

### 3. 3 断層帶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 地下構造モデルの高度化及び強震動シミュレーション

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人産業技術総合研究所	主任研究員	吉見 雅行
独立行政法人産業技術総合研究所	外来研究員	林田 拓己
独立行政法人産業技術総合研究所	グループ長	阿部 信太郎
独立行政法人産業技術総合研究所	グループ長	今西 和俊
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	松島 信一
国立大学法人京都大学防災研究所	教授	川瀬 博
国立大学法人岡山大学大学院自然科学研究科	教授	竹中 博士
国立大学法人福岡教育大学教育学部	准教授	山田 伸之
国立大学法人東京大学大学院理学系研究科	准教授	安藤 亮輔
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	三宅 弘恵

(c) 業務の目的

既存の大分堆積盆地内外の地震波速度構造モデル（地下構造モデル）を、地震動記録、地震波干渉法によって得られる観測グリーン関数、アレイ微動探査等によって検証し、サブテーマ1～2での探査結果も入れて、より信頼度の高い予測強震動を得るために地下構造モデルを改良する。また、別府-万年山断層帶の特性を考慮した震源モデルを作成する。これらを組み合わせ、別府-万年山断層帶の強震動を予測する。

(d) 3カ年の年次実施業務の要約

1) 平成26年度：

大分堆積盆地内外の強震観測点・震度観測点の地震記録の収集、解析、微動アレイ観測、単点微動観測、地震波干渉法による速度構造推定のための連続微動観測を実施し、大分堆積盆地内外の地下構造のモデル化のための情報蓄積を行った。また、短い活断層の集合から成る震源モデル作成のための準備作業を実施した。

2) 平成27年度：

微動アレイ観測、単点微動観測、地震波干渉法による速度構造推定のための連続微動観測を引き続き実施するほか、これらを平成26年度実施分の情報と合わせ、大分堆積盆地ならびに周辺域の地下構造のモデル化のために集約し、既往地下構造モデルの評価・修正を実施する。既往震源モデルを用いて、別府-万年山断層帶の強震動シミュレーションの試計算を実施する。短い活断層の集合から成る震源モデル作成作業を引き続き実施する。

### 3) 平成 28 年度 :

前年度までに集約した情報、および新規探査による情報を用いて、大分堆積盆地内外の地下構造モデルを改良する。また、別府-万年山断層帯の特性を考慮した震源モデルを作成する。両者を組み合わせ、別府-万年山断層帯の強震動を予測する。

## (2) 平成 26 年度の成果

### (a) 業務の要約

#### 1) 微動アレイ探査

固有周期 10 秒の 3 成分速度計を用いて大分平野 12 カ所、別府扇状地 5 カ所、由布院盆地 1 カ所にて最大半径 1 km 程度の微動アレイ観測を実施し、0.2Hz から 5-10Hz の範囲でレリーフ波の位相速度の暫定値を得た。既往速度構造モデルから計算される理論位相速度と観測値との比較を行い、今後の速度構造モデルの改良について考察した。

#### 2) 単点微動観測および小半径微動アレイ観測

大分平野の沖積層分布地域に 3 測線を設定し可搬型 3 成分加速度計 12 台を用いた単点微動同期観測を実施した。当地域では観測した水平上下スペクトル比 (H/V スペクトル) から表層地盤特性の地域性を把握できるとの知見を得た。また、別府湾周辺地域の広域を対象として 3 成分速度計を用いた単点微動観測を行いデータを蓄積した。H/V スペクトルの 0.1Hz から 1 Hz 帯のピークが深部速度構造と対応する傾向を見出した。さらに、小半径微動アレイ観測を実施し、浅層の S 波速度構造推定のためのデータを蓄積した。

#### 3) 連続微動観測網の構築と地震波干渉法解析

別府湾を取り囲む全 12 点の広域地震計から成る連続微動観測網を構築し、地震波干渉法解析のための観測データを蓄積した。別府湾周辺域の防災科研 Hi-net の 1 年間分の観測記録を用いた干渉法予察解析を実施し、別府湾広域の長測線での平均的な群速度を推定した。連続微動観測網で得られた 5 ヶ月分のデータを用いた地震波干渉法解析を行い、観測点ペアによっては分散性をもつ波群が検出されつつあることを確認し、いくつかの観測点ペアについて群速度の暫定値を得た。

#### 4) 地震記録の収集・解析

大分県内の自治体震度計（全 49 点）にて 2005 年以降に観測された 51 地震の観測記録を収集・整理した。地震記録の主要動部分を用いた H/V スペクトルの算出と、後続波部分を用いた R/V スペクトルの算出を行い、観測点毎に整理し、地下構造モデル高度化のためのデータを蓄積した。

#### 5) 震源モデルの作成

境界積分方程式法を用いた計算コードを整備した上で、別府地溝南縁断層について断層形状モデルを作成した。次に数値計算コードを用いて動的破壊伝播シミュレーションを行い、コードの動作を確認した。また、当該地域の既往の強震動予測の震源モデルを調査すると共に、短い活断層の集合から成る震源モデル作成に向けて、地殻内地震における短い活断層および正断層の震源特性の調査を行った。

(b) 業務の成果

1) 微動アレイ探査

a) 大半径微動アレイ観測

微動アレイ探査とは、表面波の位相速度に見られる分散性を利用して、主に地盤の S 波速度構造を推定する手法である (Aki, 1957 ; Okada, 2003 ; Cho et al. 2006 など)。地表に多数の地震計を配置して常時微動（地面の微かな揺れ）を同時に観測し、主にレイリーワークの位相速度を多くの周波数に対して推定し、地盤の S 波速度の 1 次元構造を逆解析等で求める。人工的な震源を必要としない探査手法であり、都市部でも多くの適用事例がある。深部までの S 波速度構造を簡易に推定できる数少ない調査であり、強震動予測に用いる速度構造モデルの作成には不可欠な探査となっている。

別府湾周辺域では、大分平野内 8 カ所で微動アレイ探査が実施されており（宮腰ほか、2007；吉見ほか、2008）、反射法探査結果（大分県、2000、2002；吉見ほか、2007）との整合性が検討されている。しかし、大分平野内でも探査密度は十分とは言えず、別府や国東半島南部域では探査が実施されていない状況である。別府湾周辺域の速度構造モデル（大分県、2008：大分県モデル；藤原ほか、2012：J-SHIS モデル；地震調査研究推進本部、2009a：JVM モデル）の精度向上には、別府湾周辺の広域での微動アレイ探査が必要である。

本年度は、大分平野内陸部、別府扇状地、由布院盆地を微動アレイ探査の対象地域とした（図 3.3.1-1、図 3.3.1-2）。大分平野については、既往探査が完新統低地（沖積低地）で実施されていたのに対し、今回は、住宅地の広がる台地も探査対象に加えた（図 3.3.1-2）。これら台地を構成する大分層群、碩南層群は工学的基盤相当層であり、これらの S 波速度を直接推定できれば速度構造モデルの高度化に資するためである。別府、由布院においては人口密集地をカバーするよう探査を計画した。

別府湾周辺地域の地震基盤深度は最大で 4 km 程度である（由佐ほか、1992；Kusumoto et al., 1996）。地震基盤から地表に至る S 波速度構造を求ることを目標とし、既往研究を参考に、アレイ半径を半径 20m 程度から最大 1 km 程度に設定した。表 3.3.1-1 にアレイ半径の一覧を示す。アレイ半径、収録設定等の観測諸元は作業性を高めるために統一した。アレイ配置は正三角形の 3 頂点と重心 1 点の観測点からなる 4 点アレイを基本とした。また、微動アレイ解析で多用される空間自己相関法：SPAC 法（Aki, 1957；岡田ほか、1990）では、中心（重心）と同じくするアレイ数が多いほど解析上有利であること、波数スペクトル法：F-K 法（Capon, 1969）では、多地点での同時観測が必要であることから、LL、L、M アレイの中心点は可能な限り同一点とし、この 3 アレイを同時に測定することを基本とした。また SM、S、SS アレイは常に同時に測定した。

観測には、固有周期 10 秒の 3 成分微動計（東京測振製速度計 SE-321、5V/kine）を小型低消費電力データロガー（白山工業製 LS-8800、GPS 時刻校正、24bit AD 変換）に接続して使用した。これらを 12V 電池で駆動し、サンプリング周波数 100 Hz、最小位相フィルター、8 倍アンプをかけて微動データを収録した。なお、微動計は X 方向を磁北に合わせ水平を取った後、プラスチックバケツで覆い風雨等の影響を避けた。

微動アレイ観測地点の緯度経度および観測時刻の一覧を表 3.3.1-2 に示す。観測は 2014

年 11 月 6 日から 2015 年 2 月 3 日にかけて実施した。観測地点は、大分平野 12 カ所、別府扇状地 5 カ所、由布院盆地 1 カ所の計 18 カ所である。微動アレイの全体配置図および既往探査地点・地質との対応図をそれぞれ図 3.3.1-1、図 3.3.1-2 に、各微動アレイ観測地点の詳細配置図を図 3.3.1-3～図 3.3.1-24 に示す。大分平野と由布院盆地の 13 カ所では、表 1 の LL から SS アレイまでの測定を実施した。別府扇状地は L アレイまでの探査を基本とし、LL アレイ観測は扇状地南部と中部の 2 カ所のみとした。なお、大分平野の 00Z、0TR では、低周波数領域での観測位相速度の確認のため、辺長 3,800m の XL アレイを追加した。

大半径のアレイ (XL、LL、L、M アレイ) は、交通振動等に起因するインコヒーレントノイズを低減するため夜間観測とした。観測においては機器を夕方に設置し早朝に撤収することで、8 時間程度の観測時間を確保した。また、観測機器の盗難や事故を防ぐため、できる限り機器は民地に設置すると共に、反射材を施したカラーコーン等を設置した。観測点の選定では、あらかじめ 1 万分の 1 地形図や衛星写真を用いて 4 点の観測候補地を選定した上で、アレイ半径に対する誤差数% の範囲内に位置する民地等の所有者と用地交渉した。機器を夜間に道路上（歩道など）に設置する場合は道路管理者及び警察の許可を取った。測定後は直ちに位相速度の概略解析を実施し、良好な結果が得られていないと判断される場合にはアレイ配置を変更して別日程で再測定した (OSG、BFJ)。

小半径のアレイ (SM、S、SS アレイ) は、交通量の少ない街路や農道等に観測点を設定し、監視員を置いて昼間に観測した。観測時間は 1～2 時間である。ただし、幹線道路沿い、出入りの多い商店付近や繁華街などノイズが大きい地点に観測点を設定せざるを得なくなった場合には、ノイズを避けるため、夜間あるいは休日に観測を実施した (0TR、00T、0SG、OND、BAK)。観測の様子を写真 3.3.1-1、写真 3.3.1-2 に示す。

表 3.3.1-1 アレイ半径一覧

アレイ名	半径 m (辺長 m)	備考
XL	2,190 (3,800)	00Z、0TR のみ
LL	982 (1,700)	別府扇状地では BPM、BPS のみ
L	491 (850)	
M	289 (500)	
SM	94 (160)	0SO は辺長 140m、OHD は辺長 153m
S	47 (80)	
SS	21 (36)	BSN は辺長 32 m

表 3.3.1-2 微動アレイ観測地点と観測日時一覧

地点名	アレイ名	アレイ中心位置		観測開始時刻		観測終了時刻	
		辺長	北緯(deg.) 東経(deg.)	年月日 時	年月日 時	年月日 時	年月日 時
OAK (明野)	SM, S, SS	LL	33.2209 131.6566	2014/11/06 20	2014/11/07 5		
		L	33.2209 131.6566	2014/11/06 20	2014/11/07 5		
		M	33.2209 131.6576	2014/11/06 20	2014/11/07 5		
		SM, S, SS	33.2195 131.6579	2014/11/07 10	2014/11/07 12		
OOZ (大在)	XL	LL	33.2483 131.711	2015/01/28 16	2015/01/29 6		
		L	33.2517 131.7137	2014/11/07 18	2014/11/08 6		
		M	33.2515 131.7137	2014/11/07 18	2014/11/08 6		
		SM, S, SS	33.25176 131.71174	2014/11/08 10	2014/11/08 12		
		XL	33.2476 131.676	2015/01/28 18	2015/01/29 7		
OTR (鶴崎)	SM, S, SS	LL	33.2439 131.6888	2014/11/08 18	2014/11/09 6		
		L	33.2415 131.6908	2014/11/08 18	2014/11/09 6		
		M	33.2415 131.6908	2014/11/08 18	2014/11/09 6		
		SM, S, SS	33.23948 131.68983	2014/11/23 11	2014/11/23 13		
		XL	33.2476 131.676	2015/01/28 18	2015/01/29 7		
OHT (花高松)	SM, S, SS	LL	33.25 131.6647	2014/11/09 18	2014/11/10 6		
		L	33.25 131.6647	2014/11/09 18	2014/11/10 6		
		M	33.2499 131.6636	2014/11/09 18	2014/11/10 6		
		SM, S, SS	33.25091 131.66387	2014/11/10 11	2014/11/10 13		
OOT (大津)	SM, S, SS	LL	33.2509 131.6245	2014/11/10 18	2014/11/11 6		
		L	33.2487 131.6253	2014/11/10 18	2014/11/11 6		
		M	33.2505 131.6245	2014/11/10 18	2014/11/11 6		
		SM, S, SS	33.25188 131.62353	2014/11/24 12	2014/11/24 14		
大分 平野	OSG (下郡)	LL	33.224 131.626	2014/11/11 19	2014/11/12 6		
		L	33.2253 131.6284	2014/11/11 19	2014/11/12 6		
		M	33.2248 131.628	2014/11/11 19	2014/11/12 6		
		L2(再測)	33.2253 131.6273	2014/11/23 18	2014/11/24 6		
		M2(再測)	33.2254 131.6265	2014/11/23 18	2014/11/24 6		
		SM, S, SS	33.22243 131.62773	2014/12/02 22	2014/12/02 24		
		XL	33.2136 131.6007	2014/11/12 20	2014/11/13 6		
OSO (南大分)	SM, S, SS	LL	33.2136 131.6007	2014/11/12 20	2014/11/13 6		
		L	33.2136 131.6007	2014/11/12 20	2014/11/13 6		
		M	33.2136 131.6007	2014/11/12 20	2014/11/13 6		
		SM, S, SS	33.21672 131.60198	2014/11/29 11	2014/11/29 13		
OSI (坂ノ市)	SM, S, SS	LL	33.2375 131.7426	2015/01/29 18	2015/01/30 7		
		L	33.2389 131.7432	2015/01/29 18	2015/01/30 7		
		M	33.2382 131.7429	2015/01/29 18	2015/01/30 7		
		XL	33.23962 131.74118	2015/01/28 11	2015/01/28 13		

		LL	33.1863	131.6043	2015/01/30	18	2015/01/31	7
OMY (光吉)		L	33.1863	131.6043	2015/01/30	18	2015/01/31	7
		M	33.1863	131.6043	2015/01/30	18	2015/01/31	7
		SM, S, SS	33.19118	131.60498	2015/01/29	11	2015/01/29	13
OMK (宗方)		LL	33.1951	131.5749	2015/01/31	18	2015/02/01	6
		L	33.1951	131.5749	2015/01/31	18	2015/02/01	6
		M	33.1942	131.574	2015/01/31	18	2015/02/01	6
		SM, S, SS	33.19298	131.57455	2015/01/30	11	2015/01/30	13
OND (野田)		LL	33.2018	131.5446	2015/02/01	17	2015/02/02	6
		L	33.2019	131.541	2015/02/01	17	2015/02/02	6
		M	33.2018	131.5446	2015/02/01	17	2015/02/02	6
		SM, S, SS	33.19917	131.54332	2015/02/03	22	2015/02/03	24
OHD (判田)		LL	33.1605	131.6253	2015/02/02	17	2015/02/03	6
		L	33.1613	131.6259	2015/02/02	17	2015/02/03	6
		M	33.1613	131.6259	2015/02/02	17	2015/02/03	6
		SM, S, SS	33.16047	131.62528	2015/02/01	11	2015/02/01	13
別府扇状地	BKT (京大)	L	33.2838	131.4858	2014/11/19	18	2014/11/20	6
		M	33.2841	131.4862	2014/11/19	18	2014/11/20	6
		SM, S, SS	33.28349	131.48533	2015/11/19	11	2015/11/19	13
	BFJ (富士見)	L	33.2869	131.4988	2014/11/20	18	2014/11/21	6
		M	33.2869	131.4988	2014/11/20	18	2014/11/21	6
		L2(再測)	33.2868	131.5005	2014/11/29	18	2014/11/30	6
		M2(再測)	33.2868	131.5007	2014/11/29	18	2014/11/30	6
		SM, S, SS	33.2877	131.4998	2014/11/27	11	2014/11/27	13
	BPS	LL	33.2864	131.4930	2014/11/20	18	2014/11/21	6
	BIS (石垣)	L	33.3007	131.4970	2014/11/21	18	2014/11/22	6
		M	33.3007	131.4970	2014/11/21	18	2014/11/22	6
		SM, S, SS	33.30027	131.49691	2014/11/21	11	2014/11/21	13
	BPM	LL	33.3031	131.4905	2014/11/21	18	2014/11/22	6
由布院	BSN (上人)	L	33.3123	131.4955	2014/11/22	18	2014/11/23	6
		M	33.3123	131.4955	2014/11/22	18	2014/11/23	6
		SM, S, SS	33.31140	131.49612	2014/11/22	10	2014/11/22	12
	BAK (秋葉)	L	33.275	131.5021	2014/11/24	20	2014/11/25	6
		M	33.2749	131.5017	2014/11/24	20	2014/11/25	6
		SM, S, SS	33.27445	131.50187	2014/11/28	1	2014/11/28	3
	YUF (由布院)	LL	33.2608	131.3531	2014/12/03	18	2014/12/04	11
		L	33.2608	131.3531	2014/12/03	18	2014/12/04	11
		M	33.2586	131.3548	2014/12/03	18	2014/12/04	11
		SM, S, SS	33.26133	131.35282	2014/12/03	11	2014/12/03	13

