

## 四国東部・中国地域における深部地殻構造探査

蔵下英司<sup>1)</sup>・平田 直<sup>1)</sup>・岩崎貴哉<sup>1)</sup>・小平秀一<sup>2)</sup>・金田義行<sup>2)</sup>・伊藤 潔<sup>3)</sup>・西田良平<sup>4)</sup>・  
木村昌三<sup>5)</sup>・澁谷拓郎<sup>3)</sup>・松村一男<sup>3)</sup>・渡辺邦彦<sup>3)</sup>・一ノ瀬洋一郎<sup>1)</sup>・中村正夫<sup>1)</sup>・井上義弘<sup>1)</sup>・  
北浦泰子<sup>1)</sup>・小林 勝<sup>1)</sup>・坂 守<sup>1)</sup>・田上貴代子<sup>1)</sup>・羽田敏夫<sup>1)</sup>・三浦勝美<sup>1)</sup>・三浦禮子<sup>1)</sup>・  
川谷和夫<sup>5)</sup>・徳永雅子<sup>6)</sup>・田代勝也<sup>7)</sup>・中東和夫<sup>7)</sup>・土井隆徳<sup>7)</sup>・渡邊篤志<sup>7)</sup>・栗山 都<sup>7)</sup>・  
根岸弘明<sup>3)</sup>・藤澤洋輔<sup>3)</sup>・高橋繁義<sup>3)</sup>・野口竜也<sup>4)</sup>・余田隆史<sup>4)</sup>・吉川大智<sup>4)</sup>・安岡修平<sup>4)</sup>・  
井川 猛<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学地震研究所・<sup>2)</sup> 海洋科学技術センター・<sup>3)</sup> 京都大学防災研究所・<sup>4)</sup> 鳥取大学工学部・

<sup>5)</sup> 高知大学理学部附属高知地震観測所・<sup>6)</sup> 日本大学文理学部・<sup>7)</sup> 九州大学理学部・<sup>8)</sup> 地球科学総合研究所

## Seismic Refraction/Wide-angle Reflection profiling in the Eastern Shikoku Island and Chugoku District

Eiji Kurashimo<sup>1)</sup>, Naoshi Hirata<sup>1)</sup>, Takaya Iwasaki<sup>1)</sup>, Shuichi Kodaira<sup>2)</sup>, Yoshiyuki Kaneda<sup>2)</sup>, Kiyoshi Ito<sup>3)</sup>, Ryohei Nishida<sup>4)</sup>, Shozo Kimura<sup>5)</sup>, Takuo Shibutani<sup>3)</sup>, Kazuo Matsumura<sup>3)</sup>, Kunihiro Watanabe<sup>3)</sup>, Yoichiro Ichinose<sup>1)</sup>, Masao Nakamura<sup>1)</sup>, Yoshihiro Inoue<sup>1)</sup>, Yasuko Kitaura<sup>1)</sup>, Masaru Kobayashi<sup>1)</sup>, Mamoru Saka<sup>1)</sup>, Kiyoko Tagami<sup>1)</sup>, Toshio Haneda<sup>1)</sup>, Katsumi Miura<sup>1)</sup>, Reiko Miura<sup>1)</sup>, Kazuo Kawatani<sup>5)</sup>, Masako Tokunaga<sup>6)</sup>, Katsuya Tashiro<sup>7)</sup>, Kazuo Nakahigashi<sup>7)</sup>, Takanori Doi<sup>7)</sup>, Atsushi Watanabe<sup>7)</sup>, Miyako Kuriyama<sup>7)</sup>, Hiroaki Negishi<sup>3)</sup>, Yosuke Fujisawa<sup>3)</sup>, Shigeyoshi Takahashi<sup>3)</sup>, Tatsuya Noguchi<sup>4)</sup>, Takashi Yoden<sup>4)</sup>, Daichi Yoshikawa<sup>4)</sup>, Syuhei Yasuoka<sup>4)</sup> and Takeshi Ikawa<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup> Earthquake Research Institute, University of Tokyo

<sup>2)</sup> Japan Marine Science and Technology Center

<sup>3)</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

<sup>4)</sup> Faculty of Engineering, Tottori University

<sup>5)</sup> Kochi Earthquake Observatory, Faculty of Science, Kochi University

<sup>6)</sup> Faculty of Humanities and Sciences, Nihon University

<sup>7)</sup> Faculty of Science, Kyushu University

<sup>8)</sup> JGI, Inc.

### Abstract

In the summer of 1999, we conducted a highly dense, onshore-offshore integrated seismic experiment in the eastern part of Shikoku Island and the Nankai Trough off Shikoku Island, SW Japan. On shore, 93 land seismic stations were deployed on a 165-km-long line in the north-south direction. The intervals of the stations were about 1-2 km. Three explosives were fired as controlled seismic sources. Off shore, an air-gun array was fired at intervals of 200 m. Seismic signals both from land explosives and the air-gun array were recorded by the land seismic stations. We obtained high signal-to-noise ratio data along the entire length of the land profile. Very prominent late arrivals, probably reflected waves from the lower crust or the upper mantle, can be recognized on the record sections. An outline of this experiment is given in this paper, and a detailed analysis showing a structure model from the upper crust to the upper mantle beneath the eastern Shikoku Island will be published in a separate paper.

**Key words :** Onshore-offshore integrated seismic experiment, Seismic Refraction/Wide-angle Reflection profiling, crustal and upper mantle structure

## 1. はじめに

四国沖南海トラフはフィリピン海プレートが西南日本弧下に沈み込むプレート収束域である。南海トラフ周辺域では、過去に東南海地震（1944年）や南海道地震（1946年）などの巨大地震が繰り返し発生している。Ando (1975) によると、東海沖から四国沖にかけての南海トラフ沿いで発生する巨大地震の発生間隔は100～200年であり、4つの破壊領域に分けられている。また、これら地震破壊領域の一部は陸域も含まれていると考えられている。なぜ、このような地震破壊領域のブロック化が存在するのかを理解する為には、地震破壊領域毎に地殻構造を求め、それぞれの構造の違いを明らかにすることだけではなく、破壊が起こった領域と破壊が起こらなかった領域での地殻構造の違いも明らかにすることが重要である。その為には、地震破壊領域全体を横切り、海陸境界域を含む南海トラフから西南日本弧にかけての地殻構造を連続的に把握することが必要である。南海トラフ周辺海域では近年、制御震源と海底地震計を用いた地殻構造探査が数多く行われ [例えば, Kodaira *et al.*, 2000, Nakanishi *et al.*, 1999, Takahashi *et al.*, 1999], 紀伊半島沖や四国沖におけるフィリピン海プレートの沈み込みの様子が明らかになった。しかし、これら得られた地殻構造は海域が中心であり、地震破壊領域全体を完全に横切った海域から陸域にかけての地殻構造を連続的に得るには至っていない。そこで南海トラフから四国・中国地方にかけての地殻構造を連続的に把握することを目的とし、1999年5月～7月にかけて南海トラフから四国・中国地方を横断する海陸統合地殻構造探査が行なわれた [南海トラフ海陸境界深部構造探査研究グループ, 1999]。

