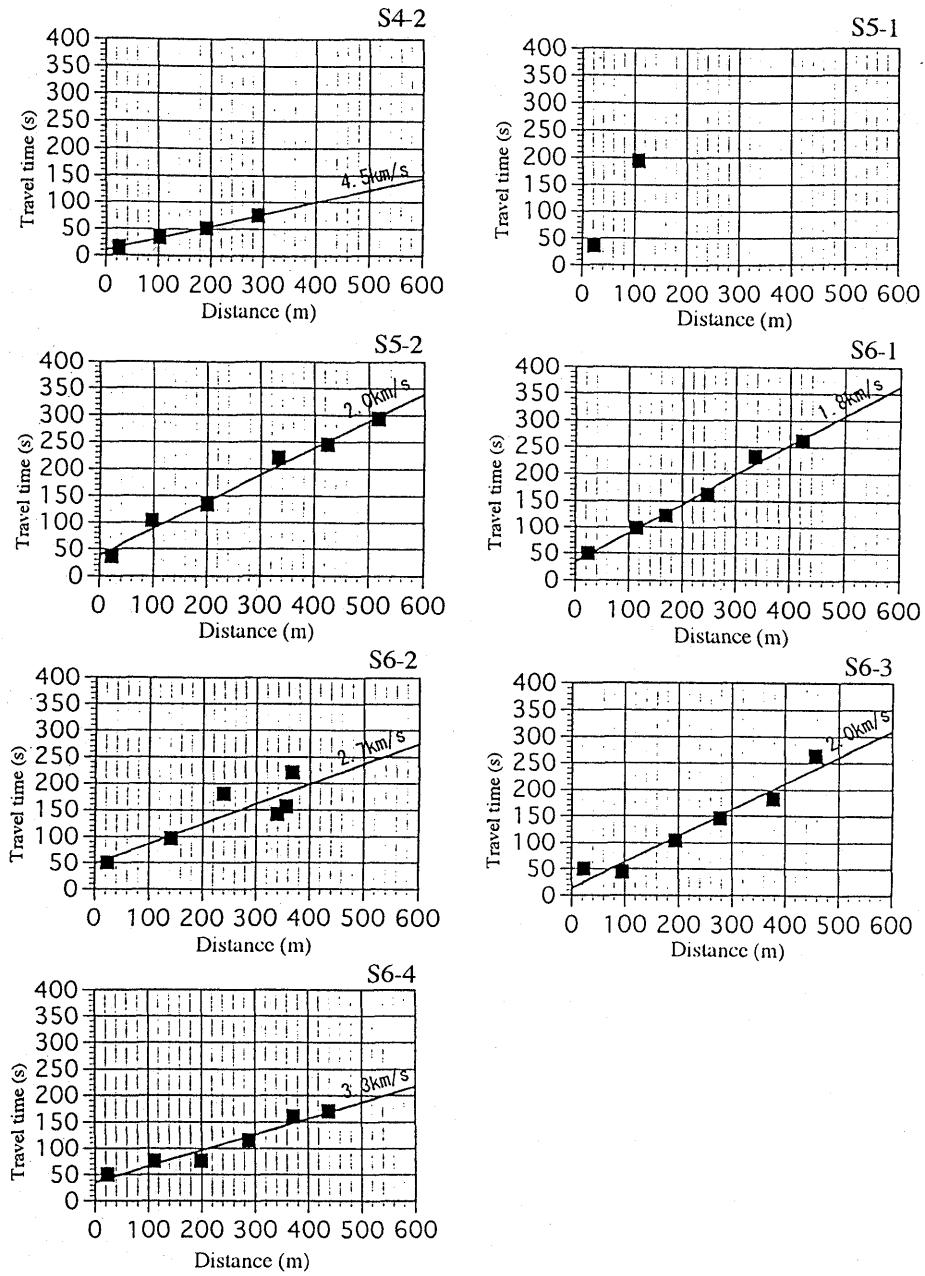


Fig.3b Travel time diagrams near the shot points.

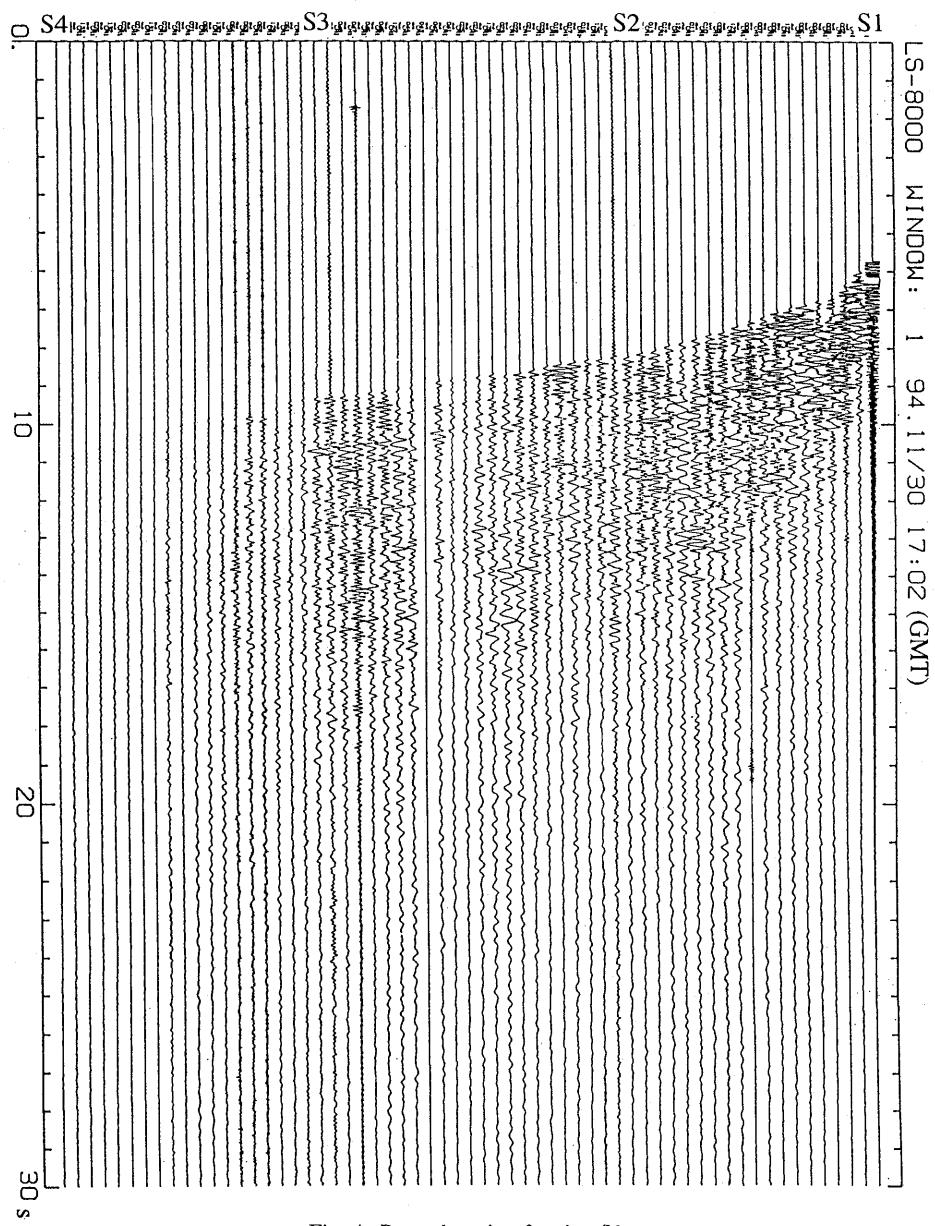


Fig. 4a Record section for shot S1.