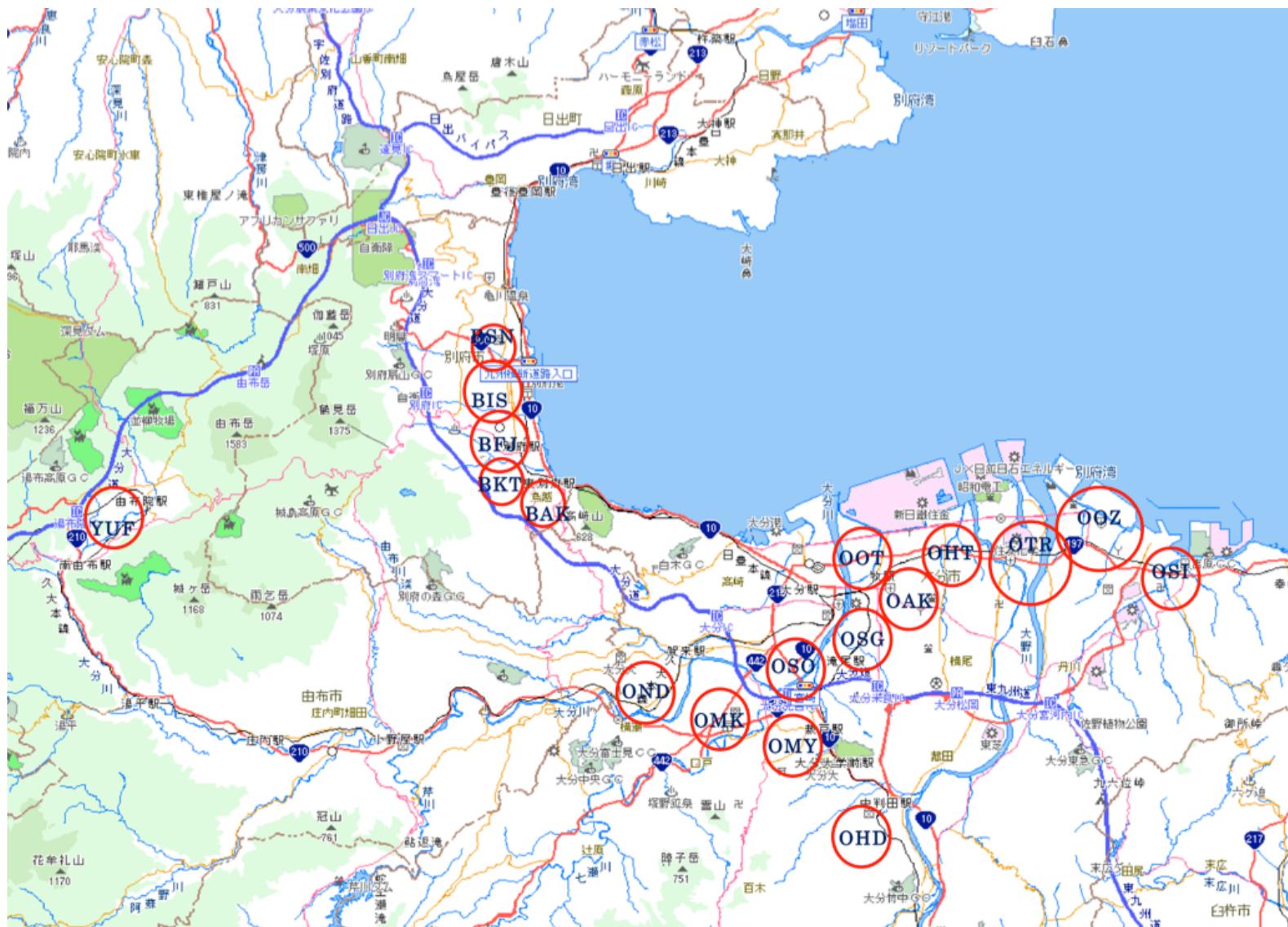


図 3.3.1-1 微動アレイ観測地域位置図（円内の記号は観測地域略称）

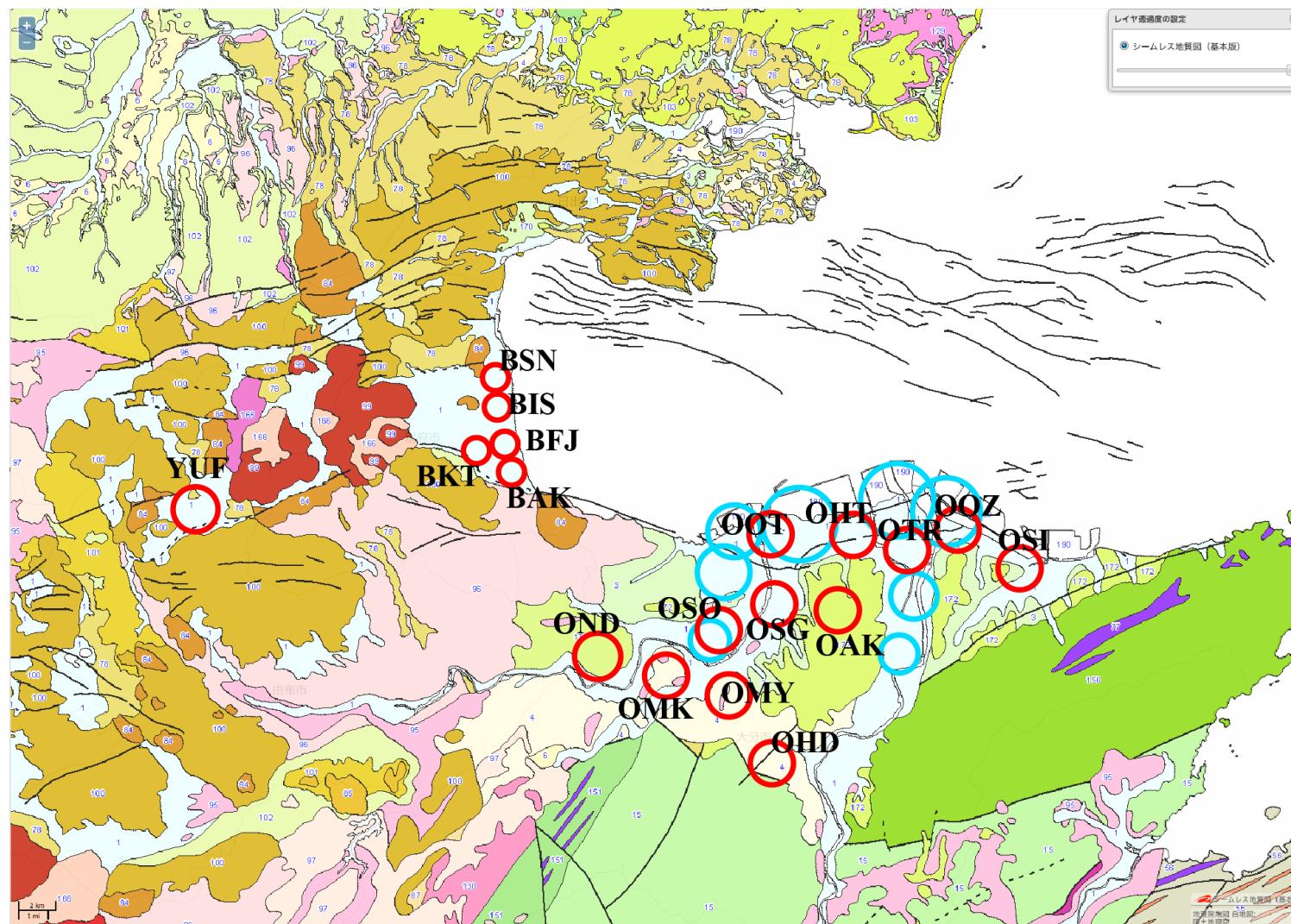


図 3.3.1-2 微動アレイ観測地点（赤丸）、既往微動アレイ観測地点（水色丸）と表層地質の関係（大分平野内の黄緑領域（OAK, ONDなど）は大分層群、肌色領域（OMK, OMY, OHDなど）は碩南層群分布域）（基図は産総研シームレス地質図）

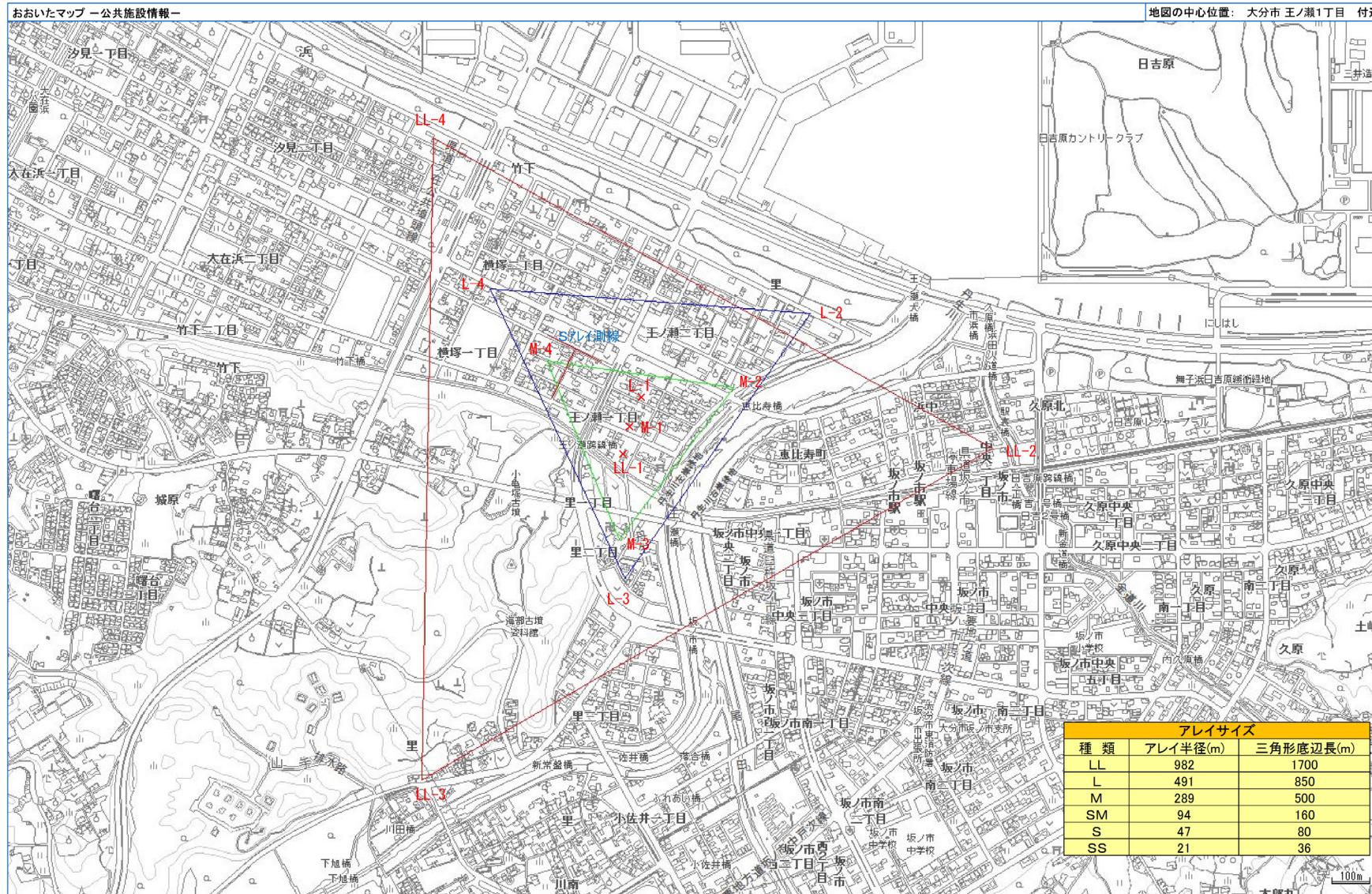


図 3.3.1-3 OSI (坂ノ市) アレイ観測点配置図 (おおいたマップを使用)

