## 3.3 断層帯周辺における強震動予測の高度化のための研究

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯周辺における強震動予測の高度化のための研究

(b)	担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学原子炉実験所	教授	釜江 克宏
国立大学法人京都大学原子炉実験所	准教授	上林 宏敏
国立大学法人京都大学原子炉実験所	助教	川辺 秀憲
国立大学法人京都大学防災研究所	教授	岩田 知孝
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	関口 春子
国立大学法人京都大学防災研究所	助教	浅野 公之
国立大学法人福井大学附属国際原子力工学研究所	准教授	大堀 道広

(c) 業務の目的

S 波速度構造情報が不十分である和歌山平野においてアレイ微動観測を行うとともに、対 象断層帯周辺域の地盤速度構造モデルを、地震動記録や微動観測等によって検証し、より信 頼度の高い予測強震動を得るための地下速度構造モデルの改良を行う。さらに、サブテーマ 2によって得られる震源断層形状、および、サブテーマ1によって高度化される断層活動区 間等の情報を活かした震源断層モデル構築と強震動予測を行う。

- (d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約
- 1) 平成 25 年度:

和歌山県や奈良県を対象に地震観測記録や地盤データの収集・整理を行った。また、和歌山市内等で微動アレイ探査や単点微動調査を行い、地下構造モデル構築の ための基礎データを入手した。

2) 平成 26 年度:

和歌山県や奈良県を対象に地震観測記録や地盤データの収集を平成25年度に引き 続き行う。大阪平野南部において微動アレイ探査や単点微動調査を行い、大阪平野 の地下構造モデルの高精度化のための基礎データを入手する。また、平成25年度の 調査等によって得られた地下構造に関するデータを活用し、和歌山平野の三次元地 下構造モデルの初期モデルを構築するとともに、和歌山市等における強震動予測の 予備計算を行う。

3) 平成 27 年度:

調査観測のまとめを行う。

## (2) 平成 25 年度の成果

(a) 業務の要約

1) 地震観測記録の収集・分析

和歌山平野及び周辺部において、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網(KiK-net)、気象庁及び関西地震観測研究協議会の強震観測記録、 ならびに、和歌山県の震度計の記録を収集しイベント記録のヒットリスト(観測点・イベ ントペアがわかるリスト)を作成した。現在、奈良県の震度計の記録も収集中であり、奈 良県の震度計及び奈良県内の強震観測網の観測記録のとり纏めは次年度に行う予定である。

2) 既存の地下構造モデルの収集

和歌山平野における、強震動予測のための既往の地下構造モデルを収集した。(独) 産 業技術総合研究所による大阪堆積盆地の3次元地下構造モデルには、和歌山平野における 堆積層の速度構造が紀の川に沿って、数百メートルの厚さで分布していることが示されて いる(堀川ほか,2003)。独立行政法人防災科学技術研究所のJ-SHIS 地震ハザードステーシ ョン(藤原ほか,2012)では、和泉層群(堆積岩)と思われる地層と地震基盤との地層境 界面の深度モデルが示されている。

3) 微動アレイ探査

和歌山平野の内、和歌山市域を対象に5つの領域(JMA 和歌山、今福、島、有本、梶取) において微動アレイ探査を実施した。観測記録を SPAC 法により解析し、5 地点とも連続性 の良い位相速度の分散曲線を得た。次に、観測した分散曲線が Rayleigh 波基本モードのも のと仮定し、観測値を満足するS波速度構造を求めた。三波川変成岩と未固結な堆積層の 地層境界深度は、JMA 和歌山が 0.52km、今福が 0.51km、有本が 0.39km、島が 0.32km、梶 取が 0.64km となった。Rayleigh 波と Love 波を対象とした F-K 法による解析も実施し、5 地点における同分散曲線を求めた。それらと SPAC 法による推定S波速度構造から求めた理 論分散曲線と比較した結果、島アレイと有本アレイについては、両者が概ね対応するが、 JMA 和歌山、今福、梶取については、F-K 法による Love 波の位相速度が理論値よりも遅い ことがわかった。

4) 単点微動観測

3)による微動アレイ観測記録(3成分)を用いて水平/上下動(H/V)スペクトルを求めた。いずれのアレイ観測領域内においても、H/Vスペクトルは1Hz以下に明瞭なピークを示した。ピーク(卓越)周波数と微動アレイ探査から推定された基盤岩上面深度の相対的な変化の傾向は整合した。ただし、JMA 和歌山と今福において H/V スペクトルの卓越周波数から推定した基盤岩上面深度は微動アレイから推定した同深度より半分程度浅くなった。なお、和歌山市域を対象に単点微動観測を 105 点実施したが、現在データの整理中であり、次年度に分析を行う。

(b) 業務の成果

1) 地震観測記録の収集・分析

和歌山平野及び周辺部では、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)、 基盤強震観測網(KiK-net)の強震観測点、気象庁の強震観測点に加えて、関西地震観測研究 協議会(以後、関震協と呼ぶ)による広帯域強震観測点がある。今年度は、これらの観測 点で得られた記録に加えて、和歌山県の協力により和歌山県の震度計の波形記録を収集す ることができた。

収集した和歌山県震度計の波形記録は、1997年6月以降の和歌山平野及び周辺部震度計 (和歌山県北部)の記録であるが、古い記録がない観測点や観測を終了した観測点もある。

本業務において収集した地震記録のうち、和歌山県の震度計で記録が得られているイベ ントについて、和歌山県の震度計並びに、和歌山平野及び周辺部の強震観測網のイベント 記録のヒットリスト(観測点・イベントペアがわかるリスト)を表1に示す。また図1に、 イベントの震央分布を、図2に観測点位置を示す。なお、ここではP波初動から記録が得 られている波形のみを取り扱った。

上記の観測記録以外に、現在、奈良県の協力により奈良県震度計の記録も収集中である。 奈良県震度計の記録については、最大計測震度 1.5以上又は最大加速度 20gal 以上を収集 の条件としており、2011年以降の条件に該当する 43 イベントの記録の収集を行っている。 奈良県震度計及び奈良県内の強震観測網の観測記録のとりまとめは次年度に行う予定であ る。なお、図2には奈良県震度計及び奈良県内の強震観測網の観測点位置も示してある。

図3には2013年4月13日に淡路島で発生した地震の記録を示す。波形は全て速度に変換してあり、図は下から上に向かって震央距離が大きくなっている。波形は震源に近い平野外の観測WKYH09と比べ、和歌山平野内の観測点EC1では振幅が大きくなり、継続時間も長くなっている。また、震源から遠くなるにつれて振幅が減少していく様子が見てとれる。

和歌山県から貴重な震度計波形をご提供頂きました。また、独立行政法人防災科学技術 研究所の K-NET 及び KiK-net、気象庁、関西地震観測研究協議会の記録を使用させて頂き ました。記して感謝いたします。





