

淡路島における1995年兵庫県南部地震の余震観測： 強震動及び広帯域余震観

奥村，貴史
九州大学理学部

竹中，博士
九州大学理学部

鈴木，貞臣
九州大学理学部

笹谷，努
北海道大学理学研究科地球惑星科学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/4494726>

出版情報：九州大学理学部研究報告．地球惑星科学．19（1），pp.103-123，1995-12-27．九州大学理学部
バージョン：
権利関係：

淡路島における1995年兵庫県南部地震の余震観測

— 強震動及び広帯域余震観測 —

奥村貴史・竹中博士・鈴木貞臣・笹谷 努*・古村美津子*・
斉藤誠治*・松島 健**・古村孝志***

Aftershock observation of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake in Awaji Island:
strong motion and broad band observation

Takashi OKUMURA, Hiroshi TAKENAKA, Sadaomi SUZUKI, Tsutomu SASATANI*, Mitsuko FURUMURA*,
Seiji SAITO*, Takeshi MATSUSHIMA** and Takashi FURUMURA***

Abstract

The 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake occurred on January 17 1995. The maximum seismic intensity was seven in Kobe city and a part of Awaji island. We observed the aftershocks at three stations in Awaji island using three strong-motion seismometers and a broad-band seismometer from January 19 to April 4. During this period, we observed 89 events. In these events, nine events were observed at all of the three stations. Among the nine events we analyzed three events using integration of velocity in the time domain and amplitude spectrum of S-wave for 5 seconds. We also analyzed amplitude spectral ratios of two events occurring in Kobe side for 20 seconds from P-wave arrival, for 20 seconds from S-wave arrival, and S-wave part for 5 seconds. From those amplitude spectra, we found predominant frequency around 1-4 Hz for IWY and ABK stations, but TSM predominant frequency around 4-7 Hz. The spectral ratio shows 3-10 times amplification, around 1-2Hz and 4-7 Hz for TSM/IWY, and around 0.9-2 Hz and 4-7Hz for ABK/IWY. For TSM/IWY, we saw 2-5 times attenuation around 2-3 Hz. We also report on the detailed condition of observation and some phenomenological analyses of the observed events.

I. はじめに

1995年1月17日午前5時46分, 明石海峡を震源とするマグニチュード7.2の1995年兵庫県南部地震が起こった。この地震により, 死者5,500人以上, 負傷者3万

人以上の被害が生じた。今回の地震は, 淡路島の北部から神戸側の六甲山麓に至る長さ50kmの断層が右横ずれに動いたことによって起こったと推定されている(長瀬ほか, 1995)。この断層は, 淡路島側では確認されているが, 神戸側では未確認である。各地の震度は, 当初, 神戸と洲本で震度6, 京都, 豊岡, 彦根で震度5だったが, 後に気象庁は, 現地調査により, 神戸市, 芦屋市, 西宮市, 宝塚市の一部と, 淡路島北部の一部の地域が震度7に相当していたことを発表した(日本建築学会, 1995)。

我々は, 淡路島において, 1995年兵庫県南部地震の余震による強震動の共同観測を1995年1月19日から同年4月4日まで実施した。観測の目的は, 余震の震源特性や, 観測点近傍の地盤の特性などを調べることに

平成7年9月26日受付, 平成7年10月30日受理

- * 北海道大学理学研究科地球惑星科学専攻 Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
- ** 九州大学理学部島原地震火山観測所 Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Faculty of Science, Kyushu University
- *** 北海道教育大学岩見沢校 Faculty of Education, Hokkaido University of Education, Iwamizawa Campus

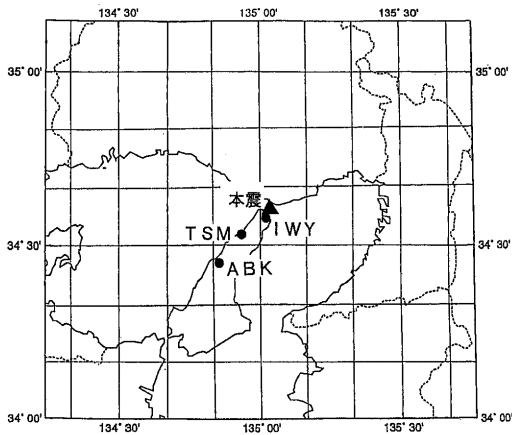


図1 観測点分布 (●) と本震の震央 (▲)

Fig. 1 Locations of the observation stations (●) and the epicenter of mainshock (▲).

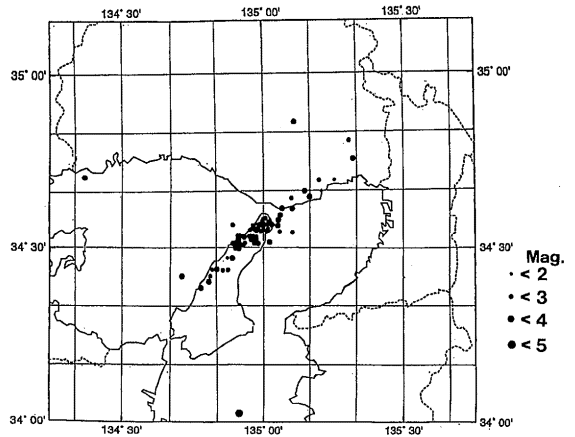


図2 観測された余震の震央分布

Fig. 2 Epicenters of the observed aftershocks.

ある。そこで、島内3ヶ所に速度型強震計 (VSE11C/12C) を、その内の1ヶ所に広帯域地震計 (STS-2) を設置した。また、この観測は、多数の大学や公共機関、民間会社による共同総合研究の一部 (共同強震観測グループ, 1995) でもある。

今回、淡路島の3点で観測を行った。その観測点の分布を図1に示す。岩屋 (IWY) は、本震の震央から5 kmほど離れた観測点である。富島 (TSM) は、今回活動した野島断層の南端近くに、多賀 (ABK) は、余震分布の南西端に位置している。それぞれの観測点の詳細は、後にまとめている。観測期間中に3観測点のいずれかで観測された余震の総数は、89個である。そのうち、3観測点で同時に観測された余震は9個である。観測されたすべての余震の震源情報と各観測点の星取り表を表1に、それらの震央分布を図2に示す。今回用いた震源情報は、京都大学防災研究所、東京大学地震研究所、名古屋大学理学部の地震観測網のデータを京大防災研阿武山観測所において自動処理して得られた震源である。また、震度階情報は気象庁気象研究所によるものである。

淡路島の地質を概観すると、基盤岩類は白亜紀に形成された花崗岩類であり、南部では、その上に和泉層群が堆積している。和泉層群は海成層で、基底礫岩、泥層、およびタービダイトを主体とする、礫岩、砂岩、および泥岩の互層である。中一北部には、花崗岩類、変成岩類および泉南流紋岩が分布し、大阪層群と神戸層群が堆積している。大阪層群は、淡水成の地層で、

礫層、砂層、およびシルト-粘土層の互層で構成され、炭質層や火山灰層を挟んでいる。層厚は、約300mである。神戸層群は淡水成の地層で、花崗岩質粗粒砂岩-細礫岩層と中一巨礫サイズの亜角-角礫岩層からなる。層厚は、50m以下である (高橋ほか, 1992)。

本論文では、今回の観測を記録として残すために、3観測点の観測状況の詳細と、余震の特徴について報告する。また、各観測点の特徴を得るために、比較的規模の大きい3つの地震の観測波形 (速度記録) とそれを積分して得られた変位記録、速度波形のX成分のS波部分のフーリエ振幅スペクトル、および神戸側の地震を使って、IWYをロックサイトとして求めたスペクトル比を示す。

II. 各観測点の観測状況

- 2.1) **IWY** (淡路町岩屋: 神戸大学内海域機能教育研究センター (旧) 神戸大学理学部附属臨海実験場)
 観測期間: 1995年1月19日~1995年4月4日
 位置: 34° 34' 44" N 135° 01' 28" E (携帯型のGPSで決定)
 地震計: STS-2 (速度型広帯域地震計, 感度: 1 Kine/15V, 観測帯域: 0.0083Hz~50 Hz)
 VSE11C/12C (速度型強震計, 感度: 30 Kine/10V, 観測帯域: 0.025Hz~70Hz)
 記録計: PDAS100 (デジタル記録計, 入力: ± 20V max) × 3set

表1 観測された余震の震源情報。○, △のついている観測点は, その地震の記録があることを示している

Table 1 List of hypocenter parameters for observed aftershocks. The event data exist in the station marked with ○ or △.