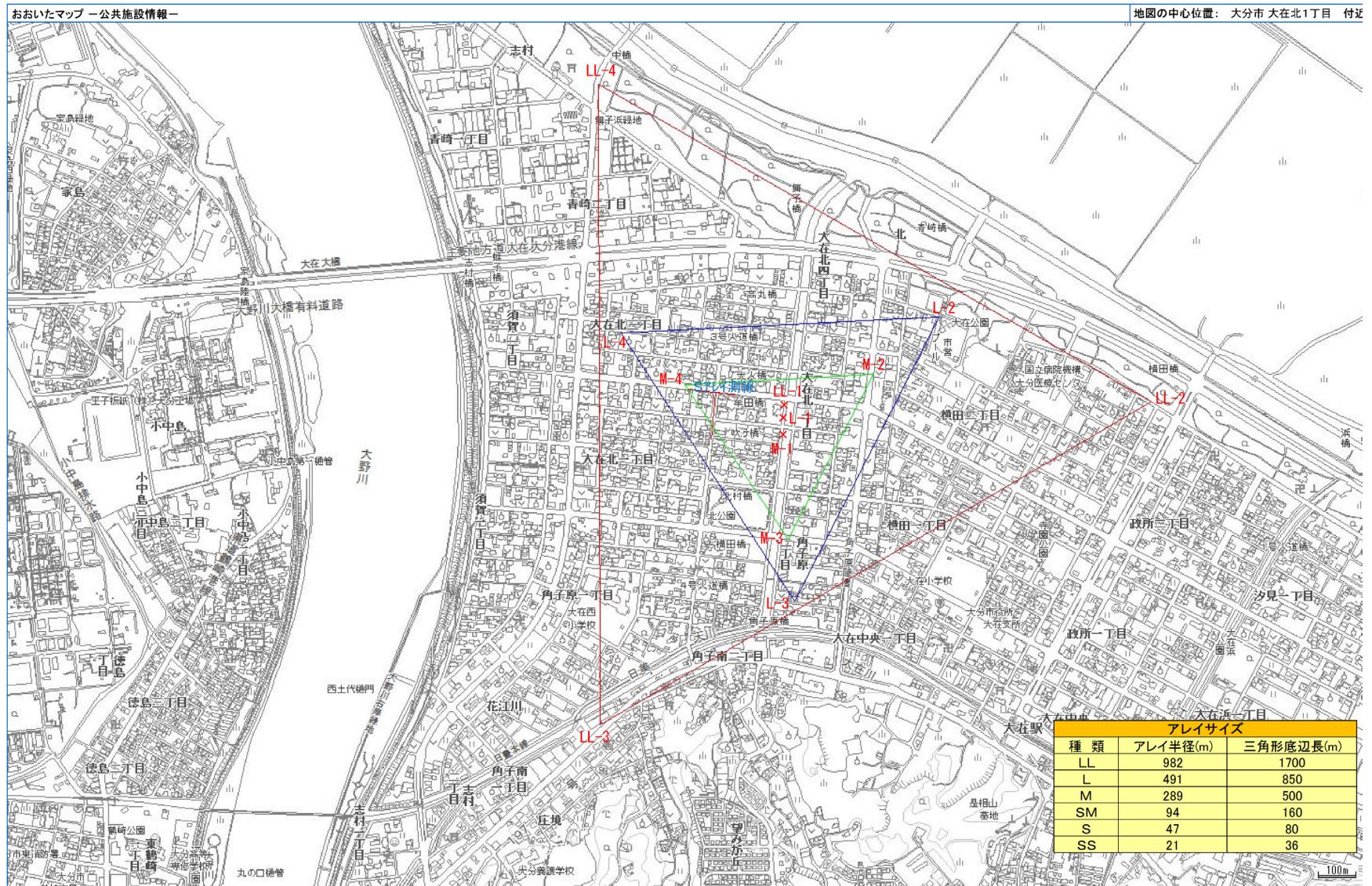


図 3.3.1-4 OOZ（大在地域）アレイ観測点配置図（おおいたマップを使用）

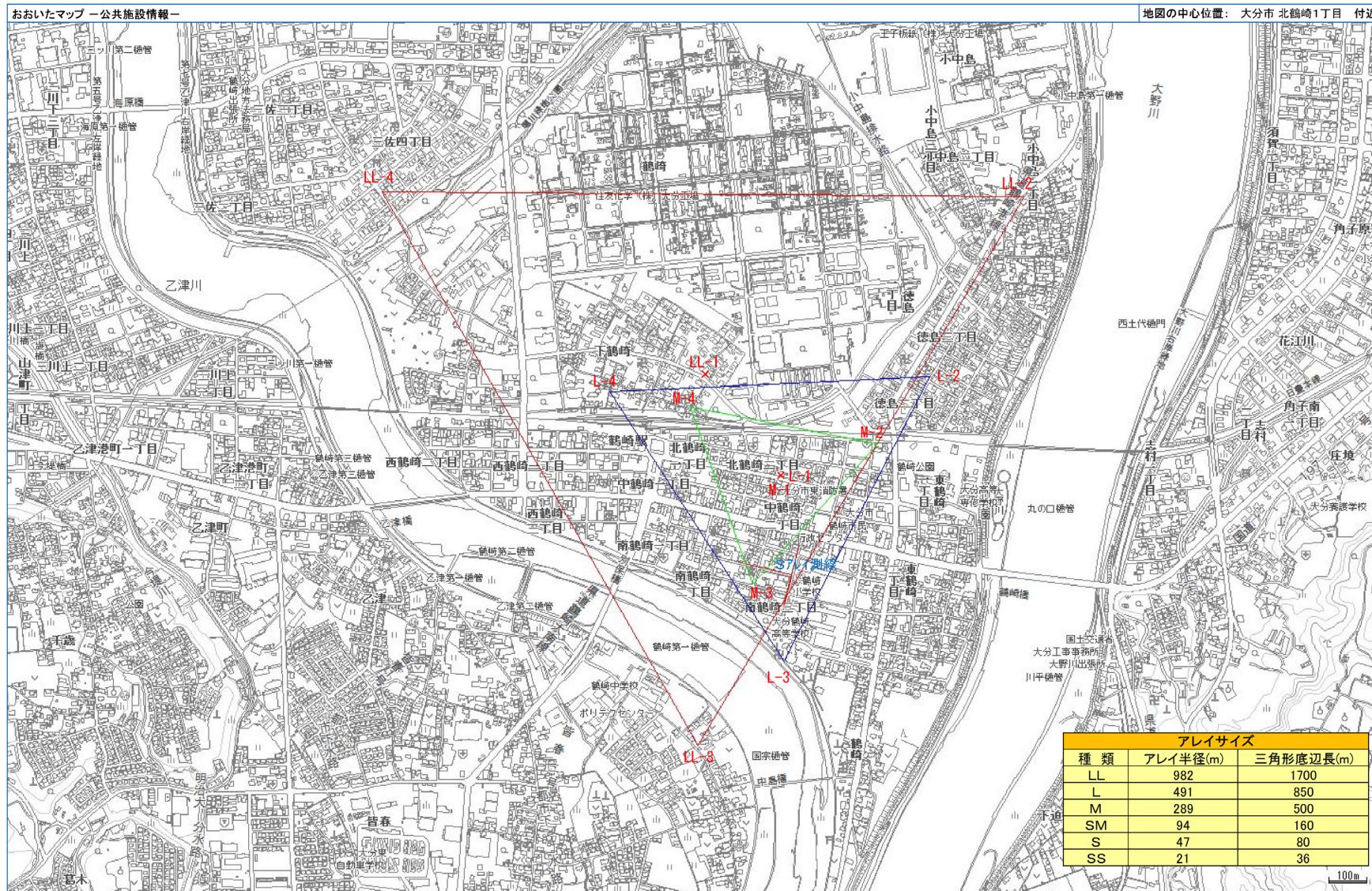


図 3.3.1-5 OTR（鶴崎地域）アレイ観測点配置図（おおいたマップを使用）

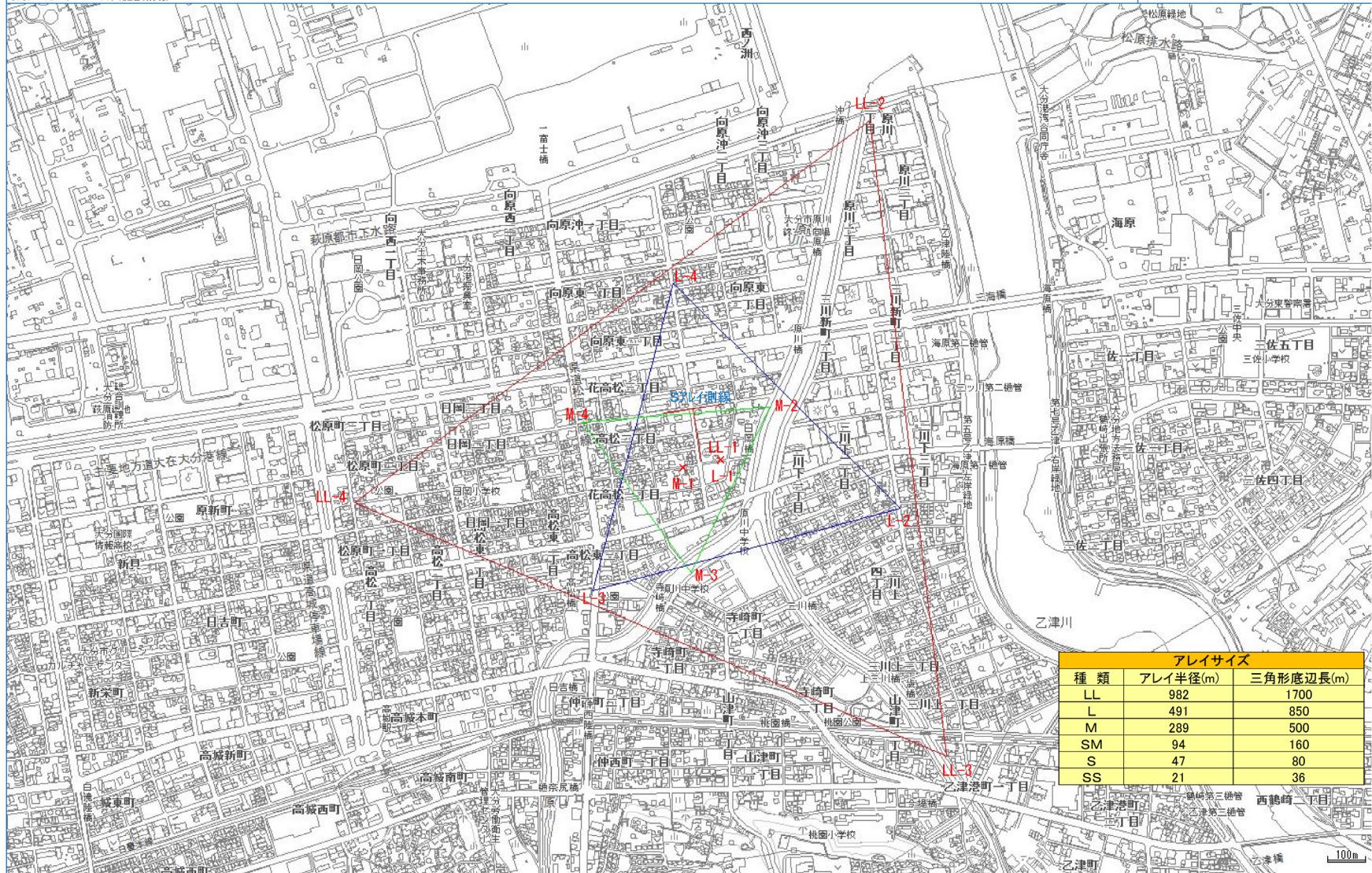


図 3.3.1-6 OHT（花高松地域）アレイ観測点配置図（おおいたマップを使用）

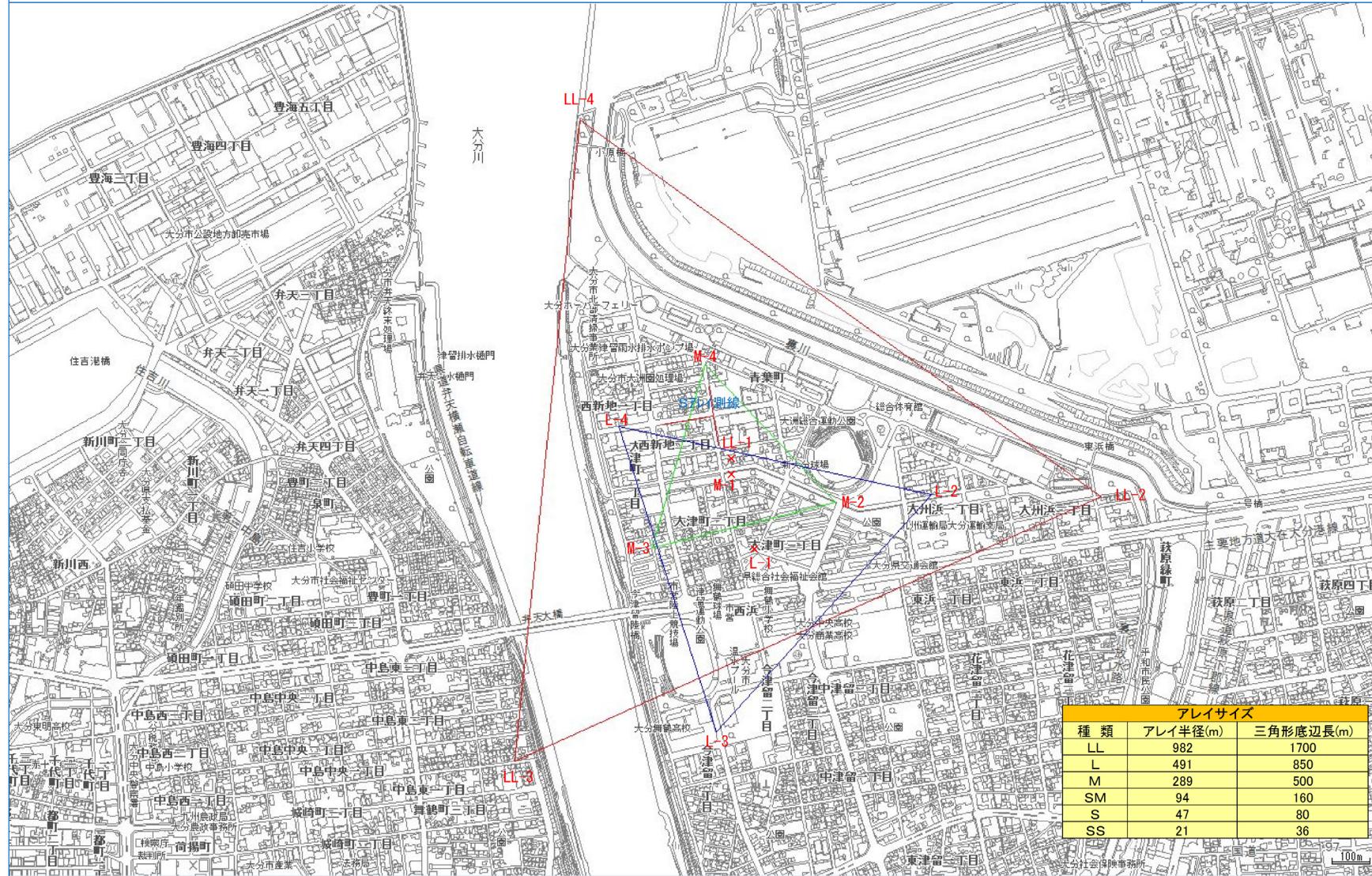


図 3.3.1-7 OOT (大津地域) アレイ観測点配置図（おおいたマップを使用）

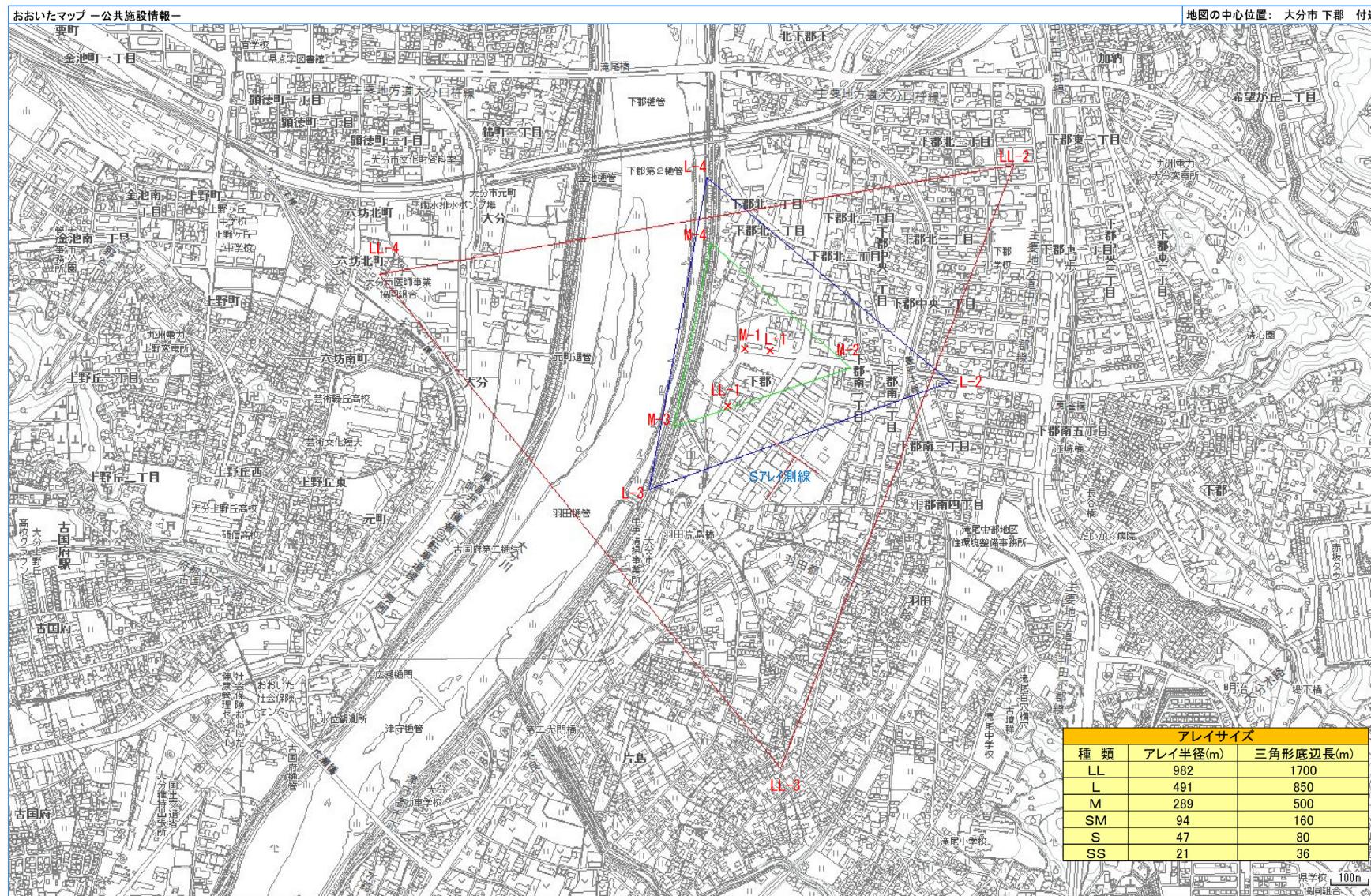


図 3.3.1-8 OSG（下郡地域）アレイ観測点配置図（L,M は再測定位置を表示）（おおいたマップを使用）

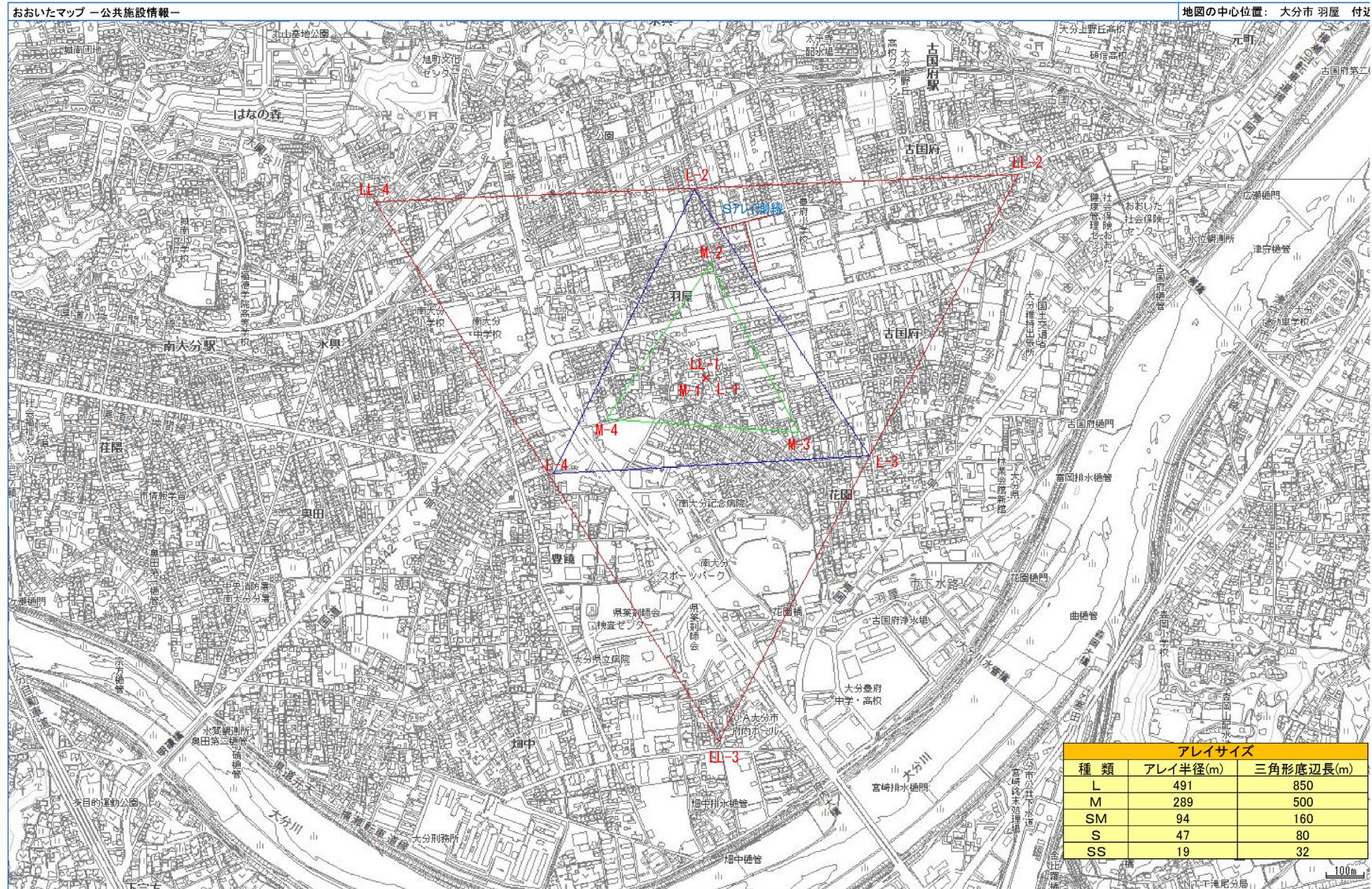


図 3.3.1-9 OSO（南大分地域）アレイ観測点配置図（おおいたマップを使用）（LL のアレイ半径等は OSG 等と同一）

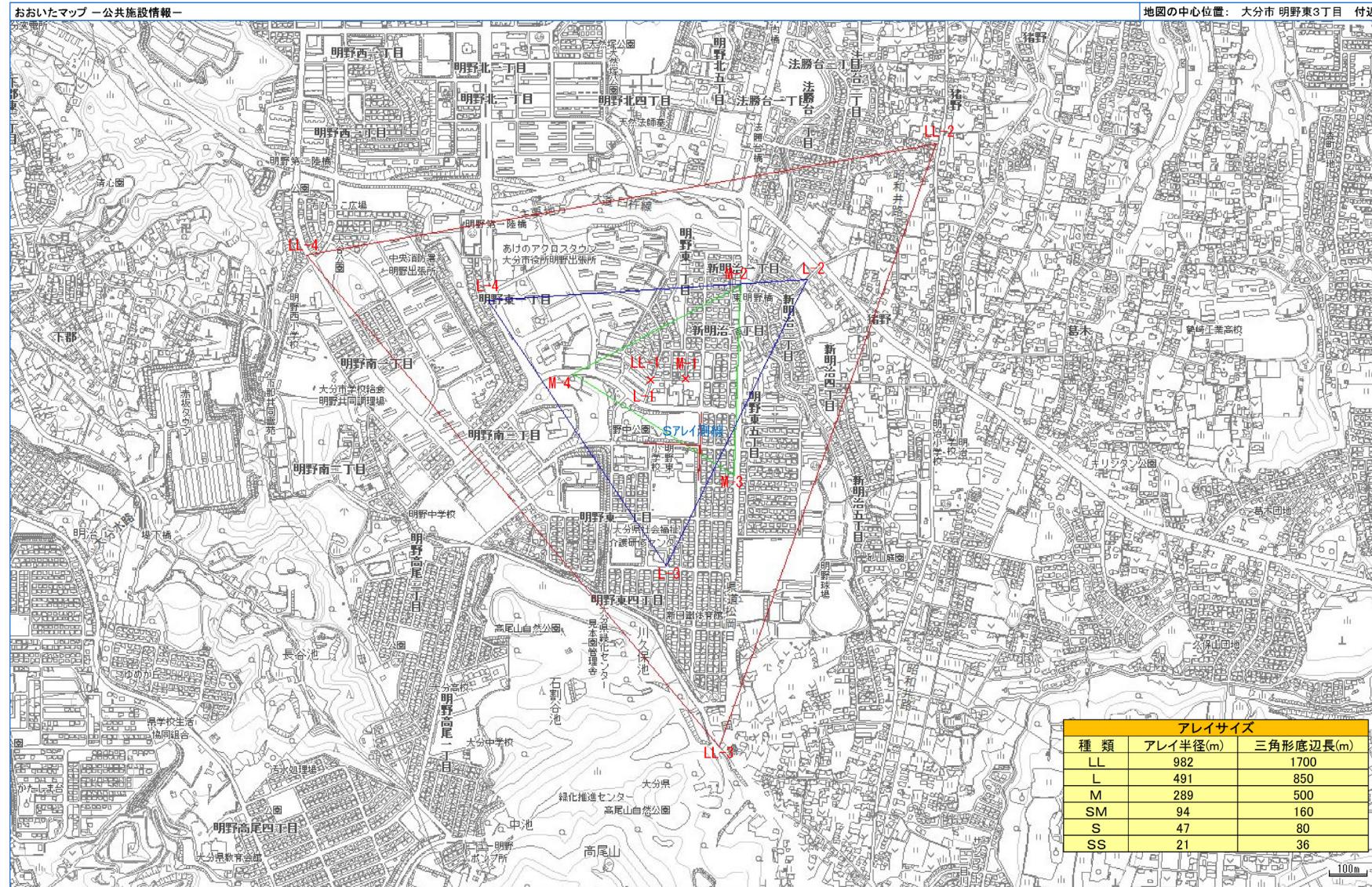


図 3.3.1-10 OAK (明野地域) アレイ観測点配置図 (おおいたマップを使用)

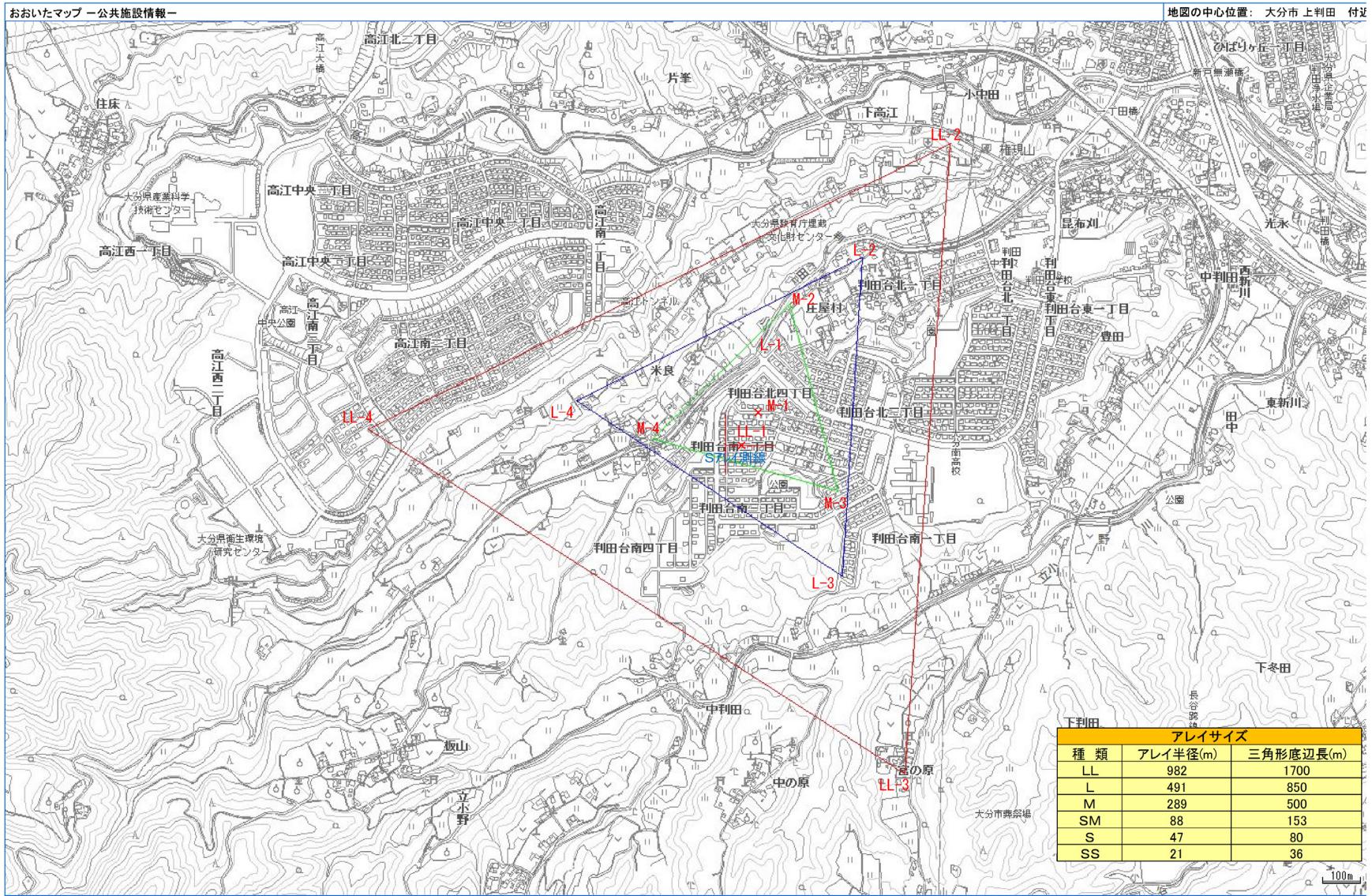


図 3.3.1-11 OHD (判田地域) アレイ観測点配置図 (おおいたマップを使用)