図3 観測記録の例。2013年4月13日の淡路島付近で発生したイベント(イベント番号 169)の各観測点での南北動成分記録。

			震源性	青報					和歌	次山り	県震!	度計							K-N	IET				KiK-	-net				気象	たた	震度調	Ħ	関震協
No.	発震時	刻	緯度	経度	深さ	気象庁マグニチュ	震央地名	記録数	橋本	檀麝口宙	岩出市	紀の川市	那賀町	举一百	貴志三町	かつらぎ町	花園村	九度山町		那賀	有田	清水	高野	広川	花園	딻싀	那賀	和歌山	紀の川市粉河	有田市箕島	高野町高野山中学校	和歌山市男野芝丁	和歌山 今福
1	yyyy/mm/dd	hh:mm:ss	度	度	km	_ ۲	和勁山目北部	1	04	05	06	07	60	10	11	23	24	25	WKY001	WKY002	WKY003	WKY004	WKY013	WKYH01	WKYH02	<b>WKYH03</b>	WKYH08	WKYH09	96A	589	CDE	EC1	IMF
2	1998/06/10	16:17:23	33.9183	135.4150	56	4.3	和歌山県南部	7									0		0	0	0	0	0										0
3	1998/12/05	01:38:30	33.5067	135.1467	41	4.0	和歌山県南方沖	7									0		0			0		0	0	0							0
4	1999/02/03	09:04:33	33.7550	135.2533	40	<u>3.0</u> 4.3	和 <u>歌山宗曽部</u> 紀伊水道	11									0		0	0	0	0	-	0	0	0	0	0					0
6	1999/08/21	05:33:11	34.0300	135.4700	66	5.6	和歌山県北部	13									0	0		0	0	0	0	00	_	0	0	0	0	0		0	0
8	2000/02/17	08:28:35	34.2533	135.4083	8	3.3	和歌山県北部	6									0	0				0	0	0	0	0	0						Q
9	2000/04/11	11:31:50	33.8450	134.9700	12	4.0	紀伊水道	12									0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0
10	2000/04/15 2000/04/28	02:41:11 11:42:16	33.6433	135.3850	42	4.9	<u>和歌山県南方沖</u> 奈良県	13									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0
12	2000/08/27	13:13:14	34.5350	135.6467	8	4.1	大阪府南部	5		0															0		0	0					0
13	2000/10/22 2000/10/31	10:41:44 01:42:53	34.0283	135.1983	10 39	4.1 5.7	<u>和歌山県北部</u> 三重県南部	14		0							0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0			0
15	2001/02/05	03:34:16	34.1967	135.2117	5	3.6	和歌山県北部	10		0									0	0	0			0	0		0	0				0	0
16	2001/03/24 2001/08/10	15:27:55	34.1317	132.6933	46	6.7 4.2	<u>安芸灘</u> 紀伊水道	11		0							0		0	0	0	0		0	0		0	0	_	0		0	0
18	2001/08/25	22:21:25	35.1517	135.6600	8	5.4	京都府南部	12		Ō	0						0	0	0	0	0		0	Ō	0		0	Ō					
19	2001/10/02	21:14:22	33.4167 33.8300	135.3300	26	4.6	<u>和歌山県南方沖</u> 和歌山県南部	13	0	0	0						0	0	0	0	0	0	0	0	0			0					
21	2002/01/04	13:18:57	33.9450	135.6317	12	3.7	奈良県	8		Õ									Ő	Ő		Ō	Õ	Õ	Ő								0
22	2002/08/11	23:00:16	34.0133	135.9467	47	3.7	<u>奈良県</u> 和歌山県北部	4	0	0	0						0		0	0	0	0	0	0	0	0		0					0
24	2002/12/17	07:17:13	33.5333	135.5983	11	4.4	和歌山県南部	5	Ŭ	Ŭ	Ŭ						õ		Ŭ	Ŭ	0	õ	Ŭ	Ŭ	õ	õ		0					Ő
25	2003/01/19	04:50:26	33.8750	137.2400	45	5.6 2.9	三重県南東沖 和歌山県北部	2	0	0								0		0					0		0						0
27	2003/03/23	04:09:27	34.2483	135.4267	8	3.5	和歌山県北部	13	õ	õ	0	0						õ	0	õ		0	0		Ŭ	0	õ		0				Ő
28	2003/04/01 2003/04/15	12:11:53	34.2683	135.4683	68	3.9 2.5	和歌山県北部 和歌山県北部	6				0					0					0			0	0	0						0
30	2003/09/02	03:18:32	34.2233	135.4183	9	2.8	和歌山県北部	4			0	õ															0						0
31	2003/10/08	17:02:21	34.2683	135.4117	37	2.7	<u>和歌山県北部</u> 三番県南東沖	12		0	0	0						0		0		0	0		0	0	0	0					0
33	2004/01/11	16:21:26	34.2367	135.4250	7	3.1	和歌山県北部	7		õ	-	õ								Õ		-	õ		õ	Õ	Õ	-					
34	2004/04/03	16:30:00 11:49:47	34.1967	135.3850	7	3.1 2.3	<u>和歌山県北部</u> 和歌山県北部	3			0	0																					0
36	2004/06/08	08:05:24	34.2133	135.0750	8	4.5	紀伊水道	13			0	-							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0	0
37	2004/06/08 2004/07/22	09:04:51	34.2083 34.2617	135.0700	8	4.3 3.1	<u>紀伊水迫</u> 和歌山県北部	11			0	0							0	0	0	0			0	0	0	0					0
39	2004/09/05	19:07:08	33.0317	136.7967	38	7.1	三重県南東沖	18		0	0	0			0		0	0	Ő	Ō		0			0	Ő	0	Õ	0	0	0	0	Ő
40	2004/09/05 2004/09/07	23:57:17 08:29:36	33.1367 33.2083	137.1400	44	7.4 6.5	<u>三重県南東沖</u> 三重県南東沖	22		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	2004/09/26	20:35:17	34.1517	135.2433	3	3.1	和歌山県北部	7							0				0		0				0	Ō		0					0
43	2004/10/16 2004/10/24	13:41:30	34.1700	135.1833	4	3.7	和歌山県北部 和歌山県北部	15			0		0	0	0	0			0	0	0	0		0	0	0	0	0	_			_	0
45	2004/10/27	21:27:34	33.6400	135.2667	39	4.4	和歌山県南方沖	16		0			0		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0
46	2004/11/12 2005/01/31	17:29:19 23:57:25	34.0833 34.2150	135.1350	6	3.4 2.4	和歌山県北部 和歌山県北部	7				0			0						0			0		0		0	_	0		_	0
48	2005/02/14	00:22:05	34.6833	135.1367	13	4.1	兵庫県南東部	6			0								0	0							0	0					0
49 50	2005/06/03 2005/06/04	10:48:47 09:40:33	34.1800 34.2050	135.1333	6 5	3.5	紀伊水追 和歌山県北部	11			0			0	0	0			0	0	0			_		0		0	_			0	0
51	2005/08/04	15:10:24	34.3417	135.4817	10	2.6	和歌山県北部	2		0						0																	
52	2005/09/19 2005/10/09	04:22:58	34.0850	135.2367	6	3.0 2.4	<u>和歌山県北部</u> 和歌山県北部	2						0	0																		0
54	2005/11/01	12:47:38	33.8233	135.0833	45	4.3	紀伊水道	18		0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0				0	0		0		0	0
56	2005/11/23	22:24:21	34.2183	135.3050	28	3.2 4.0	和歌山県北部 紀伊水道	5 10			0		0	0	0	0			0	0	0	0	0					0					0
57	2005/12/09	10:16:04	34.2100	135.2683	5	2.9	和歌山県北部	5						0	0				0	0													0
58 59	2006/01/28	03:00:31	34.1967	135.2333	6	2.4 2.7	和歌山県北部	2	L	L	L	L	L	0	0			H	H	H					Ŀ	H							0
60	2006/02/17	09:06:59	34.1767	135.1700	5	3.1	紀伊水道	6		~	~	~	~	C	0	C			0	~	0	0	0		_	0		0	0		0	0	0
62	2006/03/02	07:33:18	34.2050	135.3183	4	+.1 2.7	和歌山県北部	18		0	5	0	0	0	0	0				0	0	0	0			0		0	0		5	0	0
63	2006/04/18	04:46:18	34.2367	135.4017	8	2.2	和歌山県北部	2	H		H	0	0	0	$\square$		$\square$	$\square$		$\square$		$\vdash$				$\vdash$					$\vdash$		0
65	2006/04/29	03:16:18	34.2350	135.4033	8	2.4	和歌山県北部	1						0																			<u> </u>
66	2006/05/04	07:22:56	34.2817	135.2417	8	3.1	和歌山県北部	21		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	
68	2006/05/20	07:21:22	34.1900	135.1250	6	4.J 3.9	紀伊水道	11		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			U	0	0	0	0	U	0	0
69	2006/05/22	20:26:05	34.2133	135.3167	7	3.1	和歌山県北部	12			0	0	0	0	0	0			0	0		0				0	0	0					0
71	2006/05/22	22:06:17	34.2150	135.3117	6	2.8	和歌山県北部	3			Ŭ	Ŭ	Ŭ	0	Õ				Ŭ	Ŭ		Ŭ				Ŭ	Ŭ	V					Ő
72	2006/06/04	13:31:26	34.1433	135.2783	3	2.6	和歌山県北部	3				0		0	0	0			0														0
74	2006/07/29	19:58:28	34.2917	135.2550	9	3.3	和歌山県北部	7			0	õ	0	0	0	0																	0
75	2006/08/11 2006/09/20	03:01:59	34.2933	135.2567	10	3.1	和歌山県北部 和歌山県北部	5 16	$\vdash$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0			0	0		0				0
77	2006/09/29	16:35:32	34.2533	135.4200	8	2.4	和歌山県北部	2		Ĺ		Ĺ	õ	-		Ő						~	-				~		~				
78	2006/09/29 2006/11/07	17:38:41 00:50:01	34.2533	135.4200	8	2.4	和歌山県北部 和歌山県北部	2	H	0	H	_	0	0	0	0	0	$\vdash$	$\vdash$	$\vdash$						$\vdash$							
80	2007/01/12	11:48:38	34.2267	135.4400	8	2.7	和歌山県北部	7		Ĺ		0	õ	õ	_	0				0			0				0	_					
81 82	2007/02/26 2007/03/25	14:06:08 05:34:05	34.1717 34.2633	135.1550 135.4350	6	3.6 2.8	紀伊水道 和歌山県北部	7	$\vdash$	0	$\vdash$	⊢	0		0	0	$\vdash$	0	0	0	0	0	0			0	0	0			$\vdash$		
83	2007/04/15	12:19:30	34.7900	136.4067	16	5.4	三重県中部	17		Ő	0	0	Ő	0		Ó		Ĺ	0	Ó		0	Ő				Ó	0	0	0	0	0	0
84 85	2007/04/26	09:02:57	33.8883 34.1167	133.5833 135.3200	39 7	5.3 4.0	窦媛県果予 和歌山県北部	21	$\vdash$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-		0	0	0	0	0	0	0	0
86	2007/07/16	17:24:19	34.2600	135.9467	49	4.7	奈良県	18		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0			0	0	0	0		0		
б/ 88	2007/08/26	01:42:36	34.2500	135.3333	9 10	2.2 3.5	和歌山県北部	2		-		0	-		$\vdash$	0	0	$\vdash$	$\vdash$	$\vdash$		0	0			0					$\left  - \right $		0
89	2007/09/06	08:02:16	34.2500	135.4167	8	2.1	和歌山県北部	1						6	6	0																	~
90	2007/09/14	UD:54.53	1 34 2133	11353117	5	28	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	4	•		0			0	0																		0