No	日付	時間	緯度(°N)	経度(°E)	深さ(km)	Mag.	IWYV	IWYS	TSM	ABK	最大震度	M _{JMA}
01	1/20	11:48					△				2(神戸)	4.4
02		15:38:25	34.698	135.21	10.805	2.9		○			3(神戸)	3.6
03		15:55:53	34.487	134.89	4.998	3.4			○			
04		22:54:49	34.584	135.01	4.993	2.4		○				
05	1/21	00:59:28	34.717	135.26	11.165	1.6		○				
06		02:16:39	34.522	134.90	0.978	3.0		○	○			
07		02:21:39	34.561	134.98	-0.056	2.3		○	○			
08		04:24:11	34.541	135.02	14.650	3.0	△					
09		05:30						○				
10		06:32:08	34.584	135.05	4.639	3.2	△	○	○			3.6
11		07:27:05	34.555	134.90	3.752	2.7			○			
12		07:46:58	34.555	135.02	4.986	2.9	△	○				
13		08:59:09	34.552	134.96	14.639	2.5		○				
14		15:32:08	34.566	135.02	13.069	2.1	△	○				
15		15:44:16	34.556	134.89	6.258	2.6			○			
16		18:13:15	34.561	134.96	4.991	2.5			○			
17		20:12:48	34.628	135.08	7.613	3.2	○	○	○			3.5
18		20:16:15	34.589	135.00	4.996	2.1		○				
19		21:12:43	34.568	135.02	8.941	3.2	○	○	○	○	4(北淡町)	4.1
20		22:57:55	34.578	134.98	4.764	1.9		○				
21		23:41:23	34.558	134.97	4.457	3.2	○	○	○			
22		23:53:32	34.528	134.97	-0.013	3.2		○		○		
23	1/22	02:23:37	34.543	134.95	12.453	2.3		○				
24		05:16:56	34.660	135.10	16.219	2.8	○	○				
25		09:24:06	34.535	134.95	0.039	2.1			○			
26		10:25:10	34.524	134.90	3.461	3.2	○	○	○	○		
27		10:33:55*	34.838	135.31	16.903	2.5	○	○				
28		10:53:27	34.588	135.78	15.103	1.7		○				
29		11:34:27	34.568	135.01	14.073	2.4		○				
30		12:23:06	35.079	136.55	3.530	3.0	○	○	○	○	2(北淡町)	3.8
31		14:04:27	34.439	134.87	10.742	2.7				○		
32		17:01:10	34.560	134.99	4.992	3.0	○	○	○			
33	1/23	00:33:05	34.553	134.97	3.020	3.4	○	○	○		4(北淡町)	4.2
34		02:14:29	34.559	135.02	13.518	3.0	○	○	○		2(北淡町)	3.5
35		03:04:23	34.571	135.03	5.706	1.7	○	○				
36		04:44:05	34.541	134.92	3.875	2.7			○			
37		06:02:28	34.513	134.91	19.675	3.5	○	○	○	○	3(北淡町, 神戸)	4.5
38		09:16:44	34.542	134.90	3.180	2.4			○			
39		09:24:10	34.541	134.93	11.431	2.6			○			
40		13:05						○	○			
41		15:21:54	34.565	134.99	4.994	2.7	○	○				
42		21:44:11	34.887	135.10	29.789	3.2	○	○		○	3(神戸)	4.3
43	1/24	00:48:17	34.554	135.10	4.993	2.6		○				
44		02:42:53	34.583	135.01	4.996	2.2		○				
45		02:53:29	34.739	134.37	-0.006	3.1		○				
46		03:49:07*	34.045	134.61	35.460	4.4	○	○			3(神戸)	3.6
47	1/25	16:58:28*	34.434	134.73	8.240	3.5			○			4.2

表1 (つづき)
Table 1 (continued)

No	日付	時間	緯度(°N)	経度(°E)	深さ(km)	Mag.	IWYV	IWYS	TSM	ABK	最大震度	M _{JMA}
48		18:17:51	34.426	134.81	19.249	2.6				○		
49		22:27:33	34.561	134.97	12.579	2.7		○				
50		23:06:00	34.557	134.97	2.958	3.3	○	○	○		3(北淡町)	3.6
51		23:15:57	34.783	135.32	13.611	3.4	○	○	○	○	4(神戸)	4.7
52		23:44						○				
53	1/26	01:08:04	34.536	134.94	4.985	2.7			○		1(北淡町)	2.7
54		02:58:38	34.558	134.95	19.298	2.9		○			1(神戸)	3.1
55		08:14:50	34.562	134.95	2.843	2.6		○			1(北淡町)	3.0
56		08:34:50	34.579	135.02	4.990	2.9	○	○	○		1(北淡町, 神戸)	3.2
57		08:41:01	34.543	134.90	4.991	2.6			○		1(北淡町)	2.9
58		10:08:29	34.545	134.91	3.135	2.7		○	○		2(北淡町)	2.8
59		11:26:07	34.580	135.01	4.995	2.2		○				
60		14:29:59	34.516	134.92	3.642	2.7			○		1(北淡町)	
61		20:09:59	34.549	134.97	-0.030	2.4			○		2(北淡町)	2.8
62	1/27	08:16:31	34.603	135.05	13.754	3.3			○		1(北淡町, 神戸)	3.5
63		17:41:08	34.514	134.91	13.325	3.3			○	○		3.3
64		20:01:13	34.542	134.96	4.996	3.0			○		1(北淡町)	3.1
65	1/30	14:43:36	34.545	134.91	3.142	3.2			○		2(北淡町)	3.3
66	1/31	01:43:50	34.546	134.91	4.947	3.4		○	○		3(北淡町)	3.7
67		11:36:32	34.546	134.90	3.115	2.7			○		2(北淡町)	2.9
68	2/01	23:30:13	34.460	134.86	-0.398	2.3				○		
69	2/02	16:04:19	34.583	135.05	12.802	3.4	○	○	○	○		
70		16:19:27	34.683	135.15	17.242	3.4	○	○	○	○		
71	2/03	04:36:24	34.690	135.19	10.128	3.1			○			
72		14:18:31	34.549	134.97	4.993	2.9			○			
73		23:35:29	34.593	135.04	4.645	2.9		○				
74	2/04	16:09:58	34.530	134.90	-0.012	3.3			○	○		
75		19:38:00	34.520	134.90	16.449	3.2			○	○		
76	2/05	10:32:08	34.523	134.91	14.929	3.3	○	○	○	○		
77	2/06	03:45:34	34.571	135.00	4.989	2.9	○	○				
78	2/07	08:14:24	34.449	134.84	8.731	3.1				○		
79		08:22:00	34.446	134.82	8.878	2.6				○		
80	2/08	15:40:32	34.628	135.10	4.995	3.2			○			3.4
81	2/10	15:19:48	34.562	135.05	4.994	2.9			○			3.1
82	2/15	14:44:27	34.510	134.92	11.047	3.0			○	○		3.3
83	2/17	03:09:32	34.398	134.78	18.562	3.0				○		3.1
84	2/18	05:49:07	34.539	134.98	3.217	3.2			○			3.3
85		21:37:33	34.413	134.80	20.420	3.8	○		○	○		4.9
86	2/19	20:27:15	34.545	134.93	3.175	3.3			○			
87	2/25	12:59					○	△	○	○		
88	3/02	06:23					○	△	○			
89	3/07	16:20						○				
合 計							31	53	50	22		

注1) * は、PDAS の記録開始時間 (STS-2) と震源情報に用いたデータでの時間のくい違いが10秒以上。

注2) △は、記録としてはあるがデータとして使えない。

注3) IWYV は VSE(HIGHGAIN+LOWGAIN), IWYS は STS-2 である。

注4) M_{JMA} は、気象庁の緊急震源によるマグニチュードである。

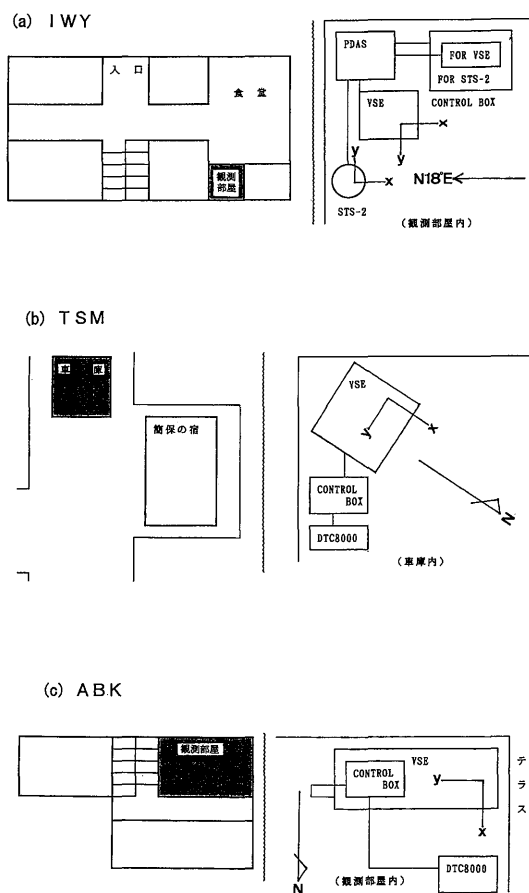


図3 各観測点の観測機器の配置。(a)IWY(神戸大学内海域機能教育研究センター)。(b)TSM(淡路島簡易保険保養センター)。(c)ABK(兵庫県立淡路文化会館)

Fig. 3 Configuration of observation systems for each station. (a)IWY, (b)TSM, (c)ABK

観測点近傍の地質

この付近は、神戸層群の一つの岩屋累層と呼ばれる砂岩が主体の堆積層が、基盤岩類となる花崗岩類の上に約60mの厚さで堆積している(藤田ほか, 1984; 水野ほか, 1990)。

観測内容

(1) STS-2 + PDAS100 (No. 009)

1995年1月20日から観測を開始し、観測された余震の記録数は53個であった。設置場所は、実験場内の部屋を借りて設置した。設置面はコンクリートである。地震計の方位および観測システムの配置は、図3(a)に示してある。記録の成分は、ch1-Z(UD), ch2-Y(N108

E), ch3-X(N198E)とした。観測方法として、記録計の内部トリガーを利用したレベルトリガー方式を採用した。AD変換は、16bitのうち、14bitを整数部、2bitを指数部に分けて行った。ゲインは1倍とした。サンプリング周波数は、1/20~1/21/06:32:00のデータは100Hz, 1/21/07:46:51~1/23/06:02:22のデータは200Hz, 1/23/13:05:49以降のデータは100Hzとした。時刻較正は、VSEにつないだLOWGAINのPDASから1秒毎に出力されるパルス信号を用いた。2/13~3/3の記録は、出力ケーブルの接続ミスで、記録としては不完全である。

(2) VSE11C/12C+PDAS100 (LOWGAIN)

(No. 002)

+PDAS100 (HIGHGAIN)

(No. 345)

1995年1月19日から観測を開始し、観測された余震の記録数はLOWGAIN(1倍)とHIGHGAIN(10倍)あわせて31個であった。設置場所は、上記のSTS-2と同じ場所である。地震計の方位および観測システムの配置は図3(a)に示してある。記録の成分は、ch1-X(N198E), ch2-Y(N288E), ch3-Z(UD)とした。VSEについては、地震計からの出力に、PDAS 2台をパラレルに接続して、PDAS側で、1台は1倍に、もう1台は10倍にゲインを設定して観測を行った。観測方法は、STS-2と同じようにレベルトリガー方式を採用した。VSE(HIGHGAINとLOWGAIN)のみ、Lowcut-Filter(周期100秒以上cut)を使用している。サンプリング周波数は、1/19~1/23/15:21:46のデータは200Hz, 1/23/21:44:17以降のデータは100Hzとした。AD変換は16bitで行った。時刻較正は、LOWGAINのPDASをJJYで較正した。HIGHGAINのPDASは、LOWGAINのPDASより1秒毎に出力されるパルス信号を用いた。また、2/14以降は、アンカーボルトで固定した。