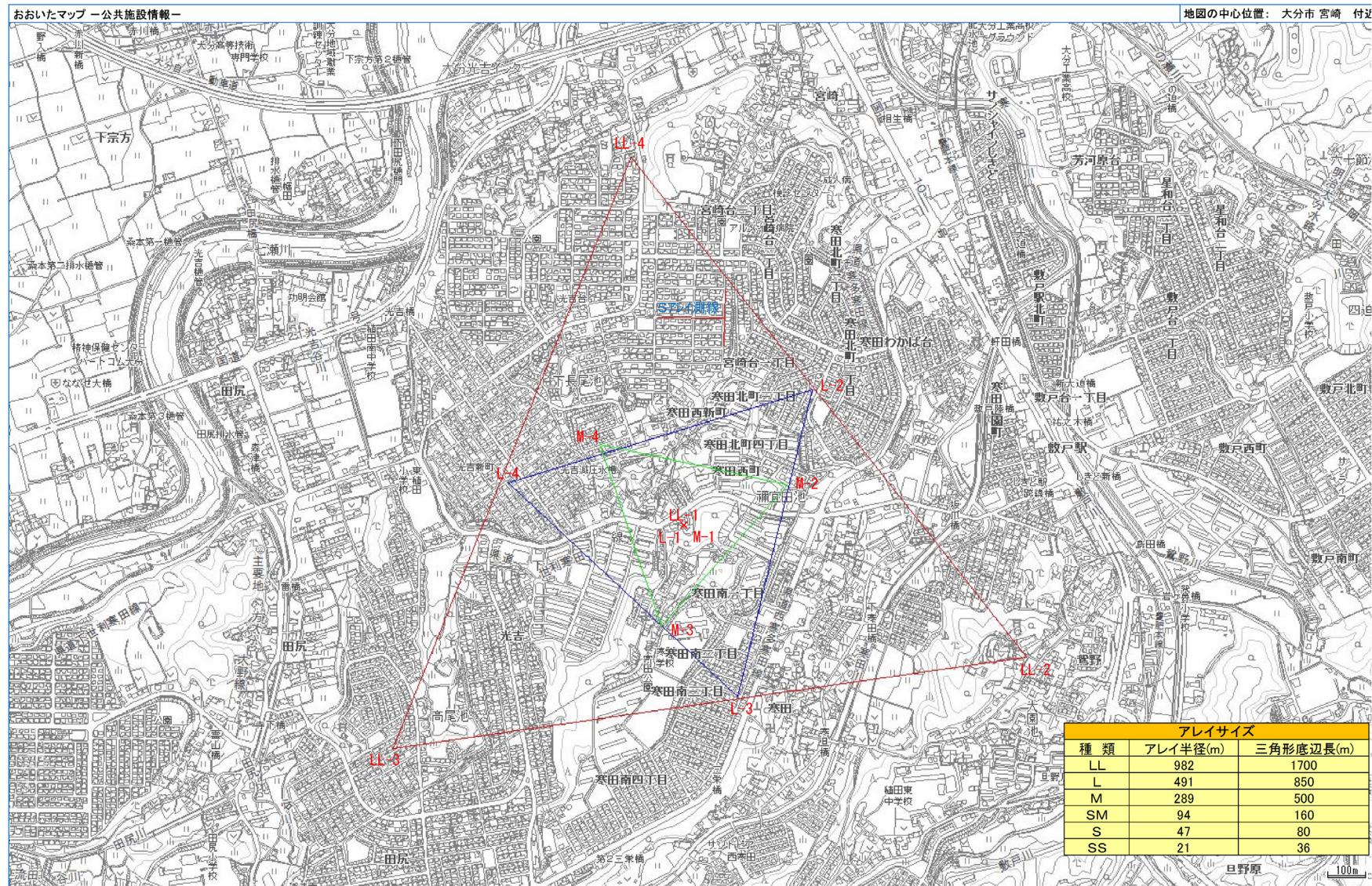


図 3.3.1-12 OMY (光吉地域) アレイ観測点配置図 (おおいたマップを使用)

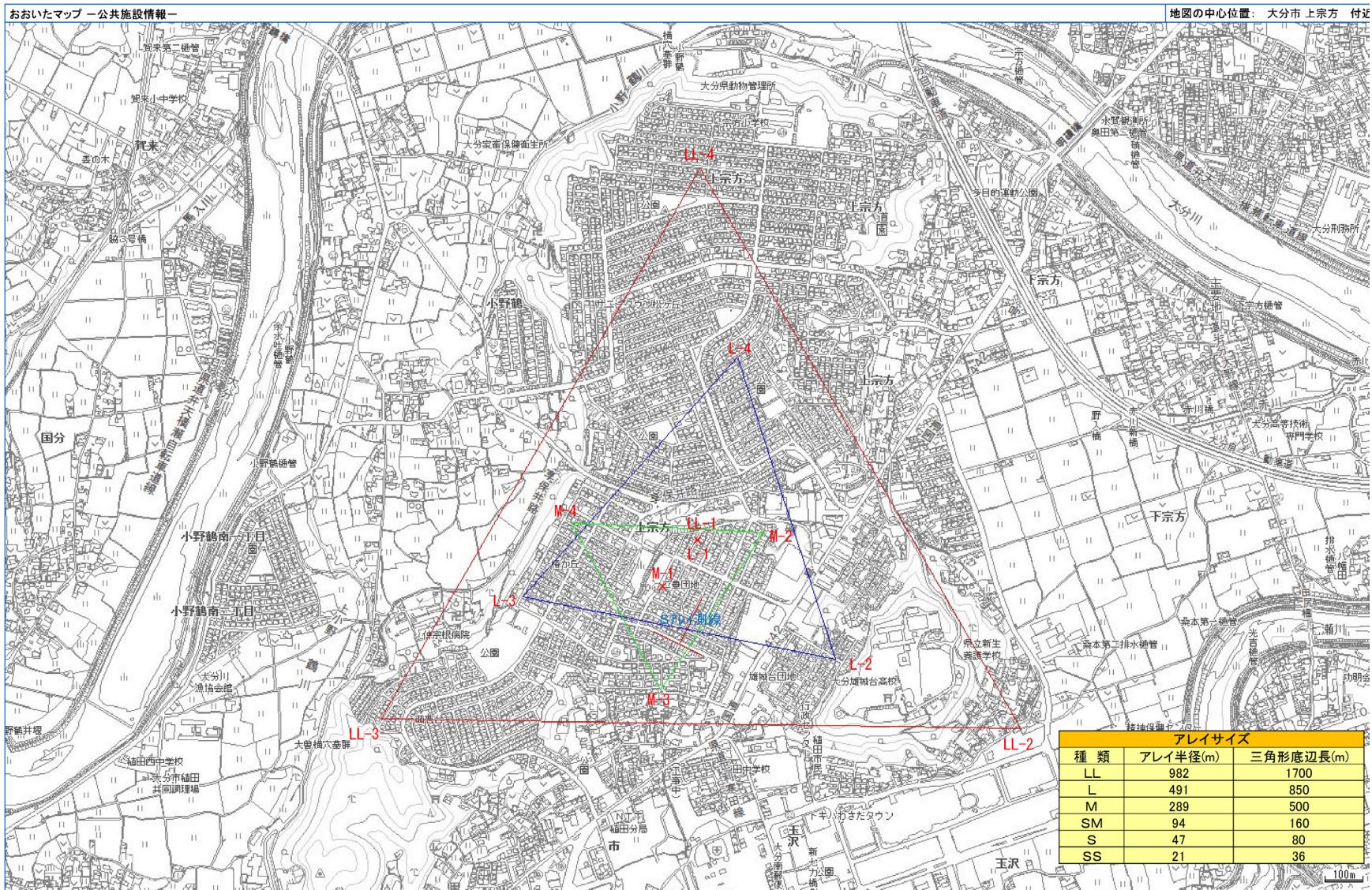


図 3.3.1-13 OMK (宗方地域) アレイ観測点配置図 (おおいたマップを使用)

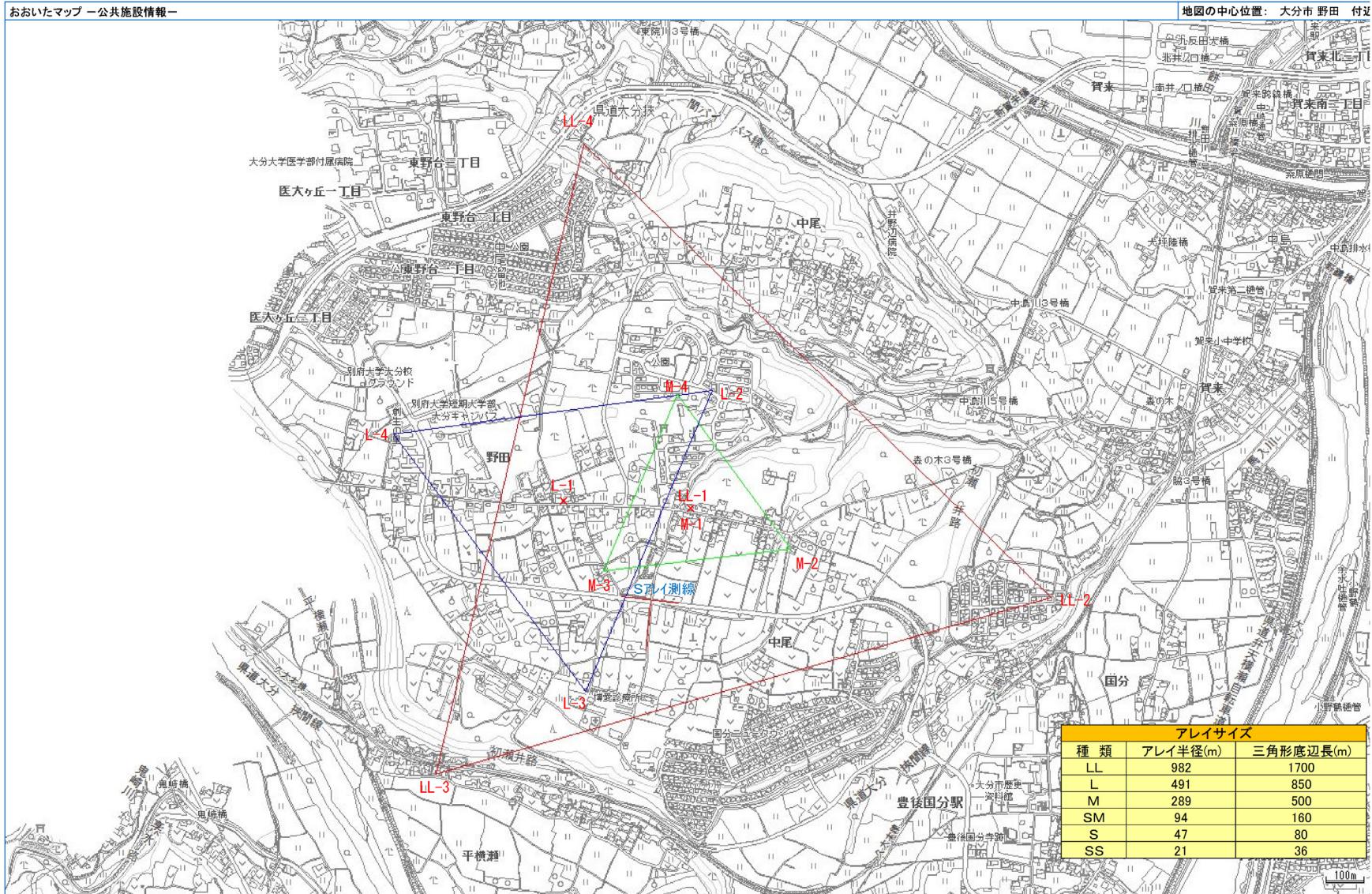


図 3.3.1-14 OND（野田地域）アレイ観測点配置図（おおいたマップを使用：地図の空白部は由布市）

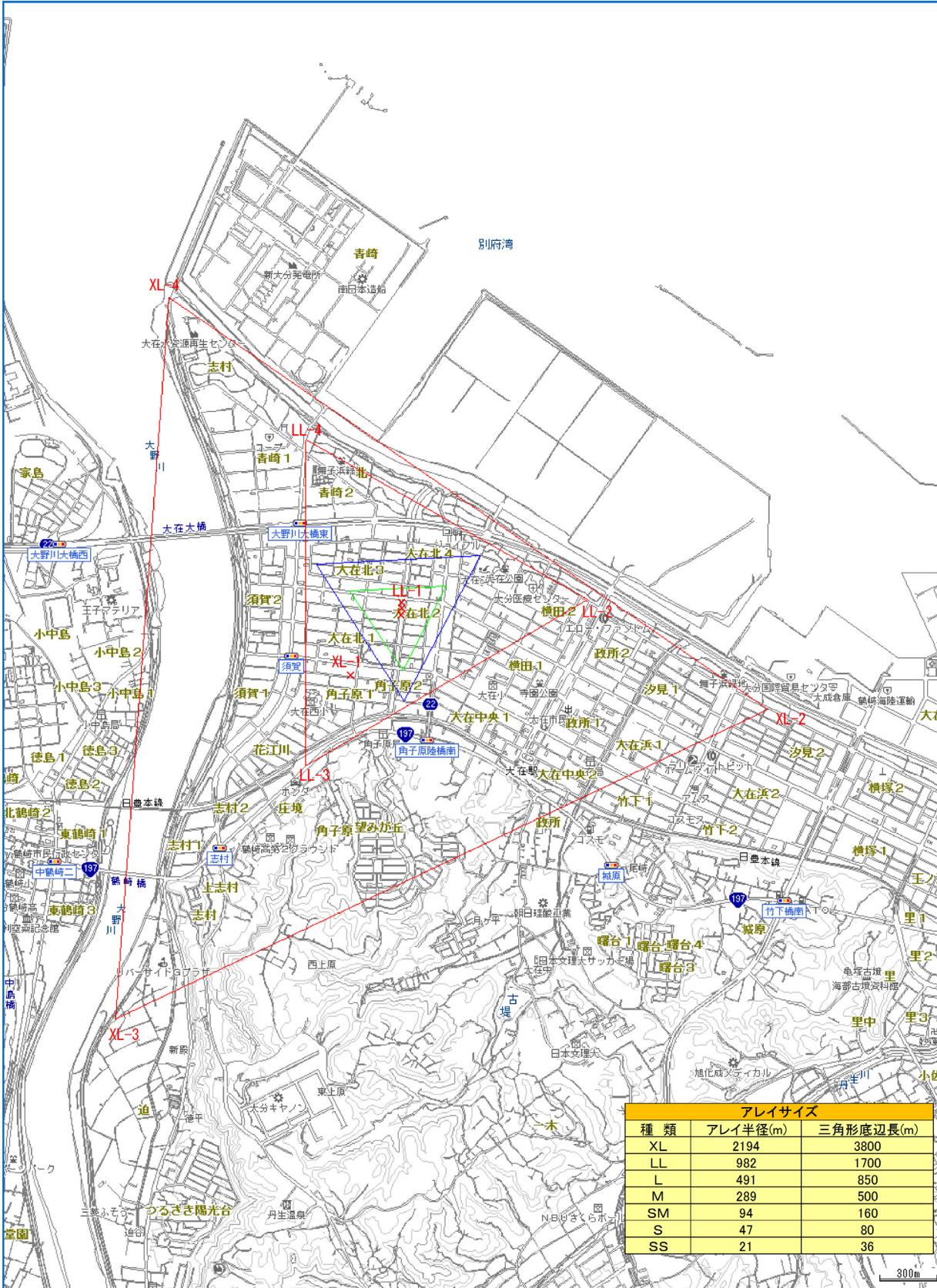


図 3.3.1-15 OOZ-XL（大在地域）アレイ観測点配置図  
(LL以下のアレイは図 3.3.1-4 と同一、おおいたマップを使用)

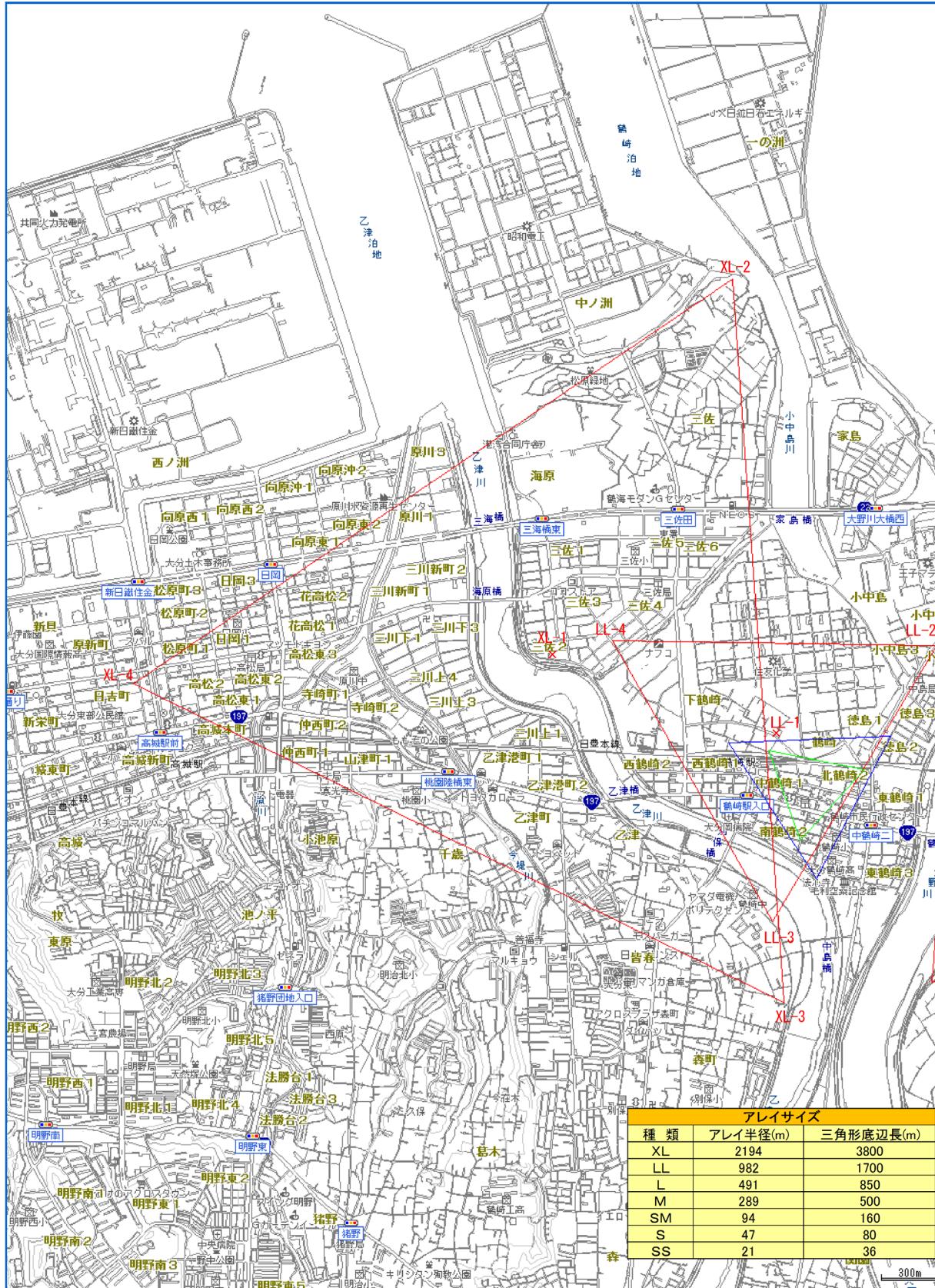


図 3.3.1-16 OTR-XL（鶴崎地域）アレイ観測点配置図  
(LL以下のアレイは図 3.3.1-5 と同一、おおいたマップを使用)