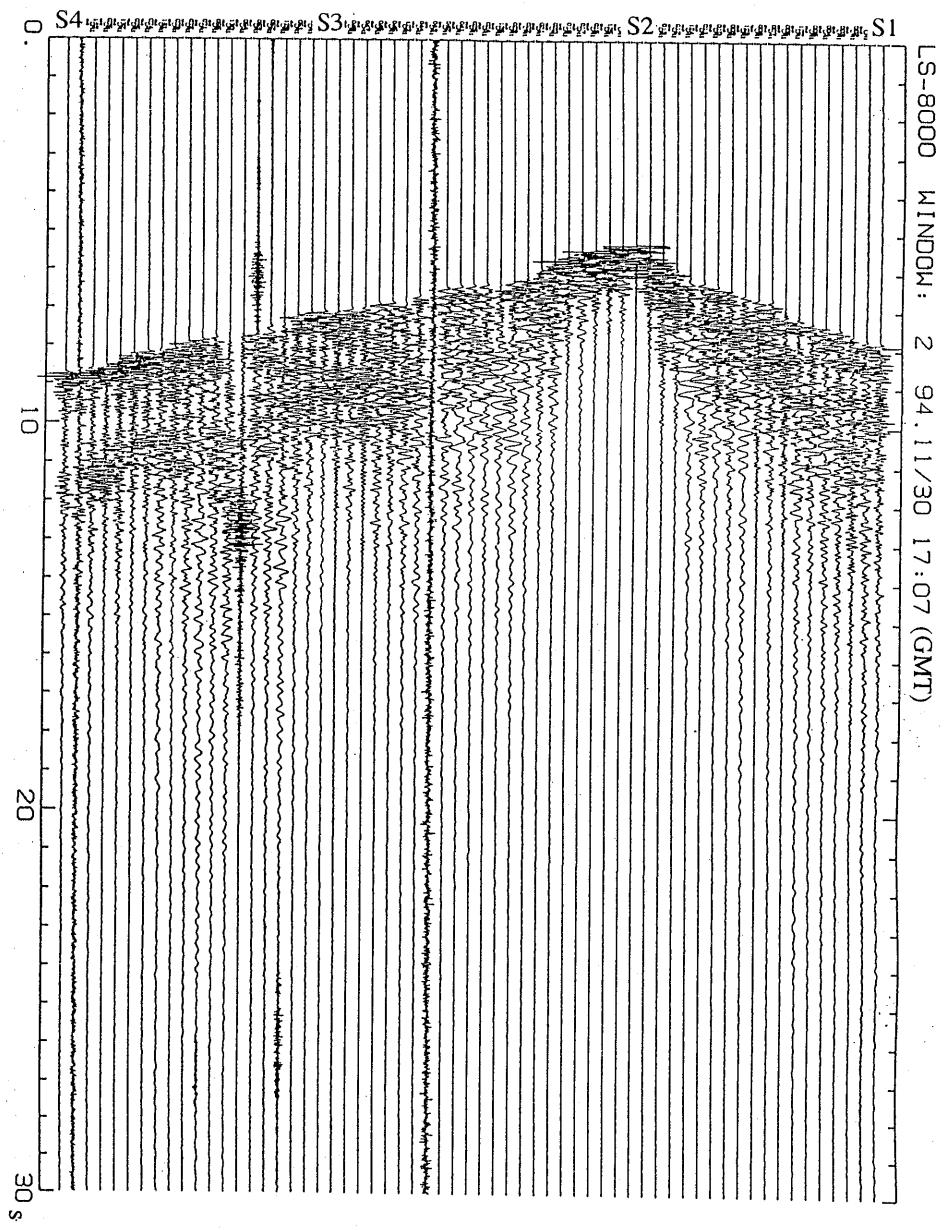


Fig. 4b Record section for shot S2.

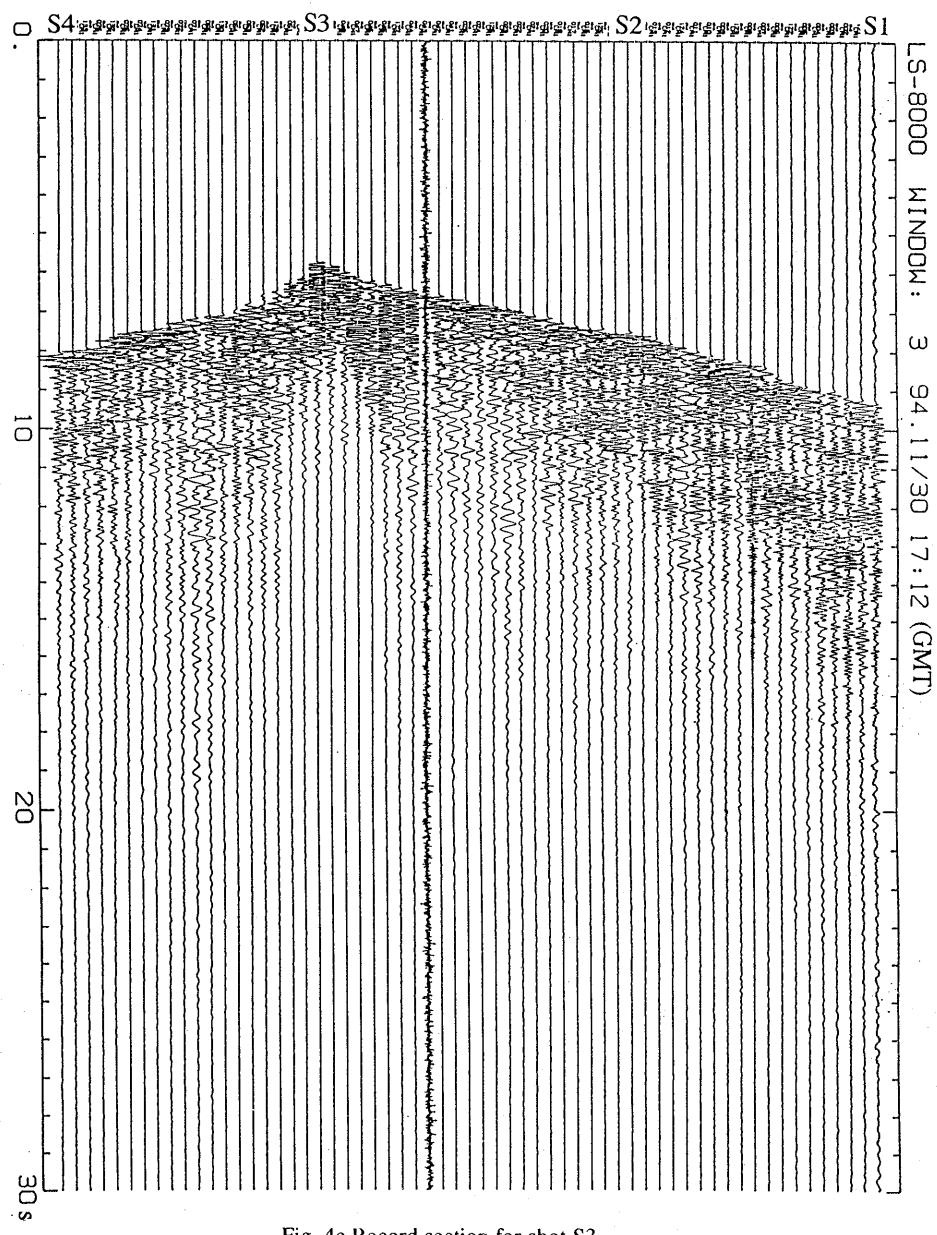


Fig. 4c Record section for shot S3.

LS-8000 WINDOW: 4 94.11/30 17:17 (GMT)

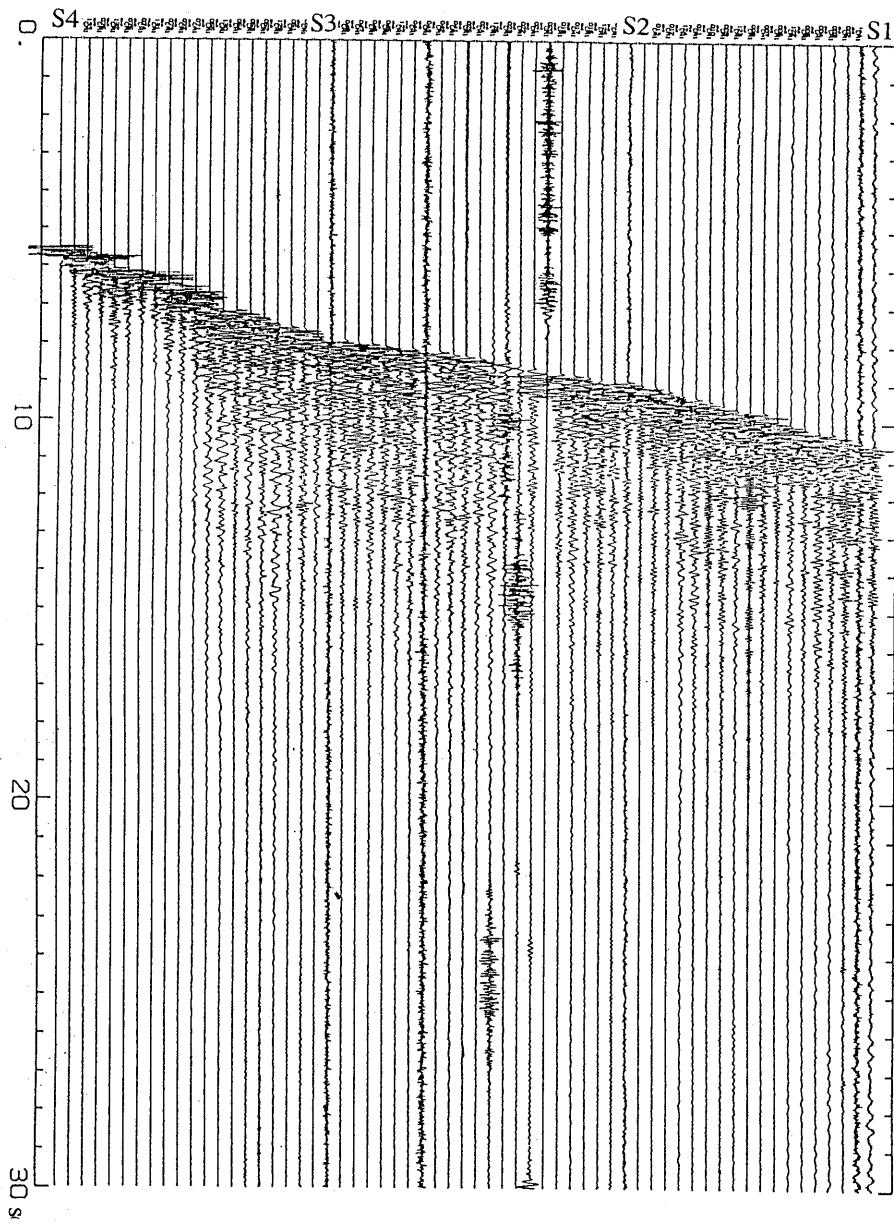


Fig. 4d Record section for shot S4.