(3) 微動観測

4月4日に、VSE 2台(IWYとABKで使用)とSTS-2を用いて、記録への建物の影響と定常ノイズを調べるために微動観測を3回行った。詳細は、次の通りである。

1) 09:35~09:40 (キャリブレーション)

屋内: STS-2 [1Kine/15V]+

PDAS100(No. 009) [GAIN100]

VSE(IWY) [3Kine/10V]+

PDAS100(No. 002) [GAIN100]

VSE(ABK) [2Kine/10V]+

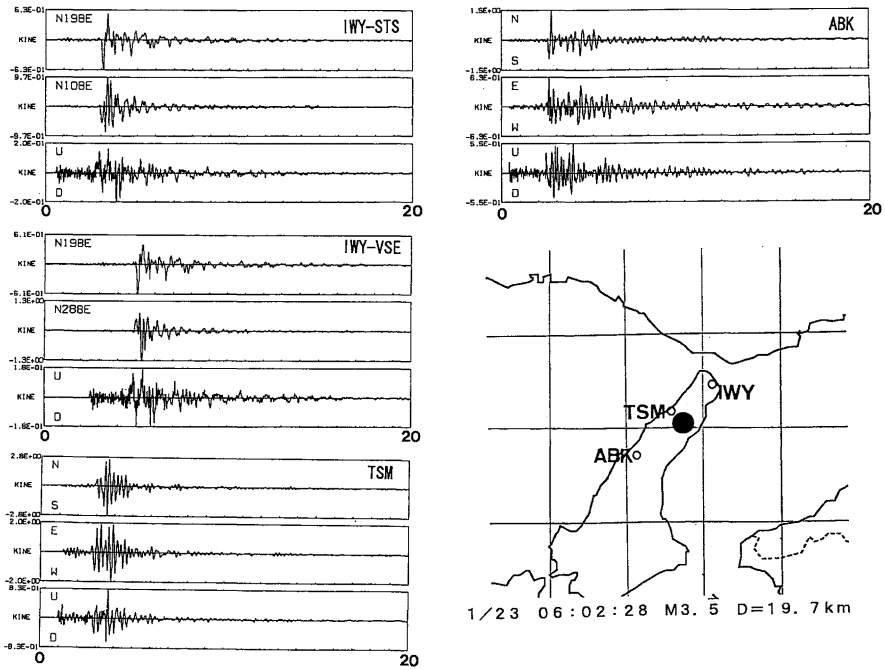


図4 観測された余震 (1/23/95) の速度記録, 横軸1目盛は1秒である

Fig. 4 Velocity seismograms of the aftershock at 1/23/95. The pitch of the horizontal axis is a second.

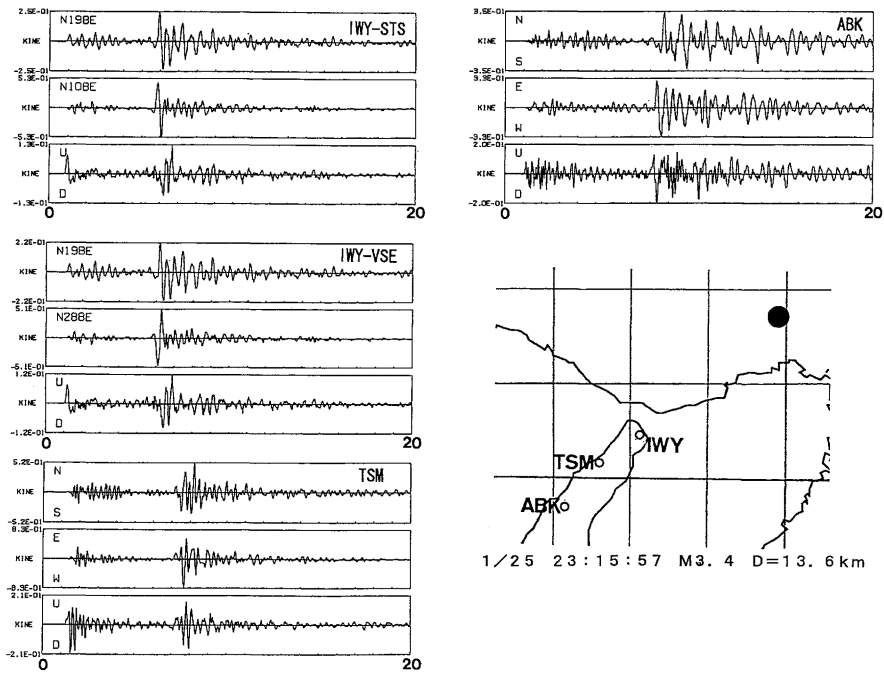


図5 観測された余震 (1/25/95) の速度記録, 横軸1目盛は1秒である

Fig. 5 Velocity seismograms of the aftershock at 1/25/95. The pitch of the horizontal axis is a second.

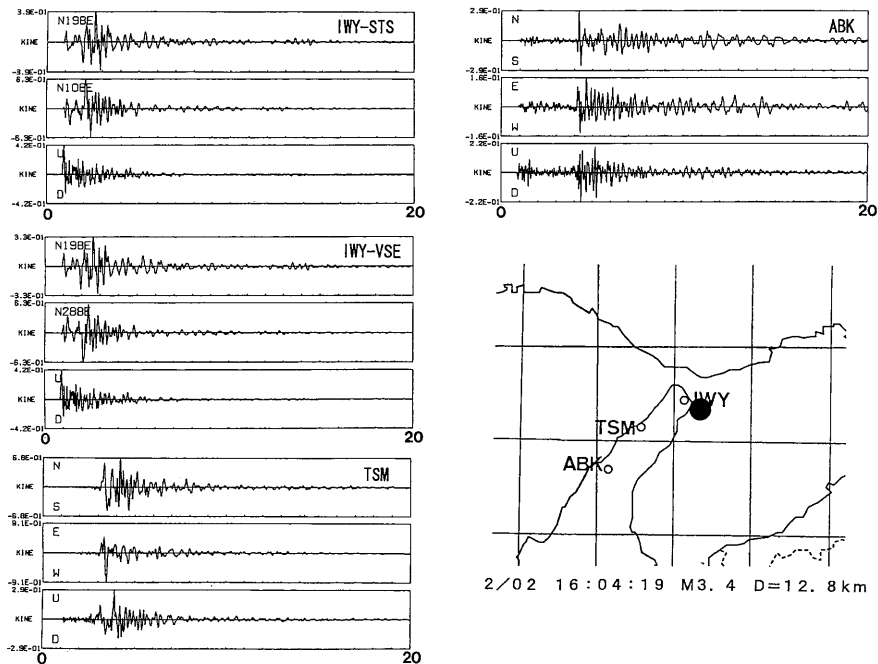


図6 観測された余震(2/2/95)の速度記録, 横軸1目盛は1秒である
 Fig. 6 Velocity seismograms of the aftershock at 2/2/95. The pitch of the horizontal axis is a second.

PDAS100(No. 345) [GAIN100]

2) 10:35~10:40

屋内(観測点): VSE(IWY) [3Kine/10V] +
 PDAS100(No. 002) [GAIN100]
 実験場屋上: VSE(ABK) [2Kine/10V] +
 PDAS100(No. 345) [GAIN100]

3) 11:15~11:20

屋内(観測点): VSE(IWY) [3Kine/10V] +
 PDAS100(No. 002) [GAIN100]
 実験場の焼却炉: VSE(ABK) [2Kine/10V] +
 PDAS100(No. 345) [GAIN100]

2.2) TSM (北淡町富島: 淡路島簡易保険保養センター)

観測期間: 1995年1月20日~1995年4月4日
 位置: 34° 32' 30" N 134° 56' 07" E (携帯型のGPSで決定)
 地震計: VSE11C/12C (速度型強震計, 感度: 20 Kine/10V, 観測帯域: 0.025Hz~70Hz)
 記録計: DTC8000 (デジタル記録計, 入力: ± 2.5V max)

観測点近傍の地質

この付近は、大阪層群に属する仮屋累層と富島累層が、花崗岩の上に約300mの厚さで堆積している。富島累層の上に仮屋累層が堆積している。仮屋累層は、淡水成のシルト-粘土層と砂層との互層である。富島累層は、淡水性のシルト-粘土層、砂岩及び礫層の互層からなり、全体として礫層が優勢である(水野ほか, 1990)。

観測内容

1995年1月20日から観測を開始し、観測された余震の記録数は、50個であった。設置場所は、センターの車庫内で、設置面はコンクリートである。地震計の方位および観測システムの配置は図3(b)に示してある。記録の成分は、ch1, 4-X (NS), ch2, 5-Y (EW), ch3, 6-Z (UD)とした。この観測点は、6チャンネル使用して、ch1~ch3はゲイン0dB (LOWGAIN), ch4~ch6はゲイン20dB (HIGHGAIN)とした。観測方法は、IWYと同様でレベルトリガー方式を採用した。サンプリング周波数は、6チャンネルとも200Hzである。AD変換は16bitで行った。時刻較正は、1時間ごとにNHKの時報を用いた。2月14日以降は、ア

