Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-05-29

観測記録を用いた神戸大学周辺の地盤震動特性

鍬田，泰子
齊藤，栄

(Citation)
神戸大学都市安全研究センター研究報告,13:227-242

(Issue Date)
2009-03

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(JaLCDOI)
https://doi.org/10.24546/81001969

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81001969

KOBE UNIVERSITY

神戸大学都市安全研究センター
研究報告，第13号，平成21年３月

観測記録を用いた
神戸大学周辺の地盤震動特性

Characteristics of Ground Motion on Slope Morphology around Kobe University Using Observed Records

鍬田　泰子[1)]
Yasuko Kuwata
齊藤　栄[2)]
Sakae Saito

概要：神戸大学の六甲台キャンパスは六甲山中腹の斜面地にあり、このような山地形などの不整形地盤上では地震時の地盤震動が複雑になることが指摘されている。本研究では、斜面上に設置した4台の地震計の観測記録を用いて、神戸大学周辺の斜面地形における地盤震動特性を明らかにすることを目的としている。まず、地震計周辺におけるボーリング調査、表面波探査と観測波形のH/Vスペクトルを比較して卓越周期を比較している。さらに、観測記録については、直接スペクトル比法、加速度オービット解析を行い、各観測点の周期特性、方向性をそれぞれ明らかにした。

キーワード：地震記録、 H/Vスペクトル、直接スペクトル比、加速度オービット、斜面地形

1.　はじめに

日本ではその国土事情を反映して山地形などの不整形地盤上での土木構造物、住宅の建設が余儀なくされている。現在では斜面のごく近傍まで宅地化が進んでおり、兵庫県の六甲山中腹に位置する神戸大学六甲キャンパス周辺でもマンションや団地などの高層建築物が多く建設され、現在もその数を増やしている。一般に、軟弱地盤に比べ、六甲山中腹のような表層地盤の薄い岩盤上の堅固な地盤は建物の共振作用が起こりにくく、構造物の建設に適していると考えられている。兵庫県南部地震の際も六甲山中腹は、軟弱な地盤を持つ沿岸部ほど多くの家屋、ビルの倒壊が見受けられなかった。しかし、不整形地盤における地震時の地盤震動特性については不明な点も多く、山地形のような不整形地盤では地震動の増幅特性が地形の影響を受けることが知られており、入射した波と内部で反射した波の干渉により、地表の地震波は複雑な様相を示す。そのため、地域ごとに地形や地質による固有の震動特性を評価し、それに応じた適切な対策が必要といえる。

現在、著者らの神戸大学大学院工学研究科地震防災研究グループは5台の地震計を所有し、うち4台の地震計を用いて神戸大学周辺の地震観測を行っている。また、(財)関西地震観測研究協議会（以下、関震協と呼ぶ）は兵庫県南部地震以前より神戸大学都市安全研究センター（以下、RCUSSと呼ぶ）で地震観測を行っている。本研究はこれらの地震計で同時観測された地震動記録を用いて、神戸大学周辺の斜面地形における地盤震動特性を明らかにすることを目的としている。まず、表層地盤による地震動の増幅特性を明らかにすることを目的とし、ボーリング調査、表面波探査の調査結果と地震波形のH/Vスペクトル比を比較して地震観測地点における卓越周期について分析を行った。さらに、近年同時観測された中小地震の地震記録について直接スペクトル比法、加速度オービット解析を行い、各観測点の周期特性、方向性を明らかにした。さらに、関震協によりRCUSSで観測された兵庫県南部地震の本震、余震についても加速度オービット解析を行い、地震動の方向性について中小地震と比較しながらその特性について明らかにした。

2. 観測体系

(1) 地震計設置箇所と周辺地形

神戸大学六甲台キャンパスは六甲山中腹に位置している。著者らの神戸大学大学院工学研究科地震防災研究グループは5台の地震計を所有し、うち4台の地震計を用いて神戸大学周辺の地震観測を行っている（図-1 参照）。キャンパス内・周辺の発達科学部、工学部、高羽小学校の他に JR 神戸線の南側にある神戸大学学而荘に地震計を設置することにより、斜面に沿ってほぼ一直線の同時観測が可能になっている。

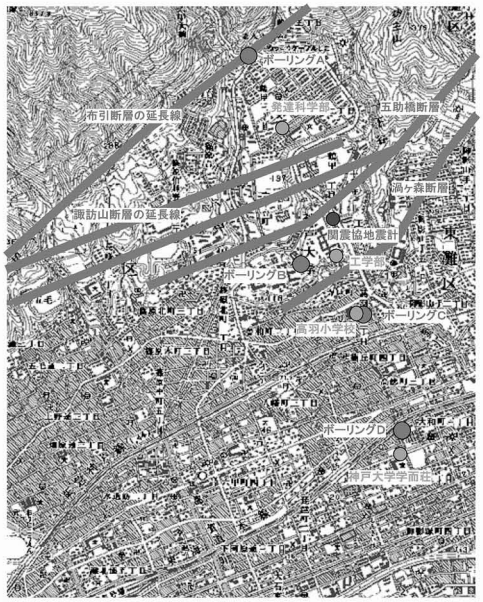


図-1 地震計設置箇所

六甲山地は諏訪山、五助橋、甲陽断層などといった活断層の断層変位によって傾動運動を伴いながら隆起した基盤山地であり、そのため斜面が一様の傾斜で高くなるのではなく階段状に地形的な段差が生じている。図-2 に神戸大学周辺の断面図と地震計の設置位置を示す。標高分布は産総研の標高数値データ[1]に基づいて作成したものである。工学部と発達科学部、高羽小学校の間にそれぞれ傾斜が大きくなる箇所が見られる。これらの観測地点の間には断層が存在しており、例えば、工学部と高羽小学校の地震計の間には渦ヶ森断層が、工学部と発達科学部の地震計の間には五助橋断層がある。これらの断層の隆起により傾斜が局所で変化している。

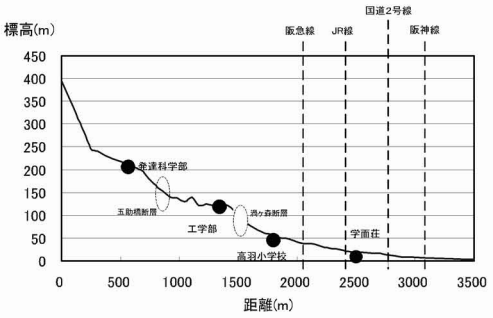


図-2 神戸大学周辺断面図

六甲山中腹の傾面地での住宅地造成の進展から、六甲台キャンパス周辺では盛土、切土による地形、地質の変化が考えられる。これらは地盤震動特性に影響するため予め地盤造成履歴を把握しておくことは重要である。そこで神戸大学周辺の古地図と現在の地形図を用いて地形や観測点周辺の造成状況を分析した。その結果、高羽小学校より低地においては標高にほとんど変化はないが、小学校の場所はかつて池であったことが明らかになった。現在では池を埋め立てられているが、当時の池周辺では埋め立て地盤によって表層地盤の硬さが異なると考えられる。一方、工学部と高羽小学校間の渦ヶ森断層の変位による斜面はほぼ一致しているが、古地図ではその斜面が現在の工学部まで続いており、工学部周辺の地盤の改変がうかがえる。この隆起より山手のやや平坦な位置では新旧地形図の標高がほぼ一致していることから、工学部の地震計設置位置付近は切土により整備されたと考えられ、表層地盤が薄く、地盤による地震動増幅の影響は小さいと予想される。一方、発達科学部周辺の傾面地形については大きな変化が見られる。現在、発達科学部から山手の鶴甲団地にかけて緩やかな傾斜となっているが、古地図では一様な急斜面を形成していたことが判読できた。発達科学部周辺では切土、盛土による造成が盛んに行われており、発達科学部においては盛土により地盤が造成されていることがわかった。

(2) 地震計の仕様

本研究で使用する地震計の仕様について以下に説明する。地震計は加速度型強震計と速度型強震計の二種類である。学而荘には Kinemetrics 社の Altus-K2 を設置しており、検出器はフォークバランス型加速度計、起動レベルは 1gal、最大記録範囲は±2G である。2004 年から 2005 年 4 月の記録はサンプリング周波数 200Hz で観測を行っており、2005 年 11 月からサンプリング周波数を 100Hz に設定変更している。発達科学部、工学部、高羽小学校では(株)東京測振の速度型地震計 CV-910 を使用している。検出器はサーボ型速度計、起動レベルは 30mkine、サンプリング周波数は 100Hz に設定している。両地震計とも遅延時間 20sec、時刻は GPS により自動修正され、同時観測が可能となっている。また、設置場所は表層地盤上である。また、起動モードは OR に設定しており、水平 2 成分、鉛直 1 成分のうちいずれかの成分が起動レベルに達した場合に観測が開始される(表-1 参照)。 次に、関震協が使用している地震計の仕様について説明する。関震協は速度型地震計を使用しており、サンプリング周波数 100Hz、検出器は本研究グループの地震計と同様にサーボ型速度計である。時刻は GPS により校正を行っており、設置深さは 9.5m である。

表-1 地震計の仕様

	仕様					
名称	速度強震計			加速度型強震計		
設置場所	工学部, 発達, 高羽			学而荘		
形式	CV-910			ALTUS-K2		
検出器	サーボ型速度計			フォークバランス型加速度計		
記録成分数	9成分			3成分		
最大記録範囲	±100kine (±200kine)低感度			±2G		
	±5kine(±10kine) 高感度					
	±1000gal 加速度信号					
AD変換分解能	16bit			24bit		
ダイナミックレンジ	96dB			114dB		
サンプリング周波数	100Hz			100Hz		
記録周波数特性	DC-41Hz			DC-40Hz		
遅延時間	20sec			20sec		
記録媒体	PCMCIA			PCMCIA		
記録フォーマット	MS-DOSフォーマット			デジタル記録収録		
起動レベル	30mkine			1gal		
起動モード	OR			OR		
時刻校正	GPSにより自動修整			GPSにより自動修整		
時刻精度	0.0005mS以内			0.0005mS以内		
チャンネル設定	X	Y	Z	X	Y	Z
	NS	EW	UD	NS	UD	EW