## 表1 強震観測点と観測イベント

表1 つづき

			辰源1	可報					和電	КШР	いしん しんしょう しんしょ しんしょ	受訂							K-N	IE I					net				凤員	K IT 8	夏度	st .	関震協
No.	発震時	刻	緯度	経度	深さ	気象庁マグニチュ	震央地名	記録数	橋本	高野口町	岩出市	紀の川市	那賀町	桃山町	貴志川町	かつらぎ町	花園村	九度山町	和歌山	那賀	有田	清水	高野	広川	花園	野上	那賀	和歌山	紀の川市粉河	有田市箕島	高野町高野山中学校	和歌山市男野芝丁	和歌山 今福
	yyyy/mm/dd	hh:mm:ss	度	度	km	۲	2-72 1 10 11 10		04	05	06	07	60	10	11	23	24	25	WKY001	WKY002	WKY003	WKY004	WKY013	WKYH01	WKYH02	<b>WKYH03</b>	WKYH08	<b>МК</b> АН03	96A	589	CDE	EC1	IMF
91	2007/10/09	22:55:39	33.9600	135.1600	73	3.3	和歌山県北部	10		_	0	_		0	0	0			0		0	0		0				0				0	0
93	2007/11/06	10:02:00	34.4750	135.6733	12 4	1.1	大阪府南部	11		0	U		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	Ŭ			0	Ŭ			0	0	ŏ
94	2007/11/18	10:21:21	34.1133	135.1617	6 3	3.3	和歌山県北部	9						0	0				0	0	0	0		0		0							0
95	2007/12/03	01:34:48	34.1/1/	135.1233	/ 3	3.4 3.7	和野山県北部	/		_	-	_		0	0	0			0	0	0	0	0	0		0		0				-	0
97	2007/12/29	21:50:05	34.2300	135.4183	8 2	2.6	和歌山県北部	1						Ő		Ŭ			Ų		Ŭ	Ŭ	Ŷ	Ŭ		Ŭ							
98	2007/12/30	04:42:20	34.2317	135.4200	83	3.0	和歌山県北部	10		0	0	0	0	0	~	0				0		0	0				0						
100	2008/01/20	07:52:40	34.1933	135.4233	7 2	2.5	和歌山県北部	2			0	0	0	0	0	0				0	_	0	0				0		_				
101	2008/01/25	23:44:36	34.1250	135.3017	6 2	2.6	和歌山県北部	4							0									0		0							0
102	2008/02/01	23:40:22	34.2067	135.0800	10 3	3.4	<u>紀伊水道</u> 士阪漆	10		_	0	0	0	0	0	0			0	0	0			0			0	0				0	0
103	2008/04/20	21:01:55	34.0967	135.3683	5 2	2.9	和歌山県北部	4			U	Ŭ	0	0	0	V			0	0		0		0			0	0					ŏ
105	2008/05/29	15:43:44	34.2567	135.4250	8 2	2.4	和歌山県北部	1						0		0																	
106	2008/07/18	14:34:24	34.2150	135.3183	62	2.7	和歌山県北部	3						0	0																		0
108	2008/08/24	05:44:54	33.6650	135.1617	45 4	1.3	紀伊水道	8					0	Ū		0			0		0	0		0			0						Ó
109	2008/10/18	22:28:36	34.2600	135.4083	83	3.5	和歌山県北部	13		_	0	0	0	0	0	0		0	0	0		0					0	_	0				0
111	2008/11/08	10:30:55	34.1800	135.6733	59 3	3.9	奈良県	7	H					_	0		0		H	0	_	0	0	0	L	L	0		_	L			0
112	2009/02/06	05:57:05	34.2167	135.3117	63	3.4	和歌山県北部	12			0	0	0	0	6	0			0	0		0	0	0			0			6			0
113	2009/08/09 2009/08/27	19:55:52	33.6600	135,2050	3336	9.8 1.0	<u> 米                                   </u>	11	$\vdash$	-	0	U	υ	υ	0	0		$\vdash$	0	0	0	0		0		-	0	-	_	0		-	0
115	2009/12/02	09:20:26	34.2117	135.2450	4 2	2.9	和歌山県北部	6			0			0	Ō				Ő		Ť	-		Õ									Ō
116	2009/12/07	19:49:01	34.1983	135.4283	62	2.8	和歌山県北部	3			0	0	0	0	0	0			0	0	0	0		0									0
118	2010/01/03	10:14:19	34.0533	135.2817	8 2	2.7	和歌山県北部	1			U	U	0	0	0				0	0	0	0		0									Ų
119	2010/01/14	12:59:50	34.2300	135.4450	8 2	2.2	和歌山県北部	1			0			0		0																	
120	2010/03/21	20:18:03	34.2017	135.2233	53	3.2 3.6	紀伊水道	13			0		-	0	0	0			0	0	0	0	-	0			0	0	_			0	0
122	2010/04/18	22:48:17	34.1983	135.2400	6 2	2.5	和歌山県北部	2							0						-												0
123	2010/04/18	23:14:55	34.2000	135.2417	53	3.3	<u>和歌山県北部</u> 和歌山県北部	9			0			0	0				0		0	0		0				0					0
125	2010/05/31	21:33:10	34.1733	135.3200	4 2	2.5	和歌山県北部	1							Ŭ	0																	
126	2010/07/21	06:19:19	34.2050	135.6933	58 5	5.1	奈良県	20	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0		0		0
127	2010/08/24	20:24:57	34.1967	135.1950	83	3.4	和歌山県北部	8		-	0	-		0	0				0		0			0				0					0
129	2010/09/30	13:35:43	34.1850	135.3550	6 2	2.6	和歌山県北部	3						0	0	0				0			0										
130	2010/11/29 2010/12/27	15:52:42	33.9050	135.4233	55 4	ł.1 3.3	<u>和歌山県南部</u> 紀伊水道	13	0	0				0	0	0			0	0	00	0	0	0				0		0		0	0
132	2011/02/06	14:10:11	34.1850	135.3517	6 2	2.2	和歌山県北部	1							0						-												-
133	2011/02/21	15:46:10	33.8767	135.3633	53 4	1.8	和歌山県北部	21	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0		0	0	0	0
135	2011/05/10	22:09:31	34.1967	135.1817	5 3	3.4	和歌山県北部	6							Ő				Ő		Ő	Ŭ		Õ				Ő					Ő
136	2011/05/10	23:01:53	34.1983	135.1850	54	1.2	和歌山県北部	19	0	0	0	0		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0				0	0		0	0	0
137	2011/07/04	11:07:12	33.9300	135.5467	46 4	1.1	和歌山県南部	12	0			0		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0			0	0				0	0
139	2011/07/05	19:18:43	33.9900	135.2333	75	5.5	和歌山県北部	22	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0
140	2011/07/24	23:32:12	33.9950	136.1383	42 4	4.3 4.8	<u>和或山県北部</u> 三重県南部	20	0	0	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0
142	2011/07/30	10:07:05	34.0883	135.2183	74	1.0	和歌山県北部	17	0		0			0	0	0	0		0	0	0	0	0	0				0	0	0		0	0
143	2011/07/30	08:13:22	34.2650	135.4067	61 4	5.1 1.7	和歌山県北部	22	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0
145	2011/08/23	20:00:16	34.1700	135.1950	8 2	2.9	和歌山県北部	6							Ō				Ō		Ō	Ō		Ō									0
146	2011/08/28	18:23:05 07:15:07	34.0683	135.3333	53 674	3.8	<u>和歌山県北部</u> 和歌山県北部	11	0	0	0	0		0	0	0	000	0	000	0	0	0	0	0		-	0	0	0	0	0	0	0
148	2011/10/04	19:19:30	34.0417	134.0817	44 4	1.2	徳島県北部	3	Ĺ	-	~	-		~	~	-			õ		~		~	õ					~	Ĺ			ő
149	2011/10/08	06:11:39	33.8350	134.9883	13 4	1.2	紀伊水道 大阪 府 南部	16	0	0	0	$\sim$	_	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		-	0	0	_	0			0
151	2011/11/07	19:06:25	34.2100	135.3117	73	3.3	和歌山県北部	11		<u> </u>	<u> </u>	ŏ		0	0	0			0	0		0	5	0		L	0	õ		L			0
152	2011/11/09	01:56:11	34.2150	135.3167	6 2	2.5	和歌山県北部	1				0		0																			0
153	2012/01/01	00:37:28	33.9983	135.5017	56 4	1.7	<u>局局近海</u> 和歌山県北部	20	0	0	0	0		0			0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0
155	2012/02/28	13:33:57	34.1533	135.2400	4 2	2.5	和歌山県北部	4						0	0	0			0					0									0
156	2012/04/02	04:58:50	34.2500	135.4267	8 2 5 3	3.0	和歌山県北部	6		-		-		0	0	0			0		0			0				0					0
158	2012/08/08	00:59:21	34.2283	135.2800	7 2	2.9	和歌山県北部	3						0	0																		0
159	2012/08/30	18:57:00	34.2683	135.4117	43 3	2.8	<u>和歌山県北部</u> 和歌山県南方沖	5		_	_	0		0		0			_	0		0	-					_				_	0
161	2012/10/23	01:56:08	34.1483	135.1383	6 3	3.4	和歌山県北部	7							0				0	0	0			0				0					Ó
162	2012/12/27	19:49:19	34.2517	135.4233	72	2.4	<u>和歌山県北部</u> 和歌山県北部	12	0	-	-	-		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		-		0		-		-	
164	2013/01/28	00:25:01	34.1333	135.1433	93	3.2	和歌山県北部	3						~	2	5	~		õ	Ŭ	õ	~	~	õ				~					
165	2013/01/29	03:55:10	34.1867	135.3550	63	3.2	和歌山県北部	8	$\vdash$	-	0	-	_	0	0	0			0	0	_	0		0		-		-	_	-			
167	2013/03/18	00:21:54	34.1100	135.4583	63 3	3.9	和歌山県北部	13	0			0		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		L	0	0		L			
168	2013/03/28	21:14:17	34.2317	135.2800	8 2	2.9	和歌山県北部	2		_	0	_		0	0	0	0				0		0					0	0	0	0		
170	2013/04/13	09:51:55	34.1117	135.1633	7 3	7.3 3.5	和歌山県北部	8		5	0	5		0	0	0	0		0	5	0	0	0	0	Ŀ	L		0	0	0	0	0	
171	2013/06/08	16:09:59	34.2083	135.2050	4 3	3.3	和歌山県北部	8	6		0	C		0	0	0			0	C	0	6	6	0				0	0	6		0	
1/2	2013/06/08	16:47:05	34.2067	135,2067	44	+.U 3.8	和歌山県北部	16	0	-	U	U		0	0	00			00	0	0	0	0	0		-		0	U	0		0	
174	2013/06/08	20:39:01	34.2083	135.2100	4 3	3.9	和歌山県北部	13	0		0	0		0	0	0			0	0	0	0	0	0				0					
175	2013/06/14 2013/07/03	15:43:16	34.2050	135.2133	43	5.1 3.4	和歌山県北部 和歌山県北部	5	$\vdash$	-	0	-		0	0				0		0	0						0				-	
177	2013/07/17	12:07:51	34.5733	135.0133	17 4	1.0	淡路島付近	5	0		0			õ	~					0	5					L		ŏ					
178	2013/08/14	22:25:18	34,1917	135.3533	6 2	22	和歌山県北部	1		_	_	_	_	_	0											<b>1</b>		_	_		_	_	