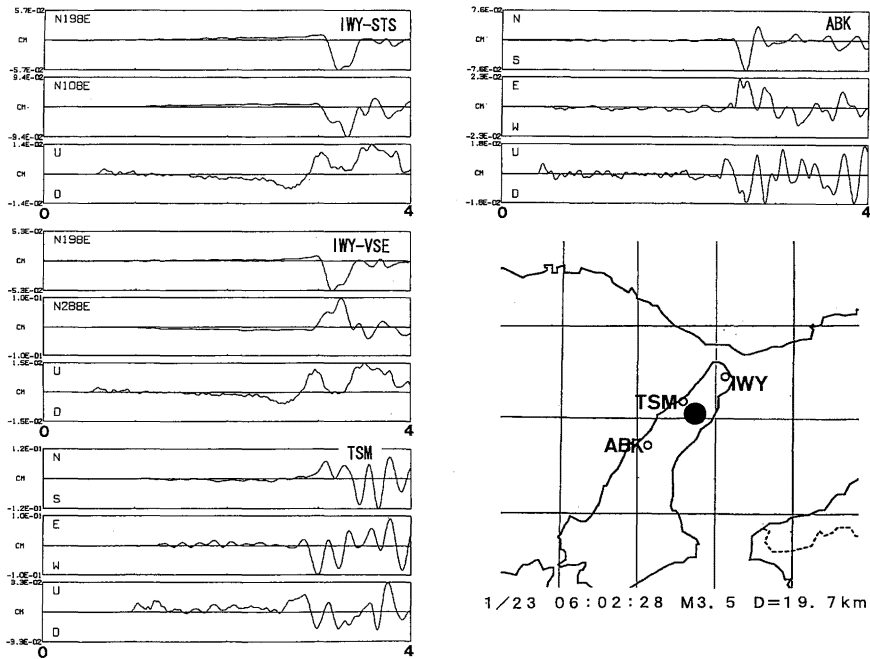


図7 図4を積分して得られた変位波形，横軸1目盛は1秒である
 Fig. 7 Displacement waveforms obtained by integration of Fig. 4. The pitch of the horizontal axis is a second.

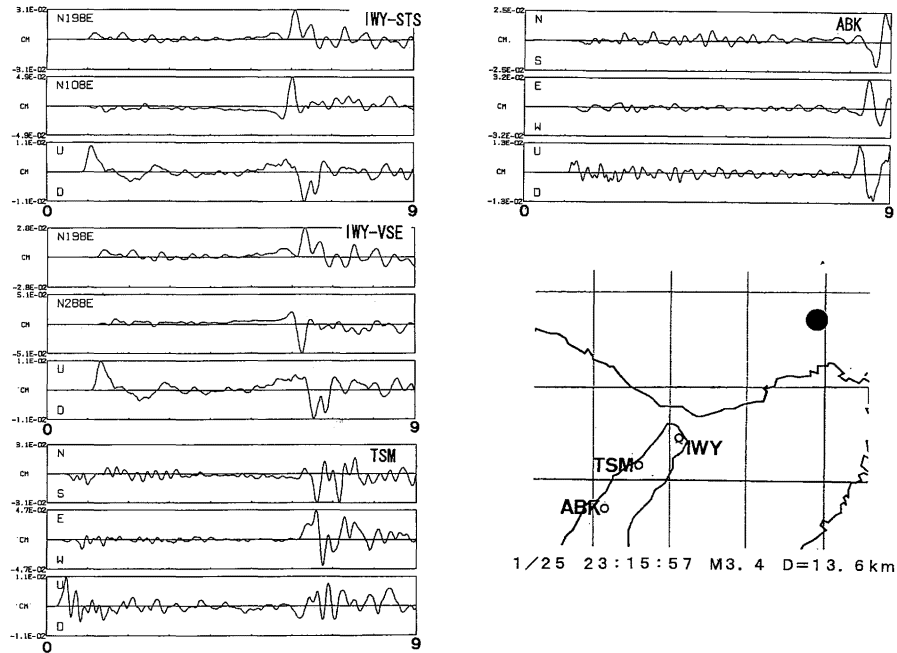


図8 図5を積分して得られた変位波形，横軸1目盛は1秒である
 Fig. 8 Displacement waveforms obtained by integration of Fig. 5. The pitch of the horizontal axis is a second.

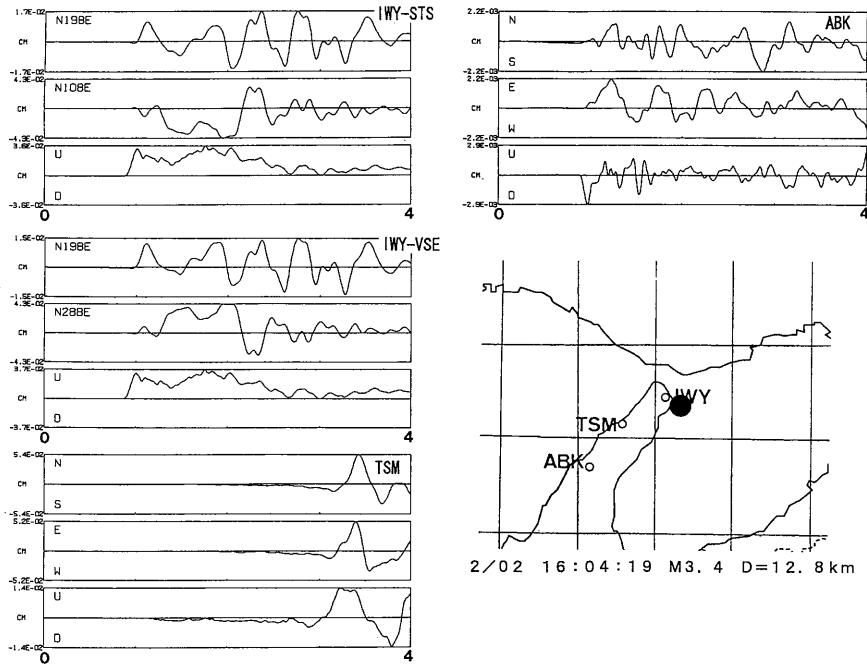


図9 図6を積分して得られた変位波形，横軸1目盛は1秒である

Fig. 9 Displacement waveforms obtained by integration of Fig. 6. The pitch of the horizontal axis is a second.

ンカーボルトで固定した。また、この観測点の記録には60Hzの電源ノイズ(ハム)が含まれているが、3月3日にハム除去のために、地震計本体とそのコントロールボックスの出力コネクターを接地し、ハムは減少した。ここでは、微動観測を行っていない。

2.3) ABK (一宮町多賀：兵庫県立淡路文化会館)

観測期間：1995年1月21日～1995年4月3日

位置：34°27'12"N 134°51'05"E (携帯型のGPSで決定)

地震計：VSE11C/12C (速度型強震計，感度：20 Kine/10V，観測帯域：0.025Hz～70Hz)

記録計：DTC8000 (デジタル記録計，入力：±2.5V max)

観測点近傍の地盤

この付近は、上部には約8mの軟弱な砂一粘土層、その下には大阪層群に属する愛宕累層が約150mの厚さで花崗岩の上に堆積している。愛宕累層の岩層は富島累層と同様で、上部100m以上は、砂礫層が優勢である(高橋ほか，1992)。

観測内容

1995年1月21日から観測を開始し、観測された余震の記録数は、22個であった。設置場所は、会館内の最下階の部屋に設置した。設置面は、リノリウムである。地震計の方位および観測システムの配置は図3(c)に記してある。記録の成分は、ch1-X(NS)，ch2-Y(EW)，ch3-Z(UD)とした。ゲインは3チャンネルとも0dBとした。観測方法は、TSM同様、レベルトリガー方式を採用した。サンプリング周波数は、3チャンネルとも200Hzである。AD変換は16bitで行った。時刻較正は、TSMと同じ方法である。この観測点は、アンカーボルトでの固定は行っていない。

III. 観測結果

ここでは、3観測点で同時に観測された余震9個のうち、3個の余震の観測波形(速度記録)とそれを積分して得られた変位記録、そしてそれぞれの速度記録の水平動(X(NS，N198E)成分)のS波部分5秒間のフーリエスペクトル、および神戸側で起こった2個の余震のP波から20秒間、S波から20秒間、S波から5秒

間のIWYをロックサイトとした際のスペクトル比を示す。今回、速度記録、変位記録、フーリエスペクトルで取り上げた3個の地震は、野島断層の南端付近で起こった余震(1/23 06:02 M3.5 D=19.7km)、神戸側の余震(1/25 23:15 M3.4 D=13.6km)、IWYに近い余震(2/02 16:04 M3.4 D=12.8km)である。他の6個の余震のうち、IWY-STS、IWY-VSE、TSM、ABKのすべてで、記録として十分な5個について、Appendix-1に速度記録(観測波形)を示す。

3.1) 速度記録

図4, 5, 6は、これらの余震によって観測された速度波形である。それぞれの図には、震央と観測点の位置関係を示す地図をのせている。1/23の地震(図4)は、すべての観測点において、水平成分の初期微動が上下動のそれやS波の振幅に比べて非常に小さい。TSMでは、S波到達後もS波の振幅に相当する大きさの振幅が数秒続いている。1/25の地震(図5)は、震央距離がIWYよりTSMの方が遠いにもかかわらず、S波とP波の振幅は、TSMの方がIWYよりも大きくなっている。また、IWYの上下動成分ではパルス状のP波が非常にはっきりしている。2/2の地震(図6)は、震央がIWYに近いので、P波がS波に匹敵する振幅を有している。この地震でもIWYより震源距離が遠いTSMの方がS波の振幅が大きくなっている。

3.2) 変位波形

図7, 8, 9は、図4, 5, 6を積分して得られた変位波形である。積分の方法は、以下の方法による。

$$X(t) = X(t - \Delta t) + V(t - \Delta t) \times \Delta t,$$

ここで、 $X(t)$ は離散化された時刻 t における変位、 $V(t)$ は離散化された時刻 t における速度、 $\Delta t(\text{sec})$ はサンプリング周期で、 $X(0) = 0$ とした。

1/23の地震(図7)は、他の2つの地震に比べて、震源に一番近いTSMや他の観測点でも、直達P波があまり明瞭ではない。一方、1/25の地震(図8)は、IWY、TSMでは直達P波が明瞭であり、すべての観測点において直達S波も非常に明瞭である。2/2の地震(図9)は、IWYにおいては、P波の後続波中に、S波が到達しているの直達S波がはっきりしていない。また、UD成分の波形が明らかに他の観測点や地震とは違い、P波が強かったことを示している。

