

# 地震動の強さとスペクトル特性との関係

松村 和雄

## Relationship Between the Intensities and the Spectra of the Seismic Ground Motions

Kazuo MATSUMURA

Many ground motions were recorded by the earthquakes that occurred in the northwestern part of Kagoshima prefecture on March 26 in 1997. Fourtynine strong motions are analyzed that were recorded by the seismographs of NIED at Miyanojyo, Sendai, Akune, Ohguchi and Izumi around the seismic regions to analyze the relationship between the intensities and the spectral characteristics of the seismic ground motions. The records are classified into four or five classes by the magnitude of the peak ground acceleration and the mean Fourier spectrum and the mean velocity response spectrum in each class are calculated. It is recognized that the predominant frequency of the seismic ground motions is lower as the peak ground acceleration is larger.

**Keywords:** earthquake, strong ground motion, seismograph, Fourier spectrum

### 1 はじめに

地震動のスペクトル特性は震源特性や伝播特性や地盤特性を反映しているため複雑である。地震規模が大きくなるとコーナー振動数が小さくなるためスペクトル特性が異なることは知られているが、それに加えて、地盤の復元力特性は非線形性が大きいいため地震動の強さが大きくなるにつれてスペクトル特性が変わるのではないかと推測される。

しかし、強震動と常時微動とのスペクトル特性を比較した研究では、両者はあまり相関がないという報告がある一方でかなり相関が高いという報告もあり、その関係は必ずしも明確ではない<sup>1)</sup>。

1997年3月26日(M=6.5)と5月13日(M=6.3)の2つの地震を本震とする鹿児島県北西部地震ではそれらの震源近傍で多くの強震記録が得られた。そこで、震源を取り囲む5地点の科学技術庁のK-NET95強震計<sup>2)</sup>の強震記録から地震動の強さ毎の平均スペクトルを求めて地震動の強さとスペクトルの特性との関係を調べた。

### 2 強震記録と解析地点

Fig. 1に鹿児島県北西部地震の3月26日と5月13日の

本震と最大余震である4月3日の震央位置を●で、科学技術庁の強震観測点(KNET)を+で、大破した小学校(E.S.)と高等学校(H.S.)を■で示す。点線で囲んだ範囲は余震域を示す。また、実線は市と町の境界で、◎は市役所、○は町役場の位置を示す。

強震動のスペクトル解析に用いた地点は震源を取り囲む、宮之城(Miyanojyo)、川内(Sendai)、阿久根(Akune)、出水(Izumi)、大口(Ohguchi)の5地点である。