(3) 観測記録

表-2 に本研究で用いる観測記録を示す。観測記録は 2004 年 1 月から 2008 年 12 月までに観測された地震のうち 2 台以上の地震計で記録された 25 の地震の記録である。高羽小学校については 2005 年 4 月以降、校舎の改修工事のため観測を中断している。地震の規模は気象庁マグニチュード、震央距離は神戸大学工学部までの距離を示す。また、各観測点で記録された 3 成分の PGA を記しておく。

観測記録の多くは大阪湾、紀伊半島沖などの近畿圏を震源とする地震である。関東、九州などの遠方を震源とする遠地地震については学而荘で観測されることが少ない。これは速度型地震計が加速度型地震計に比べ長周期の分解能が高いことによるものである。一方、関西周辺を震源とするマグニチュード 3 以下の規模の小さい地震において、学而荘で観測されたものの、その他の観測点で観測されないケースが多い。これは速度型地震計において設定しているトリガーレベルが高いためである。これらのことからアレー観測においてより多くの観測記録を得るには同じ仕様の地震計を使用する、またはトリガーレベルの設定により同じ規模の地震が観測できるよう観測体系を調整することが重要であるといえる。本研究では学而荘以外の山手の地震計は全て速度型地震計であり、山手で地震動を検討するには問題がないといえる。

表-2 地震計観測記録の概要

地震諸元								PGA(gal)													
								発達科学部			工学部			関震協(RCUSS)			高羽小学校			学而荘		
No.	西暦	日付	時刻	震源深さ	震央距離	規模	震源	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
1	2004	1月6日	14:50:52	37km	141km	5.4	三重県南東沖	2.76	1.72	1.16	1.97	0.90	0.73	1.42	2.94	0.75	3.23	3.12	1.27			
2	2004	9月5日	19:07:07	38km	210km	7.1	三重県南東沖	19.42	14.02	16.01				8.01	5.95	4.22				14.37	16.68	7.50
3	2004	9月5日	23:57:17	44km	220km	7.4	三重県南東沖	11.05	12.62	8.59	5.78	3.57	3.49	5.95	6.14	5.50	6.62	8.83	4.77			
4	2004	9月7日	1:45:30	41km	340km	4.7	三重県南東沖	4.10	6.06	4.50	3.49	1.81	2.16	3.89	2.42	1.57	5.22	4.43	5.90	7.16	8.33	3.85
5	2004	9月8日	3:36:21	40km	220km	5.5	三重県南東沖	1.23	1.50	0.58	1.28	0.70	0.47	1.13	0.91	0.45	1.71	1.64	0.75	1.63	2.46	0.86
6	2004	9月8日	23:58:23	36km	230km	6.5	三重県南東沖	4.72	6.69	2.42	0.63	0.48	0.52	0.72	0.54	0.51						
7	2004	10月5日	8:33:51	12km	150km	4.8	福井県嶺北	0.89	0.87	0.87	1.06	1.00	0.88	0.90	1.85	0.57	1.73	1.03	0.68	3.84	3.45	1.23
8	2004	10月18日	11:48.0	14km	10km	3.9	兵庫県南東部	4.79	6.80	3.08				1.55	1.68	1.27				6.29	5.50	3.99
9	2004	10月23日	17:56:00	13km	360km	6.8	新潟県中越沖	0.39	0.38	0.35	0.53	0.35	0.34	0.11	0.14	0.14						
10	2005	1月19日	15:11:30	31km	530km	6.8	関東東方沖	0.24	0.19	0.33	0.10	0.10	0.14	0.12	0.14	0.20	0.22	0.20	0.23			
11	2005	2月14日	0:22:05	13km	20km	4.1	兵庫県南東部	11.91	14.57	6.56	4.55	3.85	4.82	3.72	5.58	2.70	4.55	3.85	4.82	15.04	12.59	8.94
12	2005	3月20日	10:53:40	9km	450km	7	福岡県北西沖	0.92	0.83	1.18	1.23	0.80	1.23	0.19	0.20	0.20	1.47	1.53	0.98			
13	2005	4月11日	7:22:16	52km	430km	6.1	千葉県北東部	0.92	0.83	1.18	0.15	0.11	0.13	0.13	0.12	0.19	0.22	0.18	0.21			
14	2005	11月1日	12:47:38	45km	80km	4.3	紀伊水道	2.09	1.41	0.60				0.82	1.22	0.41						
15	2005	11月15日	6:38:51	45km	810km	7.2	三陸沖	0.14	0.17	0.27	0.08	0.13	0.11	0.10	0.10	0.19						
16	2006	5月15日	1:42:13	3km	50km	4.5	和歌山県北部	1.62	1.56	0.92				0.60	0.86	0.76				1.79	1.97	1.34
17	2006	6月12日	5:01:25	145km	350km	6.2	大分西部	1.31	0.88	0.58	1.02	0.76	0.51	0.61	0.86	0.51				1.99	2.47	0.61
18	2007	1月13日	13:23:13	30km	1800km	8.2	千島列島東方	0.36	0.16	1.02	0.19	0.16	0.35									
19	2007	1月22日	2:16:08	13km	140km	4.5	岐阜県美濃中西部				0.94	0.97	1.10	0.92	1.38	0.84				4.11	5.83	1.64
20	2007	3月25日	9:41:58	11km	260km	6.9	能登半島沖	1.46	1.28	0.92	1.35	1.35	0.83	0.60	0.62	0.73				3.57	3.60	1.88
21	2007	4月15日	12:19:30	16km	110km	5.4	三重県中部	3.66	3.16	2.45	4.10	3.99	2.03	4.30	4.14	1.22				6.55	8.69	3.05
22	2007	11月6日	10:01:59	12km	50km	4.1	大阪府南部	3.34	3.35	2.68	2.66	1.67	2.49	2.17	1.55	1.05				3.74	5.56	3.04
23	2008	4月17日	0:58:29	10km	20km	4.1	大阪湾	8.87	6.42	5.88	4.53	3.23	3.03	4.12	3.69	2.15				16.73	7.71	6.34
24	2008	4月18日	4:11:29	10km	20km	3.7	大阪湾	3.98	3.30	3.21	2.05	1.69	1.57	2.04	2.08	1.31				4.73	4.61	3.00
25	2008	8月6日	6:26:01	13km	20km	3.9	兵庫県南東部	2.60	2.51	1.63	2.25	3.34	2.36	1.80	2.93	1.37				9.52	4.03	2.18

3. 地盤の固有周期の特性

(1) ボーリング調査資料と固有周期

工学的基盤から地表までの浅い地盤は、比較的軟らかい地層で構成されている。固い地盤では地震波の伝播速度が速く、軟らかい地盤では遅くなるため、震源から伝播してきた地震動は表層地盤において増幅し、地上の構造物に甚大な被害を与える。そのため、構造物建設地の地盤増幅特性を事前に把握することは重要である。基本的に地震時の地盤震動は表層地盤の固有周期域で増幅するため、この周期が明らかになれば、対象とする地震動に対してその地域が揺れやすいか否かがわかる。日本では構造物建設の際、構造物の基礎までの地盤調査が義務付けられており、20～30mまでのボーリング調査資料が都市部を中心に数多く蓄積されている。しかし、地盤震動研究に利用できるほど密に資料はないため、簡易的かつ経済的に地盤情報収集が可能な調査方法が必要となる。現在、簡易的に地盤増幅特性を把握する手段として広く利用されているものに表面波探査や常時微動測定が挙げられる。本研究では地震計設置箇所周辺のボーリング調査資料や表面波探査から得られる地盤の固有周期と地震動のH/Vスペクトル比の卓越周期との関係について分析する。

まず、神戸JIBANKUN[2]から得られた地震計設置箇所周辺のボーリング調査資料から地盤の固有周期を算出する。算定に利用するボーリングコアの4箇所の位置を図-1に併記する。表層地盤の平均せん断波速度の推定は道路橋示方書[3]の式(1)を用いた。ボーリング調査資料から得られた表層地盤のN値を表-3に示す。

$$\text{粘性土層の場合}\quad V_{Si}=100N_i^{1/3}\quad (1\le N_i\le 25)$$
$$\text{砂質土層の場合}\quad V_{Si}=80N_i^{1/3}\quad (1\le N_i\le 50) \tag{1}$$

A地点は表層2mが礫混じり砂の盛土、B地点は表層2.4mが砂質地盤からなり、それ以深は基盤層であり、表層地盤は非常に薄いことが分かる。このことから発達科学部、工学部においては表層地盤による地震動の増幅は大きくないものと考えられる。C地点は高羽小学校の観測点に隣接したボーリングの位置である。C、D地点の基盤の深度はそれぞれ10.5m、11.3mであり、A、B地点に比べて堆積層が厚い。高羽小学校は前述したように池を埋め立てて建設され、池周辺で表層地盤が大きく変化する可能性が考えられるので留意されたい。

表-3 ボーリング調査資料から得られた地震計周辺の表層地盤のN値[3]

(1) 地点A (発達科学部周辺)

層厚(m)	土質	平均N値	平均Vsi(m/s)
2.0	盛土(礫混じり砂)	22.5	226

(2) 地点B (工学部周辺)

層厚(m)	土質	平均N値	平均Vsi(m/s)
2.4	砂	19.9	217

(3) 地点C (高羽小学校周辺)

層厚(m)		土質	平均N値	平均Vsi(m/s)
10.5	0.4	礫混り砂	3.0	115
	1.8	砂	7.4	156
	1.0	砂礫	24.9	234
	1.9	礫混り砂	24.3	232
	1.2	礫混り砂	31.5	253
	0.9	シルト混り砂	15.7	200
	0.8	砂礫	12.5	186
	0.8	シルト混り砂	26.5	239
	0.9	礫混り砂	37.5	268
	0.6	シルト混り砂	12.2	184
	0.4	砂礫	25.0	234