3.3) S波フーリエスペクトル

それぞれの速度記録から、図4, 5, 6の水平動(X(NS, N198E)成分)のS波部分の5秒間を取り出し計算したフーリエ振幅スペクトルを図10, 11, 12に示し

ている。フーリエスペクトルの計算は、大崎(1994)の高速フーリエ変換を用いた。

今回取り上げた地震は、どれも1~4Hz前後にピークがあり、10Hz以上になると急にスペクトルが小さくなり、20~30Hzではほとんどノイズレベルになっている。IWYとTSMは、ABKに比べて1Hzより長周期側にもピークが存在している。TSMは、他の観測点に比べるとピークがやや高周波側(3~6Hz)にずれており、1~2Hzあたりにスペクトルの谷が存在している。

3.4) スペクトル比

スペクトル比に関しては、先に取り上げた神戸側の余震(1/25)と、もう一つ別の神戸側で起こった余震(2/2 16:19 M3.4 D=17.2km)を用いた。3観測点は神戸側から見ると、ほぼ一直線に並んでいる。そこで、神戸側で起こった地震であれば、各観測点への震源の放射特性による影響の差が小さいと考えられる。よって、全観測点で震源メカニズムによる影響は同じと見なせる。従って、この波形記録を比較することによって、各観測点の地盤による影響を推定することが可能となる。

今回のスペクトル比は、地震自体の特性と地盤の効果の特徴を調べるために、P波から20秒間、S波から20秒間、S波から5秒間の部分について、それぞれの観測点ごとに求めたX成分のスペクトルに、大崎(1994)のスペクトルウィンドウによるスペクトル平滑化のプログラムに基づいて、P波から20秒間とS波から20秒間に関しては20ポイントずつ、S波から5秒間に関しては5ポイントずつウィンドウをかけて、それを1ポイントずつずらしながら平滑化を行った後を、IWYをロックサイトと考えて、スペクトル比TSM/IWY(図13)、ABK/IWY(図14)を求めた。IWYの記録は、地震計の特性の影響をなくすためにVSEの記録を用いた。また、IWYのX成分はN198Eを向いているが、ほぼSN方向と見なせる。よって、X成分をそのまま用いても問題ないと考えられるので、X成分を用いた。

TSMに関しては、2~3Hzに2~5倍の減衰効果が、4~7Hzに3~10倍の増幅効果が顕著に現れている。これはフーリエスペクトルのところで指摘した点と一致している。ABKに関しては、0.9~2Hzと4~7Hzに増幅効果が、3Hz付近に減衰効果が現れている。1/25の地震については、TSMとABKの両方に1Hz前後に増幅効果が見られる。この効果は、P波を考慮していないスペクトル比にも現れている。また、2/2の地震には

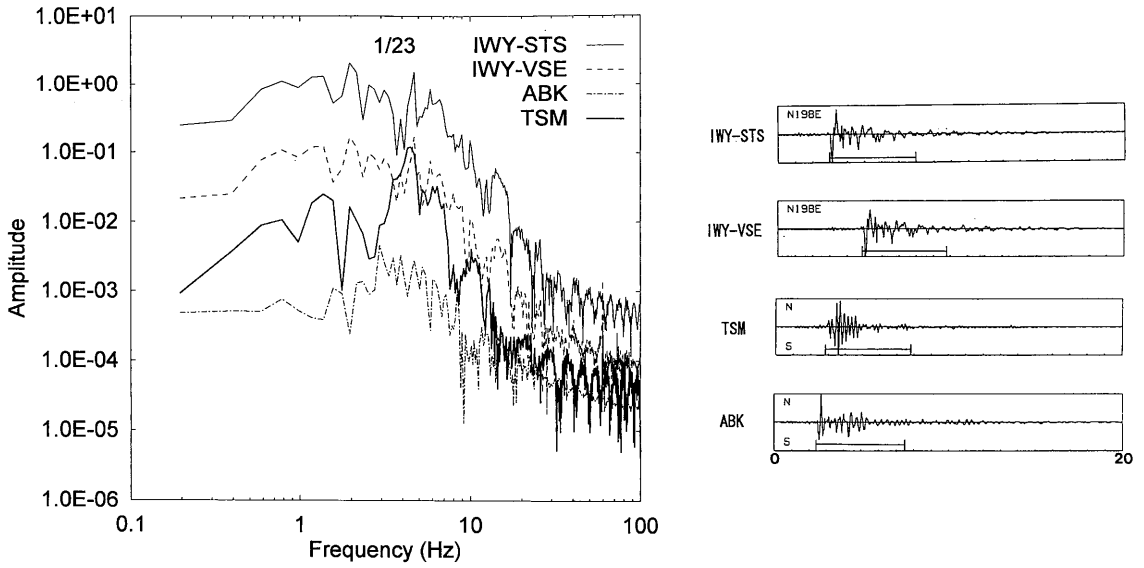


図10 1/23の余震のS波部分5秒間（波形中のアンダーライン部分）のフーリエスペクトル

Fig. 10 Fourier spectra of S-wave parts of the aftershock at 1/23 for 5 seconds (underlined parts of seismograms).

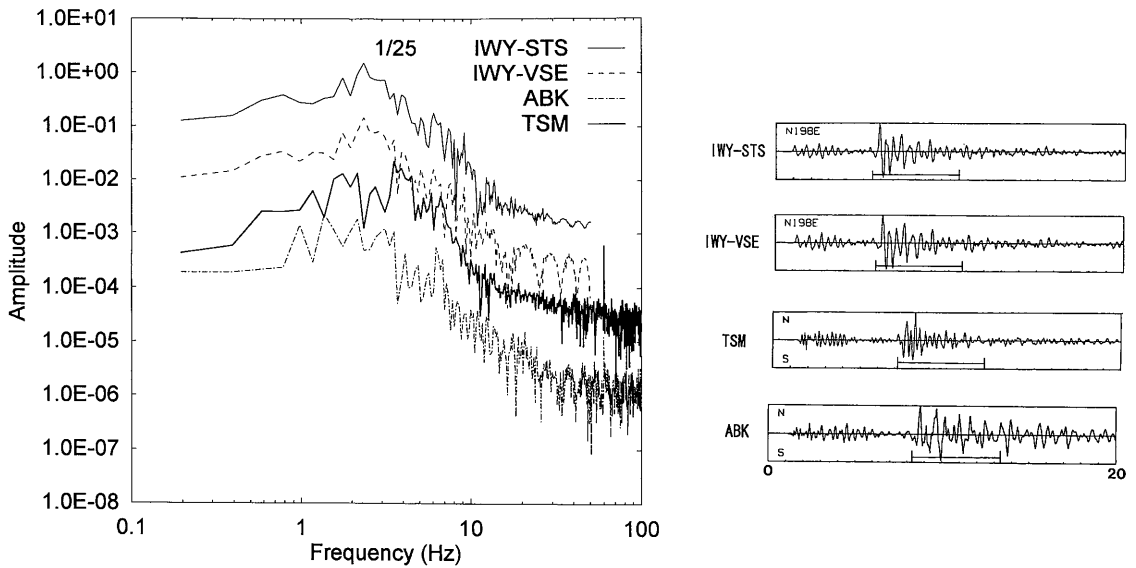


図11 1/25の余震のS波部分5秒間（波形中のアンダーライン部分）のフーリエスペクトル

Fig. 11 Fourier spectra of S-wave parts of the aftershock at 1/25 for 5 seconds (underlined parts of seismograms).

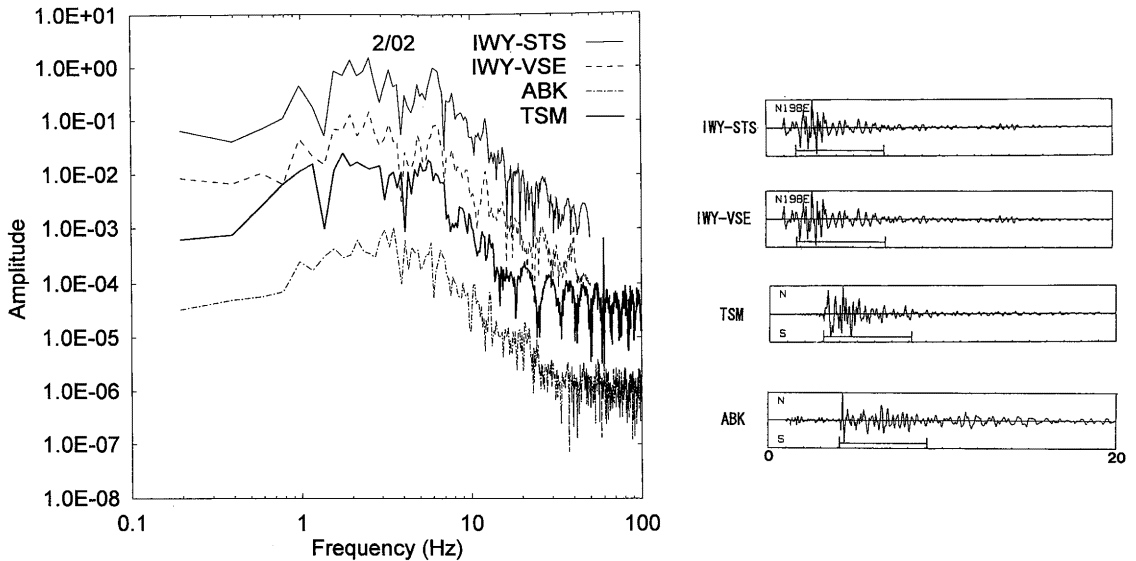


図12 2/2の余震のS波部分5秒間(波形中のアンダーライン部分)のフーリエスペクトル

Fig. 12 Fourier spectra of S-wave parts of the aftershock at 2/2 for 5 seconds (underlined parts of seismograms).