解析の対象とした地震動は、観測期間が1997年3月26日から1年間で、気象庁による震源位置が緯度は31.9°

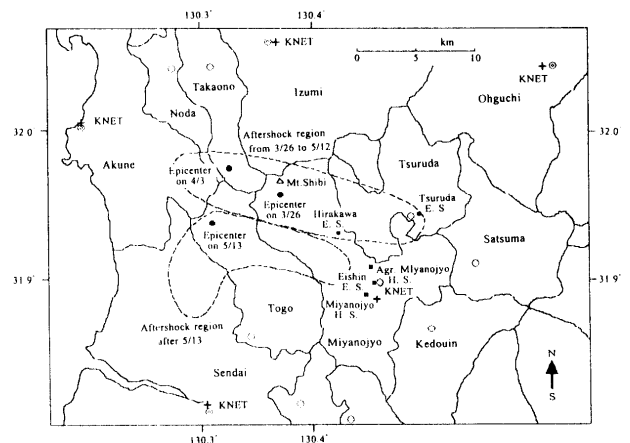


Fig. 1 Epicenters, aftershok regions and seismograph stations

Table 1 Earthquakes and strong motions used for analysis

No.	day and time	epicenter		depth (km)	M	Miyanojyo		Sendai		Akune		Izumi		Ohguchi	
		N	E			E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S
1	97-0326-17.31	32.0	130.4	8	6.3	493	434	224	211	131	293	542	727	193	306
2	97-0326-17.39	32.0	130.3	8	4.7	142	163	48	63	31	31	99	197	60	78
3	97-0326-18.05	32.0	130.4	10	4.5	138	211	39	45	18	20	38	32	44	54
4	97-0326-18.30	32.0	130.4	14	4.0	113	232	21	22	13	13	17	18	21	22
5	97-0326-19.45	32.0	130.4	10	3.7	67	132			5	7	7	7	9	11
6	97-0326-21.15	32.0	130.0	21	4.3	26	27			13	18	27	15	10	8
7	97-0326-22.24	32.0	130.4	11	4.4	149	132			17	25	48	55	34	38
8	97-0327-05.19	32.0	130.4	0	4.1	77	188			13	16	16	19	16	17
9	97-0327-21.26	32.0	130.3	10	3.8	25	14			16	19	24	48	7	6
10	97-0328-02.51	32.0	130.3	13	4.0	34	30			11	14	34	42		
11	97-0329-22.13	32.0	130.3	6	3.8	30	22			16	15	49	38	11	17
12	97-0401-02.14	32.0	130.4	10	3.7	71	96			3	5	9	8	8	11
13	97-0403-04.33	32.0	130.3	9	5.5			179	124	112	98			163	218
14	97-0404-02.33	32.0	130.4	10	4.7			27	24	19	25	56	112	52	52
15	97-0405-13.24	32.0	130.4	8	4.9			66	93	39	50	72	120	68	72
16	97-0406-04.42	32.0	130.3	10	3.8			7	7	15	18	19	20	7	8
17	97-0408-17.21	32.0	130.4	8	3.8					4	4	10	12	14	17
18	97-0409-23.20	32.0	130.4	10	4.9	330	266	35	51	38	59	79	61	118	71
19	97-0409-23.23	32.0	130.4	0	4.7	82	106	19	22	18	16	41	39	61	83
20	97-0420-12.34	32.0	130.4	9	3.5	75	87	11	9	3	4	3	3	5	7
21	97-0421-00.16	32.0	130.3	10	3.7	22	17	6	6	13	18	27	32	6	8
22	97-0425-00.50	32.0	130.4	7	3.5	53	56	9	11	3	4	8	9	12	11
23	97-0513-14.38	31.9	130.3	8	6.2	901	902	318	300	125	156	443	728	176	172
24	97-0514-08.32	31.9	130.3	10	4.7	182	141	34	57	11	29	40	40	30	30
25	97-0514-17.15	31.9	130.3	10	3.8	44	47	19	19	2	7	6	5	7	11
26	97-0518-17.49	31.9	130.3	10	3.5	34	112	16	22	2	2	6	6	3	6
27	97-0525-06.11	31.9	130.3	10	4.4	211	201	35	57	14	19	42	32	10	18
28	97-0602-00.51	32.0	130.4	9	3.8	14	17			5	7	11	23	9	9
29	97-0603-17.57	31.9	130.3	7	3.3	11	17					8	8		
30	97-0612-06.38	32.0	130.3	8	3.7	33	66			3	7	12	20	3	3
31	97-0627-14.12	31.9	130.4	10	4.1	82	80	13	13	3	3	13	19	23	22
32	97-0629-12.03	31.9	130.4	8	3.4	49	49					4	7	7	7
33	97-0703-11.47	31.9	130.3	8	3.2	15	36	10	13			11	9		
34	97-0726-18.36	32.0	130.4	10	4.3	137	102			10	5	12	18	35	24
35	97-0730-14.40	32.0	130.4	7	3.3	19	26					5	5		
36	97-0926-23.51	32.0	130.4	7	3.4	27	38					4	4	9	7
37	97-1002-21.12	32.0	130.4	7	3.4	12	12			2	2	6	6		
38	97-1007-10.19	32.0	130.4	8	3.6	24	36			3	5	7	5	33	34
39	97-1103-14.44	32.0	130.4	8	3.5	13	17			2	2	5	5		
40	97-1214-00.18	31.9	130.3	9	3.5	11	15			2	3	17	15	3	3
41	97-1225-00.17	31.9	130.3	7	3.9	19	32	34	28	3	4	18	16	6	10
42	97-1225-18.58	31.9	130.3	7	3.4	5	6	26	25						
43	98-0105-03.07	31.9	130.3	6	3.3	5	6	14	14						
44	98-0110-18.26	31.9	130.3	8	3.4	6	14	20	29			3	4		
45	98-0125-09.51	32.0	130.4	8	3.2	24	19	5	6			14	15	2	3
46	98-0210-10.52	31.9	130.3	10	3.3	11	27	12	11			7	6	4	3
47	98-0215-12.43	31.9	130.3	8	3.6	11	14	33	34			8	6	5	4
48	98-0303-08.30	31.9	130.3	8	3.8	37	44	51	53	5	6	18	18	5	4
49	98-0303-16.39	31.9	130.3	8	3.7	38	54	44	52	2	3	20	12	6	6