2) 既存の地下構造モデルの収集

「新関西地盤-和歌山平野-2011」(KG-NET・関西圏地盤研究会,2011)によれば、和 歌山平野は、和歌山市や東部の紀の川市の中央部をほぼ東西に流れる紀の川を中心に構成 される低平地で、河ロデルタを中心とした扇状の平野である。平野は北部が和泉山脈、南 部が紀伊山地の北端によって囲まれている。北部の和泉山脈は和泉層群と呼ばれる砂岩と 泥岩の互層からなる堆積岩で構成されている。一方、南部のこの地域は三波川変成帯と呼 ばれる変成岩(片岩)から構成される。紀伊山地の北西端にあたるこの地域では、山地の 形状が複雑であり、これによって和歌山平野南部の基盤形状も起伏に富み、複雑であると 考えられる。例えば平野南部の和歌山城などで基盤岩が露出する小丘が存在している(図 4)。



図4 和歌山平野部の地形と既往のS波反射法測線(朱色の線) (KG-NET・関西圏地盤研究会, 2011の図面に加筆)

和歌山平野の内、特に発達した都市域でもあり強震動予測のための地下構造調査の探査 領域でもある同平野の和歌山市域を中心に既往の調査結果について以下に述べる。これら 領域においては、地震基盤(S波速度3km/s程度以上)や上記の基盤岩以浅を対象とした 強震動予測のための3次元地下構造モデル構築を目的とした系統的な探査は行われていな い。このように地下構造に関する情報が少ない地域ではあるが、和歌山平野北部において、 深さ100m程度以浅を対象としたS波による反射法地震探査(図4の朱色の線)が行われて いる(岡田ほか,1998)。その探査断面および地質解釈図をそれぞれ図5、図6に示す。こ の断面図に示されるように、沖積層の層厚は30m程度であり、それらは主に水平に堆積し ていることが示唆される。

3次元速度構造モデルとして、(独)産業技術総合研究所によって構築された大阪堆積 盆地の3次元地下構造モデル(堀川ほか,2003)には和歌山平野のP波及びS波速度および 密度のモデルが示されている。図7には地震基盤上面深度分布を示すが、このモデルでは 和歌山平野における堆積層(未固結な堆積物)が紀の川に沿って東西方向に細長く、地震 基盤上に数百メートルの厚さで分布していることが示されている。一方、J-SHIS 地震ハザ ードステーションでは、和泉層群により形成される堆積岩と思われる地層と地震基盤との 地層境界面の3次元モデルが示されている(独立行政法人防災科学技術研究所)(図8)。 さらに、J-SHIS 地震ハザードステーションでは浅部地下構造に関する情報として、地表か ら深度 30m 迄の平均 S 波速度を表す AVS30 の分布も示されており、本節の冒頭で述べたよ うに、紀の川河ロデルタ付近での S 波速度は他の平野部よりも低速度となっている(図9)。 地震基盤上面までの深部の地下構造に関しては、前述のように何れのモデルにおいても表 層地質や極めて限られた探査情報に基づいて構築されたものと考えられるため、和歌山平 野における精度の高い強震動予測を行うためには高度化が必要と思われる。



図5 S波測線の反射断面(岡田ほか, 1998)



図6 S波測線の地質解釈図(岡田ほか, 1998)



図7 大阪平野南部、和歌山平野及び周辺海域における地震基盤上面深度分布(堀川ほか, 2003より一部改変、加筆)



図8 J-SHIS 地震ハザードステーション(防災科学技術研究所)によるS波速度1.4km/s 層下面深度の分布(一部加筆)



- 図 9 J-SHIS 地震ハザードステーション(独立行政法人防災科学技術研究所)による深度 30m までの平均 S 波速度(AVS30)の分布(一部加筆)
  - 3) 微動アレイ探査
  - a) 実施方法
  - i) 微動アレイ記録の収集

和歌山平野においては、紀の川を中心に北側および南側で地下構造が複雑に変化してい ることが予想される。こうした現状を踏まえ、水平成層構造の仮定が成立すると予想され る領域及びサブテーマ2で実施された和歌山市内における反射法探査位置を考慮し、図 10 で示すように紀の川沿いの4領域(島、有本、梶取、JMA 和歌山)と関西地震観測研究協 議会による強震観測点(今福)付近の1領域の計5領域で微動アレイ観測を計画した。微 動アレイ探査では地下構造と周波数によって変化する表面波の位相速度から地下構造を推 定する。位相速度を正確に求めるためには、周波数毎に変化する波長に対応した観測点の 間隔を選択しなければならない。そこで、前述のJ-SHIS 地震ハザードステーションによる 地盤構造モデルから有本と梶取は他の3領域に比べて地震基盤の上面深度が比較的深いと 予想されるため、これらの2領域については半径 400m(Sアレイ)と半径 800m(Lアレイ)の 計2アレイ、それ以外は半径 400m(Sアレイ)の1アレイを展開して微動観測を行うことと した。観測点配置は正三角形の3頂点と重心1点から構成される4点アレイを基本に、様々 な波長にも対応できるようにサイズが異なる正三角形を組み合わせた二重アレイ(同時観 測で配置される観測点は7地点)とした。なお、上記のアレイ半径とは二重アレイの外側 の正三角形に外接する円の半径をいう。

各アレイ観測の場所・日時等の諸元を表2に示す。各アレイの詳細な観測点配置を図11 ~図15に、重心点を原点とする観測点の相対座標を表3に示す。観測点の現場写真として 梶取アレイを例に写真1、写真2に示す。観測システムとして、地震計は固有周期5秒の 3 成分速度計(LE-3D/5s, Lennartz-electronic 社製)を,データ収録器はLS-8800 (A/D 変換: 24bit, 白山工業製)を用いた。なお、各機材の時刻校正は GPS によって独立に行った。



図10 和歌山平野における微動アレイ観測点(5領域)

アレイ名	アレイ重心点所	アレイ半	知 11 日	観測開始-終了時	サンプリン							
称	在地	径	1161 (円) 口	刻	グ周波数							
JMA 和歌山	和歌山市駕町 48	400m	2013/11/12	16:55-17:55	100Hz							
今福	和歌山市葵町1	400m	2013/11/13	10:20-11:20	100Hz							
右卡	和歌山市加納	(S) 400m	2013/11/13	13:10-14:10	100Hz							
有平	253	(L) 800m	2013/11/13	14:40-15:40	100Hz							
自.	和勁山古自 96	400m	2013/11/13	16:50-17:20	10047							
西	和歌口印西 20	40011	2013/11/14	16:35-17:05	100112							
根取	和歌山市梶取	(S) 400m	2013/11/14	11:20-12:20	100Hz							
7)毛 丸义	216	(L) 800m	2013/11/14	12:45-13:45	100Hz							

表2 微動アレイ観測の場所・日時等の諸元



図11 微動アレイ観測地点 (JMA 和歌山)



図 12 微動アレイ観測地点(今福)





図14 微動アレイ観測地点(島)



図15 微動アレイ観測地点(梶取)

JMA 和歌山	X(EW)	Y(NS)	今福	X(EW)	Y (NS)
J1	0.000	0.000	I1	0.000	0.000
J2	-0.212	0.035	12	-0.167	-0.087
J3	0.121	0.143	13	0.020	0.233
J4	0.063	-0.200	I4	0.174	-0.090
J5	-0.107	0.389	15	-0.358	0.225
J6	0.395	-0.125	16	0.352	0.219
J7	-0.279	-0.308	17	-0.022	-0.388
有本(S)	X(EW)	Y(NS)	有本(L)	X(EW)	Y(NS)
A1	0.000	0.000	A1	0.000	0.000
A2	-0.212	0.002	A5	-0.228	0.335
A3	0.121	0.188	A6	0.387	0.008
A4	0.100	-0.156	Α7	-0.205	-0.320
A5	-0.228	0.335	A8	0.401	0.696
A6	0.387	0.008	А9	0.427	-0.702
Α7	-0.205	-0.320	A10	-0.819	0.073
島	X(EW)	Y(NS)			
S1	0.000	0.000			
S2	-0.199	0.022		/	
S3	0.134	0.197			
S4	0.104	-0.152			
S5	-0.208	0.341	]		
S6	0.434	-0.005			
S7	-0.235	-0.317			
梶取(S)	X(EW)	Y(NS)	梶取(L)	X(EW)	Y(NS)
K1	0.000	0.000	K1	0.000	0.000
K2	-0.176	-0.132	К5	-0.348	0.191
K3	0.029	0.188	K6	0.360	0.141
K4	0.155	-0.145	К7	0.006	-0.422
K5	-0.348	0.191	K8	0.043	0.776
K6	0.360	0.141	К9	0.706	-0.383
К7	0.006	-0.422	K10	-0.694	-0.416