現れていないので、1/25の地震のS波の効果であると考えられる。

IV. 議 論

IWYにおいては、P波やS波が非常にはっきりした単純なパルス状の形を示しているものが多かった。TSMは、観測波形から、より強いS波増幅効果を示しているのがわかる。また、S波フーリエスペクトルにおいても、他の観測点に比べて4~7Hzのピークが比較的顕著に現れていた。スペクトル比でも4~7Hzに増幅効果が現れていた。これらは、観測波形で見られたS波増幅効果によるものと考えられる。1~2Hz付近に現れるスペクトルの谷や減衰効果は、TSM以外の観測点では見られないので、TSM付近の地下構造、もしくは断層の影響ではないかと考えられる。また、今回観測された余震は、継続時間が短く、比較的low周波成分(10Hz以下)に富んでおり、高周波数側(20~30Hz以上)はすぐにノイズレベルになってしまっている。これは、震源から放出された波自身に20~30Hz以上の高周波成分が含まれていなかったと考えられる。長周期成分(1Hz以下)は、伝播経路や観測点近傍の地盤の影響を考慮しないと、今回の余震に、どの程度の長周期成分が含まれているかは、はっきりとは分からない。その上、今回の観測では、設置場所が

すべて屋内なので、建物の影響も考慮しなければならないかもしれない。

V. おわりに

現時点では、回収された全記録の確認および出力、その記録のデータベース化、そして個々の記録の選別が終了した段階である。本論文は観測内容の詳細な記載が主目的であり、記録に関しては、現象論的な解析だけにとどめた。今後は、今回の観測の記録と共同強震動観測の記録をもとにして、また他の観測グループの記録も取り入れて、余震の震源過程や観測点近傍の地盤の特性を詳しく調べていく予定である。

謝 辞

地震発生直後にもかかわらず、地震計設置場所を提供していただいた次の方々に感謝いたします。神戸大学内海域機能教育研究センター所長 榎本幸人教授はじめセンターの職員の皆様、淡路島簡易保険保養センター総支配人 李博司氏、兵庫県立淡路文化会館館長 三宅秀一氏。また、京都大学防災研究所の平原和朗助教授には、観測点選定に関して大変お世話になりました。島原地震火山観測所の清水洋助教授には、地震計はじめその他の観測機器に関して便宜を計って頂きました。余震の震源情報を提供して下さった京都大学防

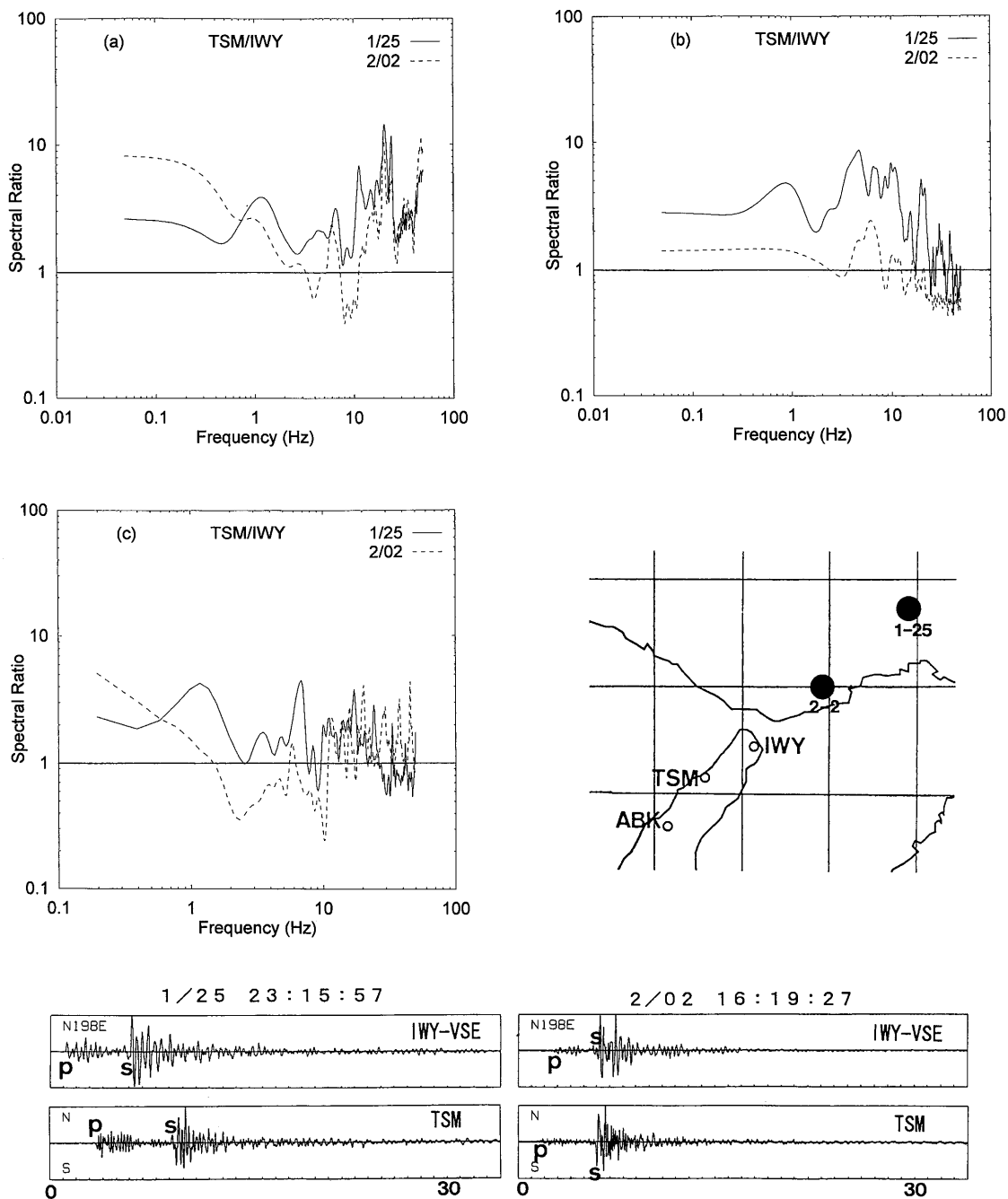


図13 TSM/IWY のスペクトル比 ((a) P 波から20秒間, (b) S 波から20秒間, (c) S 波から5秒間). “P” と “S” は P 波到達と S 波到達を表す

Fig. 13 Spectral ratios TSM/IWY, (a) for 20 seconds from the P-wave arrival, (b) for 20 seconds from the S-wave arrival, (c) for 5 seconds from the S-wave arrival. “P” and “S” indicate the P-wave arrival and S-wave arrival, respectively.

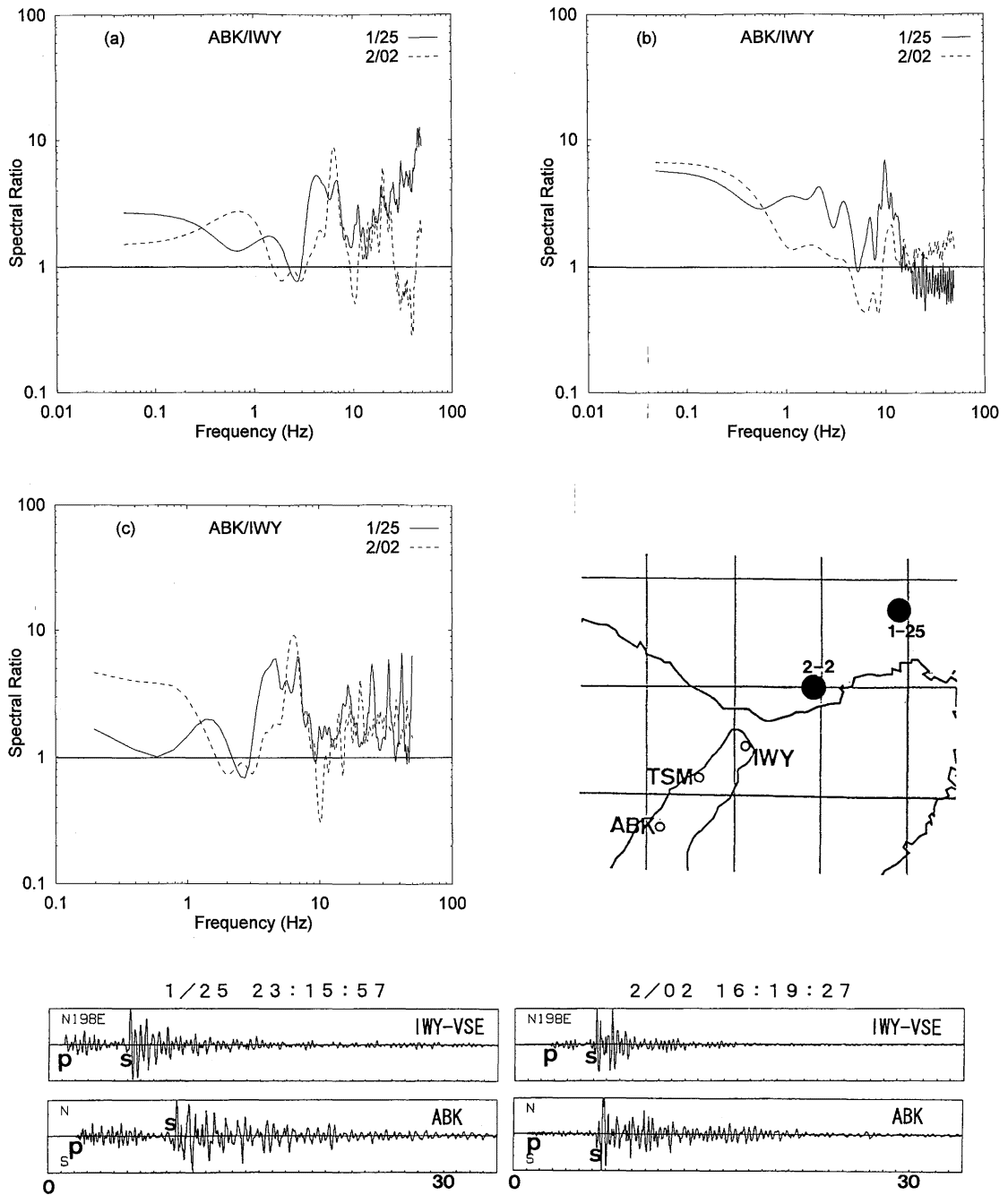


図14 ABK/IWYのスペクトル比 ((a)P波から20秒間, (b)S波から20秒間, (c)S波から5秒間). “P”と“S”はP波到達とS波到達を表す

Fig. 14 Spectral ratios ABK/IWY, (a) for 20 seconds from the P-wave arrival, (b) for 20 seconds from the S-wave arrival, (c) for 5 seconds from the S-wave arrival. “P” and “S” indicate the P-wave arrival and S-wave arrival, respectively.