(4) 地点D (学而荘周辺)

層厚(m)		土質	平均N値	平均Vsi(m/s)
11.3	2.5	砂礫	14.3	194
	0.5	砂	19.0	213
	3	砂礫	29.5	247
	3.6	砂礫	39.7	273
	1	砂	46.7	288
	0.7	シルト混り砂	29.0	246

式(1)で求めた表層地盤の平均せん断波速度を用いて、道路橋示方書[2]に従って固有周期を算定する。

$$T=4\sum_{i=1}^{n}\frac{H_i}{V_{Si}} \tag{2}$$

ここで、T ：地盤の固有周期(s)、H_i ：i番目の地層の厚さ(m)、V_{si} ：i番目の地層の平均せん断波速度(m/s)

(2) 表面波探査

a) 実験の原理と調査概要[4)]

表面波探査は地盤を伝わる表面波（レイリー波）を測定・解析することにより、深度 20m 程度までの地盤のせん断波速度構造を求める技術である[4)]。かけやなどの人工震源によりと地表を起振すると弾性波が発生する。このうち、地表近傍を横方向に伝播するものを表面波と呼ぶ。表面波の位相速度は、およそ波長に相当する深度までの地盤の S 波速度を反映する。したがって、短い波長の波は主に浅い地盤のせん断波速度を反映し、長い波長の波ほど深い地盤のせん断波速度を反映する。一般の地盤では、深度とともに弾性波速度が速くなるため、短い波長では表面波の位相速度は遅く、長い波長では位相速度が速くなる。波長による位相速度の違いにより不均質な地盤のせん断波速度構造を求めることができる。

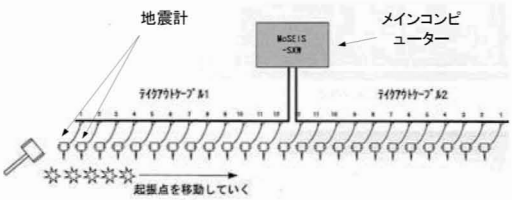
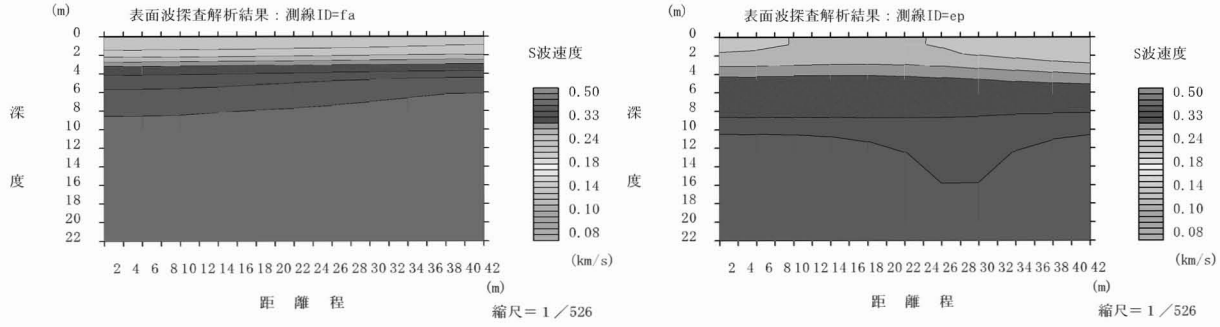


図-3 表面波探査概念図[4)]

図-3 に探査の概念図を示す。本研究では応用地質(株)の McSEIS-SXW を使用した。探査では 24 個の地震計を 2m間隔で直線上に配置し、隣り合う地震計の間の地表面をかけやで順に起震し、表面波を測定する。そして、得られた波形データを用い、周波数領域の位相速度を計算して、分散曲線を求め、非線形最小二乗法により 2 次元のせん断波速度構造を求める。

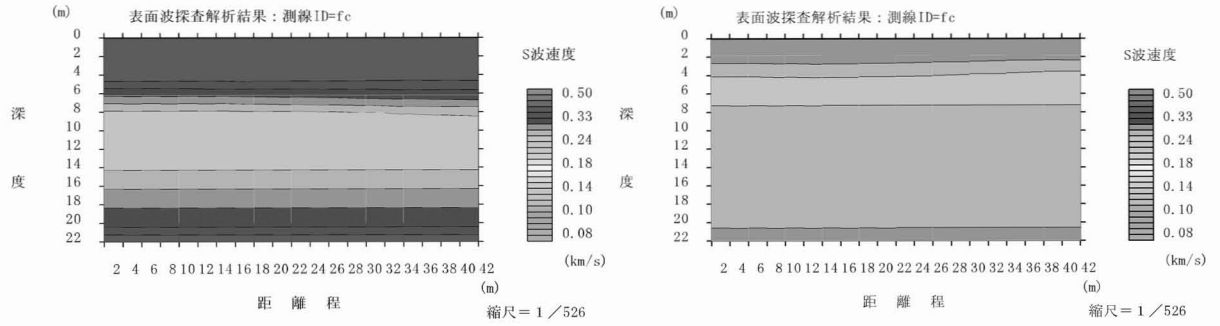
b) 調査結果

平成 20 年 9 月から 10 月にかけて、地震計周辺にて表面波探査を実施し、地震計周辺の地盤のせん断波速度構造を得た。図-4 は実験から得られた S 波速度構造図を示している。発達科学部、工学部ではそれぞれ深度 2.8m、4.8m 以深からせん断波速度が 300m 以上となり、深度 20m まで同じ速度構造となっていることから、この層境界が観測点の工学的基盤であると考えられる。学而荘については深度 20m までせん断波速度 300m 以下の速度構造となっており発達科学部、工学部と比べ、表層地盤が厚く基盤の深度は深くなっている。高羽小学校については表層から深度 6m までの地層において、その深部より速い S 波速度を示している。これは近年行われた高羽小学校前での配管工事により以前と表層地盤が変化したことによるものと考えられる。このため高羽小学校についてはボーリングデータと合わせて表層地盤の構造を考える必要がある。また深度 18m にせん断波速度 300m の層が見られ、この地点の基盤であると考えられる。実験により算定した表層地盤の平均せん断波速度を用いて、道路橋示方書[2)] に従って式(2)より固有周期を算定する。



(a) 発達科学部

(b) 工学部



(c) 高羽小学校

(d) 学而荘

図-4 表面波探査結果から得られた地震計周辺のせん断波速度構造

(3) 地震動の H/V スペクトル

a) H/V スペクトルに関する既往研究

常時微動の水平動、上下動のフーリエスペクトル比のピーク値、卓越周期がそれぞれ表層地盤の増幅倍率、固有周期を示すことは広く知られており、簡易的に地震動の増幅特性の推定を行えるため多く利用されている[5]。しかし、理論的な根拠は明確でなく、常時微動の性質について 2 つの観点からその根拠が考えられている。

中村[5]は、常時微動において重複反射する実体波が優勢であるという観点から、レイリー波をノイズと考えた。表層地盤を伝播するレイリー波に対して、表層地盤はハイパスフィルタと考えられ、軟弱地盤においては水平動が大きく増幅されることから、H/V スペクトル比が増幅特性を示すと説明している。一方、常時微動が表面波特有の分散性を示すことや、実体波に比べ表面波の方が幾何減衰が小さいことから、常時微動は表面波が優勢であるという指摘もある。大町ら[6]はこの観点から、表層と基盤のせん断波速度のコントラストが大きいと、常時微動を実体波、表面波のどちらで解釈してもピーク周期は近似し、コントラストが小さいとピーク周期が異なると説明している。常時微動において実体波が優勢であるという観点で考えると、強震動の主要動は実体波であるので、強震動でも常時微動と同様に地震動の増幅特性を推定できると考えられる。しかし、表面波が優勢と考えた場合、観測点の地盤構成により地震動と常時微動の H/V 比のピーク周期が近似しないことが考えられる。

大熊ら[7]は宮崎県内の K-NET 観測地点における地震動と常時微動の H/V スペクトル比の比較を行い、宮崎のように沖積層が堆積しているようなせん断波速度の大きい地盤では、常時微動を実体波と解釈しても表面波と解釈しても H/V 比のピーク周期が近似し、コントラストが小さいとピーク周期が異なることを示している。これは大町らの研究と調和的である。

六甲山地中腹に位置する神戸大学周辺の観測地点は表層地盤が薄く、せん断波速度のコントラストが小さいと考えられる。本研究では地震動の H/V スペクトル比の卓越周期とこれまでに算定した地盤の固有周期の比較を行い、地震動の H/V スペクトル比による地盤の増幅特性推定の精度と適用範囲について考察を行う。

b) 地震動 H/V 比の卓越周波数

表-2 の 25 地震の観測記録について震央距離 250km で地震動を区別し、H/V スペクトル比の卓越周期を求めた。地震波形のスペクトルは 0.4Hz の Parzen フィルタで処理している。また、水平動フーリエスペクトルは NS 成分と EW 成分の二乗和の平方根とした。その観測点ごとの分布を図-5 に示す。学而荘については振動数が 3.0～4.0Hz の間に分布し、安定していることが分かる。その他の観測点については振動数のばらつきが大きい。これらのばらつきの大きい地震の震源地を見てみると、学而荘の加速度型地震計では観測できなかった関東地方、新潟県中越沖などの遠地地震であった。そこで 4 台の地震計で同時観測された地震動のみを用いて観測地別の固有周期を比較することとした。