表3 観測点座標(原点をアレイ重心とする)(単位 km)



写真1 微動アレイ観測点の現場状況(梶取、K6地点)。青色の円筒状の筐体が地震計、 隣のオレンジ色の筐体がデータ記録器。



写真2 微動アレイ観測点の現場状況(梶取、K9地点)

ii) 空間自己相関(SPAC)法による観測記録の解析

微動アレイ記録の解析及び地下構造の推定手法について、岡田ほか(1990)を参考に図16 に示すフローに基づいて説明する。アレイ直下の地下構造の情報を含む表面波の分散性(位 相速度-周期の関係)を検出する。この時、空間自己相関法(以下、SPAC法; Aki, 1957) を用いる。SPAC法では基本的には円形アレイ(図17)を展開し、中心点と半径rの円周上に 等間隔に設置した各観測点の相関係数を方位平均した空間自己相関係数を求める。この時、 微動が定常確率過程であるということから、空間自己相関係数は

$$\rho(f,r) = J_0(\frac{2\pi f}{c}r)$$

と表現される。左辺は観測量( $\rho$ :空間自己相関係数)であり、得られた空間自己相関係数 $\rho$ (f,r)は0次のベッセル関数(J<sub>0</sub>)で変化することを意味している。左辺の観測量を満た すベッセル関数の変数を見つけることができれば、半径rにおける周波数fでの位相速度c が求まる。図18にある周波数(f)における空間自己相関係数の変化の例を示す。横軸は観測 点間隔(r)、縦軸は空間自己相関係数( $\rho$ )を示している。

S波速度の推定は表面波位相速度の分散性を利用して、図19に示すように観測位相速度 の分散性と一致する地下構造モデルを推定する。この時、P波速度および密度はLudwig et al. (1970)による既存の統計資料からS波速度の関数とし、未知数の数を減らしている。地下構 造のモデリングにおいては、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm、略称 GA)による 地下構造のモデリング方法(長ほか,1999)を利用する。GAでは初期モデルとして層の数、 各層の層厚の最大値・最小値、S波速度の最大値・最小値を与え、これらの範囲内で残差 最小解を求める。



図 16 微動アレイ観測のデータ処理・解析手順



図 17 二重正三角形アレイの概念図。r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>:アレイ半径 (r<sub>1</sub>=2r<sub>2</sub>), ●:地震計設置点を 表す (7点の場合)。



図 18 空間自己相関(SPAC) 法による位相速度推定の概念図。(左) 半径 r における円形アレイ。(右) f = 2.0Hz における空間自己相関係数(ρ)の例。●:観測空間自己相関係数。実線:0次ベッセル関数。ρ=J₀(2π fr/c) から位相速度(c)が求まる。



 図 19 微動アレイ観測による地下構造モデルの推定の概念。左図は第1層の層厚を0.7km (一点鎖線;モデル1)、0.9km(実線;モデル2)、1.3km(破線;モデル3)とした 場合の Rayleigh 波基本モードの位相速度分散曲線の例。●:観測位相速度。観測位相 速度(●)と最も一致がよい分散曲線となるモデル2が最適地下構造モデルとなる。

各観測点ではサンプリング周波数 100Hz で微動データを 60 分間記録しているが、解析で はデータを 50Hz にリサンプリングした。図 20 に得られた観測微動波形例 (有本(L)アレイ の UD 成分)を示す。記録された全データ長に対して、観測点近傍における交通振動などに よる一時的に大きな振幅を有するデータ区間は解析対象から除外した。 微動中に含まれる 表面波 (本項では上下成分を対象とするため Rayleigh 波)位相速度の推定には前述の SPAC 法を用いた。空間自己相関係数推定に用いた解析パラメータを表4に示す。なお、スペク トルを求める際のスムージング長は 0.1465Hz である。図 21 に表4に示す各データブロッ クのパワースペクトルを全データブロックに対してアンサンブル平均をとった平均パワー スペクトルを示す。図 22 に得られた空間自己相関係数 (図中の〇)の例を示す。図中の実 線は空間自己相関係数に対してフィッティングさせた 0 次のベッセル関数(J<sub>0</sub>)を示してお り、そのフィッティングから位相速度が得られる。図 23 に以上の解析から得られた観測位 相速度を示す。



図 20 有本(Lアレイ)における観測微動波形の例(UD 成分)

	データブ	ブロック	ブロック	解析周波数範	インバージョ	解析周
	ロック長	移動時間	数	囲(Hz)	ンで用いた周	波数間
	(s)	(s)			波数範囲(Hz)	隔(Hz)
JMA 和歌山	81.92	80.0	43	0.10~1.98	$0.72 \sim 1.78$	0.02
今福	81.92	80.0	43	0.10~1.98	$0.70 \sim 1.78$	0.02
有本(S)	81.92	80.0	43	0.10~1.98	$0.72 \sim 1.64$	0.02
有本(L)	81.92	80.0	43	0.10~1.98	$0.60 \sim 1.00$	0.02
島	81.92	80.0	28	0.10~1.98	0.48~1.68	0.02
梶取(S)	81.92	80.0	43	0.10~1.98	$0.50 \sim 1.78$	0.02
梶取(L)	81.92	80.0	43	0.10~1.98	0.34~0.90	0.02

表4 空間自己相関係数の計算に用いた解析パラメータ



図 21 各アレイ内観測点における平均パワースペクトル



図 22 各アレイにおける空間自己相関係数(図中の〇)および得られた空間自己相関係数 に対してフィッティングさせた0次のベッセル関数(J<sub>0</sub>)(図中の実線)の例



図 23 各アレイに対して得られた観測位相速度

iii) 周波数-波数スペクトル(F-K)法による観測記録の解析

微動アレイ記録の解析法の代表的な手法として、前節の SPAC 法(Aki, 1957)と周波数 - 波数スペクトル法(以下、F-K 法: Capon, 1969)がある。一般的に SPAC 法の方が F-K 法よりも位相速度の推定精度が高いという報告(例えば、小渕ほか, 2002; 0hori et al., 2002)が多いものの、F-K 法の方が良い結果を与える報告(例えば、大堀ほか, 2013)も あり、ここでは F-K 法による解析も試みることとした。F-K 法によれば位相速度とともに 波動の到来方向も推定できる特長があり、和歌山市の微動の伝播環境をより良く理解する ためにも、F-K 法による解析を補足的に行う意義がある。最近では観測機器の高度化によ り、3成分の微動アレイ観測が行われる機会も増えており、今回の和歌山平野の微動アレ イ観測においても3成分の波形データを取得した。ここでは、地盤モデルの構築において 参考となる情報を最大限引き出すことを目的とし、上下成分より Rayleigh 波の位相速度を、 水平成分より Love 波の位相速度をそれぞれ推定した。なお、SPAC 法による Love 波の検出 法も提案されている。(松島・岡田, 1990a;山本, 2000)。ただし、Love 波の位相速度 の推定結果が Rayleigh 波の位相速度の決定精度の影響を受ける解法となっており、水平成 分のみから Love 波の位相速度を推定するには至っていない。そこで、本検討では水平成分 のみから Love 波を推定することができる F-K 法(斎藤, 2007)を水平成分に適用し、従 来からの F-K 法 (Capon, 1969) を上下成分に適用している。

F-K 法による 3 成分微動アレイ観測記録の解析の概要を図 24 に示す。これより、F-K スペクトルは、クロススペクトル行列と位相遅延ベクトルを用いて算出されるが、F-K スペクトルの計算式は上下成分を取り扱う Capon (1969)の方法と水平 2 成分を取り扱う斎藤 (2007)の方法は同じであることがわかる。図 24 の下部に示すように、F-K スペクトルのピークは微動アレイに到来する波動のうちエネルギーが卓越するものに相当し、ピークを与える波数ベクトル k より位相速度 c と到来方向 θ が検出される。クロススペクトル行列と 位相遅延ベクトルを見ると、斎藤 (2007)の方法では、Capon (1969)の方法よりも行列およ びベクトルのサイズが 2 倍に拡大されていることがわかる。また、斎藤 (2007)の方法では、 Capon (1969)の方法では、 位相遅延ベクトルが Radial 成分と Transverse 成分のそれぞれに対して定義されているも のの、クロススペクトル行列は Radial 成分と Transverse 成分で共通しているのが特徴と 言える。なお、斎藤(2007)の方法以前の F-K 法による Radial 成分と Transverse 成分の計算法では、松島・岡田 (1990b)、時松ほか (1995)にみられるように、到来方向に応じて水 平 2 成分の波形より Radial 成分と Transverse 成分を算出しては、Capon (1969)の F-K 法 を繰り返し適用する方法が採られており、上下成分に比べて多大な労力を必要としていた。