本報告では、上記海陸統合地殻構造探査の概要と、陸域探査測線上で得られた地震波記録を示す。データの解

析により得られた地殻構造については、別途に報告する予定である。

## 2. 探査概要とデータ処理

南海トラフから四国・中国地方を横断する海陸統合探査測線のうち、陸上探査測線は四国東部から小豆島・中国地方にかけて設定した (Fig. 1)。この四国東部探査測線 (ES99) の探査測線長は約165 kmである。制御震源として陸域ではダイナマイト震源、海域では大容量エアガンを使用した。薬量500 kgの陸上発破は探査測線上の2地点 (J1: 香川県大川町、J2: 徳島県海部町) で行った。また四国北部の探査測線上では、本探査に付帯して香川県大川郡大川町から白鳥町において深部地殻反射法地震探査が同時期に実施され、薬量100 kgの発破 (J3) が行われた [大西他, 1999]。各陸上発破点の位置、発破時刻、薬量を Table 1 に示す。作孔の直径はそれぞれ100 mmであり、その深度はJ1が70 m, J2が75 m, J3が30 mであった。爆薬としては、海底発破用ダイナマイト (海底発破用爆薬1号) を用い、各作孔底部まで充填した後、ほぼ予定時刻に発破した。発破位置のうち、J1とJ3の緯度・経度は1万分の1地形図による図上読み取り (精度5 m程度)、標高は国家水準点を既知点とした直接水準測量 (精度mm) で算出し、J2については緯度・経度・標高ともに2万5千分の1地形図による図上読み取り (精度10～15 m程度) で算出した。また、それぞれの発破時刻はGPS信号を用いて刻時した (精度数ミリ秒)。海域で使用した制御震源は、海洋科学技術センター海洋調査船「かいよう」に搭載された12,000 cu. inchのエアガンアレーである。海域探査測線は海溝軸に直行する方向でとられ、探査測線長は約190 kmである (Fig. 1)。探査測線上には約1.6 km毎 (測線南端部の一部を除く) に98台の海底地震計が設置され

Table 1. Shot times, locations, and charge sizes of three explosions in the 1999 seismic experiment (ES99).

Shot	Latitude(deg.)	Longitude(deg.)	Height(m)	Date	Shot Time(JST)	Charge(kg)
J1	34.2708	134.2487	101.6	1999.6.14	01:02:02.884	500
J2	33.5933	134.3445	9.0	1999.6.14	01:32:02.251	500
J3	34.1904	134.2566	257.8	1999.6.14	02:02:02.994	100

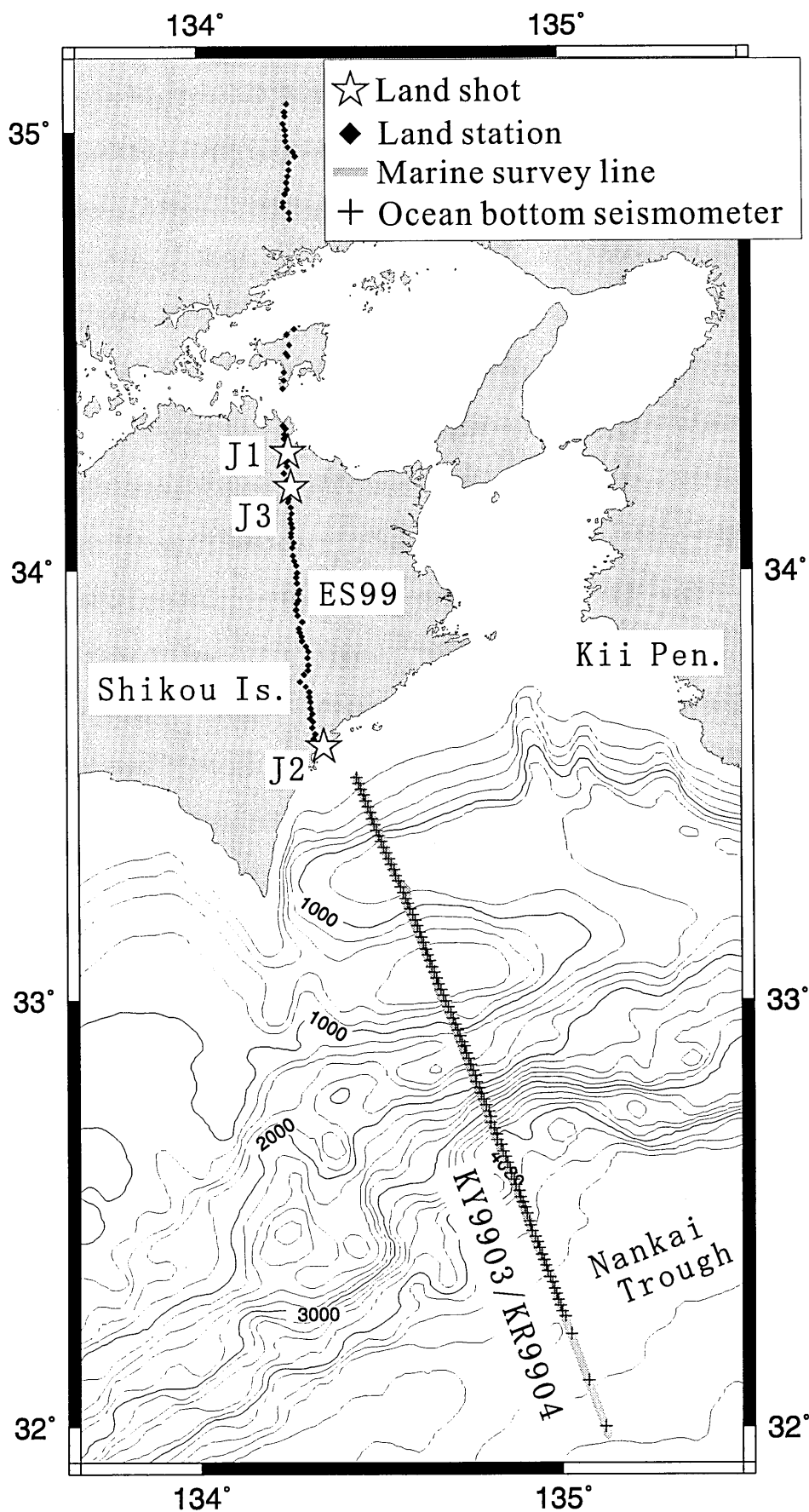


Fig.1 Location map of the 1999 onshore-offshore integrated seismic survey lines.

Bathymetric contour interval is 200 m. On shore, 93 land seismic stations were deployed on a 165-km-long line in the NS direction in the eastern part of Shikoku Island and Chugoku district (ES99). Star and diamond symbols indicate land shot points and land seismic stations, respectively. KY9903/KR9904 indicates the marine seismic survey line. Positions of the ocean bottom seismometers are denoted by crosses.

Table 2. Locations of observation sites.

Number	Station Name	Latitude(deg. )	Longitude(deg. )	Height (m)
1	ST1	35. 0634	134. 2507	220
2	ST2	35. 0448	134. 2451	230
3	ST3	35. 0356	134. 2459	160
4	ST4	35. 0177	134. 2403	150
5	ST5	35. 0050	134. 2455	140
6	ST6	34. 9918	134. 2478	220
7	ST7	34. 9792	134. 2470	190
8	ST8	34. 9649	134. 2544	200
9	ST9	34. 9543	134. 2686	250
10	ST10	34. 9447	134. 2747	210
11	ST11	34. 9297	134. 2571	450
12	ST12	34. 9133	134. 2567	390
13	ST13	34. 8984	134. 2534	270
14	ST14	34. 8844	134. 2494	130
15	ST15	34. 8702	134. 2510	110
16	ST16	34. 8596	134. 2452	100
17	ST17	34. 8398	134. 2402	70
18	ST18	34. 8295	134. 2387	80
19	ST19	34. 8167	134. 2568	100
20	ST20	34. 8025	134. 2578	100
21	ST21	34. 5513	134. 2686	10
22	ST22	34. 5388	134. 2478	30
23	ST23	34. 5157	134. 2550	480
24	ST24	34. 4960	134. 2448	130
25	ST25	34. 4911	134. 2497	150
26	ST26	34. 4531	134. 2397	30
27	ST27	34. 4348	134. 2383	20
28	ST28	34. 4160	134. 2356	60
29	ESN01	34. 3312	134. 2354	30
30	ESN02	34. 3243	134. 2425	90
31	ESN03	34. 3118	134. 2389	80
32	ESN04	34. 3015	134. 2379	40
33	ESN05	34. 2871	134. 2411	50