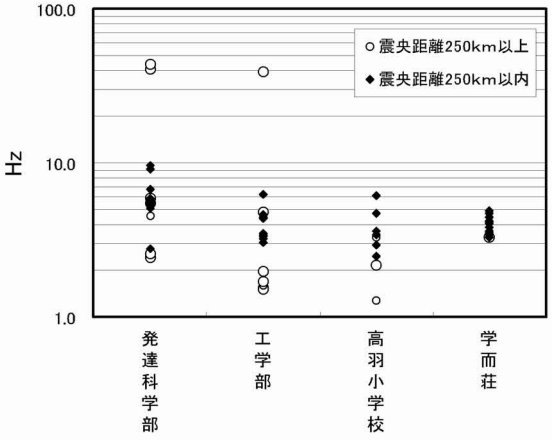
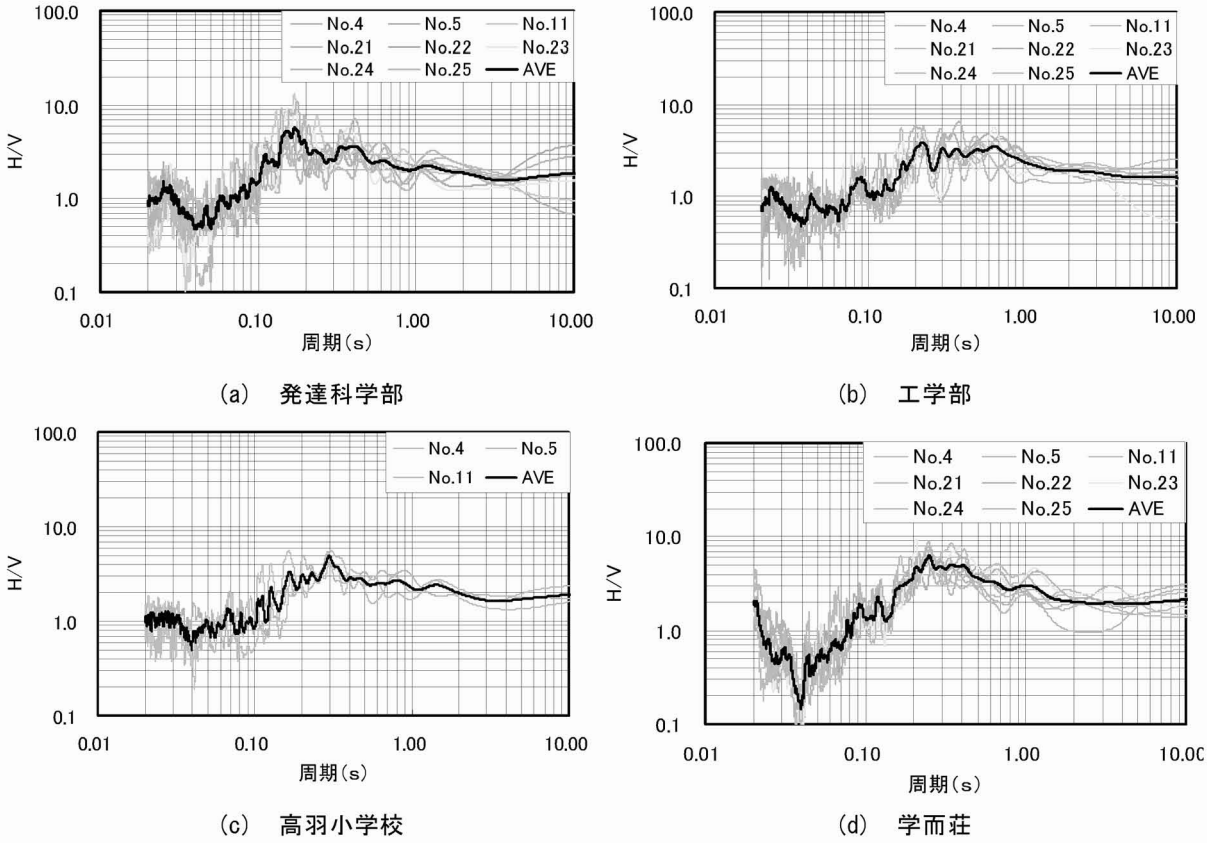


図-5 観測地別 H/V 比の卓越周期

本研究に用いる観測記録のうち 4 台の地震計で観測された記録を表-4 に示す。兵庫県南東部から三重県南東沖を震源とする 8 地震を用いるが、高羽小学校については2005年までの3地震の記録を用いて卓越周期を算定する。図-6 は各観測点の H/V スペクトル比とその平均を示している。個々のスペクトル比の形状が震源位置によらず類似していることが分かる。このことから H/V スペクトル比は震源の影響が少なく、表層の地盤構造が強く反映されていることといえる。高羽小学校、学而荘については表面波探査から算定した表層地盤の固有周期に近い値が得られた。しかし、発達科学部、工学部については大きく異なる値となった。

表-4 H/V 比分析に用いた地震

No.	年月日	規模 M	震源深さ (km)	震央距離 (km)	震源
4	2004/9/7	4.7	41	340	三重県南東沖
5	2004/9/8	5.5	40	220	三重県南東沖
11	2005/2/14	4.1	13	20	兵庫県南東部
21	2007/4/15	5.4	16	110	三重県中部
22	2007/11/6	4.1	12	50	大阪府南部
23	2008/4/17	4.1	10	20	大阪湾
24	2008/4/18	3.7	10	20	大阪湾
25	2008/8/6	3.9	13	20	兵庫県南東部



(a)　発達科学部　　(b)　工学部

(c)　高羽小学校　　(d)　学而荘

図-6　観測記録の H/V スペクトル

(4)　固有周期と H/V 卓越周期との比較

図-7 に表面波探査、ボーリング資料からそれぞれ地震計設置箇所周辺の地盤の固有周期を算定した値と H/V スペクトル比の卓越周期を示す。また、それぞれの算定法により算出した固有周期の値を表-5 に示す。観測点の中でも高羽小学校、学而荘では固有周期のばらつきが小さいことが分かる。このことから高羽小学校、学而荘のような比較的平坦な地形においては表面波探査の S 波速度構造や地震動の H/V スペクトルの卓越周期から簡易的にボーリング調査とほぼ同様の固有周期を推定できるといえる。一方、発達科学部、工学部においては表面波探査、ボーリング資料による固有周期と H/V スペクトル比による卓越周期との間に差が生じた。卓越周期は発達科学部で 0.17s、工学部で 0.21s であった。斜面地において表面波が優勢であると考えた場合、発達科学部、工学部のような表層地盤が薄く、表層と基盤のせん断波速度のコントラストが小さい地盤においては地震動の H/V スペクトルのピーク周期が地盤の固有周期と異なると考えられる。

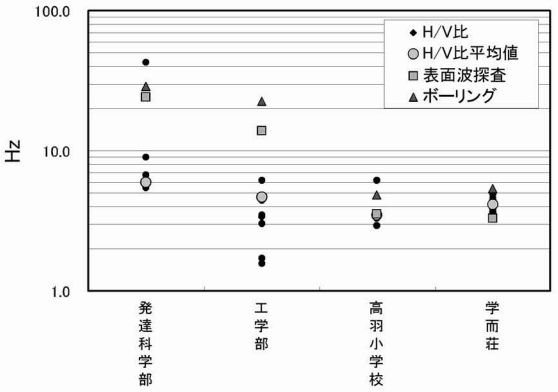


図-7　地震動 H/V 比の卓越周期と他調査による固有周期との比較

表-5　固有周期算定値

	発達科学部	工学部	高羽小学校	学而荘
ボーリング資料による固有周期算定値(s)	0.04	0.04	0.21	0.19
表面波探査による固有周期算定値(s)	0.04	0.07	0.29	0.30
H/Vスペクトル比の卓越周期(s)	0.17	0.21	0.29	0.24

4. 観測記録による周波数特性

(1) PGA の標高に対する分布

同時観測された 8 地震（表-5）について 3 成分の最大加速度（PGA）の標高に対する分布を図-8 に示す。各観測点の標高は発達科学部、工学部、高羽小学校、学而荘それぞれ 202m、120m、56m、20m である。全ての地震動について最大加速度が工学部よりも発達科学部で大きな値を示す成分が見られることが分かる。対象とした地震動の多くが大阪湾、紀伊半島沖などの学而荘より南を震源とするものであることから、学而荘から工学部にかけて表層地盤の層厚が薄くなるので振幅は一旦減少しているが、発達科学部では PGA は逆に大きくなる。工学部では鉛直動に対して水平動は大きくなく、他の観測点に比べ 3 成分が安定していることが分かる。これは工学部が切土により整備されており表層地盤による地震動の増幅の影響が小さいためであると考えられる。また、学而荘では全ての観測記録において 3 成分の中で鉛直成分が小さな加速度を記録している。これは軟弱地盤において鉛直動に比べ水平動が増幅した地震動の特性によるものと考えられる。