和歌山平野の微動アレイ観測記録に対する F-K 法解析では、各アレイの 30 分間あるい は 60 分間の波形記録を6 区間に分割し、区間ごとに 40 秒間を1 ブロックとする波形の切 り出しを、20 秒間ずつ移動しながら行い、全ブロックのクロススペクトルの平均値を算出 して用いた。サンプリング周波数は 100Hz とし、フーリエ変換の際には波形の最後に 0 を 付加し、81.92 秒のデータとして解析した。スペクトルの平滑化にはウィンドウ幅 0.1Hz の Parzen ウィンドウを用いた。F-K スペクトルの例として、島アレイの観測記録に対する 周波数 1.2Hz の結果を図 25 に例示する。ここでは、Capon (1969)の方法を上下成分、EW 成分、NS 成分に、斎藤 (2007)の方法を Transverse 成分と Radial 成分に、それぞれ適用 した結果を示す。F-K スペクトルの右上には、ピークに対応する位相速度と到来方向を記 載している。図 25 の例では、全て F-K スペクトルにおいて最も卓越する波動は西方から伝播していることがわかる。また、上下成分から推定した Rayleigh 波の位相速度と Transverse 成分から推定した Love 波の位相速度が大きく異なること、EW 成分と NS 成分から推定した位相速度が Transverse 成分の結果に比較的近いこと、Radial 成分から推定された位相速度は上下成分の結果とは異なること等が読み取れる。なお、他の周波数や他のアレイにおける結果を観察した結果、Rayleigh 波の位相速度は上下成分より、Love 波のそれは Transverse 成分より推定するのが無難なことを確認している。

続いて、F-K 法により各アレイの位相速度と到来方向を算出した結果を、図 26、図 27 にそれぞれ示す。両図には、上下成分と Transverse 成分に対する結果を一緒に表示している。また、図 26 には F-K 法による最小波長の検知限界(宮腰ほか,1995)とされる $\lambda_{\min}$ = $3^{1/2} \times r_{\min}$ ( $r_{\min}$ は地震計間の最小間隔、ここでは 200 m)を直線で表示している。この直線より上側にある位相速度結果が、検知限界を満足することになる。なお、図 27 より、各アレイにおいて微動の到来方向はさまざまであるが、どちらかと言えば、西側(北西、南西も含む)から伝播する傾向が認められる。



図 24 F-K 法解析の概要



図 25 F-K スペクトルの例(島アレイの 1.2Hz の計算結果の一例)



図 26 F-K 法による各アレイにおける位相速度の推定結果(直線は最小波長の検知限界 を示す)



図 27 F-K 法による各アレイにおける到来方向の推定結果

b)成果

i) SPAC 法による推定地下構造

観測位相速度に対して、前述の GA を用いて S 波速度構造モデルを求めた。GA の計算で は、層数が最も少ないモデルで観測位相速度が説明できるように試行錯誤の結果、4 層+ 半無限速度構造モデルを採用した。なお、前述したように P 波速度および密度は既存の統 計資料から S 波速度の関数としている(Ludwig, 1970)。JMA 和歌山、今福、有本、島、梶 取の各アレイで仮定した速度構造モデルに対し、表 5 ~表 9 で示す S 波速度およびその層 厚の探索範囲を設定した上で、試行回数 5000 回の計算を 5 回行って最適な速度構造モデル

(残差最小解)を求めた。推定された地下構造モデルの物性値を表 10~表 14 に示す。図 28 に JMA 和歌山、今福、有本、島、梶取の各アレイでの観測位相速度とともに最適な地下 構造モデルによる Rayleigh 波基本モードの位相速度分散曲線を併せて示す。また、JMA 和 歌山、今福、有本、島、梶取の各アレイでの S 波速度構造モデルを図 29 に示す。各観測点 とも推定地下構造モデルによる Rayleigh 波基本モードの位相速度分散曲線は観測位相速 度を良く再現できている。

得られた地下構造モデルによれば、前述の三波川変成岩(片岩)(S波速度 1.5km/s 程度 と見なす)と未固結な堆積層との速度コントラストが明瞭な地層境界(図 29 の矢印)の深 度は、JMA 和歌山で 0.52km、今福で 0.51km、有本で 0.39km、島で 0.32km、梶取で 0.64km となり、紀の川沿いの3アレイ領域(島、有本、梶取)を比較すると、西側の領域ほど深 くなっている。

N -	層 厚	(m)	Vs (km/s)							
NO.	下限	上限	下限	上限						
1	30	100	0.45	0.66						
2	150	300	0.65	0.90						
3	80	350	0.85	1.25						
4	450	900	1.30	1.80						
5			1.70	2.40						

表5 GAの探索範囲 (JMA 和歌山アレイ)

No.	層 厚	(m)	Vs (1	ĸm∕s)
NO.	下限	上限	下限	上限
1	30	150	0.45	0.66
2	140	250	0.65	0.88
3	80	350	0.85	1.20
4	450	900	1.25	1.80
5			1.70	2.30

表6 GAの探索範囲(今福アレイ)

N -	層 厚	(m)	Vs (kr	n/s)
NO.	下 限	上限	下 限	上限
1	20	100	0.42	0.60
2	250	450	0.60	0.86
3	150	250	1.00	1.55
4	300	900	1.45	1.90
5			2.30	2.85

表7 GAの探索範囲(有本アレイ)

表8 GAの探索範囲(島アレイ)

N -	層 厚	(m)	Vs (km/s)							
NO.	下限	上限	下限	上限						
1	30	100	0.50	0.70						
2	210	400	0.63	0.90						
3	150	500	0.95	1.48						
4	400	800	1.40	1.80						
5			1.90	2.40						

表9 GAの探索範囲(梶取アレイ)

NI -	層 厚	(m)	Vs (k	m/s)
NO.	下 限	上限	下 限	上限
1	20	100	0.42	0.65
2	350	650	0.60	0.95
3	30	250	0.90	1.45
4	700	1550	1.45	1.90
5			2.30	3.10

No.	Thickness	Depth	Vs	Vp	Density						
	(m)	(m)	(km/s)	(km/s)	$(g/cm^3)$						
1	40	0 - 40	0.622	1.99	1.93						
2	205	40 - 245	0.738	2.13	1.98						
3	274	245 - 519	1.132	2.50	2.11						
4	495	519 - 1014	1.670	3.24	2. 27						
5	_	1014 -	1.850	3.49	2.31						

表 10 推定地下構造モデルによる各層の物性値 (JMA 和歌山アレイ)

表 11 推定地下構造モデルによる各層の物性値 (今福アレイ)

No.	Thickness	Depth	Vs	Vp	Density	
	(m)	(m)	(km/s)	(km/s)	$(g/cm^3)$	
1	86	0 - 86	0.481	1.87	1.87	
2	159	86 - 245	0.740	2.13	1.98	
3	265	245 - 510	1.075	2.44	2.09	
4	850	510 - 1360	1.660	3.23	2.26	
5	-	1360 -	1.850	3.49	2.31	

表 12 推定地下構造モデルによる各層の物性値 (有本アレイ)

No.	Thickness	Depth	Vs	Vp	Density	
	(m)	(m)	(km/s)	(km/s)	$(g/cm^3)$	
1	37	0 - 37	0.576	1.95	1.91	
2	347	37 - 384	0.758	2.15	1.99	
3	213	384 - 597	1.440	2.91	2.20	
4	460	597 -1057	1.560	3.09	2.24	
5	-	1057 -	2.690	4.71	2.50	

表 13 推定地下構造モデルによる各層の物性値 (島アレイ)

No.	Thickness	Depth	Vs	Vp	Density	
	(m)	(m)	(km/s)	(km/s)	$(g/cm^3)$	
1	45	0 - 45	0.658	2.03	1.94	
2	273	45 - 318	0.680	2.06	1.95	
3	414	318 - 732	1.370	2.82	2.18	
4	780	732 -1512	1.535	3.05	2.23	
5	-	1512 -	2.050	3.77	2.36	

No.	Thickness	Depth	Vs	Vp	Density	
	(m)	(m)	(km/s)	(km/s)	$(g/cm^3)$	
1	30	0 - 30	0.600	1.97	1.92	
2	542	30 - 572	0.788	2.18	2.00	
3	70	572 - 642	0.920	2.30	2.05	
4	1358	642 - 2000	1.710	3.29	2.28	
5	-	2000 -	2.950	5.14	2.56	

表 14 推定地下構造モデルによる各層の物性値 (梶取アレイ)



図 28 各アレイ領域における観測位相速度(図中の〇)と推定地下構造モデルから計算される Rayleigh 波基本モードの位相速度分散曲線(図中の赤実線)の比較



図 29 各アレイ領域における推定地下構造モデルによる S 波速度構造モデル(矢印は三波 川変成岩の地層上面と考えられる位置)

ii) F-K 法による観測位相速度からみた SPAC 法による推定地下構造についての考察

図 26 より各アレイの位相速度を観察すると、1~1.5 Hz の周波数範囲において、JMA 和歌山アレイ、今福アレイ、梶取アレイでは Love 波の位相速度が Rayleigh 波のそれに比べて遅い傾向が見られる。一方、島アレイと有本アレイではこの傾向はそれほど顕著ではない。これは JMA 和歌山アレイ、今福アレイ、梶取アレイでは、島アレイや有本アレイに比較して沖積層が厚く堆積していることも要因であると推察される。

F-K 法より得られた位相速度をさらに検討するために、SPAC 法の位相速度に基づいて推定された地下構造モデル(表 10~表 14)を用いて算出される Rayleigh 波と Love 波の位相速度の理論値との比較を行う。図 30 は、図 26 に示した F-K 法の結果に、前項の SPAC 法による推定地下構造モデルに基づく理論値を重ね書きしたものである。これより、各アレイの位相速度を観察すると、まず島アレイと有本アレイについては、F-K 法による Rayleigh 波および Love 波の位相速度が概ね理論値と対応していることがわかる。一方、JMA 和歌山アレイ、今福アレイ、梶取アレイについては、Rayleigh 波に関しては F-K 法による位相速度は周波数範囲によっては理論値との対応が見られるが、Love 波に関しては F-K 法の結果 は理論値よりもずっと遅いことがわかる。これは、先ほど述べたように、沖積層の存在も影響していると思われる。