34	ESN06	34. 2795	134. 2391	110
35	ESN07	34. 2659	134. 2407	30
36	ESN08	34. 2491	134. 2426	110
37	ESN09	34. 2386	134. 2459	90
38	ESN10	34. 2225	134. 2372	330
39	ESN11	34. 2060	134. 2455	170
40	ESN12	34. 1943	134. 2452	260
41	ESN13	34. 1776	134. 2463	220
42	ESN14	34. 1645	134. 2512	200
43	ESN15	34. 1577	134. 2485	300
44	ESN16	34. 1448	134. 2562	220
45	ESN17	34. 1303	134. 2582	310
46	ESN18	34. 1182	134. 2544	350
47	ESN19	34. 1081	134. 2565	140
48	ESN20	34. 0983	134. 2601	70
49	ESN21	34. 0858	134. 2564	50
50	ESN22	34. 0771	134. 2560	30
51	ESN23	34. 0646	134. 2643	30
52	ESN24	34. 0525	134. 2599	170
53	ESN25	34. 0343	134. 2616	260
54	ESN26	34. 0218	134. 2651	230
55	ESN27	34. 0110	134. 2709	250
56	ESN28	33. 9948	134. 2734	740
57	ESN29	33. 9834	134. 2706	550
58	ESN30	33. 9714	134. 2727	350
59	ESN31	33. 9547	134. 2791	350
60	ESN32	33. 9463	134. 2755	320
61	ESN33	33. 9310	134. 2765	450
62	ESN34	33. 9234	134. 2710	790
63	ESN35	33. 9094	134. 2701	810
64	ESN36	33. 8962	134. 2736	670
65	ESN37	33. 8817	134. 2863	570
66	ESN38	33. 8657	134. 2773	470
67	ESN39	33. 8573	134. 2796	550
68	ESN40	33. 8472	134. 2845	470
69	ESN41	33. 8375	134. 2856	460

70	ESN42	33. 8251	134. 2969	360
71	ESN43	33. 8138	134. 3026	230
72	ESN44	33. 7980	134. 3007	240
73	ESN45	33. 7810	134. 3026	260
74	ESN46	33. 7694	134. 3019	370
75	ESN47	33. 7594	134. 2913	390
76	ESN48	33. 7434	134. 2800	680
77	ESN49	33. 7319	134. 2948	700
78	ESN50	33. 7190	134. 3055	250
79	ESN51	33. 7077	134. 3056	90
80	ESN52	33. 6966	134. 3083	90
81	ESN53	33. 6813	134. 3089	60
82	ESN54	33. 6693	134. 3133	60
83	ESN55	33. 6575	134. 3073	40
84	ESN56	33. 6505	134. 3148	40
85	ESN57	33. 6364	134. 3132	20
86	ESN58	33. 6222	134. 3211	20
87	ESN59	33. 6110	134. 3167	30
88	ESN60	33. 6023	134. 3225	20
89	ST5L	33. 6031	134. 3352	0
90	ST4L	33. 6027	134. 3379	0
91	ST3L	33. 6015	134. 3423	0
92	ST2L	33. 5978	134. 3412	0
93	ST1L	33. 5964	134. 3407	0

た、エアガンの発震間隔は 200 m であり、発震位置は D-GPS によって制御され、発震時刻は GPS 信号を用いて刻時された。この海域探査測線上では、海洋科学技術センター深海調査船「かいれい」によって反射法地震探査も実施された [南海トラフ海陸境界深部構造探査研究グループ, 1999]。

陸域探査測線上のうち、四国東部には連続記録型の DAT (Digital Audio Tape) を用いたオフラインデジタルレコーダ [篠原他, 1997] を 1~2 km 間隔で 60 点設置し、さらに J2 近傍には約 300 m 間隔で 5 点設置した。小豆島・中国地方の探査測線上にはタイマー記録方式のオフラインデジタルレコーダである LS8000SH を約 1 km 間隔で 28 点設置した。各観測点の位置を Table 2

に示す。各観測点の緯度・経度・標高は 2 万 5 千分の 1 地形図による図上読み取り (精度 10~15 m 程度) で求めた。

四国東部の探査測線上に設置した観測点では上下動及び水平動の 3 成分観測を行い、サンプリング周波数が 100 Hz のデジタル連続記録を得た。各 DAT レコーダの時刻管理は、それぞれの DAT レコーダに搭載されている CPU のリアルタイムクロック (RTC) が行っている。RTC に使われている水晶発振子は  $5 \times 10^{-7}$  の精度がある。さらに 4 時間毎に GPS 信号を受信し、GPS 時刻と RTC の時刻差を記録上に書き込んでいる。この値を用いて RTC の時刻較正を行うことにより、サンプリング間隔の範囲内で時刻精度が保たれている。この DAT レ

コードで連続記録を行ない、ダイナマイト震源及びエアガンの信号を観測した。DAT に記録された連続記録は、UNIX ワークステーションに転送後、発破とエアガンの発震時刻を基に発震毎のトレースデータとなるように編集した。一方、小豆島・中国地方の探査測線上に設置した観測点では上下動 1 成分観測を行い、サンプリングは 200 Hz であった。LS8000SH も GPS 時刻により較正された水晶時計を刻時信号として用いているので、サンプリング間隔の範囲内で時刻精度が保たれている。この LS8000SH はタイマー記録方式の為、前もって発震時刻が予定されているダイナマイト震源からの信号だけを観測した。

### 3. 観測結果

#### 3. 1 陸上発破

陸上発破 (J1, J2, J3) の信号を観測して得られたデータのうち、四国東部から中国地方の陸上探査測線上で得られた上下動成分のデータを用いて作成した陸上発破毎の距離時間軸断面 (共通震源記録) を Fig. 2 に示す。時間軸は 8 km/s でリデュースしてあり、振幅はトースごとに最大振幅値で規格化して示してある。記録には 1-25 Hz のバンドパスフィルターを施してある。得られた記録の信号対雑音比 (S/N) は良好で、初動が測線全体にわたって観測された。初動到達後も、深部地殻内や沈み込むフィリピン海プレートに起因したと考えられる反射波が幾つか見られる。特に四国南端における発震記録 (Fig. 2-2) では、震央距離 15 km 以遠で初動よりも大きな振幅を持った明瞭な広角反射波が確認できる。また、震央距離 145 km 以遠では、西南日本島弧下のモホ面からの屈折波 (Pn) と解釈できる見かけ速度 8.3 km/s の相が読み取れる。

陸上探査測線上で得られたデータのうち、四国東部では 3 成分観測データが得られている。このうち水平動成分のデータを用いて作成した陸上発破毎の距離時間軸断面を Fig. 3 に示す。上下動成分で見られる P 波に対応する S 波が同定できるように、Fig. 3 の時間軸のリデュース速度を Fig. 2 のリデュース速度の  $1/3^{1/2}$  (4.6 km/s)、表示時間の長さを Fig. 2 の表示時間長 (10 秒間) の  $3^{1/2}$  倍 (17.32 秒間) とした。振幅はトースごとに最大振幅値で規格化し、記録には 1-7 Hz のバンドパスフィルターを施して示してある。作成した距離時間軸断面上では、S 波初動が確認できる。四国南端における発震記録を観測した上下動成分記録 (Fig. 2-2) では、広範囲にわたって初動より大きな振幅を持った P 波の広角反射波が見られた。同じ発震に対する水平動成分記録