と32.0°で経度は130.3°と130.4°の範囲にある49個の強震記録である。これらのデータをTable 1に示す。地震規模はM=3.2からM=6.5で、その内訳は、Mが6が2回、5が1回、4が15回、3が31回である。深さは7km~10kmに集中している。各地点の最大の水平加速度は、宮之城が902(cm/s<sup>2</sup>)、川内が318(cm/s<sup>2</sup>)、阿久根が293(cm/s<sup>2</sup>)、出水が727(cm/s<sup>2</sup>)、大川が306(cm/s<sup>2</sup>)であり、どの地点も大きな値を観測している。

震源位置は数値でみると0.1°きざみなのでそれ程狭くないが、ほとんどのデータは2つの余震域で発生しているため、伝播経路の影響は比較的小さいと考えられる。また、地震規模はMが3~6の範囲にあるが、規模の大きいものは少ないため、規模による特性の違いを考察するのは難しい。ここでは、地震動のスペクトル特性の違いは地震動の強さによる地盤特性の反映であると仮定して考察することにする。

### 3 スペクトル解析

KNETで数値化された地震動の時間刻みは0.01(s)である。強震部分を含む10.24(s)間でのフーリエ振幅スペクトルを計算するとともに建物の応答の違いをみるため

Table 2 Soil models

site layer	Miyanojyo			Sendai			Akune			Izumi			Ohguchi		
	H (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	H (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	H (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	H (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	H (m)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)
1	2	1.55	180	3	1.41	110	5	1.54	120	3	1.60	230	2	1.40	70
2	8	1.77	300	4	1.64	160	6	1.63	250	3	1.88	440	2	1.63	210
3	2	1.88	430	13	1.81	230	7	1.70	140	13	2.18	500	12	1.57	330
4							2	1.98	380				4	1.84	390

H:height  $\rho$ :density Vs:shear wave velocity

に強震部分の30(s)間の応答スペクトルについても調べた。しかし、非減衰の速度応答スペクトルはフーリエ振幅スペクトルとの相関が高いので、ここではフーリエ振幅スペクトルの結果のみを示す。

平均的なフーリエ振幅スペクトルの特性を調べるためには地震動の強さの尺度で基準化してから平均化する必要がある。強さの尺度には、最大加速度や最大速度あるいは加速度応答スペクトルや速度応答スペクトルの利用が考えられる。ここでは、最大加速度(PGA)を用いて、強さのクラス分けを、(1)15-30(cm/s<sup>2</sup>)、(2)30-60(cm/s<sup>2</sup>)、(3)60-120(cm/s<sup>2</sup>)、(4)120-250(cm/s<sup>2</sup>) または120(cm/s<sup>2</sup>)以上、(5)250(cm/s<sup>2</sup>)以上、とした。それぞれのクラスに分けた後で、PGAを1.0(m/s<sup>2</sup>)に基準化してから平均フーリエ振幅スペクトルを求めた。

## 4 地震動の強さとスペクトル特性

### 4-1 宮之城のスペクトル特性

宮之城の観測点は震源の南東に位置し、傾斜地の切り上部分にあり、深さ2mでN値が50以上、S波速度が300(m/s)の硬い地盤上にある。

平均フーリエ振幅スペクトルをFig. 2に示す。図中のPGAは最大加速度を、nは各クラスで平均化するのに用いた地震動の数を表す。E-W方向の卓越振動数はPGAが15-30(cm/s<sup>2</sup>)では7-10(Hz)であるが、PGAが大きくなるにつれて低振動数側に移る傾向がみられ、250-1000(cm/s<sup>2</sup>)では1-3(Hz)が卓越している。N-S方向は、PGA<120(cm/s<sup>2</sup>)では5-15(Hz)が強く、卓越振動数は明瞭でないが、PGA>250(cm/s<sup>2</sup>)では2-3(Hz)の低振動数が強くなっている。