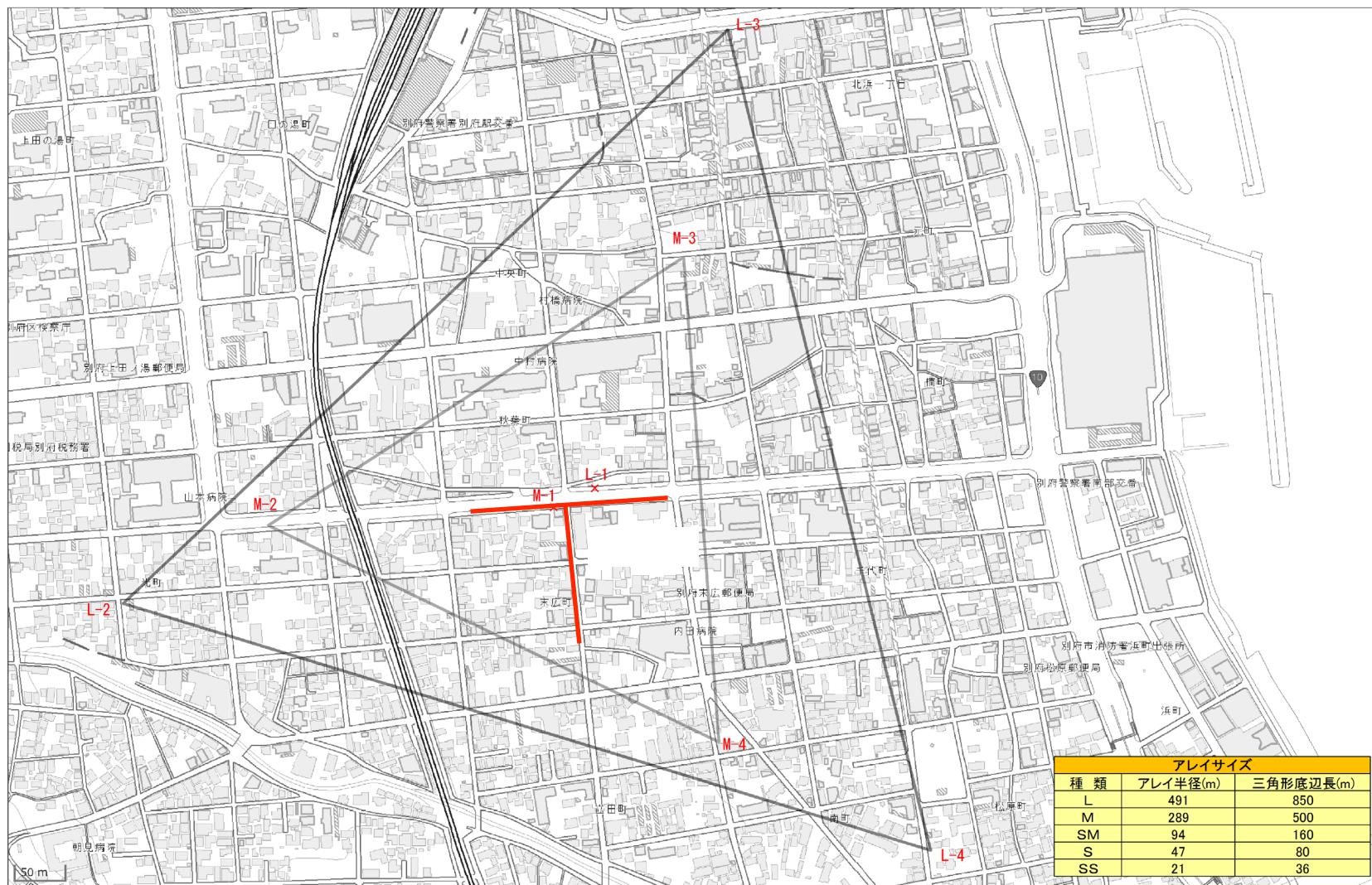


図 3.3.1-17 BAK (秋葉地域) アレイ観測点配置図 (地理院地図を使用)

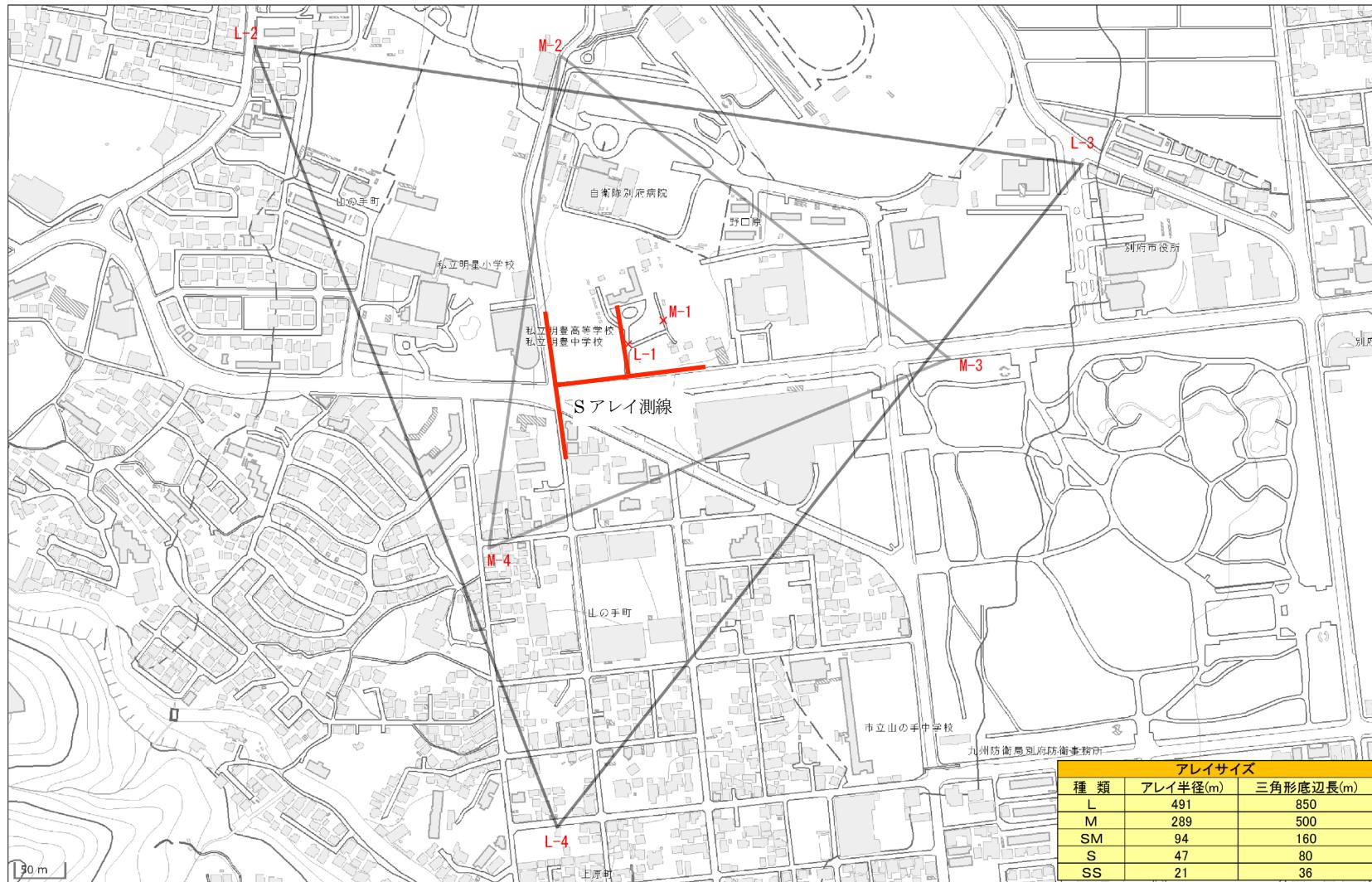


図 3.3.1-18 BKT (京大別府周辺) アレイ観測点配置図（赤線は SM, S, SS アレイ位置）（地理院地図を使用）

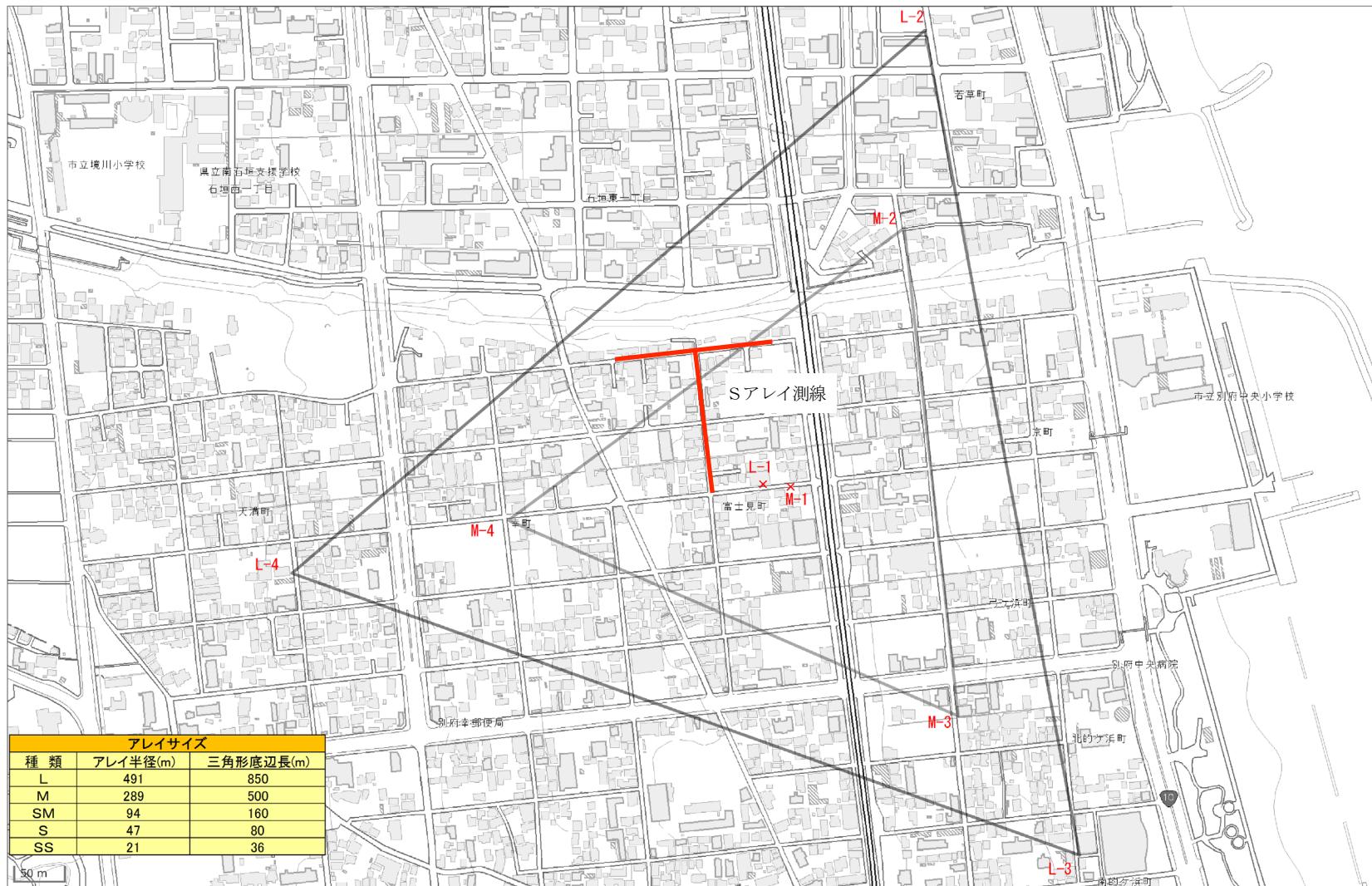


図 3.3.1-19 BFJ (富士見地域) アレイ観測点配置図 (再測定位置を表示) (地理院地図を使用)

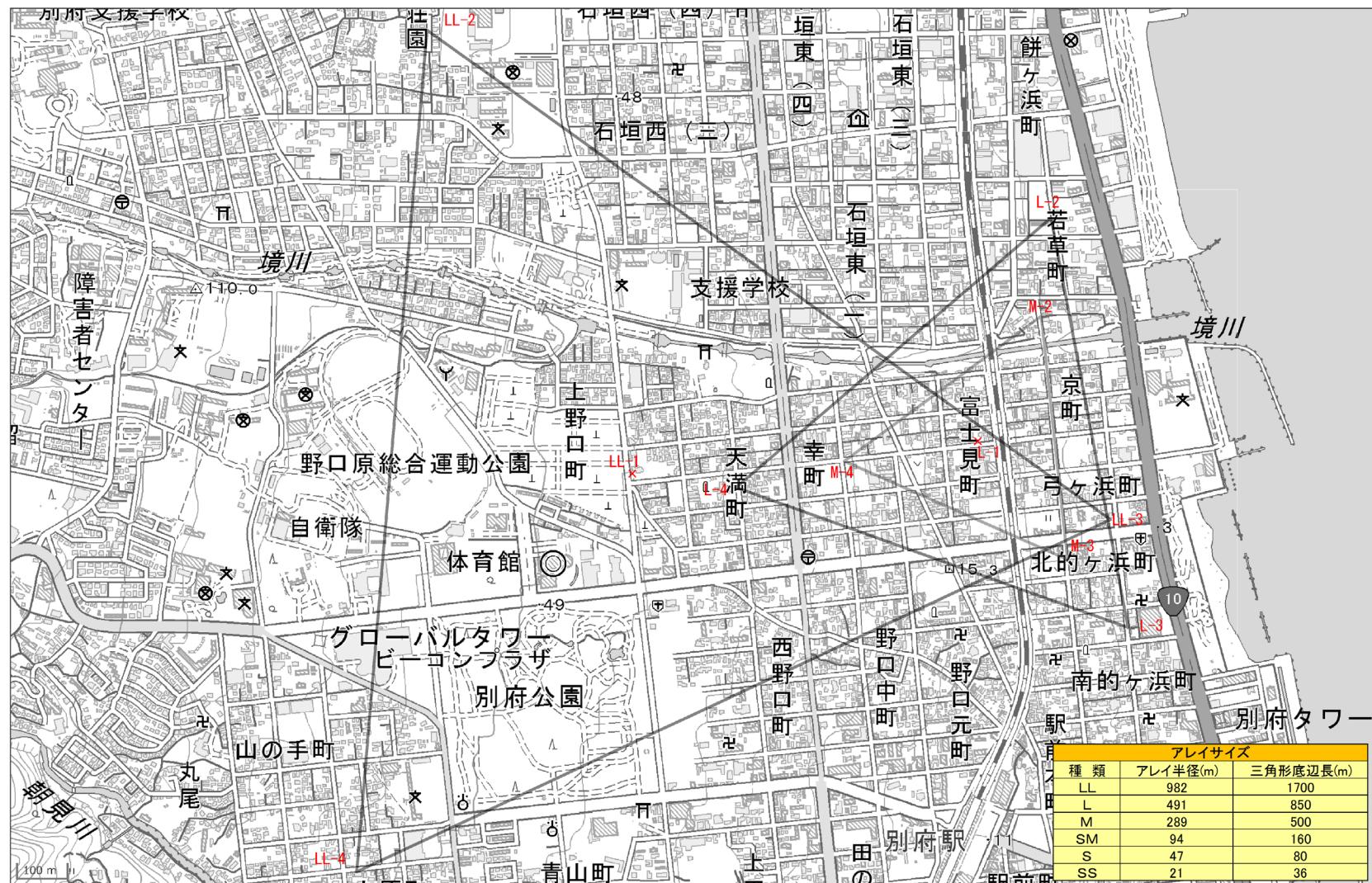


図 3.3.1-20 BPS-LL (別府南部地域) アレイ観測点配置図 (右側の L, M アレイは BFJ アレイ) (地理院地図を使用)

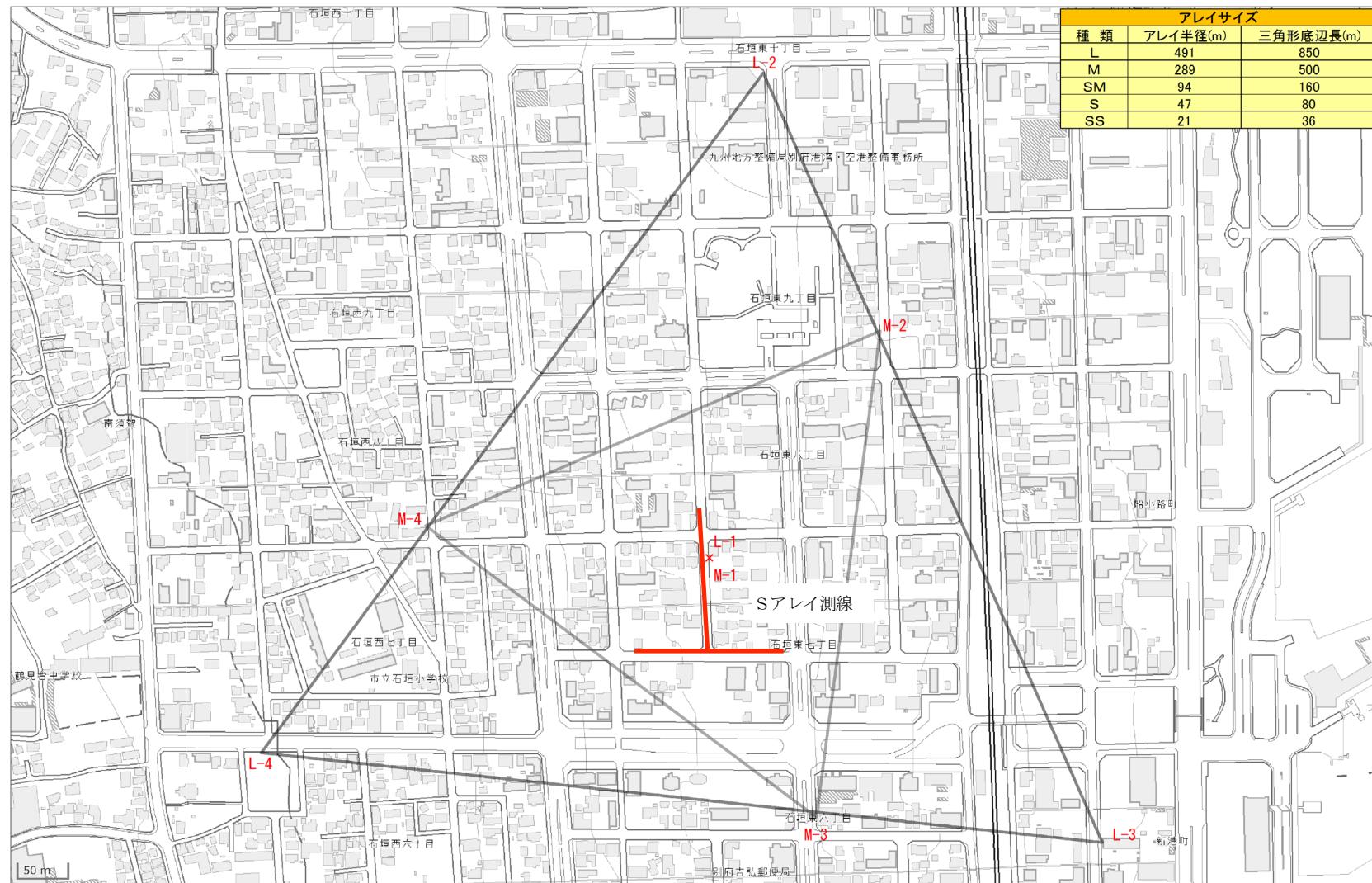


図 3.3.1-21 BIS (石垣地域) アレイ観測点配置図 (地理院地図を使用)



図 3.3.1-22 BPM-LL (別府中部地域) アレイ観測点配置図 (右側の L,M アレイは BIS アレイ) (地理院地図を使用)

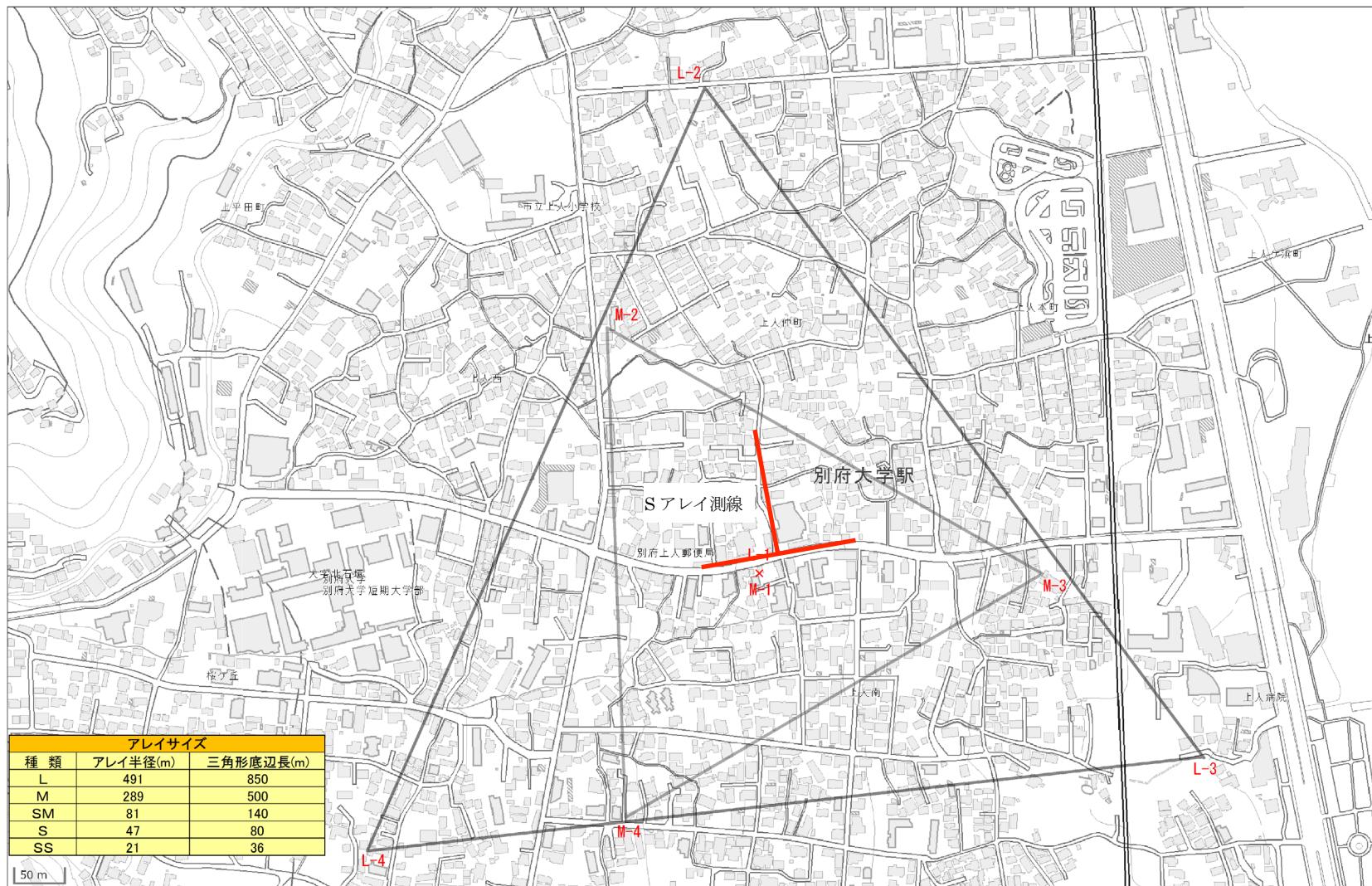


図 3.3.1-23 BSN (上人地域) アレイ観測点配置図 (地理院地図を使用)