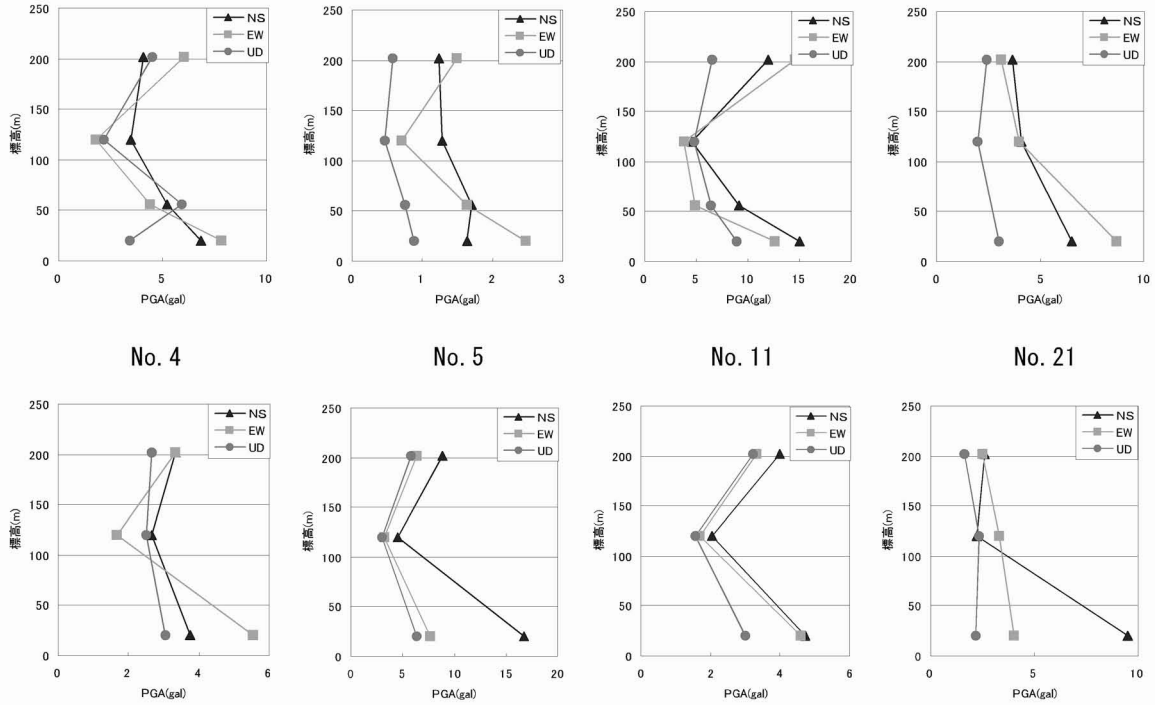


図-8 最大加速度の標高に対する分布

(2) 直接スペクトル比法

a) 概要

PGA の標高に対する分布から発達科学部、工学部間の急斜面で地震動が増幅する現象が見られた。そこで、直接スペクトル比法により各観測点の相対的な周波数特性を明らかにすることとした。直接スペクトル比法とは複数の観測点において同時観測された地震記録について、基準点に対する相対的なスペクトル比を求めることにより、各点の周波数特性を明らかにする手法である。この手法の利点は同時観測記録について隣接する観測点に対する相対的なスペクトル比をとるため震源による影響を除去できる点が挙げられる。一方、スペクトル比が基準点のサイト特性に支配されるという問題点が考えられる。そこで、3 成分の最大加速度がほぼ近い値を示し、安定していた工学部の観測記録を分母とした発達科学部、高羽小学校、学而荘との方向別のフーリエスペクトル比から各観測点の地震動増幅の特徴について考えることとした。また神戸大学 RCUSS で関震協が観測を行っている地震計の観測記録を用いることで、4 観測地点の工学部に対する地震増幅特性を考える。なお、RCUSS の地震計は地表から 9.5m 下の地下に設置されている。

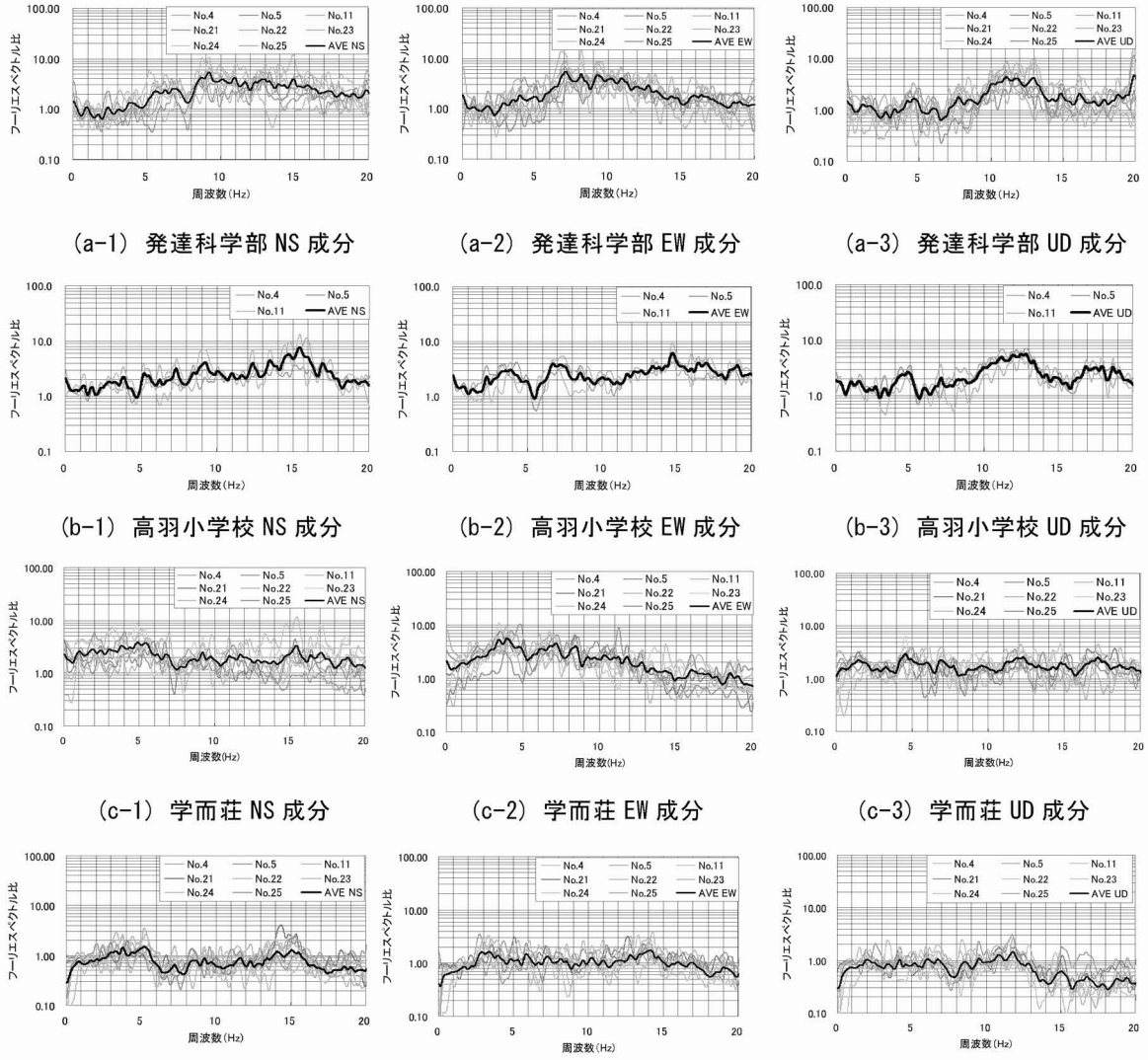
b) 解析結果

工学部を基準点とした直接スペクトル比法の結果を図-9 に示す。発達科学部では水平成分 9Hz、鉛直成分 12Hz 付近で地震動が卓越していることが分かる。地盤調査から算定した地盤の固有周期は 20Hz 以上であるが、20Hz 付近で水平動に顕著な増幅は見られない。つまり、発達科学部では表層地盤以外の要因で地震動の

増幅が起きていると考えられる。高羽小学校については、5Hz 程度の固有周期付近でやや工学部に対して優勢になっているが、水平成分は 15Hz、鉛直成分は 12Hz 付近で最も卓越している。表層地盤による地震動増幅の影響はあるものの、発達科学部と同様に表層地盤以外の要因で顕著に増幅しているといえる。

一方、平坦な学而荘では水平成分において 5Hz 付近の短周期帯で地震動が卓越している。また鉛直成分でも卓越が見られるが、水平成分ほど顕著でなく学而荘の固有周期の算定値 3～5Hz と一致していることから、この増幅は表層地盤によるものであると考えられる。

RCUSS は工学部の近傍に位置し、表層から深さ 9.5m の地中で観測を行っているため、工学部の基盤と同じ地盤構造をしていると考えられる。このため工学部において固有周期で地震動が卓越することが予想される。RCUSS との比では低周波数域においてフーリエスペクトル比が 3 成分ともほぼ 1 を示しているが、15Hz 以上の高周波数域においては 1 より小さな値を示しており、RCUSS に対して工学部が優勢になっている。表面波探査、ボーリングデータから算定した工学部の地盤の固有周期はそれぞれ 14Hz、23Hz であり、表層地盤の薄い工学部のような場所においても、地震動が増幅していることが分かる。



(a-1) 発達科学部 NS 成分　(a-2) 発達科学部 EW 成分　(a-3) 発達科学部 UD 成分

(b-1) 高羽小学校 NS 成分　(b-2) 高羽小学校 EW 成分　(b-3) 高羽小学校 UD 成分

(c-1) 学而荘 NS 成分　(c-2) 学而荘 EW 成分　(c-3) 学而荘 UD 成分

(d-1) RCUSS NS 成分　(d-2) RCUSS EW 成分　(d-3) RCUSS UD 成分

図-9　工学部に対するフーリエスペクトル比

5.　加速度オービット解析による方向性

(1)　概要

地震動の 3 次元的な挙動を知るためには単一成分の地震動の波形解析では不十分で、3 成分を同時に解析する必要がある。そこで、複雑な地震波を立体的にとらえる波形解析の手段として 3 成分の地震波を同時に

利用するオービット解析が行われる。

金子[8]はオービット解析を用いて地震波、常時微動の持っている性質を立体的に明らかにしながら基本的な利用方法を研究し、主体的な地震動については加速度、速度、変位量のいずれのオービットについても理論的に同一の挙動を示している。またピーク周波数にねらいをつけたオービット解析を行えば基本的な波動および波群の検出が行えることを示している。末冨・土岐[9]は兵庫県南部地震の際にRCUSSで観測された関震協の本震、余震の記録から水平面内変位オービットを示し、いずれの地震についてもNS成分がEW成分に比べ卓越していることを指摘している。また2次元FEMモデルを作成し、面内解析と面外解析を行うことにより基盤地震動を評価し、基盤面における変位軌跡を求めた結果、深層地盤の谷構造の影響により、変位軌跡は地震の規模、震央位置に関わらず南北方向に卓越する傾向があり、本震記録については地盤の非線形化の影響を受けることを示している。