災研究所 大見士朗氏、震度階情報を提供して下さいました。また、本論文の自動処理による震源情報は、東京大学地震研究所 anonymous FTP サーバーから頂きました。

文 献

- 藤田和夫・前田保夫 (1984) : 須磨地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 101p.
- HIRATA, N. OHMI, S. SAKAI, S. KATSUMATA, K. MATSUMOTO, S. TAKANAMI, T. YAMAMOTO, A. NISHIMURA, T. IIDAKA, T. URABE, T. SEKINE, M. OOIDA, T. YAMAZAKI, F. KATAO, H. UMEDA, Y. NAKAMURA, M. SETO, N. MATSUSHIMA, T. SHIMIZU, H. and Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (1995) : Urgent joint observation of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. *J. Phys. Earth.* (in press)
- 気象庁 (1995a) : 1995年 2 月地震火山概況。気象庁, 7p.
- (1995b) : 1995年 3 月地震火山概況。気象庁, 7p.
- 共同強震観測グループ (1995) : 兵庫県南部地震震源域における共同強震観測, 平成 7 年兵庫県南部地震とその被害に関する研究調査。(平成 6 年度文部省科学研究費 (総合研究 A) 研究成果報告書 06306022), 124-154.
- 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩 (1990) : 明石地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 90p.
- 長瀬和雄・杉山茂夫 (1995) : 兵庫県南部地震の地震断層と地盤災害。神奈川県温泉地学研究所報告, **26**, (3), 1-14.
- 日本建築学会 (1995) : 1995年兵庫県南部地震災害調査速報。日本建築学会, 193p.
- 大崎順彦 (1994) : 新・地震動のスペクトル解析入門。鹿島出版会, 299p.
- 高橋 浩・寒川 旭・水野清秀・服部 仁 (1992) : 洲本地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)。地質調査所, 107p.
- 東京測振 (1995) : サーボ型地震計 Streckeisen 社製 STS と東京測振製 VSE について。東京測振, 12p.

Appendix-1

3点で観測された余震9個のうち、本文中に取り上げなかった余震のうち、IWY-STS, IWY-VSE, TSM, ABK のすべてにおいて記録として十分なもののみの速度記録を示している。横軸は1目盛1秒である。