LS-8000 WINDOW: 5 94.11/30 17:22 (GMT)

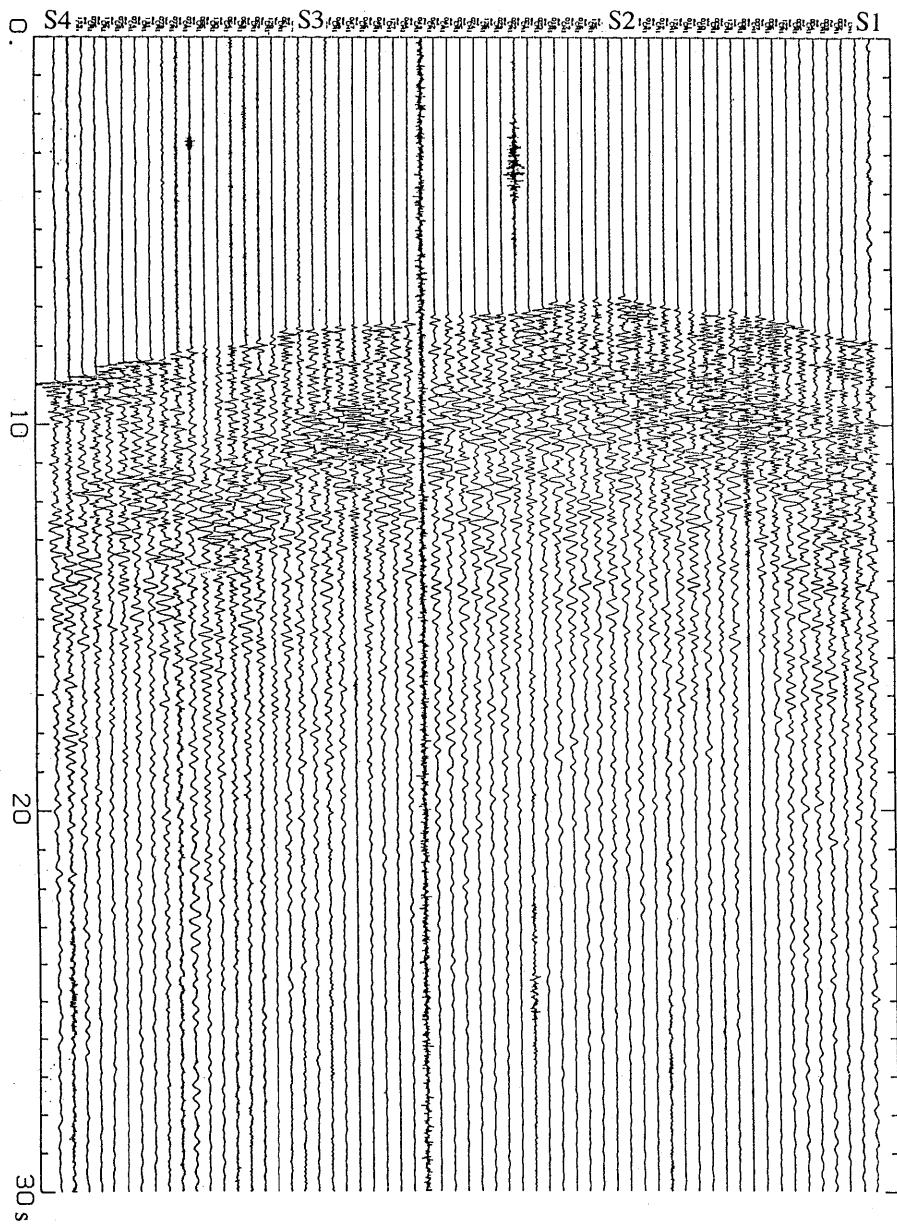


Fig. 4e Record section for shot S5.

LS-8000 WINDOW: 6 94.11/30 17:27 (GMT)

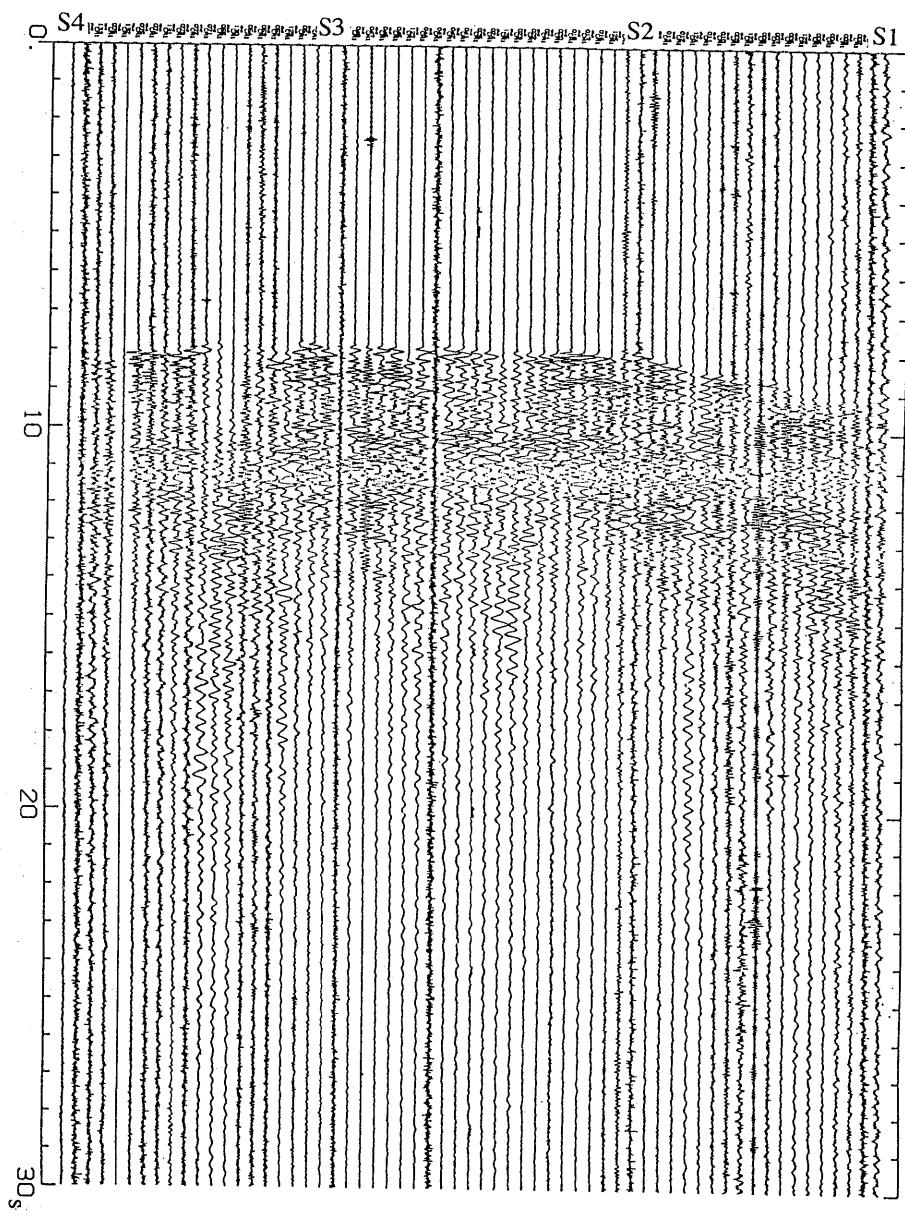


Fig. 4f Record section for shot S6.

Table 3a Arrival time data for shot S1.