科学技術庁の20mの地盤資料に基づいたTable 2のモデルで求めた地盤の増幅特性をFig. 3に示す。20(Hz)と8(Hz)の2つのピークはE-W方向のPGAが15-30(cm/s<sup>2</sup>)にはその特性がみられるものの、強さの関係は逆に低振動数の方が大きくなっている。地盤データは微小振動の結果から得られているので、その増幅度特性は地震動の強さが15-30(cm/s<sup>2</sup>)よりも小さい場合を反映しているためピークが低振動数側になっていると考えられる。

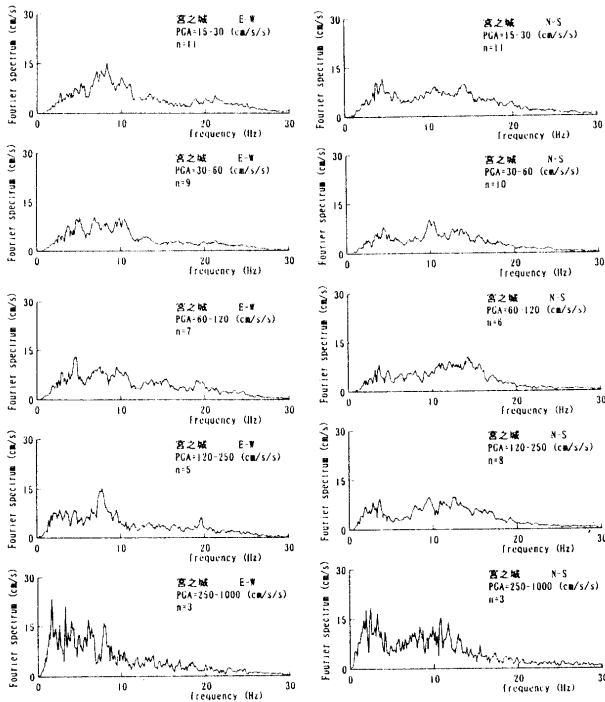


Fig. 2 Mean Fourier spectra at Miyanojyo (宮之城)

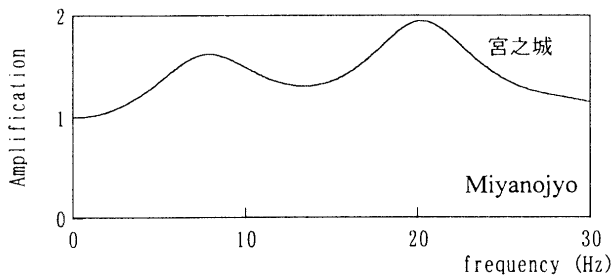


Fig. 3 Soil amplification factor at Miyanojyo (宮之城)

4-2 川内のスペクトル特性

川内の観測点は震源の南に位置し、川内川の近くにあり、地盤は20mまではN値が30以下の軟弱な地盤である。

平均フーリエ振幅スペクトルを Fig. 4 に示す。E-W 方向のスペクトルは、PGA が15-30(cm/s<sup>2</sup>)では2-15(Hz)がほぼ一様に大きく卓越振動数は明瞭ではないが、PGA が60(cm/s<sup>2</sup>)以上になると2(Hz)付近がサイン波の場合のようにパルス状に大きくなっている。N-S 方向もPGA が60(cm/s<sup>2</sup>)以下では卓越振動数は明瞭ではないが、PGA が120(cm/s<sup>2</sup>)以上になると2(Hz)付近が大きく卓越し、卓越振動数が低振動数側に移行していることが分かる。

Table 2 のモデルで求めた地盤の増幅特性を Fig. 5 に示す。6(Hz)付近にピークがあるが地震動のスペクトルにはその特性は見られない。地盤のデータが20mまでなので低振動数の特性が十分解析できていない可能性が考