1/21 21:12:43 M3.2 D=8.9 km

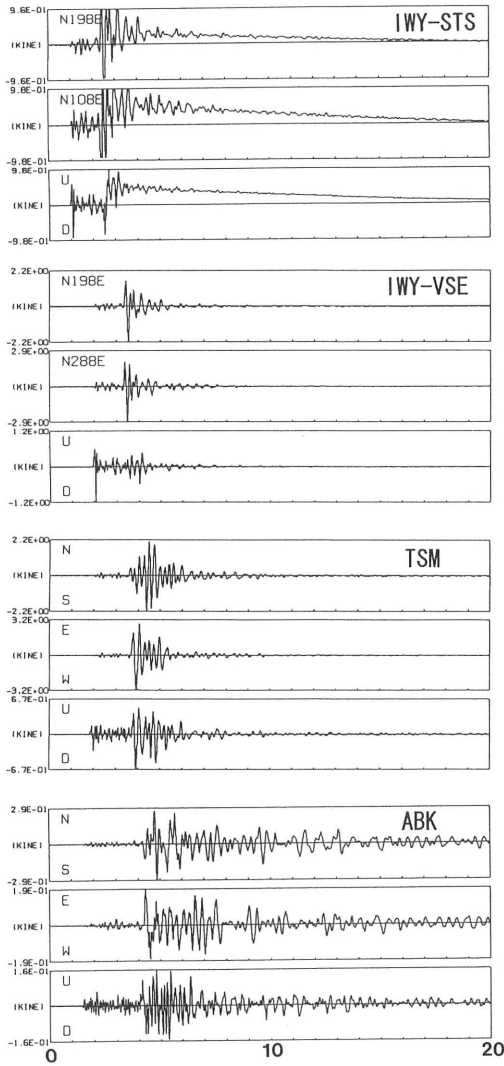


図 A-1
Fig. A-1

1/22 10:25:10 M3.2 D=3.5 km

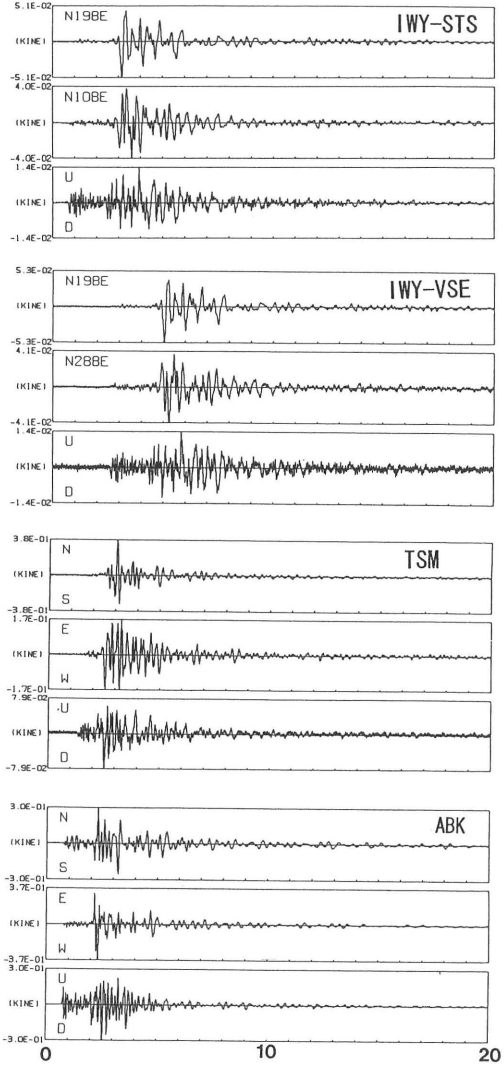


図 A-2
Fig. A-2

1/22 12:23:06 M3.0 D=3.5 km 2/02 16:19:27 M3.4 D=17.2 km

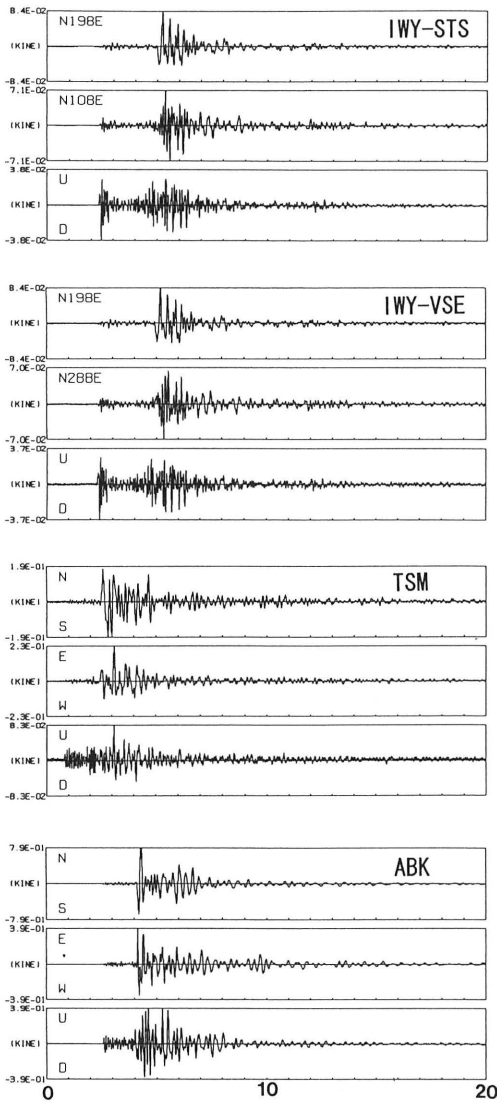


図 A-3
Fig. A-3

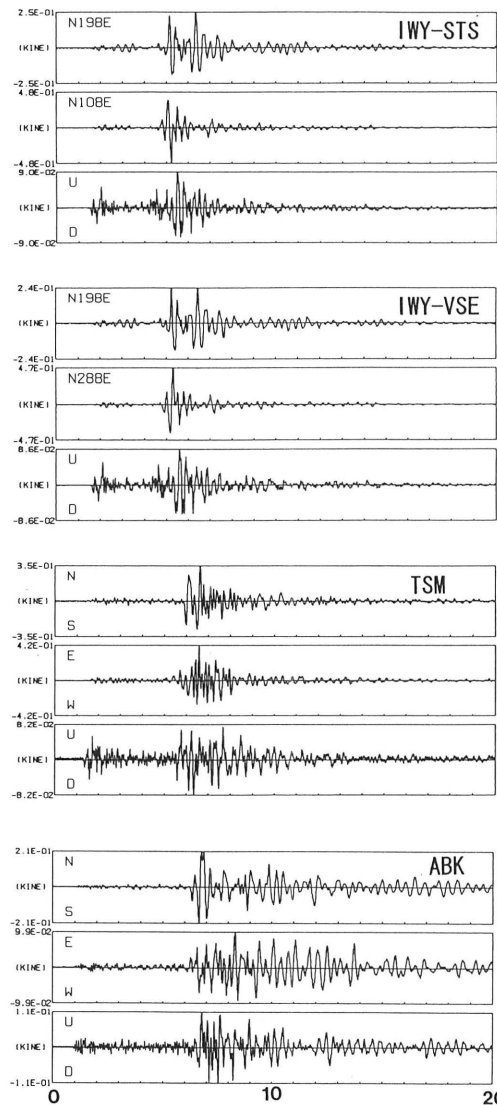
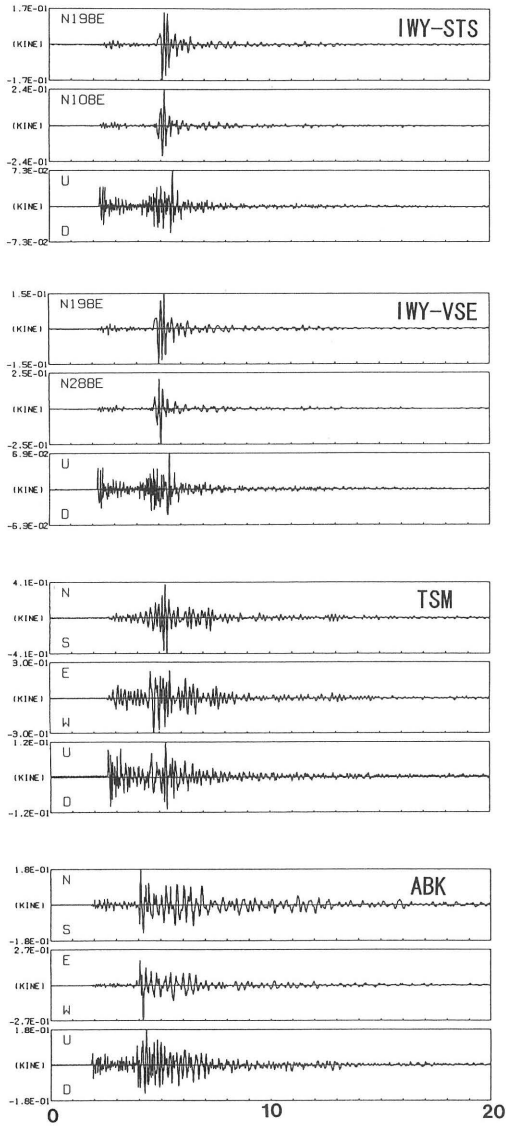


図 A-4
Fig. A-4

2/05 10:32:08 M3.3 D=14.9km

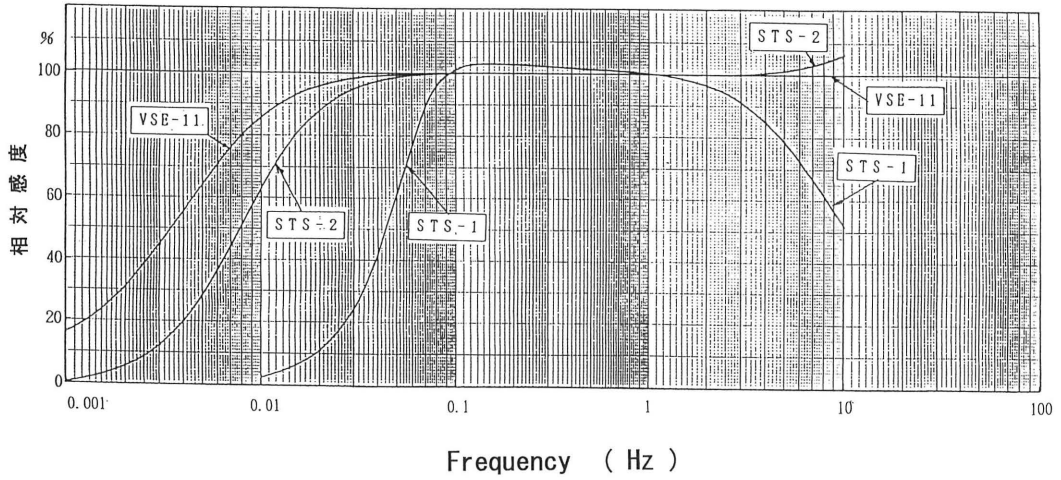


☒ A-5

Fig. A-5

Appendix-2

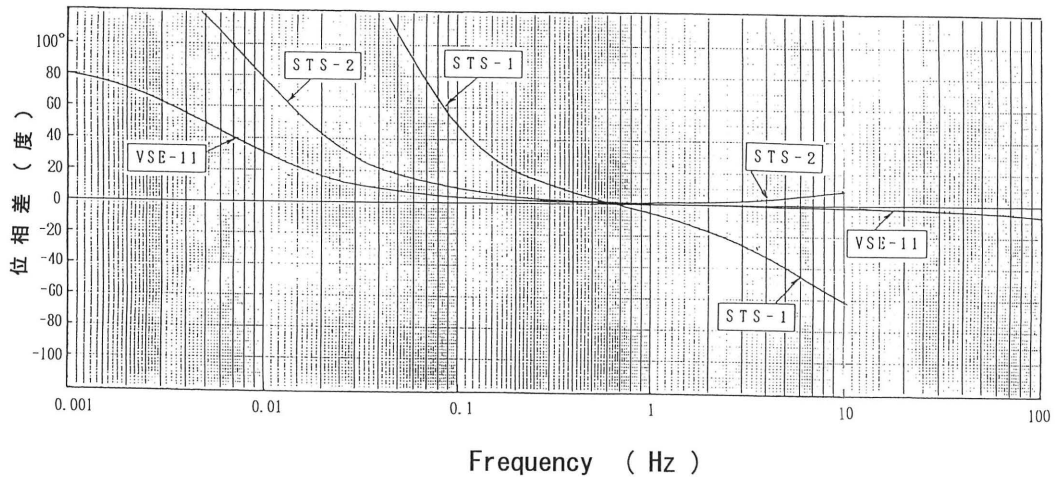
今回観測に使用した2種類の地震計の感度特性と位相特性を示す(東京測振, 1995)。ただし, これらの図は, 東京測振(1995)の伝達関数に基づいたもので, メーカー公表値とは違う。



感度特性図

図 B-1

Fig. B-1



位相特性図

図 B-2

Fig. B-2

Appendix-3

これらの震源情報は本論文中（表1）で記した震源情報より精度がよく、本論文作成後に入手したために、Appendixとしてここに記しておく。表C-1はHIRATA et al.(1995), 表C-2は気象庁(1995a, 1995b)である。

表C-1 平成7年兵庫県南部地震緊急地殻活動調査グループによる震源情報

Table C-1 List of hypocenter parameters by Japanese University Group of the Urgent Joint Observation for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake.

日付 (年 月 日)	時間 (時 分 秒)	緯度(°N)	経度(°E)	深さ(km)	Mag.	表1のNo.
95 01 27	20 01 13.2	34.53997	134.93915	11.629	1.6	64
95 01 30	14 43 36.1	34.54241	134.89421	0.749	3.2	65
95 01 31	01 43 20.8	34.54502	134.89629	1.042	3.2	66
95 01 31	11 36 32.6	34.54684	134.89917	1.594	2.6	67
95 02 01	23 30 13.6	34.43513	134.87179	1.430	2.6	68
95 02 02	16 04 19.9	34.58773	135.04048	5.724	3.2	69
95 02 02	16 19 28.0	34.70276	135.15237	17.834	4.5	70
95 02 03	04 36 24.1	34.70853	135.18524	11.740	3.9	71
95 02 03	14 18 31.7	34.55219	134.94725	8.153	3.0	72
95 02 03	23 35 29.5	34.59443	135.03506	6.455	3.1	73
95 02 04	16 09 57.7	34.52367	134.86322	2.150	3.3	74
95 02 04	19 38 0.2	34.52525	134.88357	12.783	3.7	75
95 02 05	10 32 8.3	34.53114	134.88297	12.350	3.5	76
95 02 06	03 45 34.5	34.57320	134.99143	5.854	3.0	77
95 02 07	08 21 59.6	34.44277	134.81932	2.280	2.8	79
95 02 08	15 40 32.4	34.63574	135.09592	10.232	3.2	80
95 02 10	15 19 48.8	34.56076	135.04271	5.738	3.0	81
95 02 17	03 09 33.2	34.43534	134.81482	1.486	3.1	83
95 02 18	05 49 7.5	34.53791	134.87473	1.213	3.0	84
95 02 19	20 27 15.7	34.54075	134.88937	9.006	3.4	86
95 02 25	12 59 20.8	34.54116	134.99421	14.578	3.3	87
95 03 02	06 24 6.2	34.53157	134.97833	9.145	3.4	88
95 03 07	16 20 26.2	34.56787	134.98763	6.687	2.5	89

*表1より震源決定の精度は高い。3月のデータについては暫定値で、今後変更の可能性あり。

表C-2 気象庁による震源情報(2月以降分)

Table C-2 List of hypocenter parameters by the Japan Meteorological Agency.

日付	時間	緯度(°N)	経度(°E)	深さ(km)	Mag.	表1のNo.
2/02	16:04	34.6	135.0	10	4.1	69
	16:19	34.7	135.1	20	4.2	70
2/03	04:36	34.7	135.2	20	3.7	71
	14:18	34.5	134.9	10	3.1	72
	23:35	34.6	135.0	10	3.3	73
2/04	16:10	34.5	134.9	20	3.7	74
2/05	10:32	34.5	134.9	10	3.6	76
2/06	03:45	34.6	135.0	10	3.2	77
2/07	08:14	34.5	134.8	10	3.4	78
2/08	15:40	34.6	135.1	10	3.4	80
2/10	15:19	34.6	135.0	10	3.1	81
2/15	14:44	34.5	134.9	10	3.3	82
2/17	03:09	34.4	134.8	10	3.1	83
2/18	05:49	34.5	134.9	10	3.3	84
	21:37	34.26	134.49	17	4.9	85
2/19	20:27	34.5	134.9	10	3.5	86
2/25	12:59	34.5	135.0	20	3.7	87
3/02	06:24	34.5	135.0	10	3.7	88

注) これらのデータは、今後変更の可能性がある。緯度、経度を分位まで示したものは全国のデータによる計算結果、度の1/10まで示したものは緊急震源決定によるものである。