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
1	1	A, S1	0.04	5.739	U	A	42	49	B, S3	14.61	9.273	U	B
2	121	A	0.61	5.999	U	A	43	50	C	15.22	9.319	L	
3	2	A	1.07	6.237	U	A	44	51	C	15.64	9.397	L	
4	3	A	1.62	6.398	U	A	45	129	C	16.27	9.505	U	C
5	4	A	1.88	6.496	U	A	46	52	C	16.66	9.778	L	
6	5	A	2.22	6.865	U	A	47	53	C	17.20	9.748	U	C
7	122	A	2.58	6.851	U	B	48	54	C	17.66		X	
8	6	A	3.18	6.989	U	B	49	130	C	18.14	9.845	U	C
9	7	A	3.93	7.132	U	B	50	55	D	18.78	9.784	U	C
10	8	A	4.36	7.248	U	A	51	71	D	19.18	9.919	U	C
11	123	A	5.03	7.383	U	B	52	72	D	19.67	10.021	U	B
12	9	A	5.50	7.582	U	B	53	73	D	20.37	10.085	U	C
13	10	A	5.88	7.638	U	A	54	131	D	20.93	10.184	U	B
14	11	A	6.31	7.747	U	A	55	74	D	21.18	10.232	U	A
15	124	A	6.77	7.809	U	B	56	75	D	21.67	10.301	U	A
16	12	A	7.29	7.912	U	A	57	132	D	22.13	10.380	U	B
17	13	A	7.87	8.014	U	B	58	76	D	23.23	10.586	U	B
18	14	A	8.24	8.097	U	A	59	133	D	23.58	10.630	U	A
19	15	A	8.71	8.197	L		60	77	D	24.30	10.771	U	B
20	125	B	9.04	7.273	U	B	61	78	D, S4	24.18	10.753	U	A
21	16	B	9.13	8.278	U	A	62	79	E, S2	8.84	8.233	U	B
22	17	B	9.42	8.361	U	A	63	80	E	8.77	8.233	U	B
23	18	B	9.67	8.366	U	B	64	81	E	8.64	8.207	U	B
24	19	B			X		65	134	E	8.71		X	
25	20	B	10.15	8.445	U	A	66	82	E	8.79	8.161	U	B
26	21	B	10.52	8.556	U	A	67	83	E	9.00	8.217	U	A
27	22	B	10.85	8.633	U	B	68	84	E	9.18	8.226	U	A
28	23	B	11.22	8.637	U	B	69	135	E	8.60	8.146	U	A
29	126	B	11.38	8.653	U	A	70	85	E	9.03	8.238	U	A
30	24	B	11.66	8.693	U	B	71	86	E	9.15	8.241	U	A
31	25	B	11.92	8.724	U	B	72	87	E	9.46	8.312	U	A
32	41	B	12.09	8.774	U	B	73	136	E	9.91	8.440	U	A
33	42	B	12.41	8.775	U	B	74	88	E, S5	10.13	8.458	U	A
34	43	B	12.67		X		75	89	F	9.11	8.271	L	
35	44	B	13.04	8.962	L		76	90	F	10.11	8.585	U	B
36	127	B	13.25	9.046	U	B	77	91	F	10.41	8.642	L	
37	45	B	13.53	9.123	U	A	78	92	F	10.70	8.746	U	B
38	46	B	13.73	9.103	U	A	79	93	F	10.85	8.765	L	
39	47	B	13.96	9.181	U	C	80	94	F	11.44	8.798	U	B
40	48	B	14.34	9.202	U	B	81	95	F	11.90		X	
41	128	B	14.52	9.180	U	C	82	96	F	12.54	8.933	U	B

( to be continued)

Table 3a Arrival time data for shot S1 (continued).

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
83	97	F	13.17	8.997	U	B	124	56	K	9.03	8.275	U	A
84	98	G	13.59	9.137	U	C	125	57	K	9.15	8.256	U	A
85	99	G	14.19	9.468	U	C	126	58	K	8.74	8.209	U	A
86	100	G	14.65	9.252	U	C	127	59	K	8.53	8.136	U	A
87	101	G	15.07	9.289	L	128	60	K	8.39	8.125	U	A	
88	102	G	15.46	9.380	U	C	129	61	K	8.57	8.109	U	A
89	103	G	15.89	9.399	U	B	130	62	K			X	
90	104	G	16.44	9.542	L	131	63	L	10.40	8.559	U	A	
91	105	G	16.99	9.701	L	132	64	L	10.93	8.620	U	C	
92	106	G	17.10	9.750	U	C	133	65	L	11.39	8.767	U	B
93	107	G	17.46	9.791	U	C	134	139	M	16.36	9.669	U	B
94	108	G	17.77	9.865	U	C	135	66	M	15.93	9.565	U	B
95	109	G	18.22	9.915	U	C	136	67	M	16.18	9.645	U	A
96	110	G	18.19	9.903	U	B	137	68	M	16.75	9.697	U	B
97	111	H	13.87	8.953	U	C	138	69	M	17.51	9.777	U	B
98	112	H	13.47	9.091	U	A	139	140	M	17.36	9.702	U	B
99	113	H	13.37	9.043	U	A	140	70	M	17.90	9.808	L	
100	114	H	13.10	8.986	U	A	141	141	N	19.63	9.724	U	C
101	115	H	13.27		X	142	145	N	19.70			X	
102	116	H	13.22	9.045	U	A	143	146	N	20.26		X	
103	117	I	12.85	8.984	U	A	144	142	N	20.82		X	
104	118	I	13.04	9.015	U	A	145	147	N	21.04		X	
105	119	I	13.40		X	146	148	N	21.10			X	
106	120	I	13.47		X	147	143	N	21.38			X	
107	26	I	13.38		X	148	149	N	21.52	10.209	U	C	
108	27	I	13.44	9.119	U	B	149	150	N	20.77	10.236	U	C
109	28	I	13.67	9.135	U	B	150	144	N	20.47	10.394	U	C
110	29	I	14.58	9.279	U	A	151	151	O	25.32	10.745	U	C
111	30	I	14.93	9.370	U	B	152	157	O	27.19		X	
112	31	I	15.40	9.425	U	B	153	153	O	28.10		X	
113	32	I	15.84	9.566	U	B	154	154	O	28.85		X	
114	33	I, S6	16.21	9.637	U	B	155	155	O	29.73		X	
115	34	J	10.31	8.509	U	A	156	152	O	30.50		X	
116	35	J	10.61	8.549	U	A	157	157	O	31.52		X	
117	137	J	10.92	8.646	U	A	158	158	O	32.60		X	
118	36	J	11.05	8.618	U	A	159	159	O	33.47		X	
119	37	J	11.33	8.640	U	A	160	160	O	34.04		X	
120	38	J	11.64	8.746	U	A	161	161	O	35.09		X	
121	138	J	12.05	8.856	U	A	162	162	O	36.05		X	
122	39	J	12.26		X	163	163	O	36.78			X	
123	40	J	12.81	8.972	L								

Table 3b Arrival time data for shot S2.

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
1	1	A, S1	8.80	7.776	U	A	42	49	B, S3	6.00	7.056	U	A
2	121	A	8.33	7.687	U	B	43	50	C	6.49	7.089	U	A
3	2	A	7.90	7.519	U	A	44	51	C	6.91	7.173	U	A
4	3	A	7.44	7.395	U	A	45	129	C	7.52	7.307	U	A
5	4	A	7.07	7.339	U	A	46	52	C	7.93	7.420	U	B
6	5	A	6.62	7.163	U	B	47	53	C	8.48	7.710	U	C
7	122	A	6.22	6.972	U	B	48	54	C	8.93	7.722	U	C
8	6	A	5.69	6.846	U	A	49	130	C	9.40	7.765	U	A
9	7	A	4.99	6.666	U	A	50	55	D	10.02	7.743	U	A
10	8	A	4.70	6.635	U	A	51	71	D	10.45	7.825	U	A
11	123	A	3.81	6.421	U	A	52	72	D	10.96	7.927	U	A
12	9	A	3.63	6.432	U	A	53	73	D	11.68	8.065	U	A
13	10	A	3.21	6.296	U	A	54	131	D	12.22	8.105	U	A
14	11	A	2.80	6.194	U	A	55	74	D	12.45	8.158	U	A
15	124	A	2.36	6.064	U	A	56	75	D	12.91	8.237	U	A
16	12	A	1.80	5.887	U	A	57	132	D	13.37	8.310	U	A
17	13	A	1.24	5.703	U	A	58	76	D	14.50	8.540	U	A
18	14	A	0.69	5.521	U	A	59	133	D	14.83	8.571	U	A
19	15	A	0.34	5.414	U	A	60	77	D	15.57	8.711	U	B
20	125	B	0.49	5.420	U	A	61	78	D, S4	15.48	8.696	U	A
21	16	B	0.56	5.436	U	A	62	79	E, S2	0.05	5.293	U	A
22	17	B	0.78	5.501	U	A	63	80	E	0.45	5.422	U	A
23	18	B	1.05	5.593	U	A	64	81	E	0.94	5.552	U	A
24	19	B			X		65	134	E	1.53	5.693	U	B
25	20	B	1.81	5.798	U	A	66	82	E	2.10	5.836	U	A
26	21	B	2.21	5.904	U	A	67	83	E	2.56	6.000	U	A
27	22	B	2.50	5.992	U	A	68	84	E	3.07	6.178	U	A
28	23	B	2.86	6.109	U	A	69	135	E	3.40	6.250	U	B
29	126	B	3.03	6.180	U	A	70	85	E	3.80	6.396	U	A
30	24	B	3.28	6.252	U	A	71	86	E	4.29	6.483	U	A
31	25	B	3.49	6.292	U	A	72	87	E	4.69	6.609	U	A
32	41	B	3.60	6.327	U	A	73	136	E	5.19	6.752	U	A
33	42	B	3.84	6.389	U	A	74	88	E, S5	5.77	6.883	U	A
34	43	B	4.06		X		75	89	F	0.77	5.494	U	A
35	44	B	4.43	6.577	U	B	76	90	F	1.50	5.818	U	A
36	127	B	4.63	6.689	U	A	77	91	F	1.76	5.907	U	A
37	45	B	4.88	6.821	U	B	78	92	F	2.12	6.005	U	A
38	46	B	5.07	6.772	U	B	79	93	F	2.38	6.080	U	B
39	47	B	5.28	6.897	U	A	80	94	F	2.96	6.168	U	A
40	48	B	5.66	6.968	U	A	81	95	F	3.58	6.660	U	B
41	128	B	5.87	7.037	U	A	82	96	F	4.11	6.459	U	A

( to be continued)

Table 3b Arrival time data for shot S2 (continued).