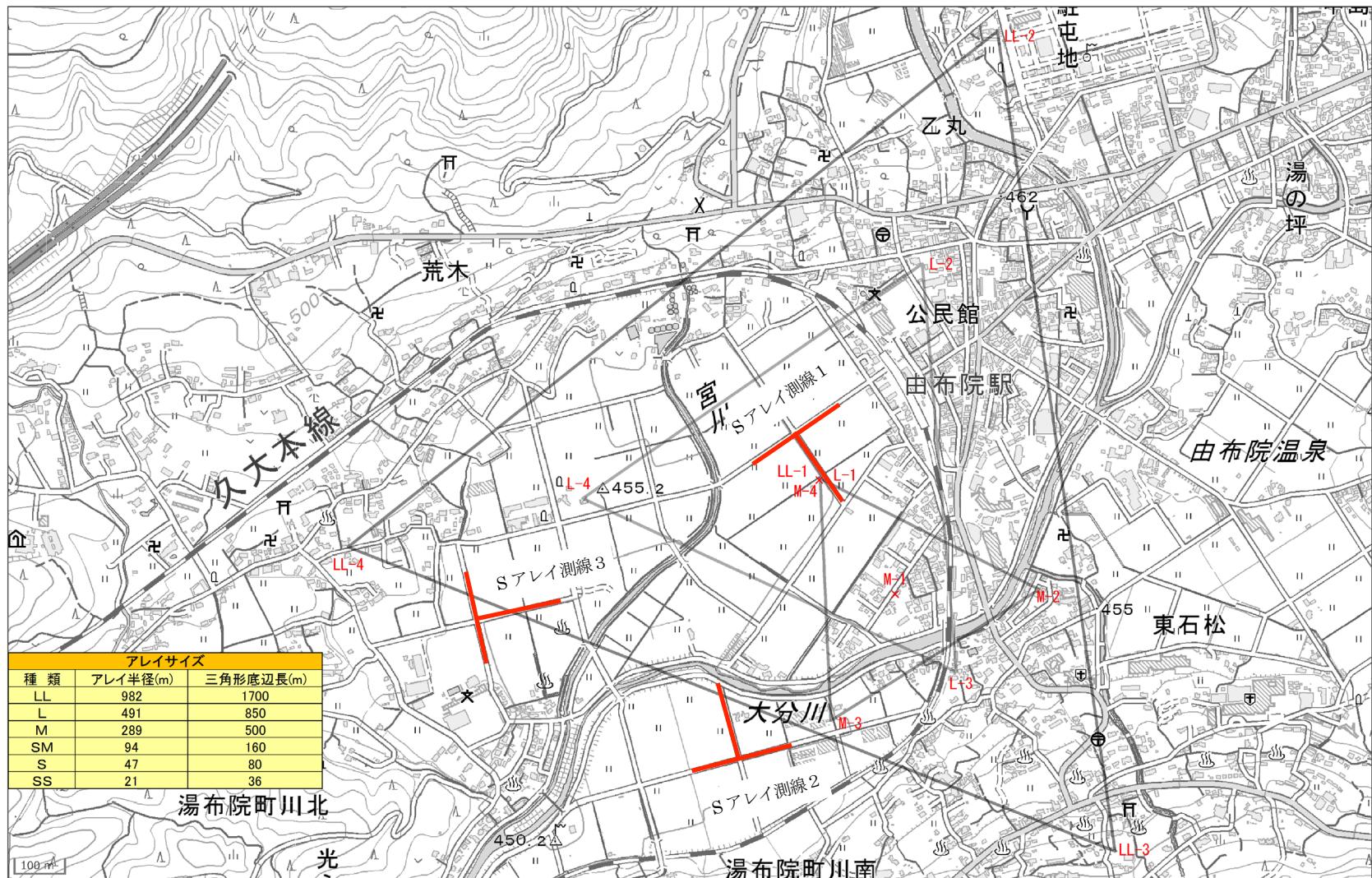


図 3.3.1-24 YUF (湯布院地域) アレイ観測点配置図 (地理院地図を使用)



写真 3.3.1-1 観測の様子（別府扇状地 BIS アレイ）



写真 3.3.1-2 観測の様子（由布院盆地、小半径アレイ測線 3）

### b)微動アレイ観測記録の解析

微動アレイ観測で得られた速度時刻歴データについて、微動アレイ解析ツール「BID02.0」ソフトウェア (Tada et al., 2010) を用いて解析した。ここでは、レイリー波を対象とし、観測記録のうち上下動成分のみを解析に用いた。

本年度は暫定的な解析を行うこととし、観測データからのトレンド成分や交通ノイズ等の除去はソフトウェアのデフォルト機能にて行った。XL、LL、Lアレイのデータに対しては、81.92秒（データ数8192）または163.84秒（データ数16384）を基本区間長さとして波形を切り出した。Mアレイについては40.96秒または81.92秒を基本長さとした。SM、S、SSアレイのデータに対しては、20.48秒を基本区間長さとした。いずれの解析においてもバンドパスフィルタは用いなかった。

前述の通り、本観測におけるアレイ配置は正三角形の3頂点と重心からなる4点アレイである。このアレイ配置では、SPAC法、CCA法 (Cho et al., 2004, 2006), V法 (Tada et al., 2007) などBID02.0に実装されている全ての解析手法が利用できる。本年度は、これらの手法のうち、SPAC法による位相速度を検討に用いる。各種の手法による解析結果の比較は次年度の課題とする。

SPAC法では位相速度が推定可能な表面波の波長はアレイ半径の2~10倍程度（例えば、宮腰ほか, 1996）である。地下浅部から深さ数kmまでの速度構造を推定するためには、短波長（数~10mオーダー）から長波長（10~20km程度）の表面波の位相速度を求める必要がある。これには、大きさの異なる多数のアレイ観測が必要となる。一方、各アレイにおける探査対象の波長域が重なり合うように観測すると、各アレイ観測による結果を統合することで観測の妥当性が判断できる。すなわち、同一地点における半径の異なるアレイ観測から求まる位相速度値が連続的に推移すれば、観測地点の速度構造は急変を伴わないこと、および、観測・解析の妥当性がある程度判断できる。これはV法やCCA法による解析結果の妥当性確認にも重要な情報となる。

図3.3.1-25に、例としてOOT(大津)アレイにおける解析結果を示す。各観測半径に対応する位相速度の推定値が、既往速度構造モデル（J-SHISモデルおよび長周期地震動予測地図（JVM）モデル）の理論位相速度に近い値で重なっている。一方、この重なる領域よりも高周波数側および低周波数側では、解析値は理論位相速度から離れる傾向がある。低周波数側のそれは、長波長域におけるSPAC法の解析能の低下を示す。高周波数側は、解析ソフトウェアの位相速度変換アルゴリズムが空間自己相関係数の振動成分（第一種0次ベッセル関数の振動成分）に対応していないことによるものである。ここでは各観測半径について、SPAC係数の極小点より低周波側で、かつ、SPAC係数が0.9から-0.3程度の範囲（図3.3.1-25の中段参照）の位相速度解析値を採用することとした。この際、ノイズ・シグナル比（NS比；Cho et al. 2006）が低周波数側で上昇する場合には、その周波数で打ち切った。図3.3.1-26に各観測半径での位相速度解析結果から表3.3.1-3に示す周波数範囲を切り出して統合したOOTアレイの（観測）位相速度の暫定値を示す。0.5Hz以下の低周波帯域ではばらつきがあるが、位相速度は概ね1つの値に統合されている。

図3.3.1-27~29に、大分平野、別府、由布院の全18カ所について、統合した位相速度暫定値と既往速度構造モデルの理論位相速度値を重ねて示す。なお、本地域における既往

速度構造モデルの S 波速度最小値は 0.6km/s であり、理論位相速度は 0.6 km/s で打ち切りとなっている。

大分平野（図 3.3.1-27、28）では、0.2Hz から 1 Hz にかけての観測位相速度は理論位相速度（J-SHIS モデルおよび JVM モデル）と概ね調和的である。J-SHIS モデルと JVM モデルの理論位相速度にずれが見られる地点では、観測位相速度は J-SHIS モデルの理論値に近い。大分平野周辺域の速度構造モデルとしては、J-SHIS モデルが概ね妥当であることを示している。高周波数側（概ね 2Hz 以上）の観測位相速度は、概ね浅部の速度構造に対応するが、大分層群、碩南層群分布域（OAK、OND、OMK、OMY、OHD：図 3.3.1-2 参照）のそれは 0.5 km/s 程度の値を示し、地表面がほぼ工学的基盤相当（S 波速度 0.4 km/s 以上）と見なせることがわかる。一方、沖積低地分布域（OOT、OHT、OTR、OOZ、OSG、OSO）の観測位相速度は高周波数域において 0.2 km/s 程度にまで低下する。これらの地域では、S 波速度の小さい層が表層に分布しているため、工学的基盤以浅のモデル化も必要である。なお、OSI は台地と沖積低地にまたがる領域であるが、10Hz 程度の高周波数帯域でも位相速度は 0.4 km/s 程度と大きい。小アレイ観測（OSI-SM、S、SS）を実施した低地でも（図 3.3.1-3 参照）、沖積層が非常に薄い可能性が指摘できる。

別府扇状地（図 3.3.1-29）では、低周波数帯域（概ね 1 Hz 以下）の観測位相速度が理論位相速度よりも大きな値を示す。特に、BSN、BKT の観測と理論値のずれが顕著であり、速度構造モデルの改良が必要と考えられる。ただし、別府扇状地における微動アレイ間の距離は高々 2 km 程度であるが、例えば BFJ と BKT（中心間距離 1 km 程度）の観測位相速度は大きく異なる。これは別府扇状地の速度構造が狭い範囲内で変化することを示している。既往速度構造モデルのメッシュサイズは約 1 km であり、このメッシュサイズでは別府地域の速度構造変化を表しきれないとも言える。速度構造のモデル化で採用するメッシュサイズについての検討が必要であると考えられる。

由布院盆地（図 3.3.1-29 右下）の観測位相速度は、観測半径の異なるアレイ間の連続が悪い。今回の SPAC 法によるアレイ解析結果からは速度構造モデルを一意に決めることができない。由布院盆地は周囲を標高 1000～1500m 級の山々に囲まれた山間盆地である。地形の状況から考えて埋積谷であり、埋積谷の堆積層は、埋没谷の中心軸に近づくほど厚く、山地に近づくほど薄いと考えられる。微動アレイ探査では、観測点を配置する領域の地下構造を平均した速度構造が推定されることと併せ考えると、アレイ観測により、由布院盆地は地下構造の変化が見いだされた可能性もある。観測半径毎の位相速度は連続性がよいことから、由布院盆地における各アレイの観測位相速度を統合せずに、速度構造モデルを検討できる可能性がある。なお、今回の観測ではすべての地点で 3 成分速度計を用いた。このため、アレイ観測の全観測点で水平・上下スペクトル比（H/V スペクトル）が利用可能である。これについては次節（単点微動観測：3.3.2 節）で述べる。

以上のように、固有周期 10 秒の 3 成分速度計を用いて大分平野 12 カ所、別府扇状地 5 カ所、由布院盆地 1 カ所にて最大半径 1 km 程度の微動アレイ観測を実施し、0.2Hz から 5-10Hz の範囲でレイリー波の位相速度の暫定値を得た。既往速度構造モデルから計算される理論位相速度と観測値との比較を行い、今後の速度構造モデルの改良について考察した。

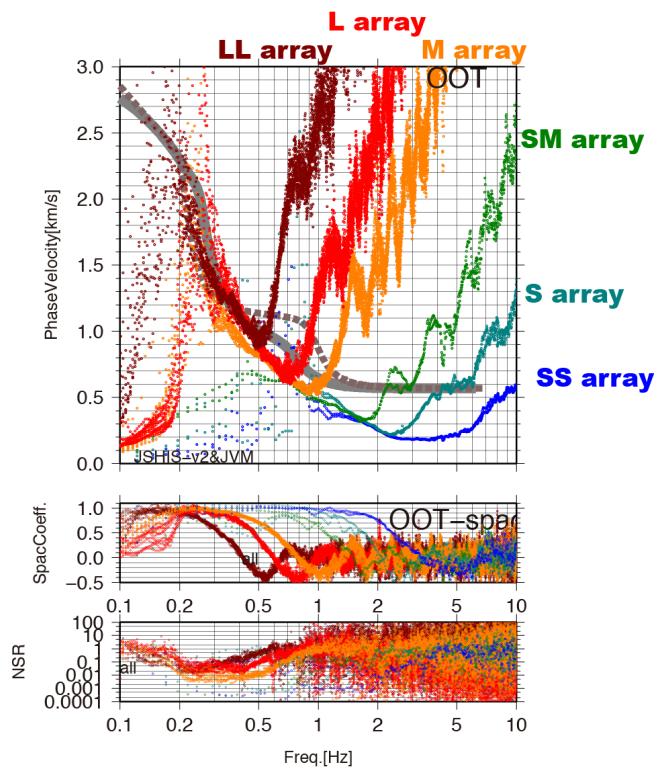


図 3.3.1-25 OOT アレイにおける各アレイ半径に対する解析結果. (上段：位相速度，中段：SPAC 係数，下段：NS 比) (太線は速度構造モデルの理論位相速度。灰線：J-SHIS モデル，点線：JVM モデル)

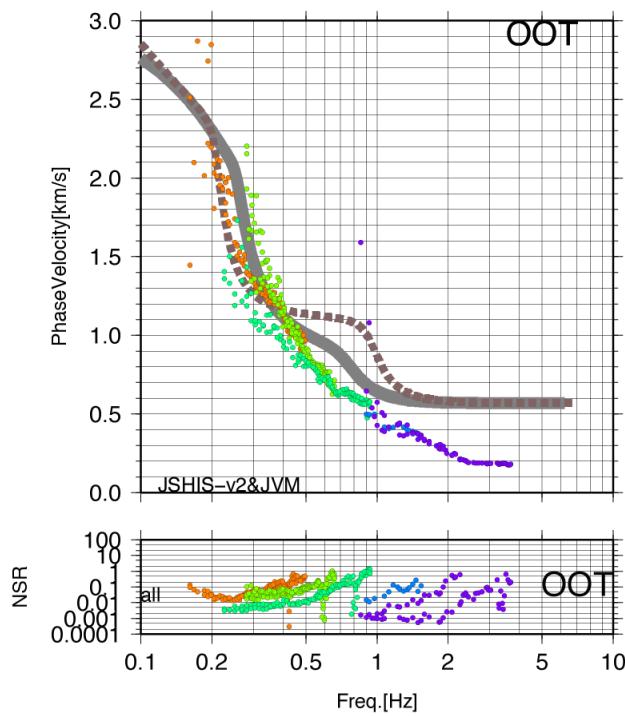


図 3.3.1-26 OOT アレイの位相速度解析統合結果 (観測位相速度暫定値)

表 3.3.1-3 各観測半径に対する位相速度解析結果の使用周波数範囲

	LL アレイ [Hz]	L アレイ [Hz]	M アレイ [Hz]	SM アレイ [Hz]	S アレイ [Hz]	SS アレイ [Hz]
OAK	0.16-0.4	0.18-1.1	0.4-1.3	0.7-3.3	1.5-5.0	2.5-9.0
OOZ	0.18-0.6	0.37-0.74	0.31-1.1	0.82-2.5	0.94-3.6	1.0-5.0
OTR	XL:0.1-0.3 0.25-0.7	0.48-1.05	0.5-1.2	1.0-2.1	1.5-3.0	2.1-4.1
OHT	0.28-06	0.28-0.8	0.37-1.2	0.65-1.9	1.0-2.6	1.7-3.8
OOT	0.16-0.5	0.28-0.66	0.22-0.94	0.9-1.6	0.92-2.4	0.84-3.7
OSG	0.18-0.6	0.28-1.06	0.28-1.4	0.47-2.2	1.4-3.2	0.83-4.7
OSO	0.2-0.6	0.24-0.88	0.25-1.4	0.6-2.6	1.0-3.7	2.6-4.7
OSI	0.16-0.4	0.4-0.9	0.4-1.5	1.0-3.3	2.0-5.0	2.5-9.0
OMY	0.16-0.4	0.4-0.9	0.5-1.5	1.0-3.3	2.0-5.0	2.5-9.0
OMK	0.16-0.4	0.3-0.9	0.5-1.5	0.5-3.3	2.0-5.0	2.5-9.0
OND	0.16-0.4	0.3-0.9	0.4-1.0	1.0-3.3	2.0-5.0	2.5-9.0
OHD	0.16-0.7	0.5-0.9	0.7-1.5	1.0-3.3	2.0-5.0	2.5-9.0
BKT	-	0.56-1.2	0.57-1.7	0.6-3.7	1.9-6.4	3.9-10.0
BFJ	-	0.37-1.0	0.33-1.2	0.6-2.0	1.1-3.0	3.0-6.0
BIS	-	0.37-1.0	0.44-1.2	0.7-2.0	1.2-3.2	0.9-6.0
BSN	-	0.6-1.2	0.5-1.5	1.6-2.6	1.7-4.0	2.1-7.0
BAK	-	0.2-1.0	0.9-1.3	0.9-2.1	1.6-2.8	2.0-5.0
YUF	0.31-0.76	0.31-1.2	0.4-1.0	0.38-2.0	1.0-2.0	2.0-5.0

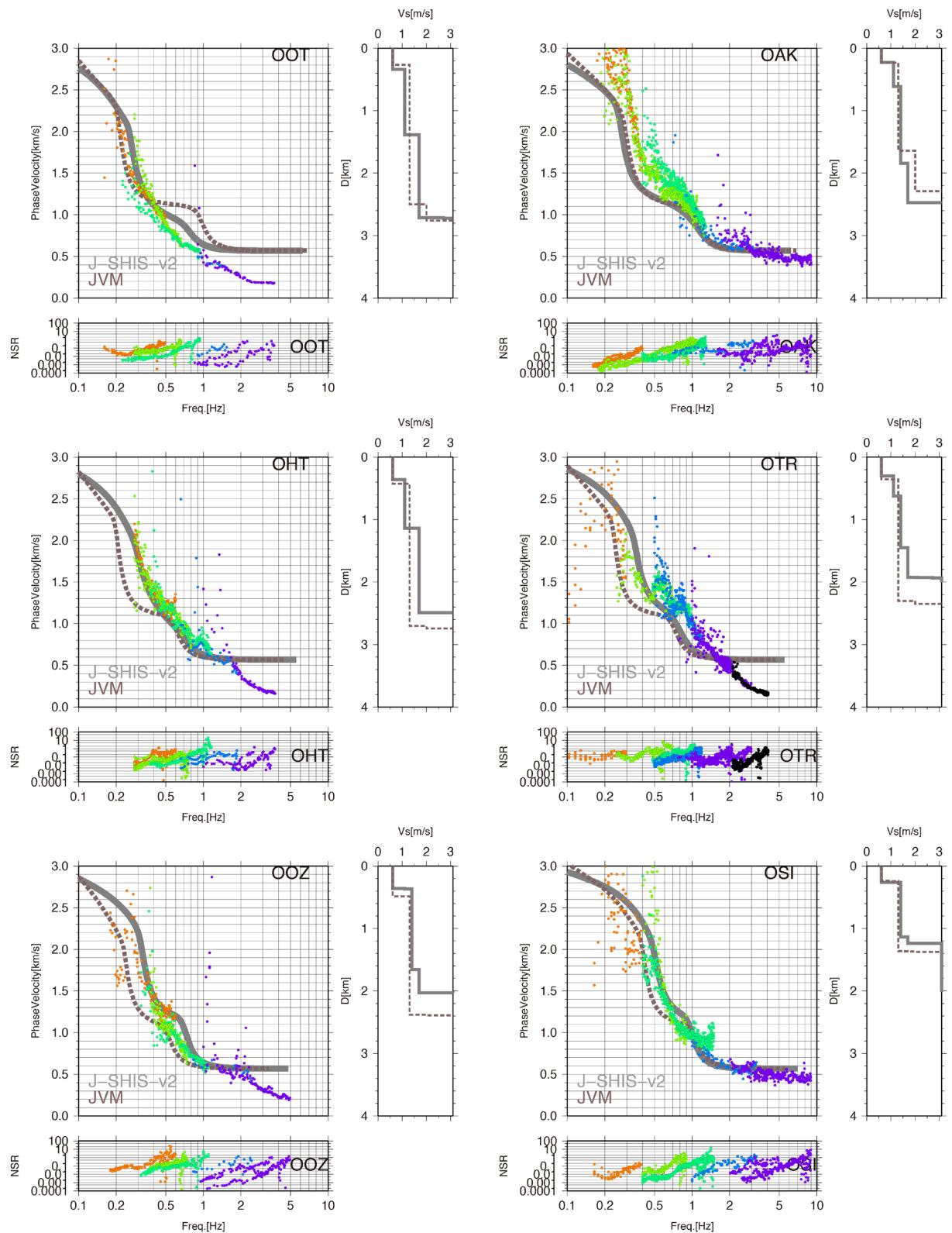


図 3.3.1-27 大分平野における観測位相速度暫定値と既往速度構造モデルに基づく理論位相速度との比較（その 1）（OOT：大津，OAK：明野，OHT：花高松，OTR：鶴崎，OOZ：大在，OSI：坂ノ市）（色の違いはアレイサイズの違いを表す；暖色→大半径。NSR はノイズ・シグナル比、アレイ中心点位置における 1 次元 S 波速度構造）