KG-NET 関西圏地盤情報協議会(2011)による「新関西地盤 -和歌山平野-」を参照す ると、島アレイや有本アレイよりも、JMA 和歌山アレイ、今福アレイ、梶取アレイでは沖 積層がかなり厚くなっている。さらに、同資料に掲載されている和歌山市南部の和歌川基 準ボーリングの PS 検層結果より、地表から深さ 41m までの多くの地層において、ポアソン 比が 0.45 以上の地層が大半を占めており、推定された地下構造モデル(表 10~表 14)に は考慮されていない S 波速度の遅い層を浅部に付加する必要性が認められる。このような 沖積層を含めた浅部の地下構造に対しては、各アレイの展開範囲内のボーリング情報の収 集・整理を行った上で、Rayleigh 波と Love 波、さらには H/V スペクトルにおける卓越周 波数などをバランス良く考慮した推定を今後行う予定である。



図30 F-K法による各アレイにおける位相速度の推定結果とSPAC法の位相速度より得られ た推定地盤モデルより計算された位相速度との比較

4) 単点微動観測

a) 実施方法

前節の3成分微動アレイ観測記録を用いて、水平と上下のスペクトル比(H/V スペクトル)を以下の手順によって求めた。記録された全データ長に対して、観測点近傍における交通振動などによる一時的に大きな振幅を有するデータ区間は解析対象から除外し、残りのデータ区間から80秒の記録長を重複区間が無いように20ブロック抜き出した。なお、解析はサンプリング周波数(100Hz)で行った。ブロック毎に自己相関関数を求め、それを有限フーリエ変換(DFT)してパワースペクトルを求めた。このとき、自己相関関数に幅15秒の三角形ラグウインドウを乗じることにより,パワースペクトルの平滑化を行った。ブロック毎に求めた3成分のパワースペクトルの水平動2成分(南北と東西方向)についてベクトル合成を行った。これを上下動成分のパワースペクトルで除し、さらに平方根をとることによってH/V スペクトルを求めた。さらに、ブロック毎に求めた H/V スペクトルを 20ブロックに対するアンサンブル平均から、目的とする(平均)H/V スペクトルを求めた。

上述の微動アレイ地点を対象とした単点微動データとしての解析とは別に、和歌山平野 の内、和歌山市域の地下構造を把握するため、島アレイ付近より西側を対象に広域的な単 点微動観測を105点で実施した。観測点の配置図を図31に、観測点の座標(緯度,経度) を表14にそれぞれ示す。観測は3グループに分かれて、2014年2月25日~27日の期間の 主として日中に行った。観測機器はGPL-6A3P((株)アカシ社製(現(株)ミツトヨ),写真3) を使用した。観測はサンプリング周波数100Hzで行った。観測時の現場写真を写真4に示 す。現在、これら単点微動観測記録の整理については実施中であり、次年度に分析を行う。



図 31 和歌山市域を対象とした広域単点微動観測点位置(赤丸、計 105 点)

	緯度(度)	経度(度)		緯度(度)	経度(度)									
1	34.2319	135.1547	22	34.2278	135.1792	43	34.2231	135.2128	64	34.2444	135.2553	85	34.2528	135.1789
2	34.2378	135.1533	23	34.2317	135.1822	44	34.2261	135.2069	65	34.2625	135.2561	86	34.2564	135.1908
3	34.2419	135.1506	24	34.2361	135.1792	45	34.2333	135.2094	66	34.2556	135.2586	87	34.2522	135.1853
4	34.2472	135.1458	25	34.2400	135.1800	46	34.2378	135.2100	67	34.2578	135.2528	88	34.2492	135.1786
5	34.2522	135.1458	26	34.2414	135.1808	47	34.2419	135.2083	68	34.2614	135.2536	89	34.2469	135.1678
6	34.2569	135.1428	27	34.1933	135.2039	48	34.2464	135.2114	69	34.2653	135.2492	90	34.2403	135.1617
7	34.2631	135.1428	28	34.2000	135.2036	49	34.2514	135.2119	70	34.2686	135.2494	91	34.2369	135.1581
8	34.1967	135.1656	29	34.2042	135.1992	50	34.2303	135.2269	71	34.2631	135.2192	92	34.2347	135.1503
9	34.2014	135.1667	30	34.2064	135.2003	51	34.2322	135.2253	72	34.2608	135.2094	93	34.2314	135.1422
10	34.2069	135.1669	31	34.2108	135.2025	52	34.2350	135.2294	73	34.2611	135.2019	94	34.2444	135.2486
11	34.2117	135.1664	32	34.2131	135.1939	53	34.2383	135.2308	74	34.2608	135.1947	95	34.2439	135.2422
12	34.2181	135.1636	33	34.2183	135.1997	54	34.2408	135.2303	75	34.2628	135.1875	96	34.2458	135.2233
13	34.2239	135.1639	34	34.2236	135.1942	55	34.2433	135.2278	76	34.2619	135.1797	97	34.2508	135.2147
14	34.2289	135.1622	35	34.2283	135.1964	56	34.2492	135.2289	77	34.2600	135.1683	98	34.2211	135.1411
15	34.1919	135.1786	36	34.2317	135.1950	57	34.2525	135.2275	78	34.2472	135.1278	99	34.2239	135.1500
16	34.1964	135.1797	37	34.2356	135.1942	58	34.2553	135.2283	79	34.2461	135.1364	100	34.2353	135.1633
17	34.2014	135.1786	38	34.2389	135.1947	59	34.2581	135.2303	80	34.2503	135.1517	101	34.2389	135.1672
18	34.2056	135.1781	39	34.2425	135.1981	60	34.2614	135.2325	81	34.2606	135.1614	102	34.2436	135.1753
19	34.2089	135.1769	40	34.2472	135.1936	61	34.2644	135.2328	82	34.2469	135.1567	103	34.2475	135.1867
20	34.2142	135.1769	41	34.2517	135.1944	62	34.2675	135.2336	83	34.2508	135.1622	104	34.2489	135.1922
21	34.2217	135,1803	42	34.2197	135.2139	63	34.2414	135.2547	84	34.2528	135.1669	105	34.2533	135.2075

表 14 和歌山平野東部域における広域単点微動観測点座標



写真3 広域単点微動観測に用いた観測機器(左側パネル部がデータ記録部、右側のスイ ッチ類がゲインやハイカットフィルターを設定する部分)





写真4 広域単点微動観測の現場写真

b) 成果

微動アレイ観測点でのそれぞれの H/V スペクトルを図 32 に示す。また、水平2 成分間の スペクトル比(南北に対する東西方向のフーリエ振幅比)を図 33 に示す。まず、H/V スペ クトルについて述べる。何れのアレイ観測領域内の観測点においても1 Hz 以下の低周波数 帯域において明瞭なピークが見られる。以下、これらのピークに対応する周波数を1 次卓 越周波数と称する。1 次卓越周波数(図 32 の矢印)は、JMA 和歌山及び今福の領域では1 Hz 程度であるが、他の領域では 0.25Hz~0.5Hz に存在し、紀の川に沿って西側の領域ほど 低周波数側にシフトする。これら1次卓越周波数の空間変動は、基盤岩と堆積層とのS波 速度コントラストが明瞭な地層境界面深度を反映したものと考えると(Yamanaka et al., 1994)、基盤岩が露頭している和歌山城に近いJMA和歌山や今福の1次卓越周波数が他の3 つの領域より高いこと、さらに紀の川に沿って西側ほど基盤岩の上面深度が深くなるとい う前節の微動アレイ記録による位相速度から推定した基盤岩上面深度の分布(図 29 の矢印) とも整合している。

しかしながら、JMA 和歌山や今福での位相速度から推定された基盤岩上面深度は有本や 島より深く(図 29 の矢印)、H/V スペクトルの卓越周波数から推定される同深度の解釈と は異なる。このことを詳しく説明するため、図 34 に梶取・JMA 和歌山での微動アレイ観測 による位相速度から推定した1次元速度構造、微動 H/V スペクトルの卓越周波数から推定 した基盤岩上面深度及びサブテーマ2において実施されたP波反射法探査(図 35 に測線を 示す)により解釈された基盤岩上面深度分布の比較を示す。なお、微動 H/V スペクトルの 卓越周波数から基盤岩上面深度を推定する際、同上面以浅の堆積層のS波速度を仮定する 必要があるが、本検討では微動の位相速度から推定された堆積層の速度構造(表 10、表 14) を用いた。図より梶取においては、3つの手法(微動アレイ観測、微動H/Vスペクトル、 反射法探査)による基盤岩上面深度は 100m (誤差 15%) 以内に収まっていることがわかる。 一方、JMA 和歌山の同深度において、微動アレイ観測から推定した深度は微動 H/V スペク トルから推定した深度より2倍程度深くなっており、かつ反射法探査による紀の川右岸で の同深度より100m程度深くなっている。JMA 和歌山アレイ重心の東側1kmには基盤岩の露 頭が見られる和歌山城が位置することから、上記の紀の川右岸より徐々に基盤岩上面が上 昇するという自然な解釈をすれば、JMA 和歌山における微動アレイ観測による推定基盤岩 上面深度が実際より深く評価された可能性がある。このことは、前節で示した JMA 和歌山 と今福における F-K 法により評価された微動の位相速度(図 30 の Rayleigh 波)が1Hz 付 近において、SPAC 法により評価された地下構造に基づく位相速度よりも速くなっている (基盤岩上面深度が浅く解釈されることを示唆)こととも整合している。なお、傾斜した 基盤上面を有する地下構造領域においては、SPAC 法を用いた微動の位相速度が空間自己相 関係数の低下により、見かけ上、位相速度が遅く評価され、結果として基盤上面深度が深 く解釈される可能性があることを上林ほか(2009)は指摘している。1Hz以下の周波数帯域 における空間自己相関係数の低下は、図 21 に示した JMA 和歌山と今福の各アレイ領域内の 観測点間における当該周波数帯域でのパワースペクトルのバラツキが大きいことからも裏 付けられる。これらの事象を踏まえて、それぞれの微動探査手法の特性を考慮に入れなが ら高精度な地下構造推定のための検討を引き続き行う予定である。