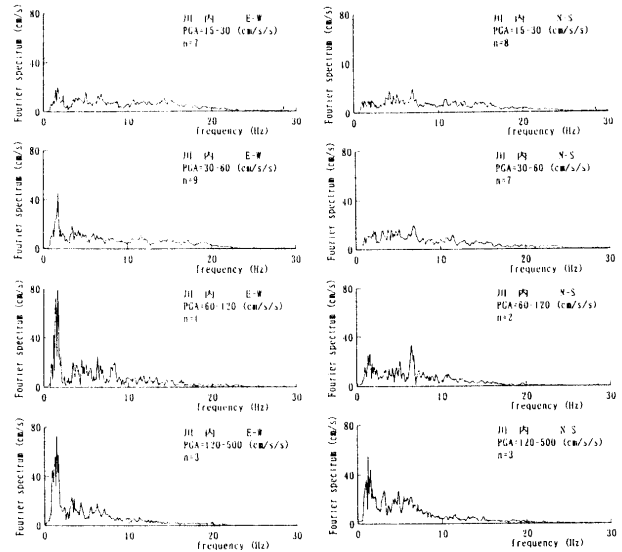


Fig. 4 Mean Fourier spectra at Sendai (川内)

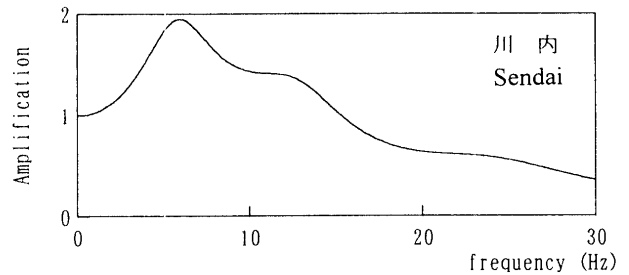


Fig. 5 Soil amplification factor at Sendai (川内)

えられる。

4-3 阿久根のスペクトル特性

阿久根の観測点は震源の北西方向の海岸付近にあり、深さ18mまでN値が10以下の軟弱な地盤上にある。

平均フーリエ振幅スペクトルを Fig. 6 に示す。E-W 方向と N-S 方向のスペクトル特性はかなり似ている。また、地震動の強さが小さいときも大きいときも卓越振動数は2(Hz)付近にみられる。PGA が120(cm/s<sup>2</sup>)以上になると低振動数の値が更に大きくなり、5(Hz)以上の高振動数の値が減少していることが分かる。

Table 2 のモデルより求めた地盤の増幅度特性を Fig. 7 に示す。増幅度特性には2-3(Hz)と6-7(Hz)にピークがあるが、地震動のスペクトルにはN-S 方向で15-30(cm/s<sup>2</sup>)では6-7(Hz)と2-3(Hz)のピークがみられるものの地震動が大きくなると高振動数側の6-7(Hz)のピークはみられない。

4-4 出水のスペクトル特性

出水の観測点は震源の北にあり、深さ5-7m付近でN

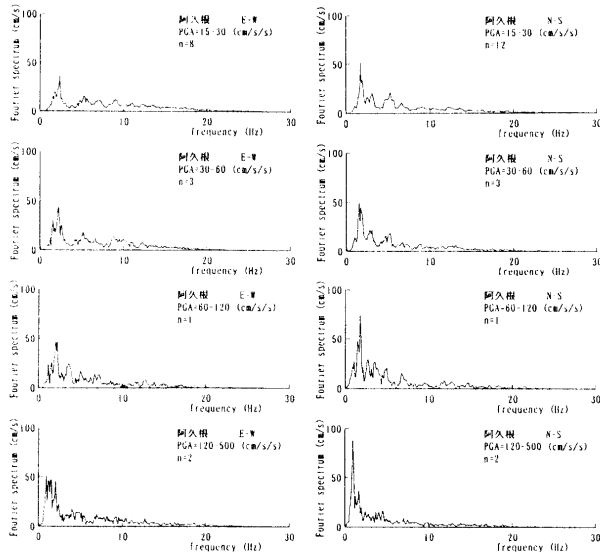


Fig. 6 Mean Fourier spectra at Akune (阿久根)