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
83	97	F	4.63	6.638	U	A	124	56	K	0.82	5.543	U	A
84	98	G	5.03	6.791	U	A	125	57	K	1.98	5.909	U	A
85	99	G	5.58	7.131	U	B	126	58	K	2.45	6.000	U	A
86	100	G	6.00	6.962	U	A	127	59	K	3.25	6.239	U	A
87	101	G	6.42	7.087	U	B	128	60	K	4.09	6.452	U	A
88	102	G	6.77	7.141	U	A	129	61	K	4.84	6.614	U	A
89	103	G	7.19	7.205	U	A	130	62	K			X	
90	104	G	7.72	7.320	U	A	131	63	L	6.45	7.055	U	A
91	105	G	8.25	7.509	U	A	132	64	L	7.18	7.217	U	A
92	106	G	8.33	7.564	U	B	133	65	L	7.94	7.396	U	A
93	107	G	8.68	7.659	U	B	134	139	M	9.18	7.634	U	C
94	108	G	8.98	7.814	L		135	66	M	8.62	7.542	U	A
95	109	G	9.42	7.795	U	A	136	67	M	8.53	7.485	U	A
96	110	G	9.41	7.780	U	A	137	68	M	8.97	7.572	U	A
97	111	H	5.14	6.744	U	B	138	69	M	9.74	7.723	U	B
98	112	H	4.70	6.636	U	B	139	140	M	9.36	7.647	U	B
99	113	H	4.59	6.587	U	A	140	70	M	9.84	7.765	U	A
100	114	H	4.32	6.515	U	A	141	141	N	10.84	7.647	U	A
101	115	H	4.56		X		142	145	N	10.95	8.011	U	A
102	116	H	4.63	6.630	U	B	143	146	N	11.53	8.048	U	B
103	117	I	4.57	6.606	U	B	144	142	N	12.15	8.156	U	B
104	118	I	4.90	6.667	U	A	145	147	N	12.44	8.181	U	B
105	119	I	5.38		X		146	148	N	12.63	8.265	U	A
106	120	I	5.68	6.886	U	B	147	143	N	13.07	8.287	U	A
107	26	I	5.86		X		148	149	N	13.40	8.363	U	B
108	27	I	6.04	6.956	U	A	149	150	N	12.89	8.267	U	A
109	28	I	6.37	7.015	U	A	150	144	N	12.69	8.375	U	A
110	29	I	7.18	7.147	U	A	151	151	O	16.55	8.941	U	A
111	30	I	7.73	7.304	U	A	152	156	O	18.43		X	
112	31	I	8.26	7.417	U	A	153	153	O	19.32	9.456	U	A
113	32	I	8.71	7.598	U	A	154	154	O	20.07	9.586	U	B
114	33	I, S6	9.16	7.663	U	A	155	155	O	20.94	9.767	U	A
115	34	J	5.41	6.776	U	A	156	152	O	21.72	10.004	U	A
116	35	J	5.21	6.745	U	A	157	157	O	22.73		X	
117	137	J	5.10	6.755	U	A	158	158	O	23.81	10.394	L	
118	36	J	4.79	6.638	U	A	159	159	O	24.69	10.556	U	A
119	37	J	4.62	6.560	U	A	160	160	O	25.25	10.646	U	C
120	38	J	4.62	6.627	U	B	161	161	O	26.30	10.818	U	B
121	138	J	4.73	6.664	U	B	162	162	O	27.26	10.974	U	C
122	39	J	4.62		X		163	163	O	27.99	11.092	U	C
123	40	J	4.87	6.671	U	B							

Table 3c Arrival time data for shot S3.

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
1	1	A, S1	14.63	9.291	U	A	42	49	B, S3	0.05	5.766	U	A
2	121	A	14.10	9.194	U	B	43	50	C	0.96	6.043	U	C
3	2	A	13.65	9.114	U	B	44	51	C	1.27	6.132	U	A
4	3	A	13.14	8.947	U	A	45	129	C	1.93	6.369	U	A
5	4	A	12.80	8.907	U	A	46	52	C	2.18	6.466	U	C
6	5	A	12.40	8.855	U	A	47	53	C	2.65	6.737	U	A
7	122	A	12.04	8.726	U	B	48	54	C	3.14	6.905	U	A
8	6	A	11.45	8.569	U	A	49	130	C	3.62	7.057	U	A
9	7	A	10.70	8.380	U	B	50	55	D	4.29	7.067	U	A
10	8	A	10.31	8.321		L	51	71	D	4.64	7.152	U	A
11	123	A	9.59	8.194	U	B	52	72	D	5.07	7.236	U	B
12	9	A	9.16	8.127	U	B	53	73	D	5.76	7.381	U	A
13	10	A	8.76	8.064	U	B	54	131	D	6.34	7.436	U	A
14	11	A	8.32	7.963	U	B	55	74	D	6.60	7.475	U	B
15	124	A	7.85	7.874	U	A	56	75	D	7.13	7.572	U	A
16	12	A	7.33	7.747	U	B	57	132	D	7.63	7.651	U	B
17	13	A	6.76	7.640	U	A	58	76	D	8.63	7.883	U	A
18	14	A	6.45	7.591	U	B	59	133	D	9.02	7.925	U	A
19	15	A	6.01	7.497	U	B	60	77	D	9.71	8.079	U	A
20	125	B	5.67	7.406	U	A	61	78	D, S4	9.56	8.043	U	A
21	16	B	5.58	7.375	U	A	62	79	E, S2	5.97	7.485	U	B
22	17	B	5.30	7.320	U	A	63	80	E	6.21	7.560	U	B
23	18	B	5.02	7.252	U	A	64	81	E	6.56	7.632	U	A
24	19	B			X		65	134	E	6.86	7.669	U	A
25	20	B	4.47	7.133	U	B	66	82	E	7.19	7.717	U	A
26	21	B	4.10	7.068	U	A	67	83	E	7.39	7.749	U	A
27	22	B	3.77	6.973	U	A	68	84	E	7.70	7.791	U	A
28	23	B	3.41	6.892	U	A	69	135	E	8.39	7.949	U	A
29	126	B	3.26	6.835	U	A	70	85	E	8.48	7.968	U	A
30	24	B	2.98	6.784	U	A	71	86	E	8.89	8.038	U	A
31	25	B	2.71	6.701	U	A	72	87	E	9.09	8.039	U	A
32	41	B	2.54	6.652	U	A	73	136	E	9.34	8.129	U	A
33	42	B	2.22	6.559	U	A	74	88	E, S5	9.85	8.212	U	B
34	43	B	1.97		X		75	89	F	6.03	7.525	U	B
35	44	B	1.59	6.433	U	A	76	90	F	5.17	7.430	U	B
36	127	B	1.39	6.353	U	A	77	91	F	4.93	7.409	U	B
37	45	B	1.14	6.288	U	A	78	92	F	4.85	7.397	U	B
38	46	B	0.97	6.187	U	A	79	93	F	4.96	7.415	U	B
39	47	B	0.82	6.100	U	A	80	94	F	4.68	7.252	U	A
40	48	B	0.56	5.996	U	A	81	95	F	4.86	7.579	U	A
41	128	B	0.28	5.845	U	A	82	96	F	4.50	7.175	U	B

( to be continued)

Table 3c Arrival time data for shot S3 (continued).

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
83	97	F	4.07	7.095	U	A	124	56	K	5.62	7.423	U	B
84	98	G	3.93	7.051	U	B	125	57	K	5.56	7.397	U	A
85	99	G	3.77	7.188	U	A	126	58	K	6.12	7.507	U	A
86	100	G	3.63	6.927	U	A	127	59	K	6.67	7.568	U	A
87	101	G	3.76	6.978	U	A	128	60	K	7.30	7.727	U	B
88	102	G	3.67	6.935	U	B	129	61	K	7.72	7.783	U	B
89	103	G	3.72	6.880	U	B	130	62	K			X	
90	104	G	3.90	6.969	U	B	131	63	L	10.48	8.363	U	B
91	105	G	4.07	7.065	U	A	132	64	L	11.04	8.435	U	B
92	106	G	3.90	7.042	U	A	133	65	L	11.70	8.603	U	B
93	107	G	3.86	7.031	U	B	134	139	M	8.88	8.204	U	B
94	108	G	3.91	7.105	U	A	135	66	M	8.32	8.020	U	B
95	109	G	4.14	7.139	U	B	136	67	M	7.67	7.849	U	B
96	110	G	3.88	7.112	U	A	137	68	M	7.70	7.861	U	A
97	111	H	1.13	6.178	U	A	138	69	M	8.24	7.954	U	B
98	112	H	1.68	6.428	U	A	139	140	M	7.46	7.799	U	B
99	113	H	1.92	6.484	U	A	140	70	M	7.66	7.870	U	A
100	114	H	2.76	6.662	U	A	141	141	N	5.73	7.035	U	B
101	115	H	3.25		X		142	145	N	6.12	7.486	U	B
102	116	H	3.86	7.041	U	B	143	146	N	6.79	7.580	U	A
103	117	I	4.87	7.257	U	A	144	142	N	7.69	7.737	U	C
104	118	I	5.22	7.317	U	A	145	147	N	8.22	7.843	U	B
105	119	I	5.56		X		146	148	N	8.82	7.986	U	A
106	120	I	6.10	7.551	U	C	147	143	N	9.61	8.097	U	B
107	26	I	6.66		X		148	149	N	10.37	8.259	U	A
108	27	I	6.90	7.650	U	A	149	150	N	10.44	8.247	U	A
109	28	I	7.18	7.690	U	A	150	144	N	10.44	8.425	U	A
110	29	I	7.38	7.710	U	A	151	151	O	10.79	8.321	U	A
111	30	I	7.97	7.882	U	A	152	156	O	12.64		X	
112	31	I	8.38	7.971	U	A	153	153	O	13.57	8.855	U	B
113	32	I	8.64	8.059	U	B	154	154	O	14.35	9.005	U	B
114	33	I, S6	9.06	8.189	U	B	155	155	O	15.28	9.219	U	A
115	34	J	9.31	8.120	U	A	156	152	O	16.00	9.418	U	B
116	35	J	8.85	7.988	U	B	157	157	O	17.04		X	
117	137	J	8.45	7.918	U	B	158	158	O	18.12	9.816	U	B
118	36	J	7.94	7.812	U	A	159	159	O	18.98	9.968	U	B
119	37	J	7.42	7.684	U	B	160	160	O	19.54	10.081	L	
120	38	J	7.05	7.663	U	B	161	161	O	20.58	10.229	U	B
121	138	J	6.67	7.605	U	A	162	162	O	21.60	10.493	U	B
122	39	J	6.18		X		163	163	O	22.39	10.724	L	
123	40	J	5.65	7.411	U	A							

Table 3d Arrival time data for shot S4.