和歌山平野は上述のように、基盤岩上面が顕著な不規則性を有することから H/V スペク トルの卓越周波数付近において、微動の水平動振幅の異方性が考えられる(Uebayashi, 2003)。Uebayashi et al. (2012)では、同異方性が顕著に見られる地点において、水平成 層構造の仮定に基づく地下構造の推定誤差が大きくなることを観測と3次元地下構造モデ ルを用いた微動のシミュレーションとの比較に基づいて言及している。そこで微動アレイ 観測が行われた5つの領域について、H/V スペクトルの卓越周波数付近の同異方性の強弱 について観察すると(図 33)、JMA 和歌山と今福において、図中に矢印で示した周波数では 東西と南北方向の振幅が最大で倍・半分程度異なる。これら JMA 和歌山と今福における同 異方性が H/V スペクトル卓越周波数を用いた水平成層構造モデルに基づく地下構造推定精 度に、どの程度影響するのかは今のところ明確に評価することはできないが、少なくとも 同異方性が見られる領域ではそうではない領域に比べて、地下構造の推定誤差が大きくな る可能性がある。従って、同異方性を有する領域がどの程度の広がりを持つのかを上述の 広域単点微動記録からも調べておくことは、次年度に構築する予定である和歌山平野の地 下構造モデルを評価する上でも必要と思われる。これらについては次年度において引き続 き検討する予定である。



図 32 微動アレイ観測記録を単点微動記録と見なしたときの各アレイ領域(5領域)内の 観測点(7点)での水平/上下(H/V)スペクトル比(矢印は1次卓越周波数)



図 33 微動アレイ観測記録(3成分)を用いた各アレイ領域(5領域)内の観測点(7点) での東西/南北スペクトル比(矢印はやや振幅の異方性が見られる周波数)



図 34 梶取・JMA 和歌山での微動アレイ観測から推定された1次元速度構造とP波反射法 探査から推定された基盤岩上面深度分布及び微動 H/V スペクトル卓越周波数から推定 した基盤岩上面深度の比較



(c) 結論ならびに今後の課題

1) 地震観測記録の収集・分析

和歌山平野及び周辺部における地震観測記録を収集し、イベント記録のヒットリストを 作成した。次年度は奈良県における地震記録についてイベント記録のヒットリストを作成 する。また、収集した記録から地下構造モデルの検証等に使用するイベント記録を選定し、 地下構造モデルの高度化のためのモデルシミュレーションに利用する。

2) 既存の地下構造モデルの収集

和歌山平野における、強震動予測のための既往の地下構造モデルを収集した。(独) 産 業技術総合研究所による大阪堆積盆地モデルおよび独立行政法人防災科学技術研究所によ る J-SHIS 地震ハザードステーションでは、地震基盤以浅の速度構造モデルが示されている が、両モデルともに既往の探査情報が少なかったこともあり、数秒以下の強震動予測の精 度を確保するためには新たな情報を加えるなど、モデルの高度化が必要であることがわか った。

3) 微動アレイ探査

既存の地下構造に関する情報を考慮し、和歌山市域を対象に5つの領域(JMA 和歌山、 今福、島、有本、梶取)において微動アレイ探査を実施した。観測記録を SPAC 法により解 析し、何れの領域においても連続性の良い位相速度の分散曲線が得られ、それらの分散曲 線からS波速度構造を推定した。さらに、F-K 法による解析も実施し、推定したS波速度 構造から求めた理論分散曲線と比較した。結果として、島と有本については、両手法(SPAC 法と F-K 法)による結果が概ね対応したが、JMA 和歌山、今福、梶取については、位相速 度に差異が見られた。この原因については、下記の単点微動の解析結果との整合性も考慮 しながら来年度に引き続き検討を行う。

4) 単点微動観測

微動アレイ観測記録(3成分)を用いて水平/上下動(H/V)スペクトルを求めた。いず れのアレイ観測領域内においても、H/V スペクトルは明瞭なピークを示した。ピーク(卓 越)周波数と微動アレイ探査から推定した基盤岩上面深度の相対的な変化の傾向は整合し た。ただし、JMA 和歌山と今福においては、H/V スペクトルの卓越周波数から推定した基盤 岩上面深度は微動アレイから推定した同深度より半分程度浅くなった。この結果は、不規 則構造の場での水平成層構造を仮定した各種微動探査手法の精度が原因とも考えられ、引 き続き検討すべき課題である。なお、和歌山市域を対象とした単点微動観測を105点実施 したが、結果については次年度に報告する。

さらに、来年度は既存の地下構造モデル、重力データに加え、今年度実施したサブテーマ2による反射法探査結果なども参考に、微動アレイ探査や単点微動観測結果などに基づき和歌山平野の3次元地下構造の初期モデルを構築する。

(d) 引用文献

Aki K., Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference

to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 35, 415-456, 1957.

- Capon, J., High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, 1408-1418, 1969.
- 長 郁夫・中西一郎・凌 甦群・岡田 広,微動探査法への個体群探索分岐型遺伝的アル ゴリズム fGA の適用,物理探査,52,227-246,1999.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・森川信之・先名重樹・東 宏樹・大井昌弘・はお憲生・ 長谷川信介・前田宜浩・岩城麻子・若松加寿江・井元政二郎・奥村俊彦・松山尚典・ 成田 章,東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討,防災科学 技術研究所研究資料,第 379 号, 2012.
- Ohori M., A. Nobata, and K. Wakamatsu, A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 2323-2332, 2002.
- 大堀道広・チタクセチキン・中村武史・坂上 実・武村俊介・古村孝志・竹本帝人・岩井 一央・久保篤規・川谷和夫・田嶋佐和・高橋成実・金田義行,高知市街地の浅層地盤 モデルの構築,日本地震工学会論文集,13,52-70,2013.
- 岡田篤正・松井和夫・横田 裕・斎藤 勝・遠藤 理・野田利一・香川敏幸,和歌山平野 北東部における中央構造線の地下構造,活断層研究,17,84-96,1998.
- 岡田広・松島健・森谷武男・笹谷 努, 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, 物理探査, 43, 402-417, 1990.
- 小渕卓也・山本英和・斎藤徳美, 微動アレー探査における周波数-波数スペクトル法と空間自己相関法から推定した Rayleigh 波の有効波長範囲の上限の検討, 物理探査, 55, 363-373, 2002.
- 堀川晴央・水野清秀・石山達也・佐竹健治・関口春子・加瀬祐子・杉山雄一・横田 裕・ 末廣匡基・横倉隆伸・岩淵 洋・北田奈緒子・Arben Pitarka, 断層による不連続構 造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル,活断層・古地震研究報告,3, 225-259,2003.
- KG-NET・関西圏地盤研究会,新関西地盤 2011-和歌山平野-, 208pp., 2011.
- 関西地震観測研究協議会, http://www.ceorka.org/, 2014.4.1 現在.
- Ludwig, W.J., J.E. Nafe, J.E., and C.L. Drake, Seismic refraction, The Sea, A.E. Maxwell (Editor), 4, Wiley-Interscience, New York, 53-84, 1970.
- 松島 健・岡田 広, 微動探査法(2) 一長周期微動に含まれるラブ波を識別する試み一, 物 理探査学会第82回学術講演会講演論文集, 5-8, 1990a.
- 松島 健・岡田 広,微動探査法(5)一周波数-波数法を用いた長周期微動中のラブ波を識 別する試み-,物理探査学会第83回学術講演会講演論文集,177-179,1990b.
- 宮腰 研・岡田 広・凌 甦群, 地震計アレイによる表面波位相速度の推定可能な周波数 領域の上限-F-K スペクトル法の場合-,物理探査学会第93回学術講演会講演論文集, 95-99, 1995.

斎藤正徳,水平2成分アレーを用いた縦波・横波成分の分離,物理探査,60,297-304,2007. 時松孝次・新井 洋・酒井潤也,短周期微動に含まれる表面波の性質と地盤構造の関係,

日本建築学会構造系論文集, 472, 47-55, 1995.

- 上林宏敏・川辺秀憲・釜江克宏・宮腰 研・堀家正則,傾斜基盤構造推定における微動 H/V スペクトルの頑健性とそれを用いた大阪平野南部域の盆地構造モデルの改良,日本建 築学会構造系論文集,74,1453-1460,2009.
- Uebayashi, H., Extrapolation of Irregular Subsurface Structures Using the Horizontalto-Vertical Spectral Ratio of Long-Period Microtremors, Bull. Seism. Soc. Am., 93, 570-582, 2003.
- Uebayashi H., H. Kawabe, and K. Kamae, Reproduction of microseism H/V spectral features using a three-dimensional complex topographical model of the sediment-bedrock interface in the Osaka sedimentary basin, Geophys. J. Int., 189, 1060–1074, 2012.
- 山本英和, 3成分微動アレー観測による Love 波の位相速度の推定の試み, 物理探査, 53, 153-166, 2000.
- Yamanaka, H., M. Takemura, H. Ishida, and M. Niwa, Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1831-1841, 1994.