本研究では本研究グループと関震協の地震計で観測された地震記録について、0～5Hz、5～10Hz、10～15Hzの3種類のバンドパスフィルターをかけ水平面内の加速度オービットを描き、観測点ごとの地震動の方向性を捉えることとした。また、兵庫県南部地震とその余震のRCUSSでの観測記録についても同様のバンドパスフィルターで処理し、加速度オービットを描き、末富・土岐らの既往の研究との比較を行った。

(2) RCUSSの観測記録

a) 兵庫県南部地震の記録

解析に用いる兵庫県南部地震とその余震の地震記録を表-6に示す。また、本震と余震のH/Vスペクトルを図-10に示す。本震のH/Vスペクトル比を見ると、余震に比べてスペクトル比のピークが長周期側に移動しており、増幅倍率が小さくなっていることが分かる。つまり、RCUSSの浅層地盤において地盤の非線形化していると考えられる。

表-6 RCUSSで観測された兵庫県南部地震の本震と余震

	年月日	規模	震源深さ	震源
本震	1995/1/17	M:7.3	16km	大阪湾
余震No.1	1995/1/23	M:4.3	16km	兵庫県南東部
余震No.2	1995/1/23	M:4.7	16km	播磨灘
余震No.3	1995/1/25	M:5.1	15km	兵庫県南東部
余震No.4	1995/2/18	M:5.0	16km	淡路島付近

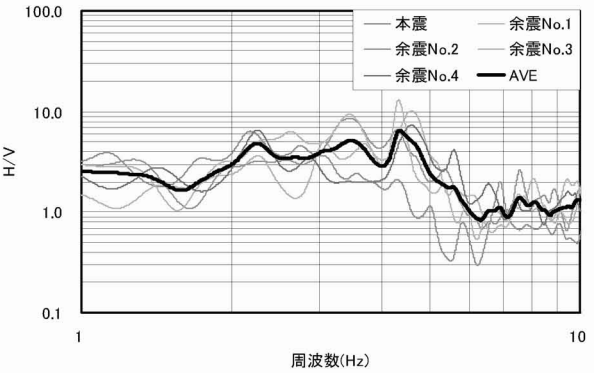


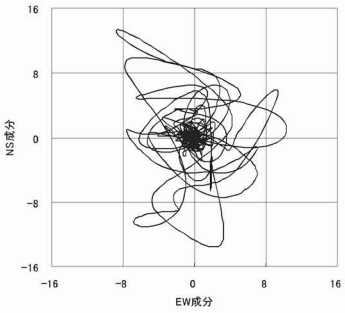
図-10 兵庫県南部地震の本震と余震のH/Vスペクトル

次に、個々の地震動の主要動30秒についての水平成分の加速度オービットを図-11に示す。H/Vスペクトルでピーク周波数を示している0～5Hzの周波数域において、いずれの地震動についてもNS方向に卓越しており、これは末富・土岐らが指摘した結果と一致している。5～10Hzにおいては他の周期帯に比べてNS成分、EW成分の増幅に偏りが少ない。また10～15Hzの周波数域においてはEW成分が卓越している。H/Vスペクトル比から0～5Hzの周期帯においてNS成分が卓越する理由として、周辺地盤の非線形化の影響が考えられるが、本震以外の余震についても同様の傾向がみられることから、他の要因が予想される。RCUSSの深層地盤は谷構造であり、地盤構造が地震動の方向性に影響を与えていると考えられる。高橋ら[10]の地形改変の行われた丘陵地の振動性状の研究において、谷を埋め立てた地点で観測された地震動が表層地盤の固有周期付近で谷筋に平行な方向に卓越することが確認されている。これは谷を埋め立てた結果、谷筋に沿って軟弱な盛土が分布するため、その方向に地震動が増幅したと考えられる。RCUSSにおいても主要な周波数域において谷筋に平行な方向、つまり南北方向に地震動の増幅が見られ、表層地盤の固有周波数の算定、造成状況を踏まえて地盤、地形による増幅方向への影響を考える必要がある。

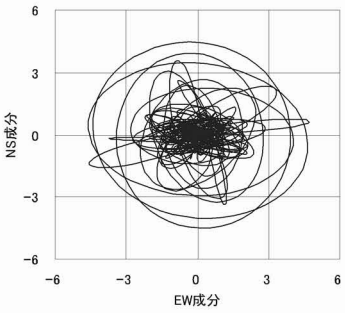
b) 近年の中小地震の記録

兵庫県南部地震やその余震に比べて、規模が小さく、震央距離の長い記録について加速度オービット解析を行い、RCUSSでの地震動の方向性を検討することとした。その結果を図-12に示す。No.21、22は三重県中部、大阪府南部を震源とする地震動であり、兵庫県南部地震の震源断層と異なる。また、No.24は兵庫県南部地震の震源断層を震源とする気象庁マグニチュード3.7の地震である。これらの地震についても兵庫県南部地震やその余震と同様に0～5Hz、10～15Hzの周波数域においてそれぞれNS成分、EW成分が卓越しており、地震動の規模、震源によらず同様の周波数特性が表れている。以上のことから、RCUSSでは主要な周期帯において深層の谷構造の影響でNS方向に地震動が卓越するが、高振動帯では谷筋に直交するEW方