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
1	1	A, S1	24.21	10.550	U	A	42	49	B, S3	9.59	7.841	U	A
2	121	A	23.68	10.447	U	A	43	50	C	9.00	7.621	U	B
3	2	A	23.22	10.357	U	B	44	51	C	8.58	7.544	U	A
4	3	A	22.72	10.233	U	A	45	129	C	7.98	7.407	U	A
5	4	A	22.38	10.182	U	A	46	52	C	7.56	7.347	U	A
6	5	A	21.98	10.138	U	A	47	53	C	7.01	7.234	U	A
7	122	A	21.61	10.015	U	A	48	54	C	6.56	7.135	U	A
8	6	A	21.02	9.895	U	A	49	130	C	6.10	6.997	U	A
9	7	A	20.28	9.707	U	A	50	55	D	5.50	6.732	U	A
10	8	A	19.89	9.670	U	A	51	71	D	5.06	6.677	U	A
11	123	A	19.16	9.545	U	A	52	72	D	4.54	6.595	U	A
12	9	A	18.74	9.461	U	C	53	73	D	3.82	6.450	U	A
13	10	A	18.34	9.419	U	B	54	131	D	3.28	6.256	U	A
14	11	A	17.90	9.341	U	B	55	74	D	3.05	6.204	U	A
15	124	A	17.43	9.262	U	A	56	75	D	2.73	6.100	U	A
16	12	A	16.90	9.154	U	A	57	132	D	2.43	6.042	U	A
17	13	A	16.32	9.051	U	A	58	76	D	1.06	5.733	U	A
18	14	A	15.99	9.018	U	B	59	133	D	1.06	5.711	U	A
19	15	A	15.53	8.948	U	B	60	77	D	0.57	5.621	U	A
20	125	B	15.19	8.845	U	A	61	78	D, S4	0.05	5.496	U	A
21	16	B	15.10	8.810	U	B	62	79	E, S2	15.44	8.900	U	B
22	17	B	14.81	8.745	U	B	63	80	E	15.61	8.983	U	B
23	18	B	14.54	8.705	U	A	64	81	E	15.88	8.995	U	A
24	19	B			X		65	134	E	16.05	9.006	U	C
25	20	B	14.04		X		66	82	E	16.24	9.009	U	A
26	21	B	13.68	8.560	U	B	67	83	E	16.30	9.012	U	A
27	22	B	13.35	8.503	U	B	68	84	E	16.46	9.016	U	A
28	23	B	12.98	8.423	U	C	69	135	E	17.20	9.134	U	A
29	126	B	12.83	8.391	U	A	70	85	E	17.12	9.152	U	A
30	24	B	12.55	8.361	U	A	71	86	E	17.40	9.182	U	B
31	25	B	12.29	8.327	U	B	72	87	E	17.46	9.190	U	B
32	41	B	12.11	8.276	U	A	73	136	E	17.50	9.268	U	B
33	42	B	11.79	8.199	U	A	74	88	E, S5	17.86	9.348	U	B
34	43	B	11.52		X		75	89	F	15.35	8.918	U	B
35	44	B	11.15	8.122	U	A	76	90	F	14.39	8.846	U	A
36	127	B	10.94	8.109	U	B	77	91	F	14.11	8.824	U	B
37	45	B	10.67	8.064	U	A	78	92	F	13.91	8.816	U	B
38	46	B	10.47	8.009	U	A	79	93	F	13.89	8.778	U	C
39	47	B	10.24	7.968	U	B	80	94	F	13.40	8.616	U	B
40	48	B	9.86	7.882	U	A	81	95	F	13.22	8.844	U	A
41	128	B	9.67	7.846	U	B	82	96	F	12.61	8.405	U	B

( to be continued)

Table 3d Arrival time data for shot S4 (continued).

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
83	97	F	11.93	8.331	U	B	124	56	K	15.17	8.869	U	A
84	98	G	11.54	8.300	U	A	125	57	K	15.12	8.847	U	A
85	99	G	10.96	8.373	U	A	126	58	K	15.64	8.924	U	A
86	100	G	10.48	8.017	U	A	127	59	K	16.11	8.971	U	B
87	101	G	10.16	7.960	U	B	128	60	K	16.62	9.107	U	A
88	102	G	9.72	7.838	U	B	129	61	K	16.89	9.137	U	A
89	103	G	9.28	7.696	U	A	130	62	K			X	
90	104	G	8.76	7.599	U	A	131	63	L	18.34	9.462	U	B
91	105	G	8.19	7.524	U	A	132	64	L	18.65	9.518	U	B
92	106	G	7.91	7.469	U	A	133	65	L	19.12	9.607	U	C
93	107	G	7.37	7.324	U	A	134	139	M	13.39	8.475	U	A
94	108	G	6.93	7.228	U	A	135	66	M	13.15	8.450	U	B
95	109	G	6.39	7.060	U	A	136	67	M	12.29	8.218	U	B
96	110	G	6.21	7.008	U	B	137	68	M	11.81	8.094	U	A
97	111	H	10.36	7.944	U	B	138	69	M	11.67	8.047	U	A
98	112	H	10.80	8.080	U	B	139	140	M	10.96	7.928	U	A
99	113	H	10.93	8.065	U	B	140	70	M	10.61	7.820	U	A
100	114	H	11.40	8.183	U	A	141	141	N	5.57	6.434	U	A
101	115	H	11.46		X		142	145	N	6.01	6.892	U	A
102	116	H	11.79	8.281	U	B	143	146	N	5.95	6.849	U	A
103	117	I	12.62	8.456	U	B	144	142	N	6.41	6.922	U	A
104	118	I	12.71	8.435	U	A	145	147	N	6.96	7.002	U	A
105	119	I	12.68		X		146	148	N	7.93	7.203	U	A
106	120	I	13.02	8.462	L		147	143	N	8.84	7.347	U	A
107	26	I	13.51		X		148	149	N	9.93	7.588	U	A
108	27	I	13.66	8.613	U	B	149	150	N	11.00	7.780	U	B
109	28	I	13.75	8.603	U	A	150	144	N	11.36	8.009	U	A
110	29	I	13.28	8.442	U	B	151	151	O	1.81	5.908	U	A
111	30	I	13.56	8.586	U	C	152	156	O	3.24		X	
112	31	I	13.62	8.507	U	B	153	153	O	4.22	6.470	U	A
113	32	I	13.55	8.524	U	B	154	154	O	5.04	6.641	U	A
114	33	I, S6	13.69	8.537	U	R	155	155	O	6.05	6.869	U	A
115	34	J	17.32	9.214	U	B	156	152	O	6.64	7.071	U	A
116	35	J	16.79	9.112	U	A	157	157	O	7.69		X	
117	137	J	16.32	9.064	U	A	158	158	O	8.73	7.496	U	A
118	36	J	15.84	8.926	U	A	159	159	O	9.56	7.636	U	A
119	37	J	15.29	8.825	U	A	160	160	O	10.11	7.774	U	A
120	38	J	14.85	8.801	U	B	161	161	O	11.12	7.921	U	A
121	138	J	14.34	8.708	U	A	162	162	O	12.21	8.170	U	B
122	39	J	13.86		X		163	163	O	13.09	8.267	U	A
123	40	J	13.14	8.567	U	C							

Table 3e Arrival time data for shot S5.