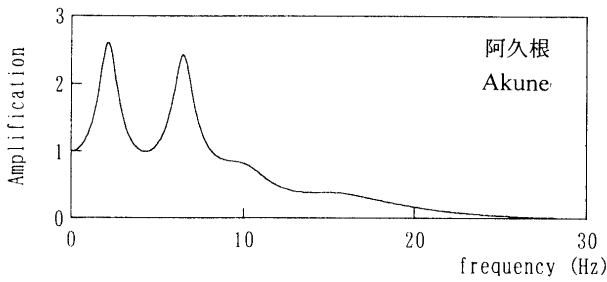


Fig. 7 Soil amplification factor at Akune (阿久根)

値が50以上となる固い地盤上にある。

平均フーリエ振幅スペクトルを Fig. 8 に示す。E-W 方向と N-S 方向のスペクトル特性は良く似ている。また、地震動の強さが小さいときも大きいときも卓越振動数は11-13(Hz)にみられる。PGA が250( $\text{cm/s}^2$ )以上になると E-W の卓越振動数は10-12(Hz)と少し低振動数側に移るが、N-S 方向では5-10(Hz)と大きく低振動数側に移動している。また、それに対応して両方向とも12(Hz)以上の高振動数の値は小さくなること分かる。

Table 2 のモデルで求めた地盤の増幅特性を Fig. 9 に示す。増幅度特性では17-18(Hz)にピークがみられるが、地震動のスペクトルにはPGA が15-30( $\text{cm/s}^2$ )と小さいときにそれより低振動数側にピークがみられる。

4-5 大口のスペクトル特性

大口の観測点は震源の北東にあり、深さ20m付近までN値が20程度の軟弱な地盤上にある。

平均フーリエ振幅スペクトルを Fig. 10 に示す。E-W 方向と N-S 方向のスペクトル特性は良く似ている。また、地震動の強さが小さいときも大きいときも卓越振動

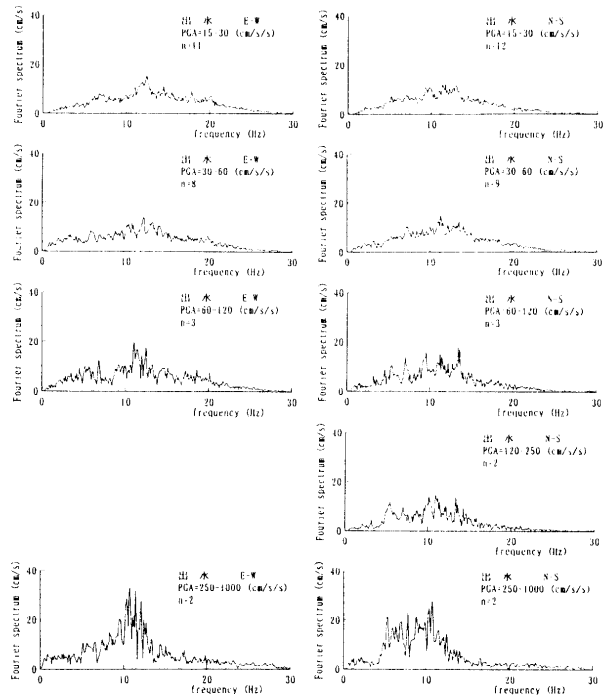


Fig. 8 Mean Fourier spectra at Izumi (出水)

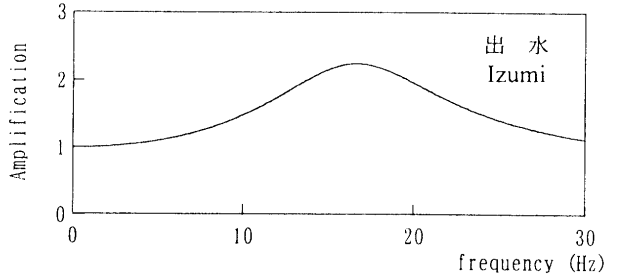


Fig. 9 Soil amplification factor at Izumi (出水)

数は3-4(Hz)と8-10(Hz)の2カ所にみられる。PGA が60( $\text{cm/s}^2$ )以下では8-10(Hz)の方が強いが、60( $\text{cm/s}^2$ )以上になると3-4(Hz)の方が強くなるとともに、12(Hz)以上の高振動数の値は小さくなっていることが分かる。