にも初動到達後に、広角反射波と思われる相を確認することができる (Fig. 3-2)。しかし、S 波の広角反射波は震央距離約 60 km 以遠で見られ、また、その振幅の大きさは S 波初動とほぼ同じである。

#### 3. 2 エアガン記録

四国東部の陸上探査測線上に設置した DAT レコーダで得られた記録は連続記録である為、エアガンからの信号も観測している。その為、エアガン発震毎の距離時間軸断面 (共通震源記録) や、陸上観測点毎の距離時間軸断面 (共通受振点記録) を作成することが可能である。共通震源記録の一例として、海域探査測線の最も北端で発震したエアガンからの信号 (Shot NO, 919) を四国東部の探査測線上で観測したデータを用いて作成した距離時間軸断面 (共通震源記録) を Fig. 4 に示す。時間軸は 8 km/s でリデュースしてあり、振幅はトースごとに最大振幅値で規格化して示してある。波形には 1-25 Hz のバンドパスフィルターを施してある。記録の S/N は良好で、初動より大きな振幅を持った広角反射波が見られる。次に、陸上観測点毎の距離時間軸断面 (共通受振点記録) の一例として、陸域探査測線最南端の観測点 (ST1L) で得られた上下動成分のデータを用いて作成した距離時間軸断面を Fig. 5 に示す。時間軸は 8 km/s でリデュースしてあり、振幅はトースごとに最大振幅値で規格化して示してある。記録には 1-25 Hz のバンドパスフィルターを施してある。記録の S/N は良好で、初動は海域探査測線全体で確認できる。さらに、震央距離 150 km 以遠では、約 9 km/s の見かけ速度を持つ相が読み取れる。

### 4. おわりに

四国沖南海トラフはフィリピン海プレートが西南日本弧下に沈み込むプレート収束域であり、マグニチュード 8 クラスの巨大地震が繰り返し発生している。この地域での地震発生様式を考える上で、沈み込むフィリピン海プレートの形状と西南日本弧下の地殻構造を詳細に把握することは重要である。そこで、1999 年 5 月～7 月にかけて南海トラフから四国・中国地方を横断する海陸統合地殻構造探査を行った。

陸域探査測線上で観測された記録の S/N は良好で、陸上発破により得られたデータでは、初動が測線全体にわたって観測された。さらに、初動到達後も深部地殻内からや沈み込むフィリピン海プレートに起因したと考えられる反射波が幾つか見られる。また、水平動成分のデータにも S 波の屈折波、広角反射波が確認できる。

四国東部の探査測線上に設置した DAT レコーダで得

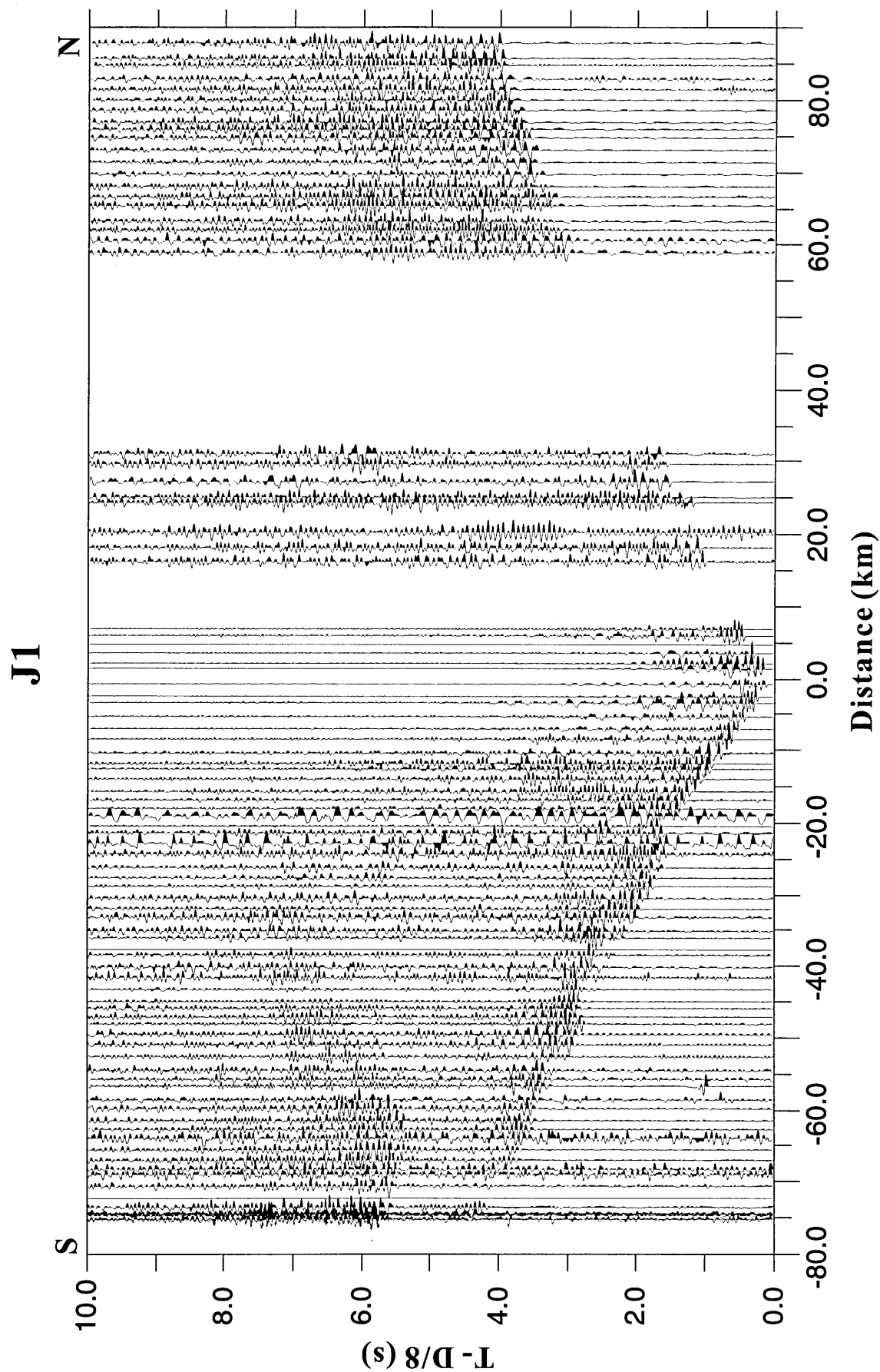


Fig. 2-1 Observed seismograms (vertical component) for J1. The horizontal axis represents a source-receiver offset. Band-pass filter (1-25 Hz) is applied. Each trace is normalized by its maximum amplitude. The reduction velocity is 8 km/s.