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
1	1	A, S1	10.11	7.784	U	B	42	49	B, S3	9.75	7.532	U	B
2	121	A	9.97	7.751	U	B	43	50	C	9.73	7.468	U	B
3	2	A	9.73	7.688	U	A	44	51	C	10.05	7.533	U	B
4	3	A	9.54	7.582	U	A	45	129	C	10.39	7.640	U	A
5	4	A	9.19	7.552	U	B	46	52	C	10.86	7.795	U	C
6	5	A	8.68	7.447	U	A	47	53	C	11.40	7.893	U	C
7	122	A	8.29	7.281	U	B	48	54	C	11.70	7.913	U	C
8	6	A	8.16	7.250	U	A	49	130	C	12.07	7.979	U	B
9	7	A	7.88	7.131	U	B	50	55	D	12.51	7.925	U	B
10	8	A	7.95	7.171	U	C	51	71	D	12.99	8.012	U	B
11	123	A	7.03	6.938	U	B	52	72	D	13.60	8.131	U	B
12	9	A	7.52	7.114	U	B	53	73	D	14.30	8.272	U	B
13	10	A	7.27	7.040	U	B	54	131	D	14.70	8.304	U	A
14	11	A	7.14	7.011	U	A	55	74	D	14.86	8.329	U	A
15	124	A	6.98	6.944	U	A	56	75	D	15.09	8.383	U	A
16	12	A	6.70	6.872	U	B	57	132	D	15.42	8.443	U	A
17	13	A	6.52	6.826	U	B	58	76	D	16.76	8.699	U	A
18	14	A	6.10	6.742	U	B	59	133	D	16.92	8.700	U	A
19	15	A	6.04	6.731	U	B	60	77	D	17.71	8.856	U	B
20	125	B	6.16	6.733	U	B	61	78	D, S4	17.82	8.864	U	A
21	16	B	6.20	6.751	U	A	62	79	E, S2	5.75	6.635	U	A
22	17	B	6.27	6.754	U	A	63	80	E	5.27	6.564	U	B
23	18	B	6.43	6.763	U	B	64	81	E	4.80	6.446	U	A
24	19	B			X		65	134	E	4.19	6.292	U	B
25	20	B	7.18	6.945	U	B	66	82	E	3.63	6.113	U	A
26	21	B	7.49	7.036	U	A	67	83	E	3.16	6.003	U	A
27	22	B	7.66	7.095	U	B	68	84	E	2.65	5.873	U	A
28	23	B	7.89	7.113	U	A	69	135	E	2.45	5.868	U	A
29	126	B	8.02	7.103	U	A	70	85	E	1.96	5.715	U	A
30	24	B	8.16	7.093	U	B	71	86	E	1.49	5.605	U	A
31	25	B	8.23	7.123	U	B	72	87	E	1.06	5.433	U	A
32	41	B	8.24	7.116	U	B	73	136	E	0.53	5.295	U	A
33	42	B	8.25	7.121	U	A	74	88	E, S5	0.05	5.075	U	A
34	43	B	8.31		X		75	89	F	5.04	6.498	U	C
35	44	B	8.56	7.270	U	B	76	90	F	5.23	6.618	U	B
36	127	B	8.67	7.355	U	B	77	91	F	5.33	6.700	U	B
37	45	B	8.80	7.374	U	A	78	92	F	5.21	6.685	U	A
38	46	B	8.90	7.340	U	B	79	93	F	4.99	6.648	U	A
39	47	B	8.99	7.377	U	B	80	94	F	5.13	6.596	U	B
40	48	B	9.26	7.405	U	A	81	95	F	4.96	6.816	U	B
41	128	B	9.54	7.458	U	B	82	96	F	5.44	6.596	U	B

( to be continued)

Table 3e Arrival time data for shot S5 (continued).

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
83	97	F	6.05	6.709	U	B	124	56	K	6.53	6.842	U	A
84	98	G	6.39	6.892	U	B	125	57	K	7.70	7.089	U	A
85	99	G	6.91	7.176	U	B	126	58	K	8.12	7.114	U	B
86	100	G	7.37	7.026	U	B	127	59	K	8.85	7.271	U	B
87	101	G	7.66	7.101	U	B	128	60	K	9.61	7.447	U	B
88	102	G	8.11	7.192	U	B	129	61	K	10.35	7.552	U	A
89	103	G	8.54	7.271	U	B	130	62	K			X	
90	104	G	9.05	7.360	U	B	131	63	L	0.74	5.343	U	A
91	105	G	9.63	7.553	U	C	132	64	L	1.46	5.495	U	B
92	106	G	9.90	7.586	U	C	133	65	L	2.22	5.721	U	A
93	107	G	10.45	7.810	U	B	134	139	M	6.57	7.008	U	C
94	108	G	10.90	7.850	U	B	135	66	M	6.26	6.800	U	B
95	109	G	11.45	7.906	U	B	136	67	M	6.77	6.949	U	B
96	110	G	11.73	7.957	U	B	137	68	M	7.39	7.018	U	C
97	111	H	8.67	7.245	U	A	138	69	M	8.06	7.287	U	A
98	112	H	8.12	7.162	U	A	139	140	M	8.19	7.346	U	B
99	113	H	7.88	7.094	U	B	140	70	M	8.75	7.448	U	A
100	114	H	7.07	6.907	U	B	141	141	N	12.34	7.678	U	A
101	115	H	6.73	6.876	L		142	145	N	12.10	7.976	U	B
102	116	H	6.24	6.799	U	B	143	146	N	12.46	7.969	U	B
103	117	I	5.28	6.583	U	A	144	142	N	12.65	8.049	L	
104	118	I	5.12	6.542	U	A	145	147	N	12.62	8.029	U	B
105	119	I	5.14		X		146	148	N	12.34	8.064	U	A
106	120	I	4.84	6.513	U	B	147	143	N	12.32	7.995	U	C
107	26	I	4.43		X		148	149	N	12.17	7.987	U	B
108	27	I	4.35	6.353	U	B	149	150	N	11.20	7.835	U	C
109	28	I	4.40	6.333	U	A	150	144	N	10.84	7.929	U	C
110	29	I	5.20	6.463	U	B	151	151	O	18.36	9.016	U	B
111	30	I	5.32	6.527	U	A	152	156	O	23.16		X	
112	31	I	5.67	6.603	U	A	153	153	O	20.97	9.552	U	B
113	32	I	6.07	6.753	U	C	154	154	O	21.60	9.656	U	B
114	33	I, S6	6.35	6.848	U	C	155	155	O	22.29	9.780	U	B
115	34	J	0.50	5.299	U	A	156	152	O	23.16		X	
116	35	J	1.03	5.469	U	A	157	157	O	24.07		X	
117	137	J	1.50	5.600	U	A	158	158	O	25.13	10.395	U	C
118	36	J	1.98	5.715	U	A	159	159	O	26.00	10.535	U	C
119	37	J	2.54	5.794	U	A	160	160	O	26.56	10.686	L	
120	38	J	2.98	5.995	U	A	161	161	O	27.60	10.783	L	
121	138	J	3.48	6.154	U	A	162	162	O	28.39	11.000	L	
122	39	J	3.97		X		163	163	O	28.94		X	
123	40	J	4.68	6.444	U	C							

Table 3f Arrival time data for shot S6.

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
1	1	A, S1	16.20		X	42	49	B, S3	9.05	7.857	U	B	
2	121	A	15.96	9.387	L	43	50	C	8.44	7.768	U	B	
3	2	A	15.65	9.128	L	44	51	C	8.52	7.754	L		
4	3	A	15.37	9.098	U	45	129	C	8.43	7.729	U	C	
5	4	A	14.99	9.046	U	46	52	C	8.79	7.913	L		
6	5	A	14.48	8.959	L	47	53	C	9.13	7.961	L		
7	122	A	14.06	8.844	U	48	54	C	9.17	7.924	L		
8	6	A	13.77	8.774	U	49	130	C	9.33	7.735	U	C	
9	7	A	13.29	8.572	U	50	55	D	9.44	7.741	U	C	
10	8	A	13.20		X	51	71	D	9.87	7.766	U	C	
11	123	A	12.21	8.458	U	52	72	D	10.46	7.892	L		
12	9	A	12.41	8.479	L	53	73	D	11.01	8.058	U	C	
13	10	A	12.03	8.430	U	54	131	D	11.19	8.017	U	B	
14	11	A	11.73	8.392	U	55	74	D	11.24	8.035	U	B	
15	124	A	11.38	8.281	U	56	75	D	11.20	8.017	U	A	
16	12	A	10.88	8.166	U	57	132	D	11.36	8.031	U	B	
17	13	A	10.40	8.111	U	58	76	D	12.74	8.283	U	C	
18	14	A	9.84	7.986	U	59	133	D	12.72	8.267	U	B	
19	15	A	9.49	7.913	L	60	77	D	13.48	8.401	U	C	
20	125	B	9.37	7.920	L	61	78	D, S4	13.76	8.460	U	B	
21	16	B	9.35	7.812	U	62	79	E, S2	9.17	7.845	L		
22	17	B	9.21	7.812	U	63	80	E	8.86	7.792	L		
23	18	B	9.16	7.783	U	64	81	E	8.63	7.717	U	C	
24	19	B			X	65	134	E	8.21	7.821	L		
25	20	B	9.55	7.834	U	66	82	E	7.86	7.519	U	C	
26	21	B	9.59	7.872	U	67	83	E	7.49	7.447	U	C	
27	22	B	9.53	7.797	U	68	84	E	7.17	7.356	U	C	
28	23	B	9.51	7.815	U	69	135	E	7.65	7.539	U	C	
29	126	B	9.53	7.842	U	70	85	E	7.19	7.385	U	C	
30	24	B	9.48	7.833	U	71	86	E	7.06	7.396	U	B	
31	25	B	9.36	7.805	U	72	87	E	6.78	7.265	U	C	
32	41	B	9.23	7.789	L	73	136	F	6.41	7.246	U	C	
33	42	B	8.98	7.701	U	74	88	E, S5	6.35	7.182	U	C	
34	43	B	8.84		X	75	89	F	8.44	7.757	L		
35	44	B	8.83	7.757	U	76	90	F	7.80	7.580	U	C	
36	127	B	8.79	7.792	U	77	91	F	7.62	7.577	U	C	
37	45	B	8.72	7.860	U	78	92	F	7.27	7.545	U	C	
38	46	B	8.67	7.803	U	79	93	F	6.95	7.729	L		
39	47	B	8.57	7.813	U	80	94	F	6.49	7.331	L		
40	48	B	8.60	7.809	U	81	95	F	5.84	7.816	L		
41	128	B	8.84	7.837	U	82	96	F	5.57	6.994	U	C	

( to be continued)

Table 3f Arrival time data for shot S6 (continued).

Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank	Site No.	Logger	Line	Delta (km)	Arrival time	Pol.	Rank
83	97	F	5.51	7.019	U	B	124	56	K	9.70	7.914	U	B
84	98	G	5.41	7.005	U	C	125	57	K	10.71	8.147	U	B
85	99	G	5.38	7.181	L		126	58	K	11.38	8.204	U	B
86	100	G	5.47	6.947	U	C	127	59	K	12.23	8.376	U	B
87	101	G	5.39	6.979	U	C	128	60	K	13.11	8.567	U	B
88	102	G	5.60	7.007	U	C	129	61	K	13.83	8.609	U	B
89	103	G	5.77	7.043	U	C	130	62	K			X	
90	104	G	5.98	7.073	U	C	131	63	L	6.41	7.406	U	B
91	105	G	6.32	7.210	L		132	64	L	6.29	7.402	U	C
92	106	G	6.68	7.287	U	C	133	65	L	6.40	7.379	U	C
93	107	G	7.24	7.455	U	C	134	139	M	0.36	5.577	U	A
94	108	G	7.68	7.560	U	C	135	66	M	0.79	5.691	U	A
95	109	G	8.17	7.581	U	B	136	67	M	1.58	5.975	U	A
96	110	G	8.69	7.695	U	B	137	68	M	1.94	6.103	U	B
97	111	H	8.22	7.683	U	C	138	69	M	2.18	6.173	U	A
98	112	H	7.85	7.558	U	C	139	140	M	2.79	6.349	U	B
99	113	H	7.64	7.556	U	C	140	70	M	3.20	6.551	U	B
100	114	H	6.88	7.254	U	C	141	141	N	8.28	7.203	U	B
101	115	H	6.25		X		142	145	N	7.75	7.458	U	B
102	116	H	5.68	7.059	U	C	143	146	N	7.82	7.402	U	C
103	117	I	5.01	6.877	U	B	144	142	N	7.59		X	
104	118	I	4.59	6.786	U	B	145	147	N	7.29	7.306	U	C
105	119	I	4.08		X		146	148	N	6.70	7.176	U	C
106	120	I	3.62	6.589	U	C	147	143	N	6.40	7.117	U	C
107	26	I	3.33		X		148	149	N	6.01	7.062	U	A
108	27	I	3.14	6.378	U	A	149	150	N	4.93	6.872	U	A
109	28	I	2.82	6.260	U	B	150	144	N	4.54	6.916	U	B
110	29	I	2.04	5.994	U	B	151	151	O	13.77	8.531		L
111	30	I	1.46	5.867	U	A	152	156	O	15.47		X	
112	31	I	0.92	5.713	U	A	153	153	O	16.06	8.961	U	C
113	32	I	0.50	5.633	U	A	154	154	O	16.57	9.115		L
114	33	I, S6	0.05	5.470	U	A	155	155	O	17.10		X	
115	34	J	6.02	7.106	U	B	156	152	O	17.99	9.484		L
116	35	J	5.64	7.005	U	B	157	157	O	18.80		X	
117	137	J	5.30	6.977	U	B	158	158	O	19.81	9.881	U	C
118	36	J	5.17	6.904	U	B	159	159	O	20.65	10.053	U	B
119	37	J	4.96	6.852	U	B	160	160	O	21.19		X	
120	38	J	4.75	6.819	U	A	161	161	O	22.20	10.268		L
121	138	J	4.50	6.748	U	B	162	162	O	22.87	10.419	U	C
122	39	J	4.56		X		163	163	O	23.30		X	
123	40	J	4.43	6.760	U	B							

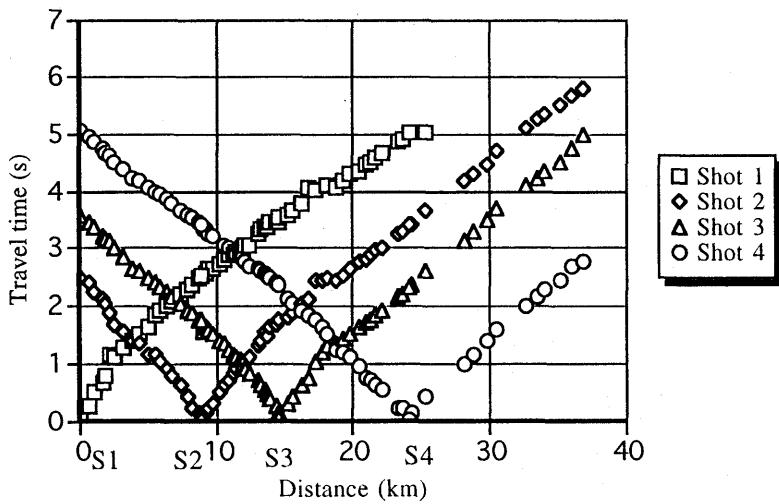


Fig.5 Travel time diagram for each shot.

測線A-B-C-D-Oにおいて観測された値をFig. 5に示す。この図から、霧島火山群の南側にあたるS4付近では4~5km/sの比較的速い速度の層が地表に現れているのに対して、北側では2~3km/sの遅い速度の層が厚くなっていく傾向が読みとれる。また、爆破点S3とS4の中間において屈折初動が不明瞭になり、読みとられた走時に飛びが見られることから、ここに何らかの不連続が存在することが考えられる。

## 5.まとめ

1994年12月1日未明に霧島火山群において人工地震による構造調査を行った。観測は成功し、有意義なデータを得ることができた。初動の走時からは、霧島の南側に速度の速い層が地表に露出し、北側に行くほど低速度の表層が厚くなる傾向が見られる。また、南側の一部には、構造の不連続も見られる。これらの結果は別の機会に報告する。

## 謝辞

本調査を遂行するにあたり、以下の機関の関係者のご協力をいただいた。環境庁えびの高原国立公園管理事務所、えびの・小林・都城・加治木の各営林署、宮崎・鹿児島県消防防災課、管財課および土木事務所、えびの・小林・都城の市役所、高原・霧島・牧園・栗野・横川・吉松の町役場、えびの・小林・都城・国分・横川の各警察署。また、地震研究所、吉井敏専教授、岩崎貴哉助教授には、本調査の企画段階から多くのご教示をいただいた。これらの方々に謝意を表します。本調査は、火山噴火予知計画経費「火山体構造探査」により行われた。また、本研究の一部には、平成6年度文部省科学研究費補助金、重点領域研究(1)「霧島火山群の深部構造に関する地震学的・電磁気学的・測地学的研究」(代表者:鍵山恒臣、課題番号:06222102)を使用した。

## 文献

- HASHIMOTO, T., T. KAGIYAMA and F. MASUTANI, 1994, Self-potential measurements on Shinmoe-dake, Kirishima Volcano Group. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **69**, 257-266.  
 井村隆介, 1994, 霧島火山の地質. 震研彙報, **69**, 189-209.  
 鍵山恒臣, 1994a, 霧島一やや張力的応力場に生成した火山群. 地学雑誌, **103**, 133-144.  
 鍵山恒臣, 1994b, 霧島火山群の構造調査の意義. 震研彙報, **69**, 177-188.

- 鍵山恒臣・山口勝・増谷文雄・歌田久司, 1994, 霧島火山群・硫黄山周辺のVLF, ELF-MT測定.  
震研彙報, 69, 211-239.
- 松島 健・井口正人・西村裕一・鍵山恒臣・渡辺秀文・三ヶ田均・及川 純・山本圭吾・山口  
勝・増谷文雄・奥田 隆・筒井智樹・宮町宏樹, 1995, 1994年霧島火山群人工地震探査における  
GPSを用いた爆破点・観測点の位置測量. 震研彙報, 本号.
- 三ヶ田均・筒井智樹・森田裕一, 1995, 火山体構造探査における波形デジタル共通  
フォーマット. 震研彙報, 本号.
- MINAKAMI, T., S. HIRAGA, T. MIYAZAKI and H. TERAO, 1969, The Ebino Earthquake Swarm and the  
seismic activity in the Kirishima Volcanoes, in 1968-1969, Part 2. Bull. Earthq. Res. Inst., 47,  
745-767.
- 宮崎務・山口勝・増谷文雄・寺尾弘子, 1978, 霧島火山下部のP波速度構造.  
火山, 23, 215-225.
- 森田裕一・茂原論・浜口博之, 1994, 火山構造探査用データロガーの開発と構造探査実験の  
試み. 火山学会1994年秋期大会講演予稿集, 70.
- 及川純・山本圭吾・井田喜明, 1994, 霧島火山における地震波減衰領域. 震研彙報, 69, 291-307.
- 筒井智樹・森田裕一・三ヶ田均, 1995, 人工地震記録読みとりソフトについて.  
震研彙報, 本号.
- 歌田久司・鍵山恒臣・霧島火山電磁気研究グループ, 1994, 霧島火山の深部比抵抗構造.  
震研彙報, 69, 241-255.
- 山本圭吾・井田喜明, 1994, やや遠地地震を用いた霧島火山群の3次元P波速度構造解析.  
震研彙報, 69, 267-289.