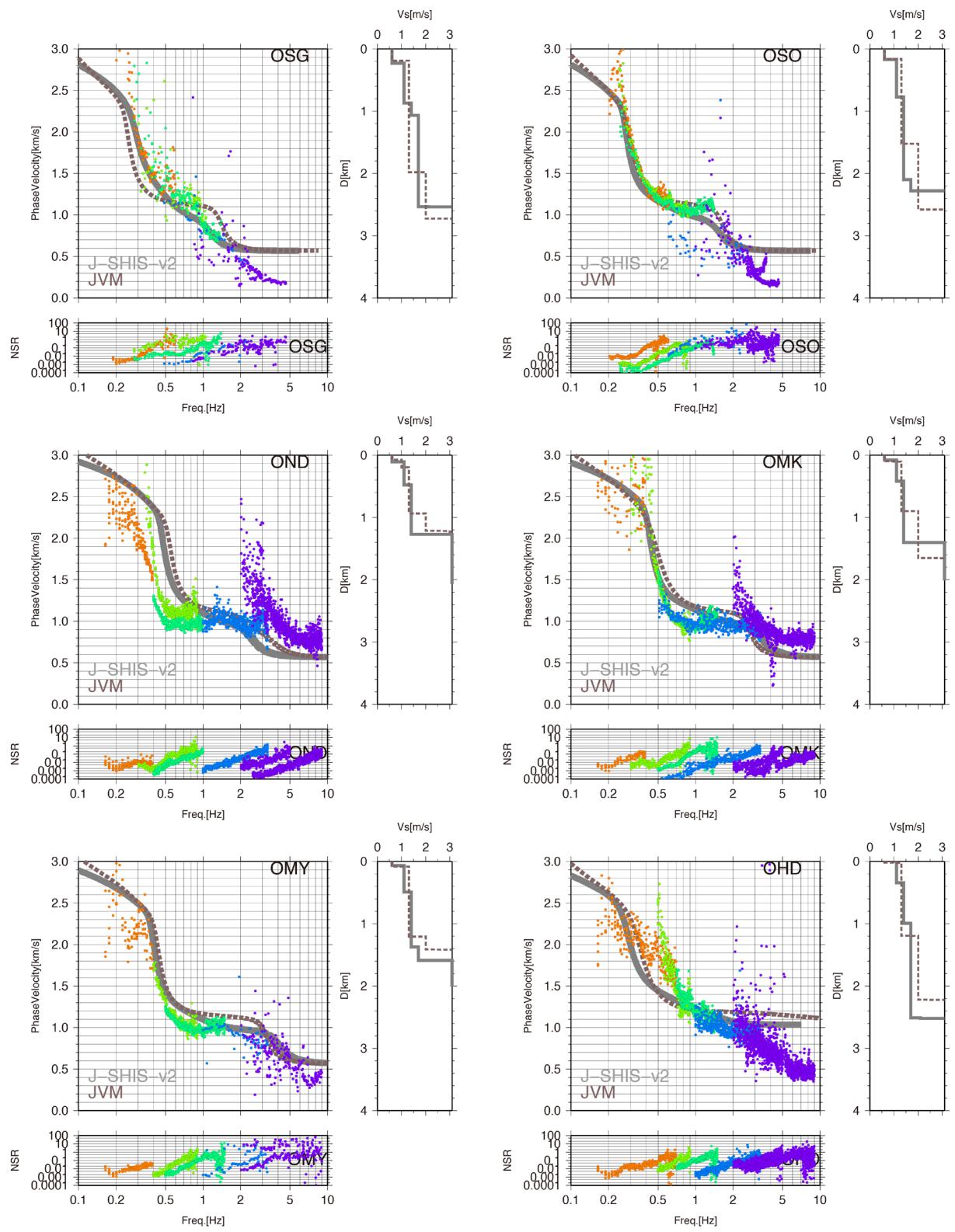


図 3.3.1-28 大分平野における観測位相速度暫定値と既往速度構造モデルに基づく理論位相速度との比較（その 2）（OSG：下郡，OSO：南大分，OND：野田，OMK：宗方，OMY：光吉，OHD：判田）（色の違いはアレイサイズの違いを表す；暖色→大半径。NSR はノイズ・シグナル比、アレイ中心点位置における 1 次元 S 波速度構造）

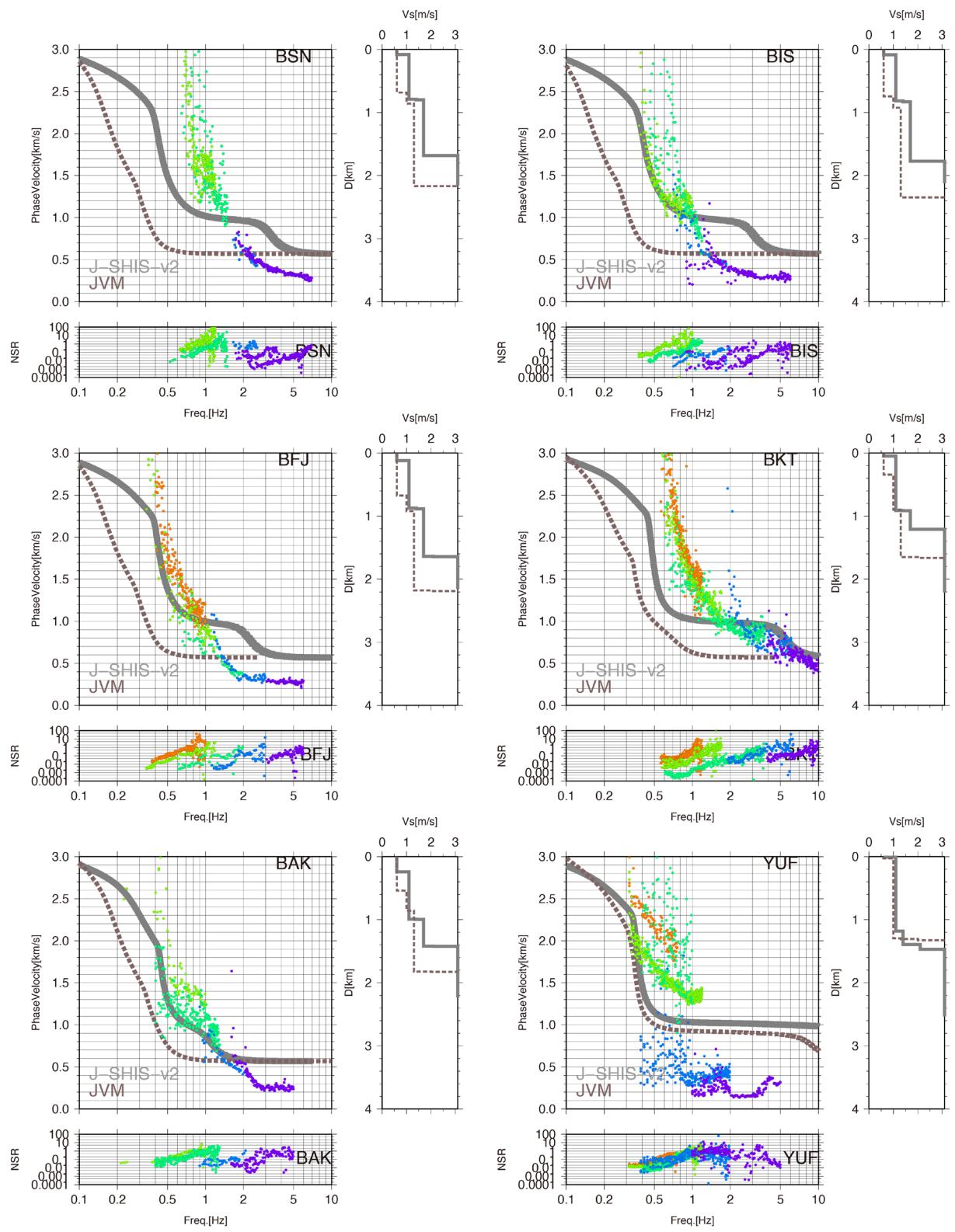


図 3.3.1-29 別府扇状地および由布院盆地の観測位相速度暫定値と既往速度構造モデルに基づく理論位相速度との比較 (BSN: 上人, BIS: 石垣, BFJ: 富士見, BKT: 京大, BAK: 秋葉, YUF: 湯布院) (色の違いはアレイサイズの違いを表す; 暖色→大半径. NSR はノイズ・シグナル比, アレイ中心点位置における 1 次元 S 波速度構造)

## 2) 単点微動観測および小半径微動アレイ観測

### a) 大分平野における単点微動同期観測と小半径微動アレイ観測

大分平野域における浅層地盤の速度構造モデルの高度化を目的として、単点微動同期観測および小半径微動アレイ観測を実施した。

単点微動同期観測は、大分市中心部を東西1測線と南北3測線で実施した。東西測線は約2km間隔で12地点を配し、延長の約22kmとした。南北測線のうち東側（02測線）と西側（03測線）は約1km間隔で10地点を配した延長約9kmとした。南北測線のうち中央（04測線）は北部の4地点を1km間隔、南部6地点を500m間隔の延長約6kmとした。単点微動観測点は図3.3.2-1に示す計42地点にて実施した。単点微動同期観測は、0.1倍から10,000倍のアンプ付可搬型3成分加速度地震計SMAR-6A3P（株ミツトヨ製）とデータ収録装置LS-8800（株白山工業製）を組み合わせた装置を用いた。サンプリング周波数は100Hz、アンプの倍率は500倍として行った。測線ごとにすべての観測点を設置してから1時間以上は同時観測を行い（同期観測）、共通して使える時間帯が1時間以上となるようにした。観測地点一覧を表1に示す。また、東西測線の観測点を写真3.3.2-1～12に、南北測線の3測線（02～04）の観測点をそれぞれ写真3.3.2-13～22、写真3.3.2-23～32、写真3.3.2-33～42に示す。

小半径アレイ微動観測は、大分市の平和市民公園の多目的広場を借用して行った。アレイ微動観測を行った位置を図3.3.2-1にARRAY（表3.3.2-1の観測点コード“ARRAY”がアレイの中心点位置）として示す。中心を共通とする3つ半径の円周上に正三角形となるように地震計を配置する計10地点で観測するセットを、地震計を盛り換えて半径の大きさを変えて2回行った。大きいアレイは半径を36m、12m、4mとし、小さい方のアレイは4.5m、1.5m、0.5mとした。アレイ微動観測では、単点微動観測と同じ可搬型3成分加速度地震計と用いて行ったが、サンプリング周波数は200Hzとした。写真3.3.2-43～44に小半径アレイ微動観測の観測風景を示す。

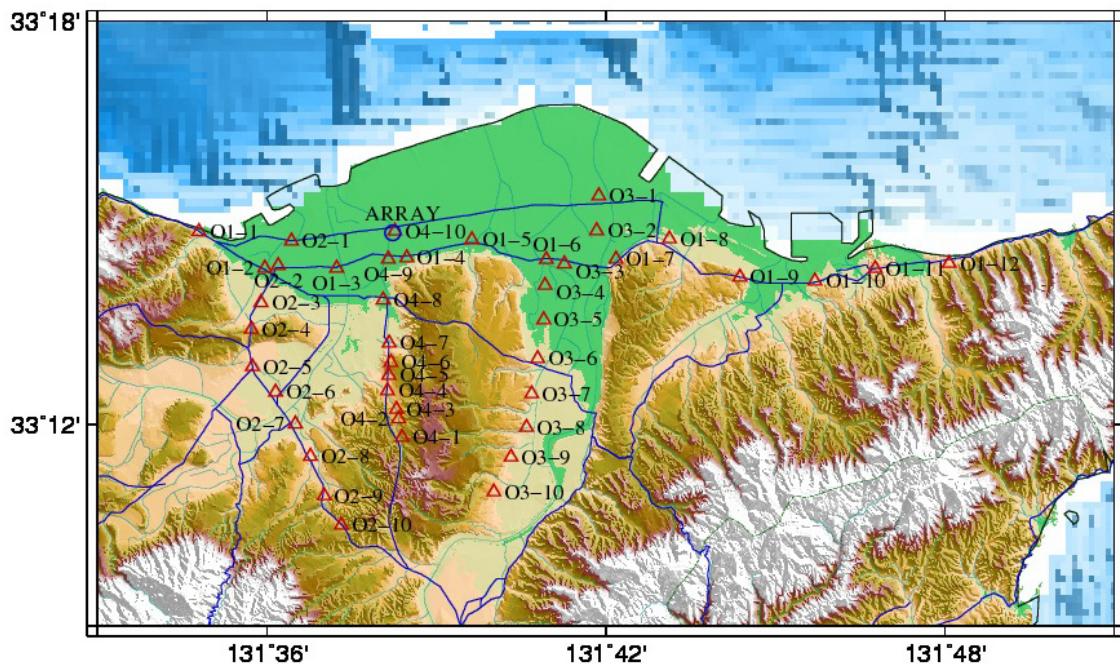


図3.3.2-1 単点微動同期観測点配置（ARRAYは小微動アレイ観測点）

表3.3.2-1 単点微動同期観測点一覧

観測点コード	緯度	北緯)	経度	東経)	観測点コード	緯度	北緯)	経度	東経)
O1-1	33.247800	131.580000	O3-1	33.256700	131.697950				
O1-2	33.238710	131.599400	O3-2	33.248050	131.697360				
O1-3	33.238710	131.620610	O3-3	33.239770	131.687850				
O1-4	33.241280	131.641280	O3-4	33.234430	131.682080				
O1-5	33.245770	131.660430	O3-5	33.225900	131.681660				
O1-6	33.240880	131.682500	O3-6	33.216350	131.679860				
O1-7	33.240980	131.703000	O3-7	33.207560	131.678150				
O1-8	33.246000	131.718783	O3-8	33.199280	131.676570				
O1-9	33.236510	131.739580	O3-9	33.191840	131.672060				
O1-10	33.235570	131.761720	O3-10	33.183200	131.667000				
O1-11	33.238650	131.779540	O4-10	33.247900	131.637800				
O1-12	33.239935	131.801342	O4-9	33.241000	131.635820				
O2-1	33.245460	131.607220	O4-8	33.230850	131.634330				
O2-2	33.239390	131.603350	O4-7	33.220200	131.636140				
O2-3	33.230190	131.598250	O4-6	33.215360	131.636630				
O2-4	33.223530	131.595440	O4-5	33.212120	131.635970				
O2-5	33.214240	131.595700	O4-4	33.208290	131.635640				
O2-6	33.207960	131.602570	O4-3	33.203750	131.638230				
O2-7	33.200040	131.608400	O4-2	33.201380	131.638950				
O2-8	33.192100	131.612920	O4-1	33.196750	131.639880				
O2-9	33.182240	131.616870	ARRAY	33.247434	131.637102				
O2-10	33.174980	131.622020							



写真3.3.2-1 01-1観測点



写真3.3.2-2 01-2観測点



写真3.3.2-3 01-3観測点



写真3.3.2-4 01-4観測点



写真3.3.2-5 01-5観測点



写真3.3.2-6 01-6観測点



写真3.3.2-7 01-7観測点



写真3.3.2-10 01-10観測点



写真3.3.2-8 01-8観測点



写真3.3.2-11 01-11観測点



写真3.3.2-9 01-9観測点



写真3.3.2-12 01-12観測点



写真3.3.2-13 02-1観測点



写真3.3.2-16 02-4観測点



写真3.3.2-14 02-2観測点

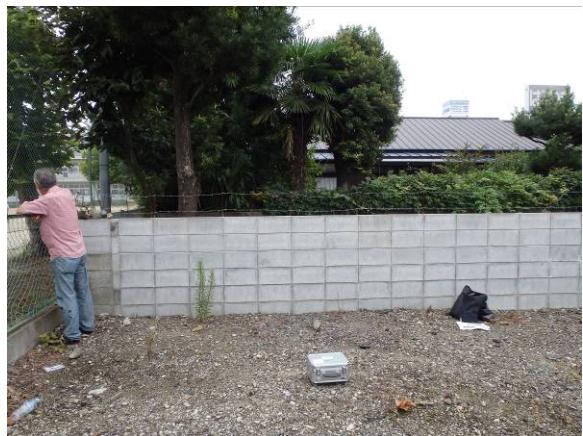


写真3.3.2-17 02-5観測点



写真3.3.2-15 02-3観測点



写真3.3.2-18 02-6観測点



写真3.3.2-19 02-7観測点



写真3.3.2-22 02-10観測点



写真3.3.2-20 02-8観測点



写真3.3.2-23 03-1観測点



写真3.3.2-21 02-9観測点



写真3.3.2-24 03-2観測点



写真3.3.2-25 03-3観測点



写真3.3.2-28 03-6観測点



写真3.3.2-26 03-4観測点



写真3.3.2-29 03-7観測点



写真3.3.2-27 03-5観測点



写真3.3.2-30 03-8観測点



写真3. 3. 2-31 03-9観測点



写真3. 3. 2-34 04-2観測点



写真3. 3. 2-32 03-10観測点



写真3. 3. 2-35 04-3観測点



写真3. 3. 2-33 04-1観測点



写真3. 3. 2-36 04-4観測点



写真3.3.2-37 04-5観測点



写真3.3.2-40 04-8観測点



写真3.3.2-38 04-6観測点



写真3.3.2-41 04-9観測点



写真3.3.2-39 04-7観測点



写真3.3.2-42 04-10観測点



写真3.3.2-43 大きい半径の小半径アレイ微動観測の観測風景（半径36m、12m、4m）  
(平和市民公園多目的広場)



写真3.3.2-44 小さい半径の小半径アレイ微動観測の観測風景（半径4.5m、1.5m、0.5m）(平和市民公園多目的広場)

単点微動同期観測で得られた観測加速度時刻歴データから全地点で共通する1時間を使って解析を行い、各観測点における水平上下スペクトル比を求めた。まず時刻歴データから40.96秒の時間区間に切り出す。この際、切り出し開始時刻は20.48秒ごととし、時間区間が半分重複するようにした。時間区間ごとに3成分（南北成分（NS）、東西成分（EW）、上下成分（UD））ごとにパワースペクトルを計算し、水平2成分をそれぞれ上下成分で除した後に平方根をとって、成分別の水平上下スペクトル比、つまりNS/UDとEW/UDを求めた。交通振動の影響が顕著な時間区間は除外し、使用可能な時間区間を全て平均したものを各観測点の観測水平上下スペクトル比とした。図3.3.2-2に東西測線の各観測点で得られた水平上下スペクトル比を示す。縦軸がスペクトル比で横軸は振動数であり、青線がNS/UD、赤線がEW/UDである。図3.3.2-3～5には、3つの南北測線、南北測線1（02）、南北測線2（03）、南北測線3（04）の各観測点で得られた水平上下スペクトル比を示す。