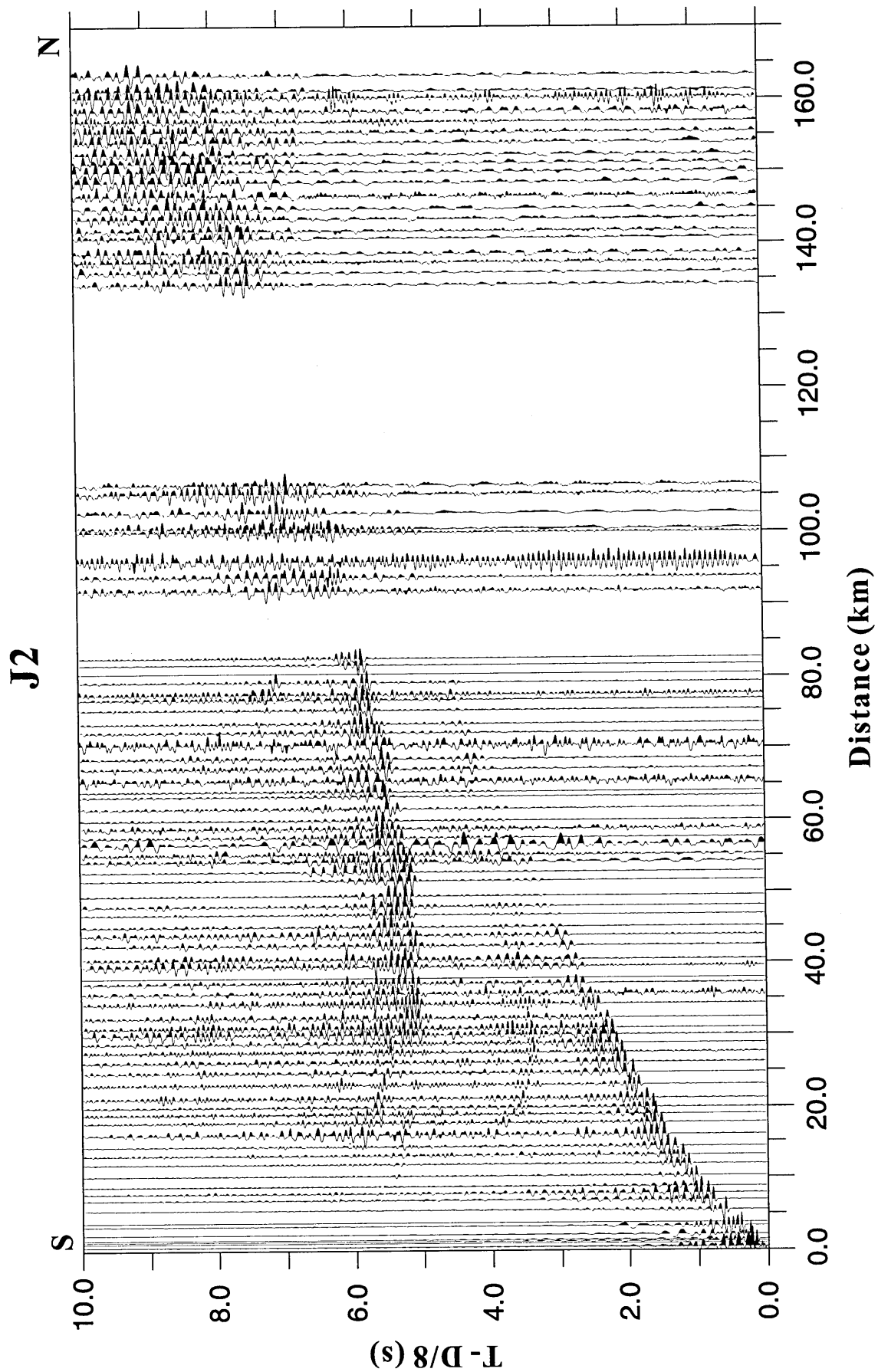


Fig. 2-2 Same as Fig. 2-1, except for J2.

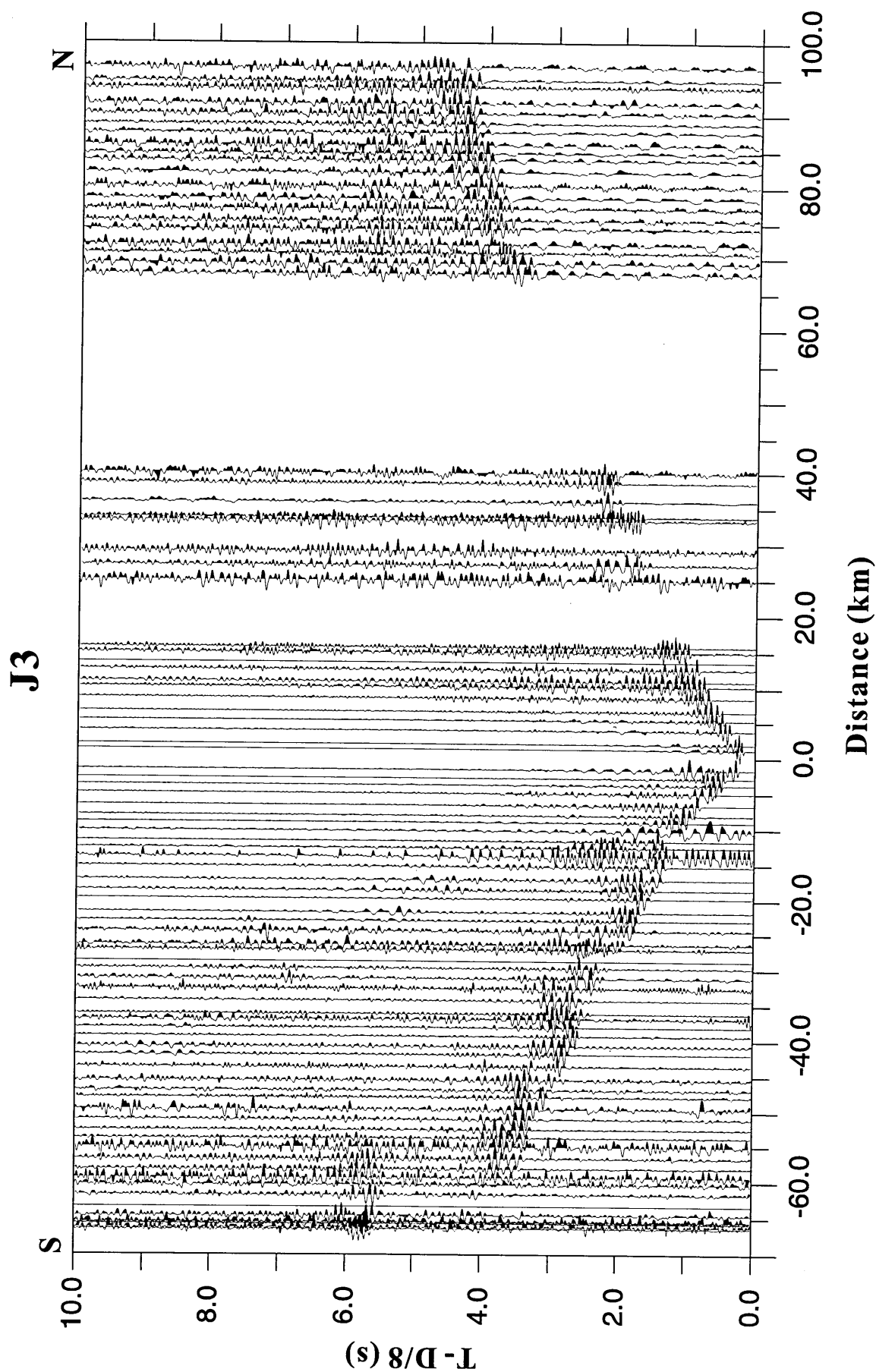


Fig. 2-3 Same as Fig. 2-1, except for J3.