Table 2 のモデルで求めた地盤の増幅特性を Fig. 11 に示す。増幅度特性では8-9(Hz)に1つのピークがみられるが、地震動のスペクトルはピークが2つあり特性が異なっている。増幅度特性のピークは高振動数側の8-10(Hz)のピークと対応していると考えられる。

5 結論

1997年鹿児島県北西部地震で震源を取り囲む5地点で観測された49個の地震の強震データを最大加速度で4から5のグループに分けて最大加速度で基準化した地震動の平均フーリエ振幅スペクトルを求めた。

これらを総合した結果は、

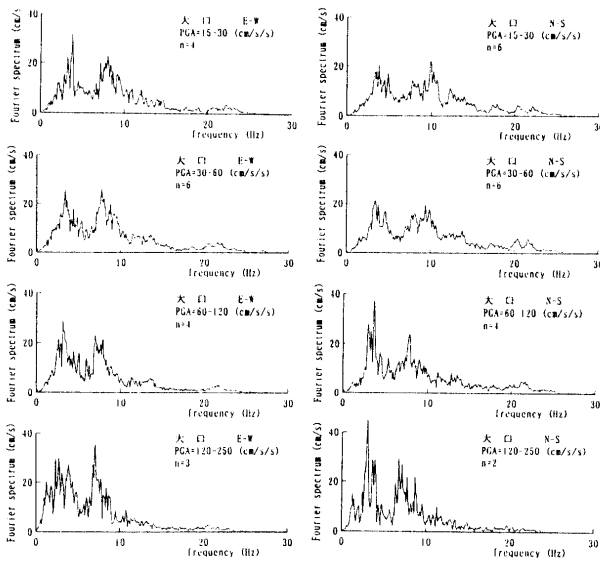


Fig. 10 Mean Fourier spectra at Ohguchi (大口)

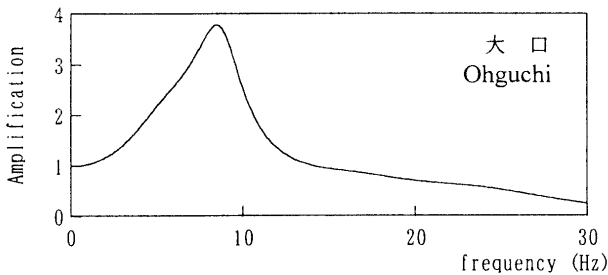


Fig. 11 Soil amplification factor at Ohguchi (大口)

1) 地震動の強さが大きくなるにつれて卓越振動数は低振動数側に移る傾向が見られる。スペクトルも高振動数側は小さくなり、低振動数側は大きくなる傾向がみられる。

- 2) 最大加速度(PGA)が60-120( $\text{cm/s}^2$ )付近を境としてそれより地震動が強いときと弱いときとはスペクトルの特性がかなり異なっている。
- 3) PGAが250( $\text{cm/s}^2$ )を超える大きな地震動の卓越振動数は2-3(Hz)と低振動数側に移動している。
- 4) 地盤のS波速度構造から求めた増幅度特性の卓越振動数は、PGAが15-30( $\text{cm/s}^2$ )の場合の卓越振動数とはほぼ対応しているが、地震動の卓越振動数は低振動数側に移動している傾向がみられる。
- 5) 水平2方向の平均フーリエ振幅スペクトル特性は震源から遠い阿久根と出水と大口ではほぼ等しいが、震源に近い宮之城と川内では違いがみられ、特に地震動が小さいときは違いが大きい。

地震動の強さが大きくなると卓越振動数が低振動数側に移る原因としては震源での断層破壊時の特性と地盤の比線形特性が考えられるが、ここで得られた結果より地盤の非線形性の影響が大きいと思われる。

建物の地震応答解析では地震動の強さだけを変えて応答の違いを考察することが多いが、周波数特性の違いも考慮する必要があることが分かる。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会, 第2回地盤震動シンポジウム資料集, 「ストレン・レベルによる地震動」, 1973
- 2) 科学技術庁ホームページ (<http://www.k-net.bosai.go.jp>)
- 3) 松村和雄, 「1997年鹿児島県北西部地震の地震動の特性」, 日本建築学会構造系論文集, 第512号, 1998年10月

なお、科学技術庁の強震データを利用したことを記して感謝します。