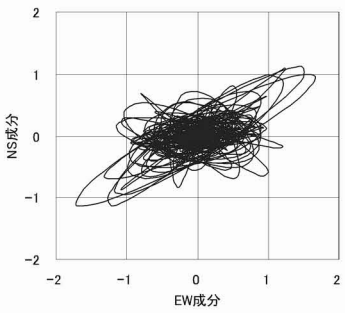
向に卓越するものと考えられる。



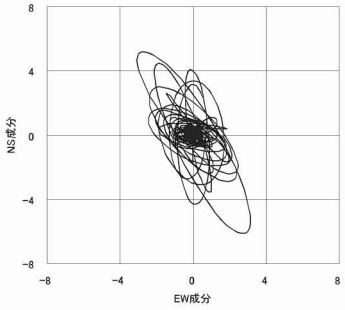
本震：0～5Hz



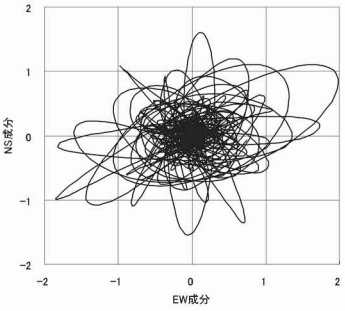
本震：5～10Hz



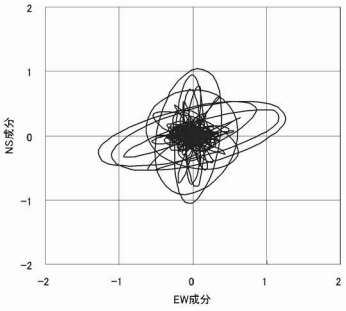
本震：10～15Hz



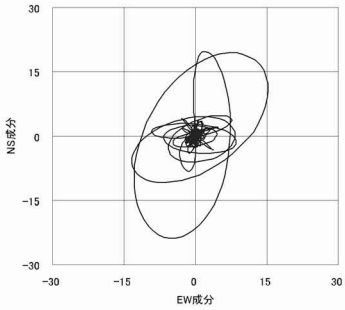
余震 No.1：0～5Hz



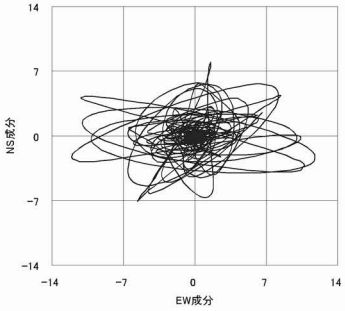
余震 No.1：5～10Hz



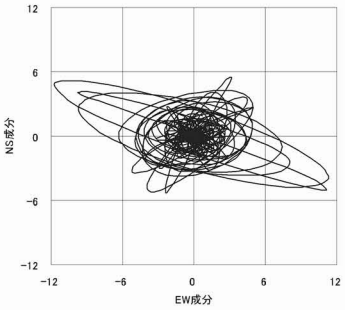
余震 No.1：10～15Hz



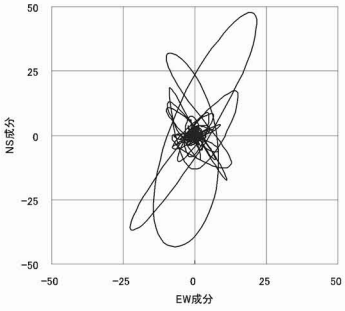
余震 No.2：0～5Hz



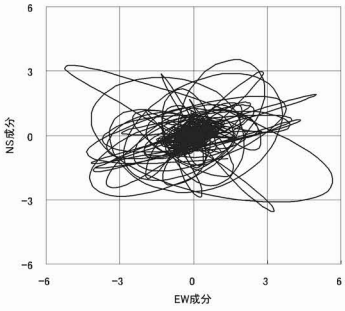
余震 No.2：5～10Hz



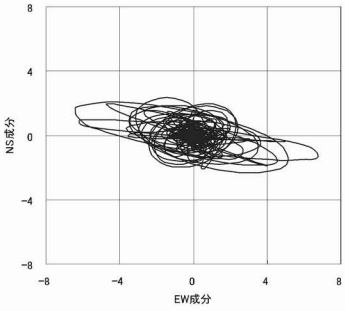
余震 No.2：10～15Hz



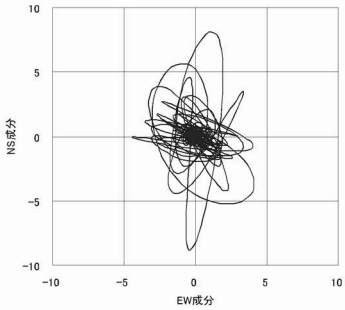
余震 No.3：0～5Hz



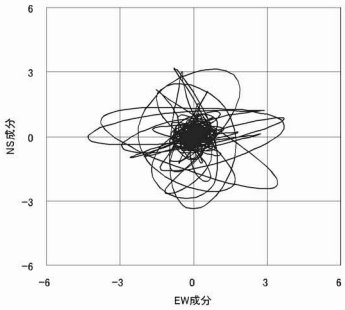
余震 No.3：5～10Hz



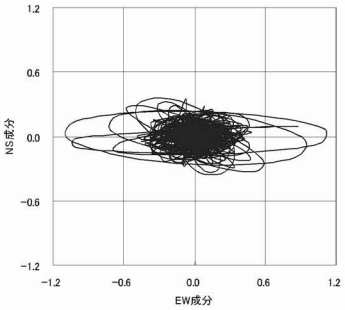
余震 No.3：10～15Hz



余震 No.4：0～5Hz

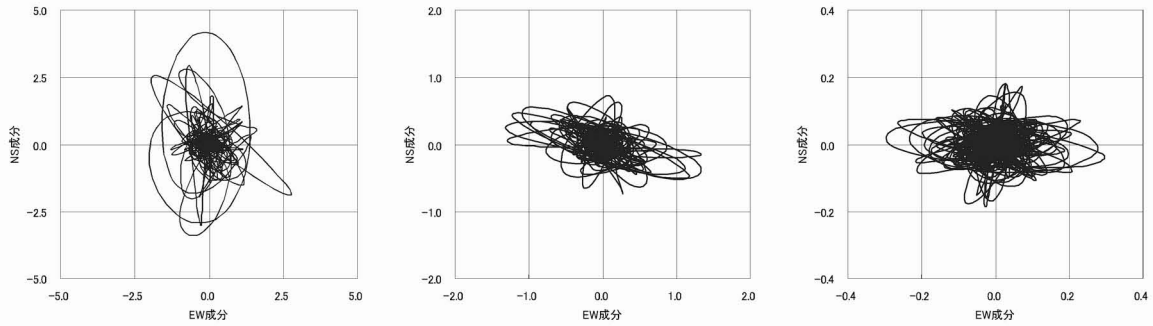


余震 No.4：5～10Hz

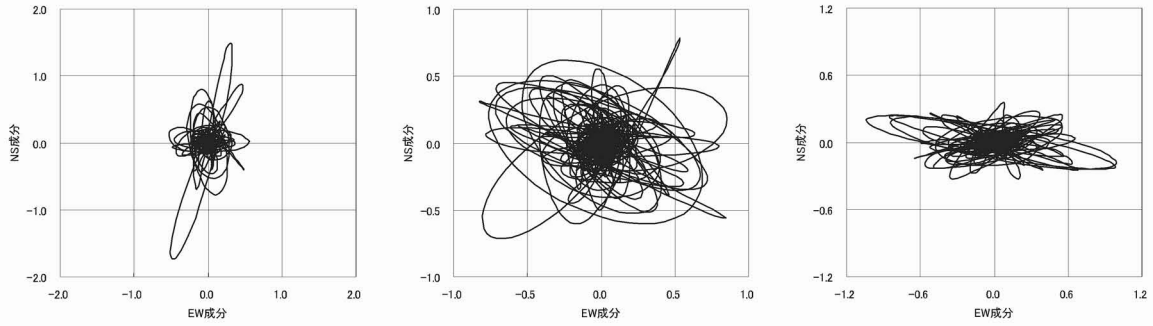


余震 No.4：10～15Hz

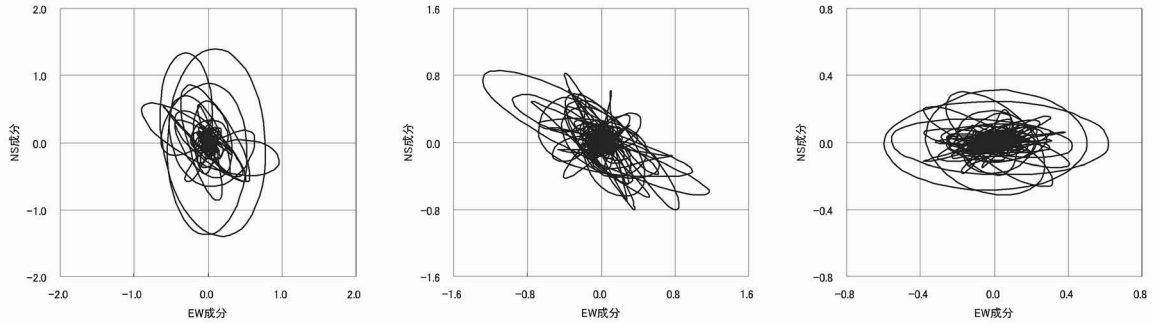
図-11　RCUSS 加速度オービット



No. 21 : 0～5Hz　　No. 21 : 5～10Hz　　No. 21 : 10～15Hz



No. 22 : 0～5Hz　　No. 22 : 5～10Hz　　No. 22 : 10～15Hz



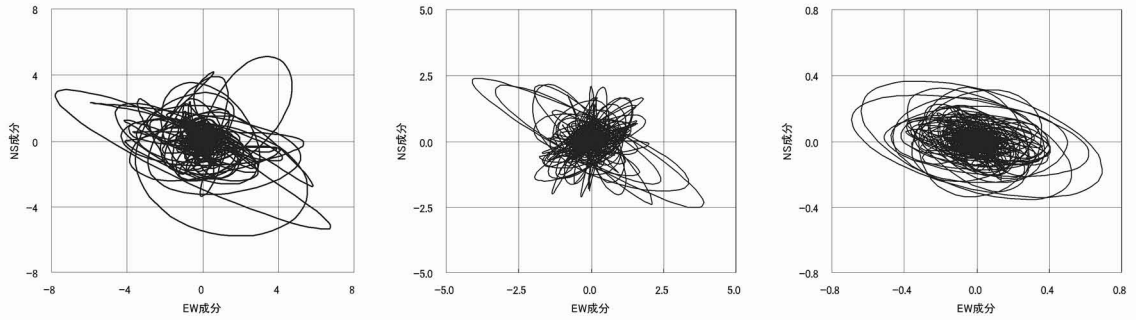
No. 24 : 0～5Hz　　No. 24 : 5～10Hz　　No. 24 : 10～15Hz

図-12　RCUSS 加速度オービット

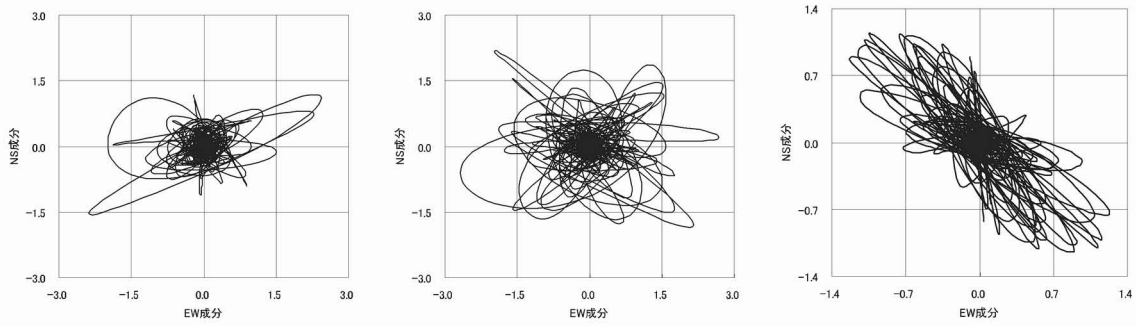
(3)　地震計ごとの方向性

a)　学而荘の方向性

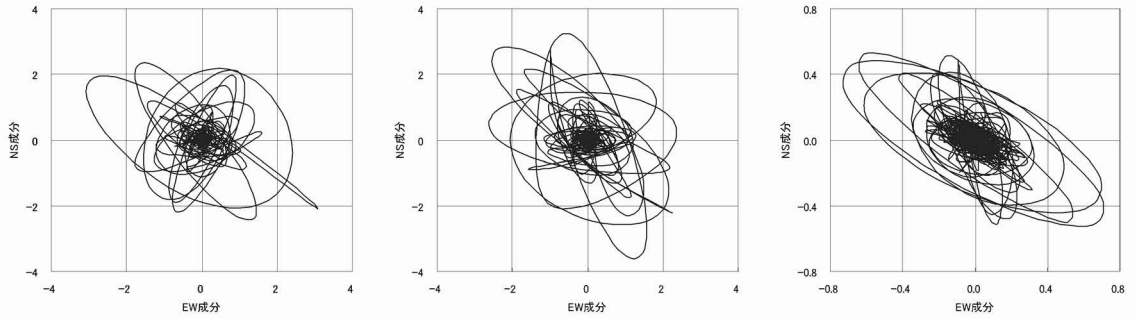
学而荘での観測記録の加速度オービットを図-13 に示す。RCUSS では地震動によらず、周波数域ごとに増幅する方向性に共通点が見られた。学而荘でも 10～15Hz の周波数域において、ほぼ同じ方向に地震動が増幅している。さらに、No.21、24 で顕著に見られるようにその方向性は周波数域により大きく変化することなく、地震動ごとにいずれの周波数域においても同様の傾向を示している。地震によらず 10～15Hz において同様の方向性が見られる要因としては軟弱な地盤が分布する方向に地震動が増幅したと考えられる。また、周波数によらず同じ方向性を持つ要因としては、学而荘周辺は平坦な地形であり、RCUSS と異なり地形による増幅の影響が少ない点が挙げられる。本研究では学而荘周辺で南北方向の側線に沿って表面波探査により S 波構造を測定したが、共通の方向性をもたらす要因を明らかにするには、3 次元的に地盤調査を行い、地盤構造を把握する必要があるといえる。