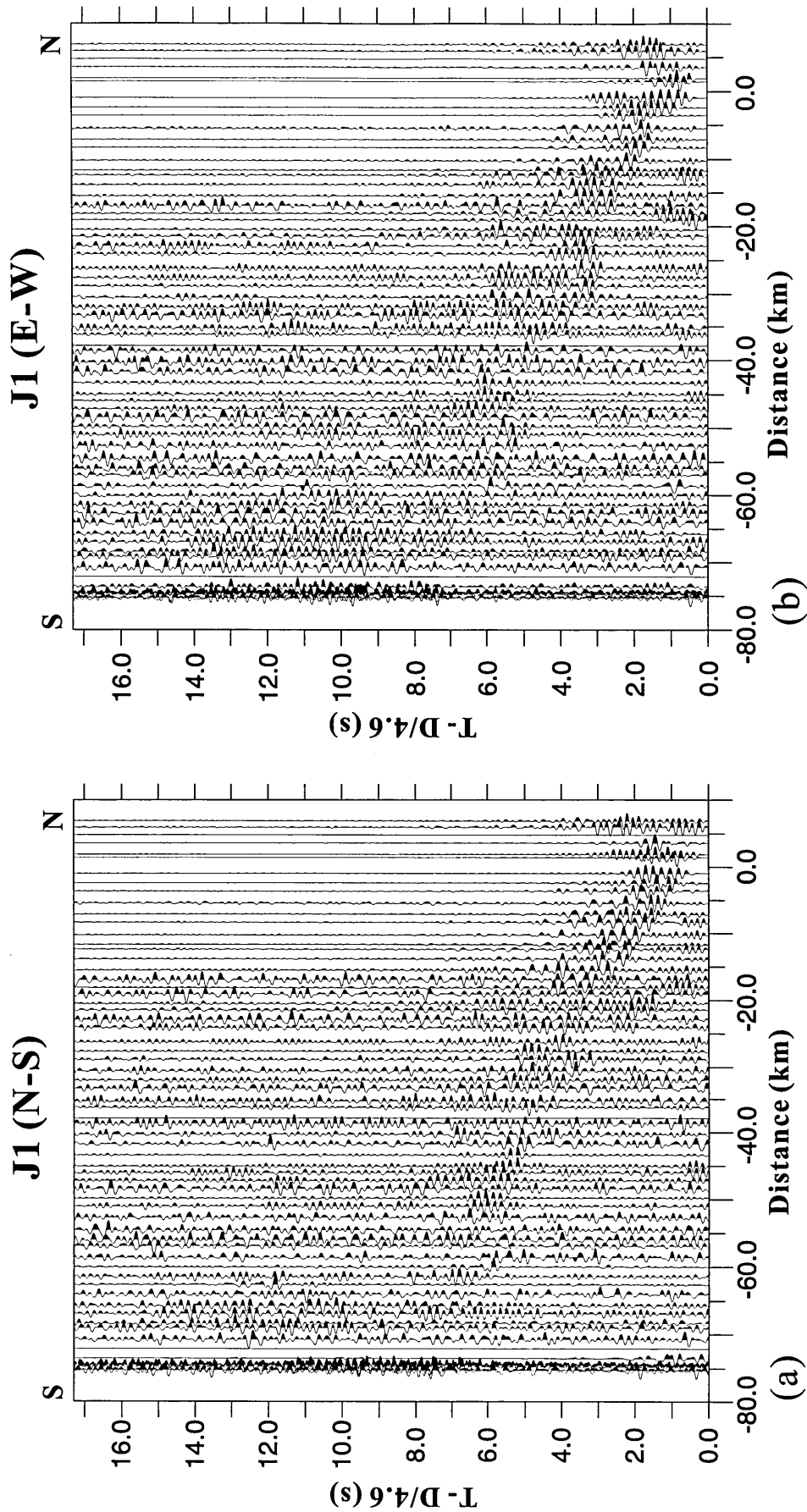


Fig. 3-1 Observed seismograms (horizontal component) for J1. The horizontal axis represents a source-receiver offset. Band-pass filter (1-7 Hz) is applied. Reduction velocity is 4.6 km/s (8.0 km/s/ $3^{1/2}$ ). The timescale is compressed by a factor of  $3^{1/2}$  to allow easier comparison between the P and S wave record sections.  
(a) NS component (b) EW component

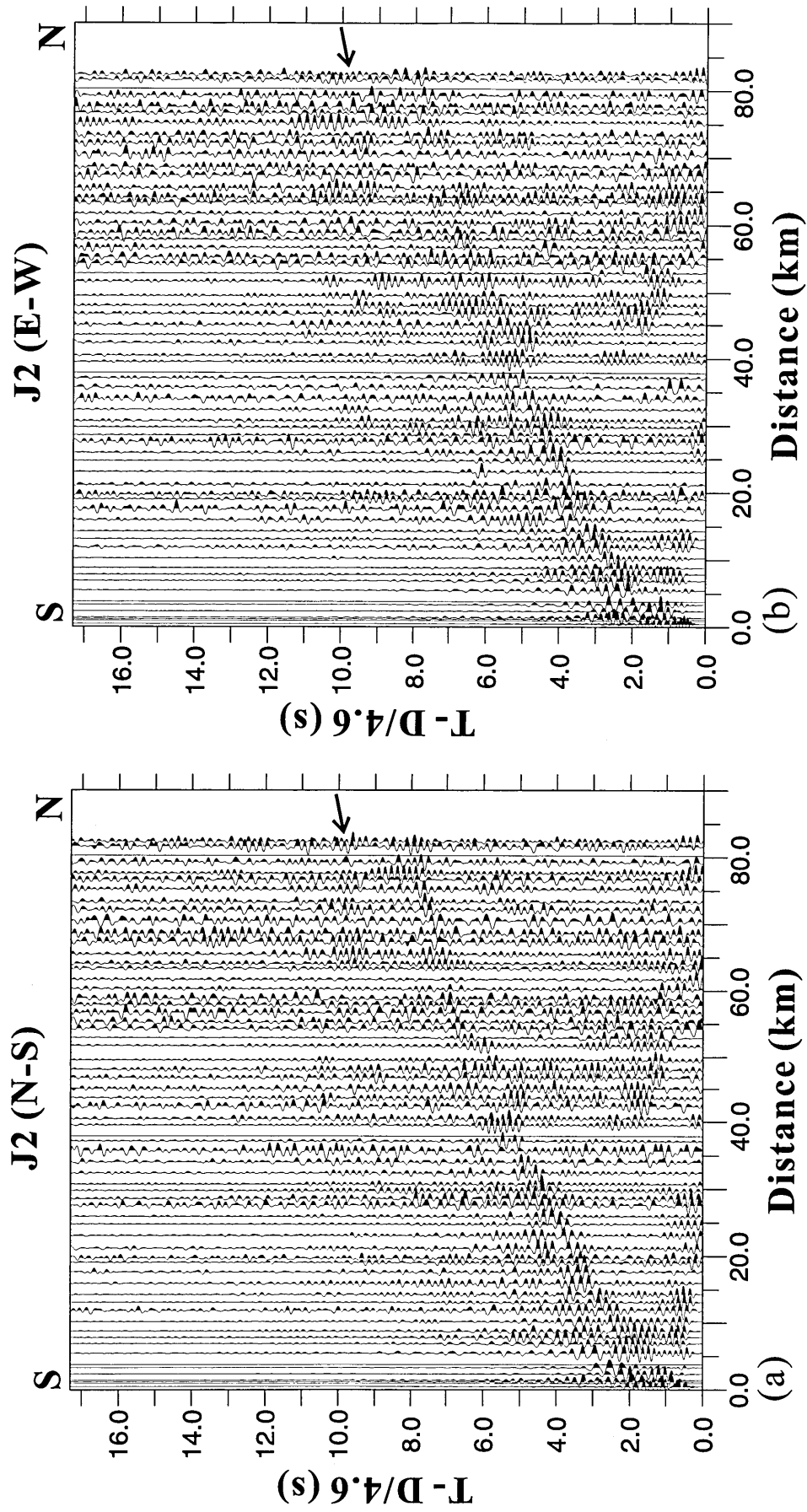


Fig. 3-2 Same as Fig. 3-1, except for J2. Arrows show late arrivals.

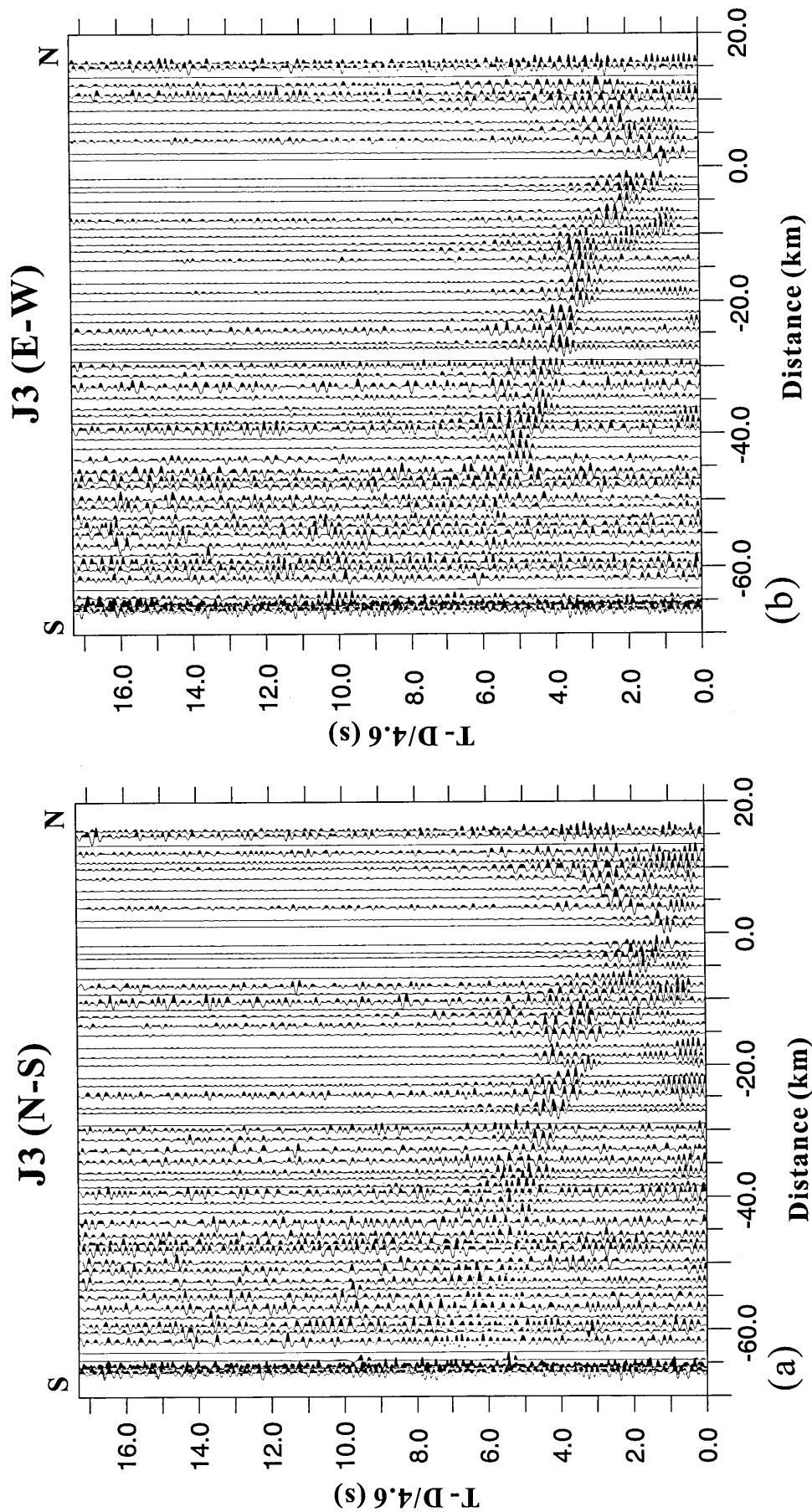


Fig. 3-3 Same as Fig. 3-1, except for J3.

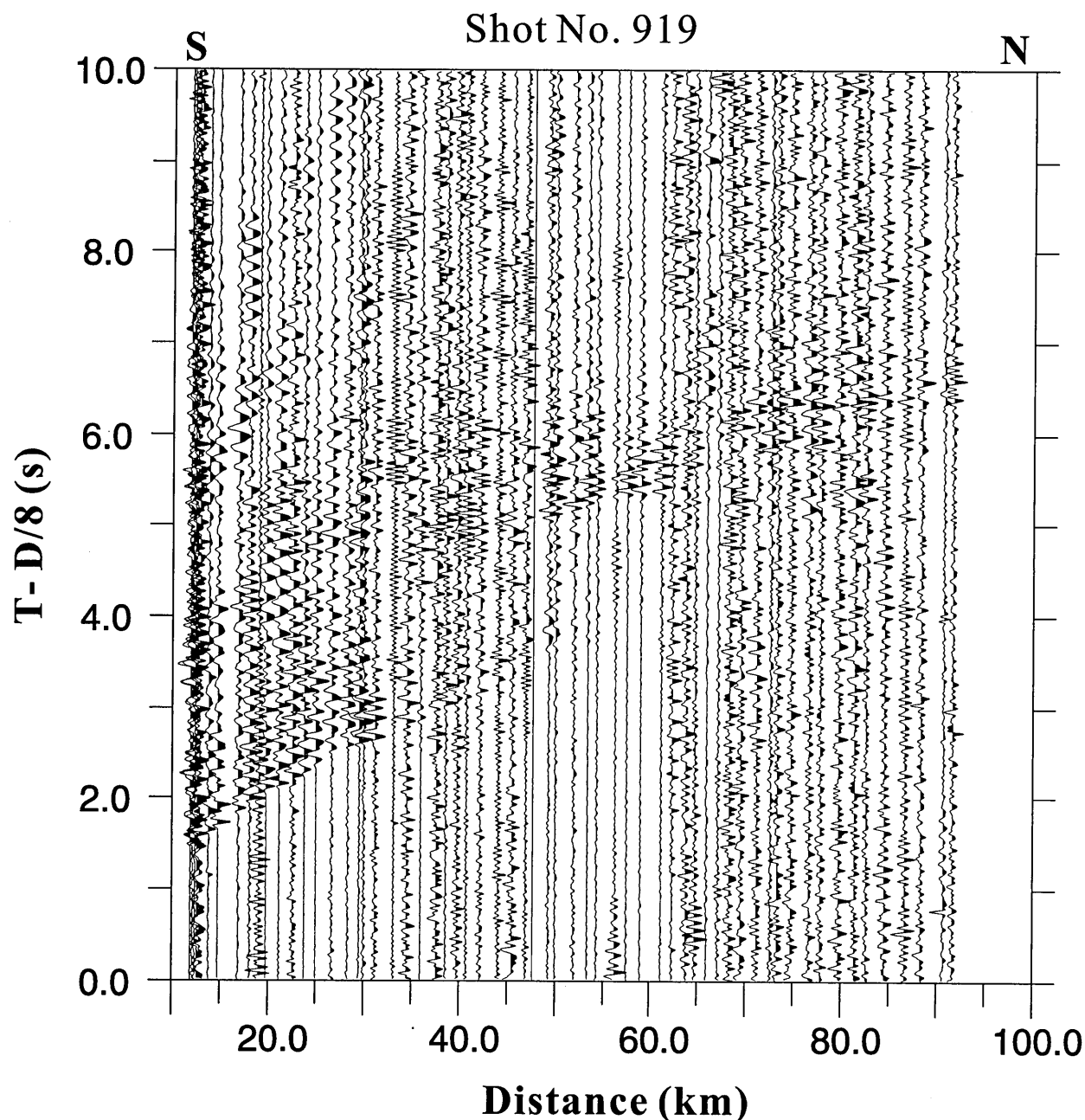


Fig. 4 Observed seismograms (vertical component) for Shot NO. 919, which was located at the northern end of the marine seismic survey line. The horizontal axis represents a source-receiver offset. Band-pass filter (1-25 Hz) is applied. Each trace is normalized by its maximum amplitude. The reduction velocity is 8 km/s.