No. 21 : 0～5Hz　　No. 21 : 5～10Hz　　No. 21 : 10～15Hz



No. 22 : 0～5Hz　　No. 22 : 5～10Hz　　No. 22 : 10～15Hz



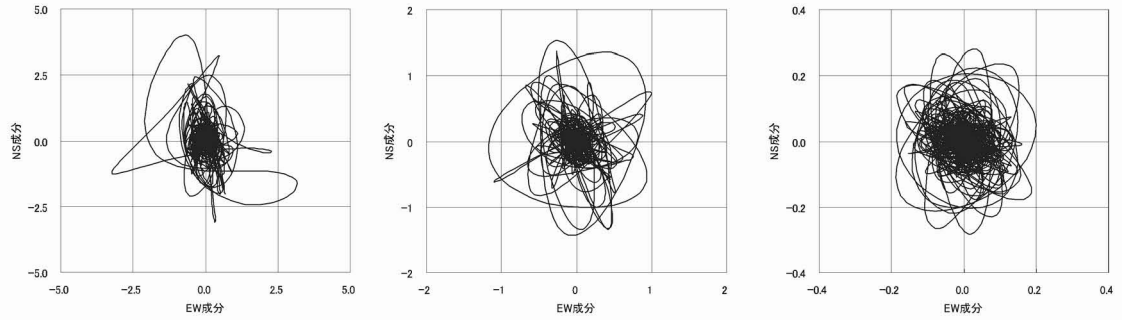
No. 24 : 0～5Hz　　No. 24 : 5～10Hz　　No. 24 : 10～15Hz

図-13　学而荘加速度オービット

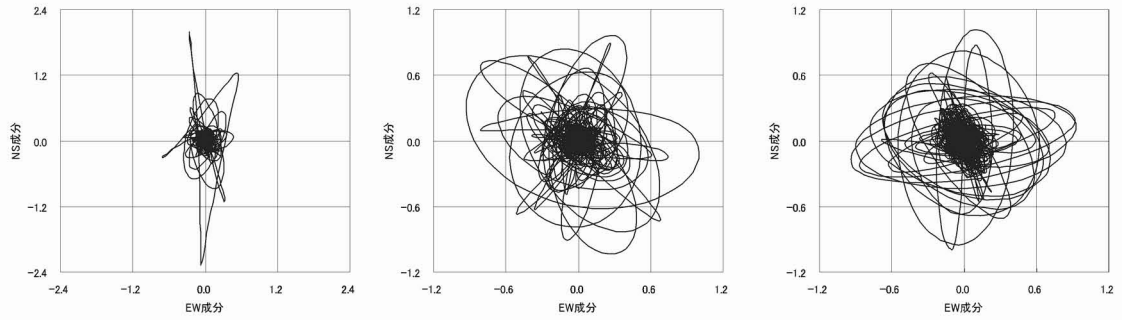
b)　工学部

工学部の加速度オービットを図-14 に示す。RCUSS では地震によらず 0～5Hz、10～15Hz でそれぞれ NS 方向、EW 方向への地震動に卓越が見られたが、ごく近傍の地表面に位置する工学部では地震ごとに卓越する方向は異なる。また同じ地震動でも周波数ごとに卓越する方向が異なる点、工学部が切土により造成されている点から考えて、軟弱な地盤が分布する方向に地震動が卓越しているのではなく、地形的な要因で方向性が変化していると考えられる。2 点間のフーリエスペクトル比から工学部では表層地盤以外の要因で地震動の増幅は見られなかったが、斜面地形により地震波の方向性が複雑に変化したと考えられる。

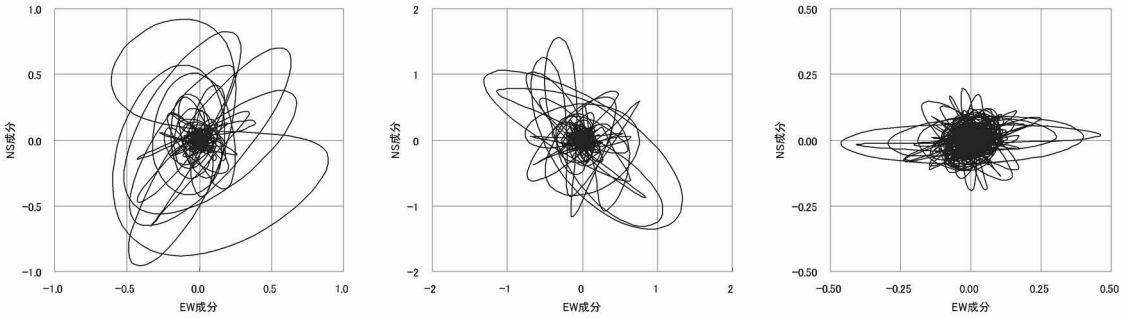
また、加速度オービット解析の結果、工学部と同様に斜面地形に位置する発達科学部、高羽小学校でも、地震動、周波数域ごとの共通の方向性は見られなかった。いずれの観測点も盛土により造成されているが、切土により整備されている工学部と同様に周波数ごとに共通の方向性が見られず、斜面地形により生じる入射波と反射波の干渉により地震動の方向性が変化していると考えられる。



No. 21 : 0～5Hz　　No. 21 : 5～10Hz　　No. 21 : 10～15Hz



No. 22 : 0～5Hz　　No. 22 : 5～10Hz　　No. 22 : 10～15Hz



No. 24 : 0～5Hz　　No. 24 : 5～10Hz　　No. 24 : 10～15Hz

図-14　工学部加速度オービット

6.　結論

本研究は神戸大学周辺で観測された地震記録を用いて、斜面地形の地盤震動特性を明らかにすることを目的とした。その手法として、まず地盤震動特性を議論する上で必要な固有周期をボーリング調査資料、表面波探査から算定するとともに、地震動の H/V スペクトル比から卓越周期を推定して、H/V スペクトル比を用いた固有周期算定手法の適用性について考察を加えた。さらに直接スペクトル比法、加速度オービット解析を用い、各観測点の周期特性と地震動増幅の方向性を明らかにした。その結果を以下に示す。

1)　高羽小学校､学而荘のような表層地盤の厚い地点においては表面波探査のS波速度構造や地震動のH/V スペクトルの卓越周期から簡易的にボーリング資料とほぼ同様の固有周期を推定できることが分かった。一方、表層地盤の薄い発達科学部、工学部では地震動の H/V スペクトルの卓越周期は他の手法により算定した固有周期と異なった。斜面地で表層地盤と基盤とのコントラストが小さく、表面波が優勢であるため、地盤のせん断震動に基づく固有周期とは合致しないことが明らかになった。

2)　直接スペクトル比法の結果、学而荘、工学部においては固有周期付近で地震動が卓越しており、表層地盤により地震動が増幅したと考えられる。しかし、発達科学部、高羽小学校においては固有周期とは異なる周期帯で最も地震動が卓越していた。このことから、斜面地では表層地盤の地震動増幅特性以外に、地震によらず決まった周波数域で増幅する特性を有していることが明らかになった。今後、斜面地形による震動の方向性を踏まえて検討する必要がある。

3) 加速度オービット解析の結果、RCUSS では地震の規模、震源によらず周波数ごとに共通の方向性が見られ、谷地形の影響で周波数ごとに卓越方向が異なるものと考えられる。また、学而荘においては津周期によらず地震動ごとに共通の方向性が見られた。周期によらずほぼ同一方向に地震動が卓越する要因として、平坦な学而荘において地形の影響が少ないことが考えられる。一方、発達科学部、工学部、高羽小学校においては方向性が見られず、斜面地形の影響により地震動の方向性が複雑に変化していると考えられる。

謝辞：本研究では関西地震観測研究協議会の地震観測記録を利用した。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

1) 国土地理院：数値地図 25000(空間データ基盤)兵庫、2003
2) 神戸市、(財)建設工学研究所：神戸の地盤データベース「神戸 JIBANKUN」、神戸の地盤研究会、1999
3) 社団法人・日本道路協会：道路橋示方書・同解説－V 耐震設計編、p.43、1996
4) 応用地質株式会社：高精度表面波探査マニュアル(McSEIS-SXW)、2004
5) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告、pp.18-27、1988
6) 大町達夫、紺野克昭、遠藤達哉、年縄巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定法の改良と適用、土木学会論文集、No.439、pp.81-87、1992
7) 大熊裕輝、松岡昌志、山崎文雄、原田隆典：宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動の推定、土木学会論文集、No.698/I-58、pp.261-272、2002
8) 金子孝吉:地震波および常時微動波のオービット解析、土木学会北海道支部論文報告集、38 巻、pp.73-78、1982
9) 末冨岩雄、土岐憲三：神戸大学観測点における表層地盤の影響に関する検討、第 24 回地震工学研究発表会講演論文集、第 1 分冊、pp.57-60、1997
10) 高橋広人、福和伸夫、鈴木康弘、梅津正倫、飛田潤：地形改変の進んだ丘陵地における強震動予測のための表層地盤モデルの構築：名古屋大学東山キャンパスを例として、日本建築学会構造系論文集、No.618、pp.33-39、2007

著者：1)　神戸大学大学院工学研究科、准教授；2)　神戸大学大学院工学研究科、学生

Characteristics of Ground Motion on Slope Morphology around Kobe University Using Observed Records

Yasuko Kuwata
Sakae Saito

ABSTRACT

Construction of building and infrastructure is forced on the irregular and unstable ground such as mountain region because of limited land in Japan. It is known that earthquake strong motion is amplified by the irregular ground such as mountain region and its characteristics are not clear. This study is conducted to clarify the ground motion characteristics on slope morphology by using the strong ground motion record observed around Kobe University.

At first, natural period of the ground is evaluated by three methods, surface wave method, borehole data, H/V spectral ratio of ground motion. The predominant period of H/V spectral ratio agrees well with the natural period estimated by the shear wave velocity of surface wave method at the flat area, but at the mountain site it does not meets. The special ground amplification on the slope area through the comparison of spectra between different sites. In addition, the particle orbits of horizontal ground motions shows the predominant directivity for the certain frequency by strong ground motions of both large and small magnitudes of earthquake.