られた記録は連続記録であるので、エアガンからの信号も観測している。それらのデータを用いて作成したエアガン発震毎の距離時間軸断面（共通震源記録）や、陸上観測点毎の距離時間軸断面（共通受振点記録）でも、地殻深部からと思われる屈折波、広角反射波が確認できる。

本観測では、陸上発破と海域で発震したエアガンからの信号を陸域に設置した観測点で観測した。得られたデータには、地殻深部からと思われる屈折波、広角反射

波が確認できた。今後、これら屈折波、広角反射波に着目し、2次元波線追跡法を用いた解析を行なうことで四国東部・中国地方における地殻構造や沈み込むフィリピン海プレートの形状を明らかにすることができる。また、明瞭に観測された広角反射波の振幅解析を行なうことにより、境界面における物性の変化に関する情報も得られるであろう。これらの結果から、この地域での地震発生様式を考える為の重要な知見が得られるものと期待される。

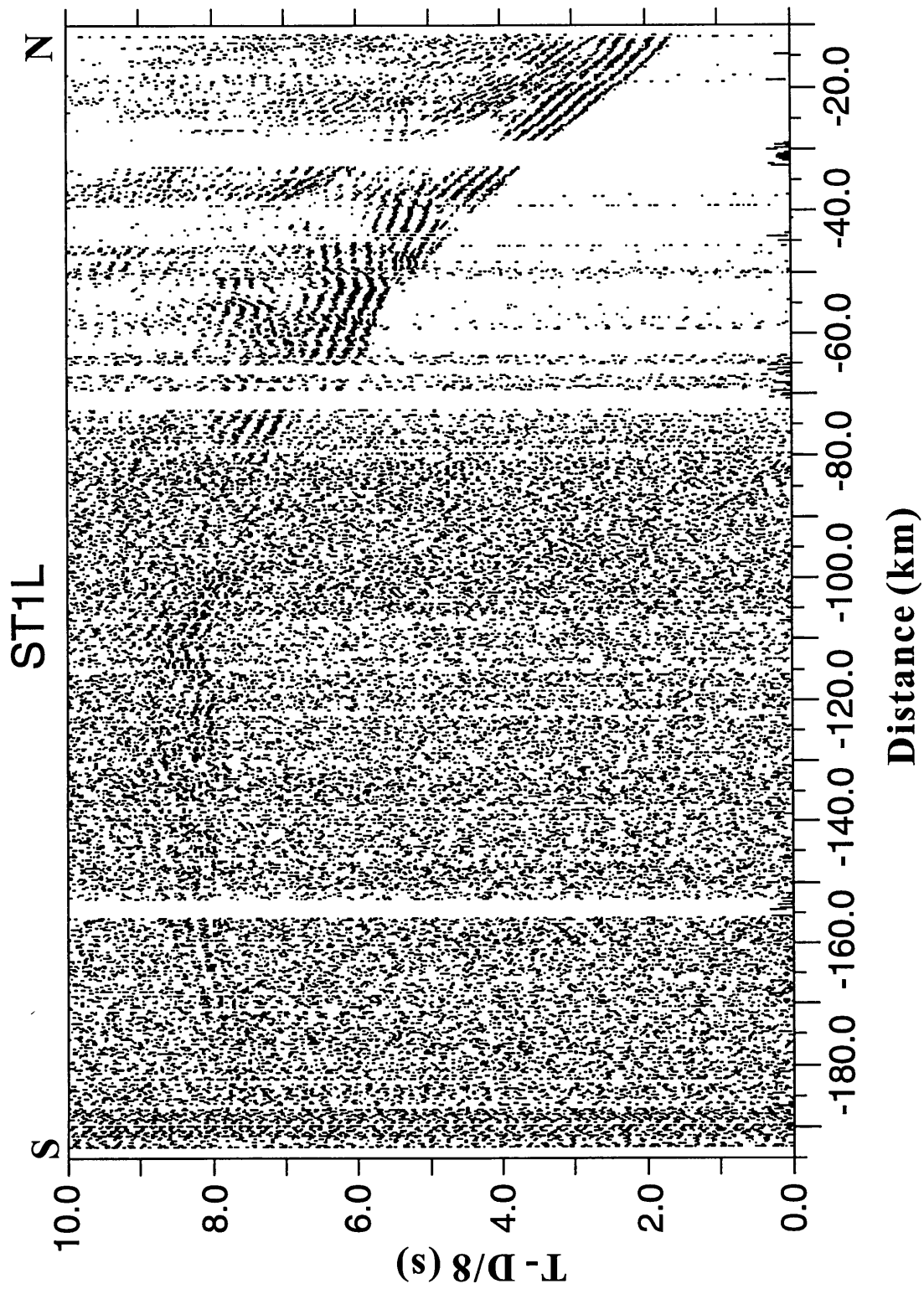


Fig. 5 Observed seismograms (vertical component) for ST1L, which was located at the southern end of the land seismic survey line (ES99). The horizontal axis represents a source-receiver offset. Band-pass filter (1-25 Hz) is applied. Each trace is normalized by its maximum amplitude. The reduction velocity is 8 km/s.

謝 辞

地殻構造探査を実施するにあたって、岡山県英田郡作東町役場、和気郡吉永町役場、備前市役所、兵庫県佐用郡上月町役場、香川県小豆郡土庄町役場、池田町役場、大川郡志度町役場、津田町役場、大川町役場、白鳥町役場、徳島県阿波郡市場町役場、阿波町役場、麻植郡山川町役場、美郷村役場、西郡神山町役場、那賀郡木沢村役場、上那賀町役場、海部郡海南町役場、海部町役場の方々には各種の便宜を図って頂きました。また、2名の匿名査読者からのコメントは、本原稿を改善する上で大変参考になりました。ここに記して深く感謝の意を表します。

文 献

- Ando, M, 1975, Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan, *Tectonophysics*, **27**, 119-140.
- Kodaira, S, N. Takahashi, J.O. Park, K. Mochizuki, M. Shinohara, S. Kimura, 2000, Western Nankai trough seismogenic zone: Results from a wide-angle ocean bottom seismic survey, *J. Geophys. Res.*, **105**, 5887-5905.
- Nakanishi, A., S. Miura, N. Takahashi, J.O. Park, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Suehiro, N. Hirata, T. Iwasaki, M. Nakamura, H. Shiobara, M. Shinohara, J. Kasahara, T. Kanazawa, R. Hino, T. Sato and H. Shimamura, 1999, Crustal structure around the eastern Nankai seismogenic zone revealed by OBS studies in 1990's, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **80**, F570.
- 南海トラフ海陸境界深部構造探査研究グループ, 1999, 地震発生帯深部構造高精度イメージング. 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B59.
- 大西正純・井川 猛・松岡稔幸・河村知徳・越後智雄・折戸雅幸・伊藤谷生・平田 直・岩崎貴哉・蔵下英司・佐藤比呂志, 1999, 爆破地震データの稠密観測記録に見られる四国中央構造線の深部反射波. 日本地震学会講演予稿集, No. 2, p.107.
- Takahashi N., S. Kodaira, A. Nakanishi, S. Miura, J.O. Park, T. Tsuru, Y. Kaneda, H. Kinoshita, T. Iwasaki and N. Hirata, 1999, Seismic structure around the western end of the southwestern Japan arc, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **80**, F570.
- 篠原雅尚・平田 直・松田滋夫, 1997, GPS 時計付き地震観測用大容量デジタルレコーダ. 地震 **2**, **50**, 119-124.

(Received May 2, 2001)

(Accepted June 13, 2001)