水平上下スペクトル比にピークが顕著に認められる観測点は水平成分の增幅が大きくなる地点であり、顕著に認められない観測点は水平成分の增幅がほとんどない硬質な地盤であることがわかる。例えば、東西測線の西端の01-1観測点は盆地から外れた地点のためピークが認められず全振動数で水平上下スペクトル比が1になっている一方で、4km離れた01-3観測点では1Hz付近にピークが見られこの振動数での地盤增幅が見込まれる。測線の観測点を比較すると水平上下スペクトル比が似た傾向にある観測点とそうではない観測点があり、水平上下スペクトル比から表層地盤特性の地域性を把握することが可能であることを示唆している。

小半径微動アレイ観測で得られた観測加速度時刻歴データについて、レイリー波の位相速度を求める微動アレイ解析ツール「BID02.0」（Tada et al., 2010）を用いて解析を行った。その結果、図3.3.2-6の位相速度の分散曲線が得られた。

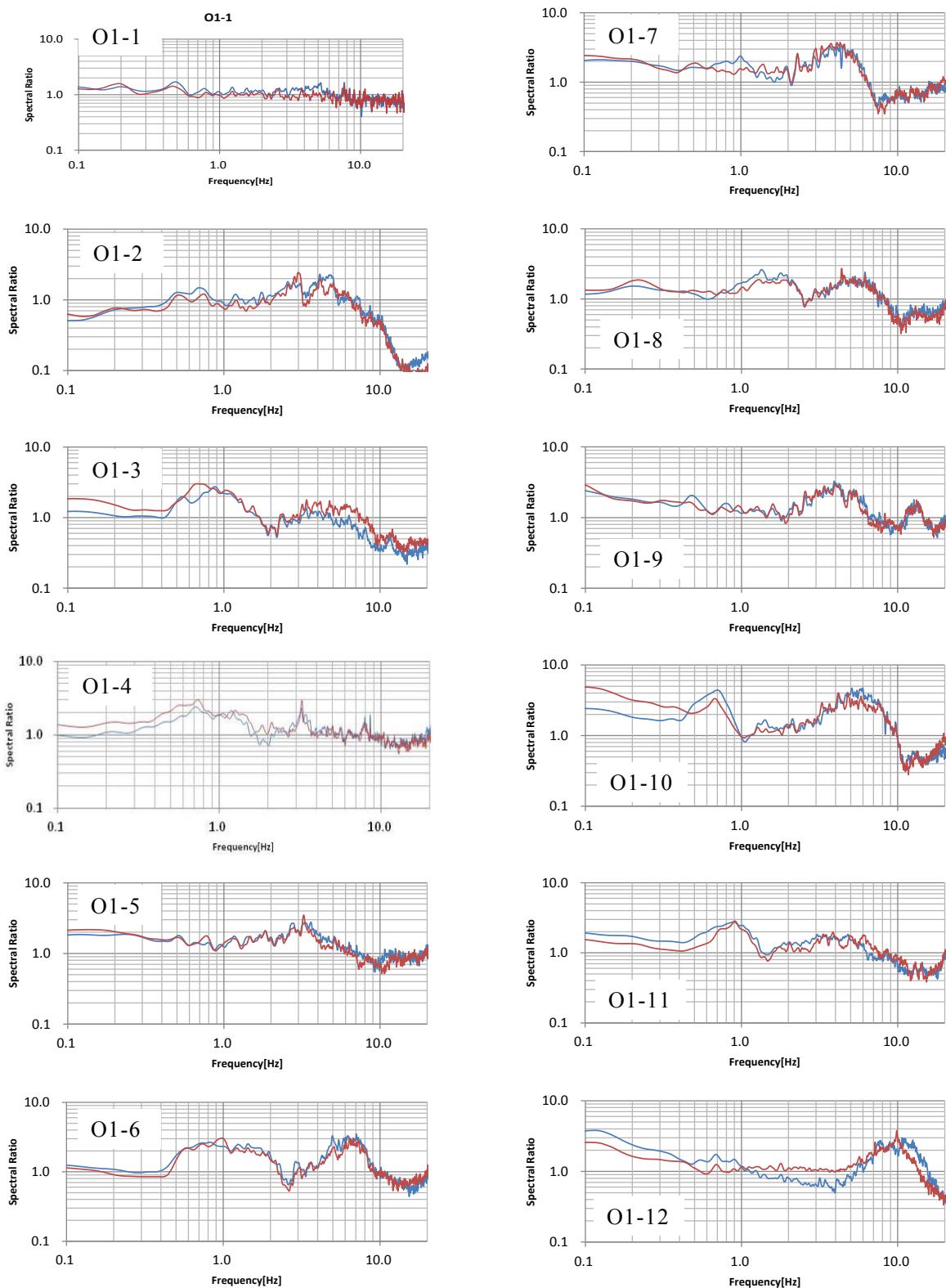


図3.3.2-2 単点微動同期観測の東西測線（01）の水平上下スペクトル比  
(青線：NS/UD、赤線：EW/UD)

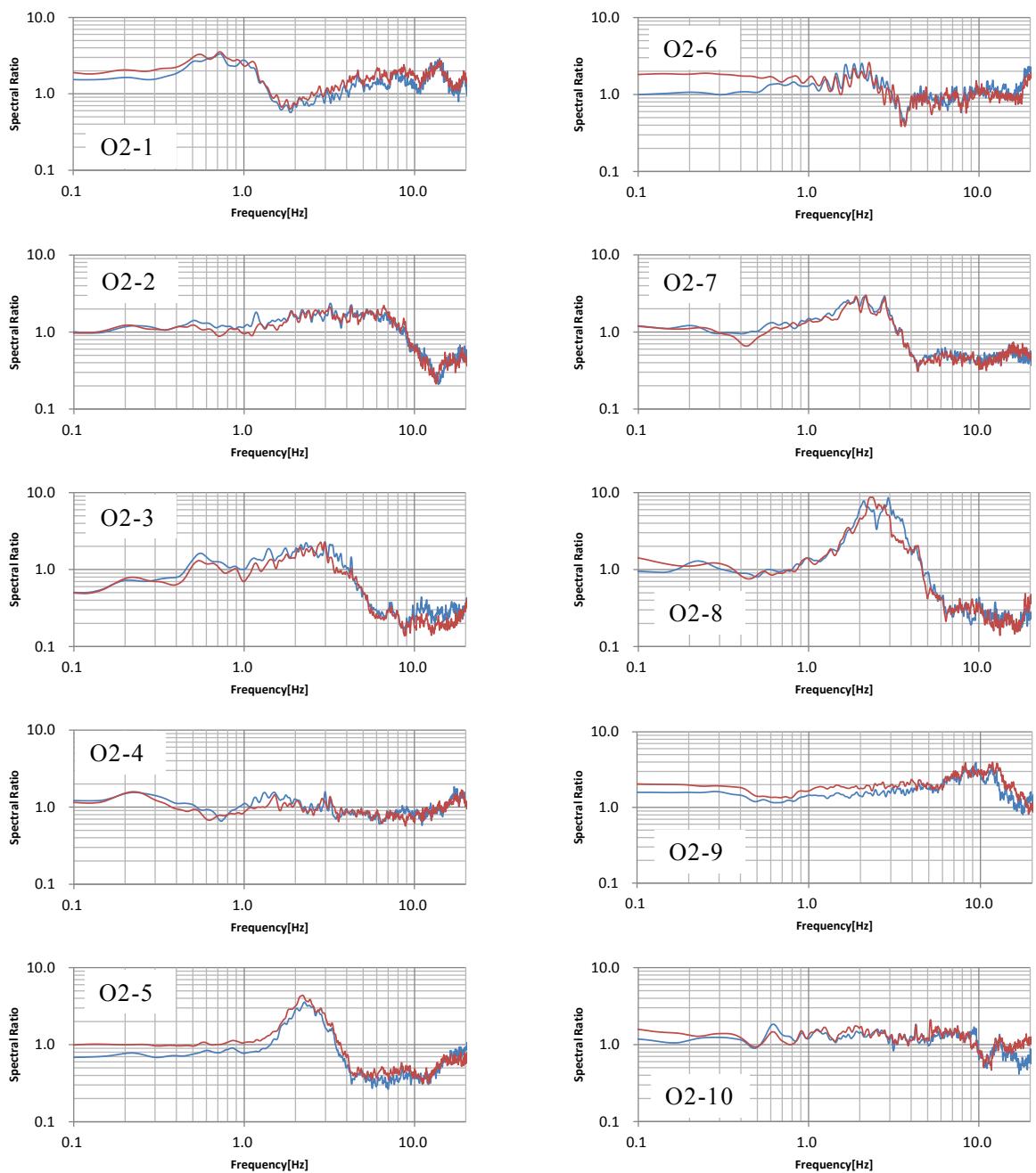


図3.3.2-3 単点微動同期観測の南北測線1(02)の水平上下スペクトル比  
(青線: NS/UD、赤線: EW/UD)

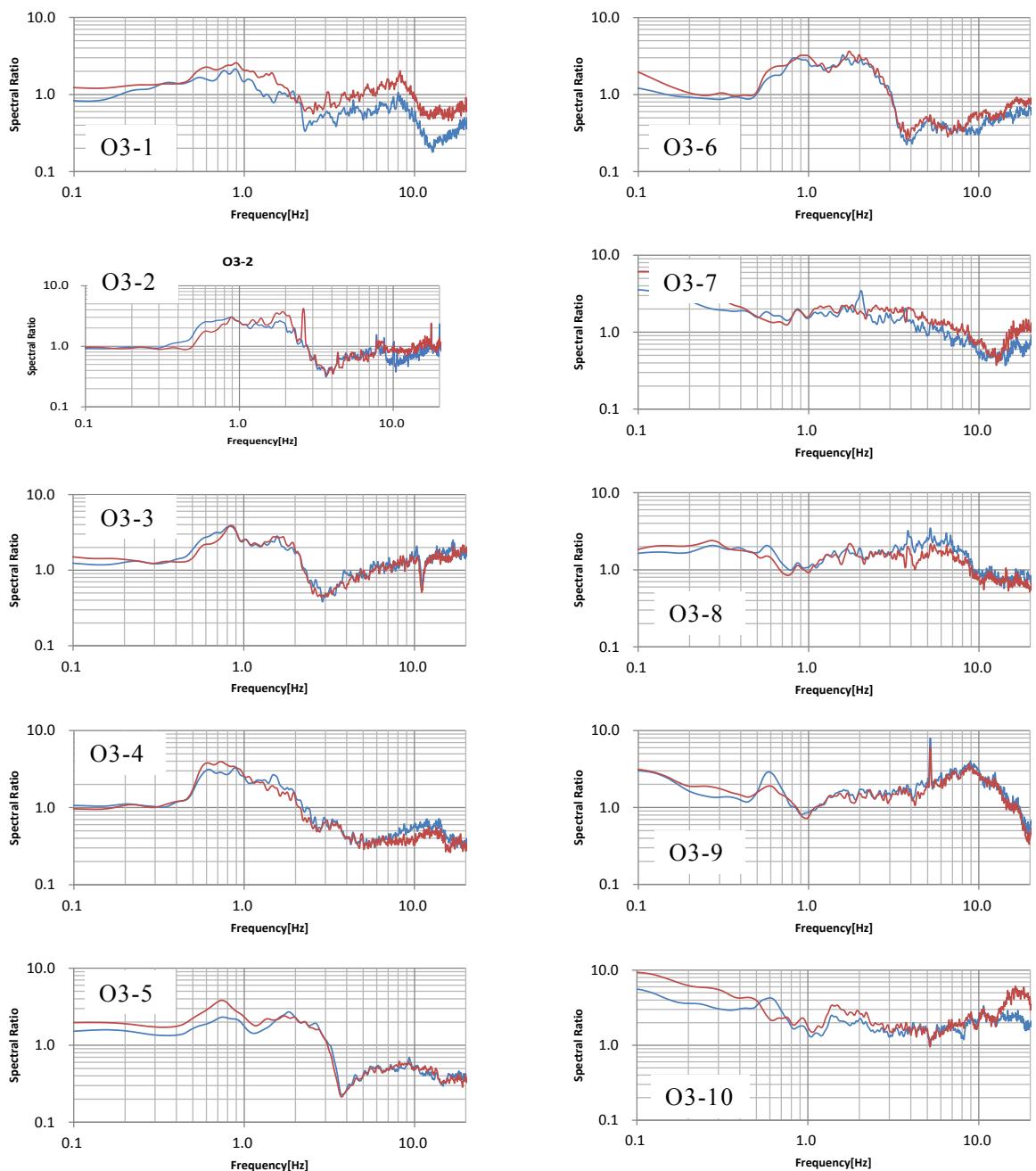


図3.3.2-4 単点微動同期観測の南北測線2（03）の水平上下スペクトル比  
(青線：NS/UD、赤線：EW/UD)

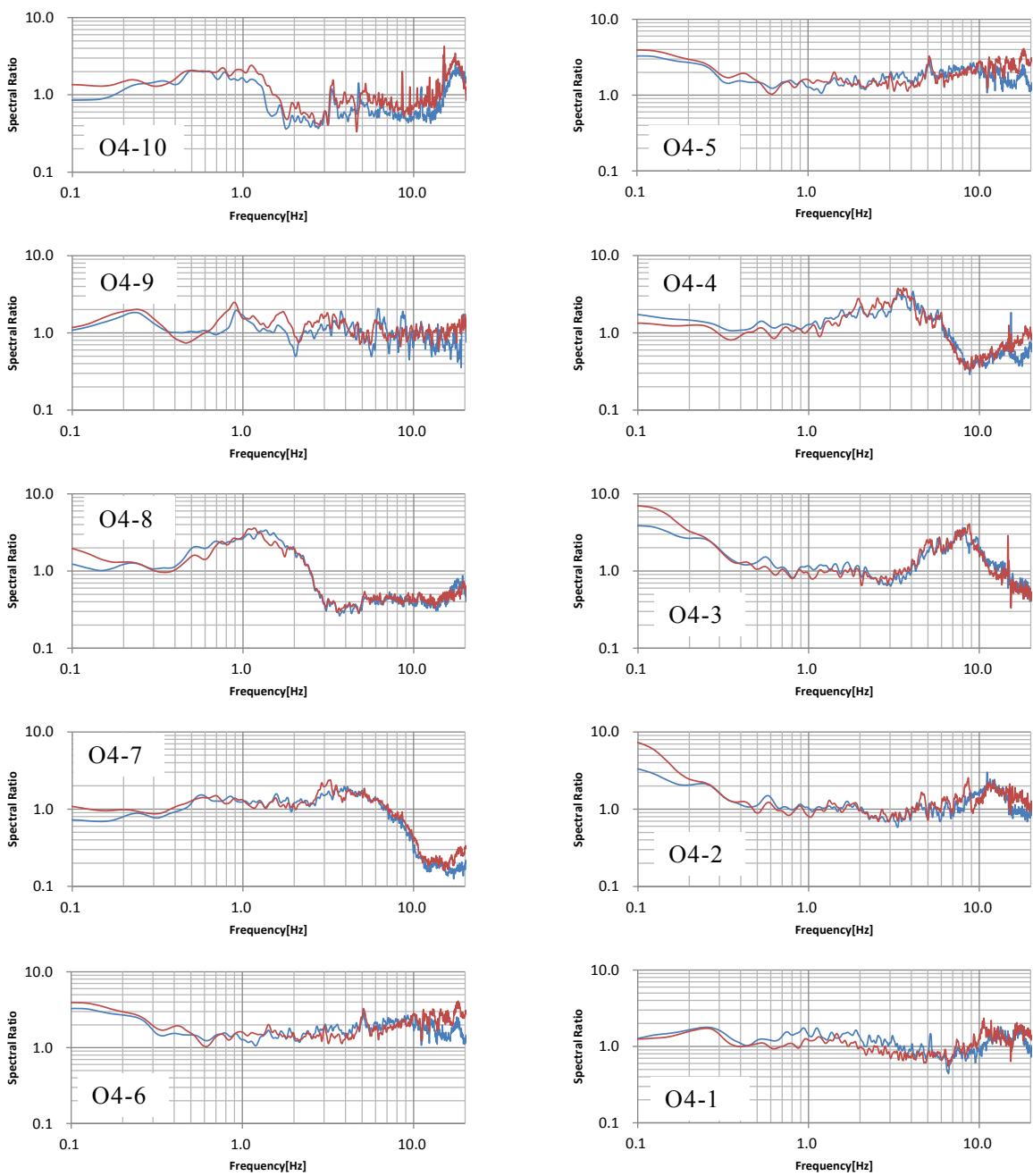


図3.3.2-5 単点微動同期観測の南北測線3（04）の水平上下スペクトル比  
(青線：NS/UD、赤線：EW/UD)

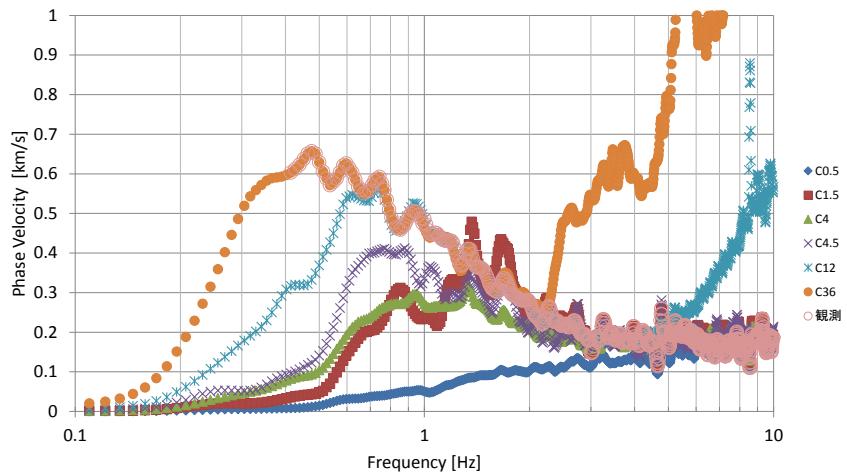


図3.3.2-6 アレイ微動観測データから求めたレイリー波の位相速度（平和市民公園）

### b) 別府湾周辺の広域における単点微動観測および小半径微動アレイ観測

別府湾周辺全体の速度構造モデルの高度化を目的として、3成分速度計を用いた単点微動観測と小半径微動アレイ観測を実施した。

#### i) 速度計を用いた単点微動観測

既往の地下構造モデル（J-SHIS モデル, JVM モデル）では、本地域の基盤深度には重力異常を基にした推定値（Kusumoto et al. 1996）が用いられているが、反射法地震探査が実施されている別府湾や大分平野を除くと基盤深度の検証は不十分である。そこで、重力異常が Low を示す地域（図 3.3.2-7）にて単点微動観測を実施し、卓越周期等の地下構造に関する情報を蓄積した。



図3.3.2-7 別府湾周辺の重力異常分布（仮定密度  $2.67 \text{ g/cm}^3$ ：産業技術総合研究所）と単点微動観測の対象地域（庄内-別府、日出-杵築、坂ノ市）（基図は地質図 NAVI）

観測にあたっては、観測対象地域のうち山間部では微動レベルが低いと推定されること、既往速度構造モデルからは地盤の卓越周期が最大で 10 秒にも達すると推定されることから、主に次の条件を満たす観測機器を選定し導入することとした。

### 1) 速度計

- ・固有周期 20 秒以上で 3 成分（水平 2 , 鉛直 1 ）の速度センサー
- ・防水防塵構造
- ・感度 400V/m/s 以上
- ・微動測定時の 0.08-10Hz 帯域の機器間のコヒーレンス 0.95 以上
- ・低消費電力（1.2W 以下）
- ・クランプ止めしない構造
- ・軽量（7kg 以内）

### 2) データロガー

- ・速度計から出力される 3 成分の信号を入力できること
- ・GPS 信号による時刻校正
- ・24bit 以上の形式分解能
- ・128dB 以上のダイナミックレンジ
- ・小型軽量かつ低消費電力
- ・大容量の汎用的記録媒体（SD カード）に対応していること

以上の条件を満たすものを仕様・価格面から精査し、速度計は Lennartz electronic 社製の 3 成分速度計 LE-3D/20s, データロガーは白山工業製 LS-8800 が選定された。これらを 4 台ずつ導入した（写真 3.3.2-45）。



写真 3.3.2-45 導入した固有周期 20 秒の 3 成分速度計（LE-3D/30s）とデータロガー  
(LS-8800 : プラスチックケース内の黒い装置)

今回導入した 20 秒速度計を用いた単点微動観測地点、および小半径微動アレイ観測地点を図 3.3.2-8 に示す。単点微動観測は大分平野東端部の坂ノ市付近、由布市から別府にかけての山間部（低重力異常を縦断する測線）、日出町-杵築市にかけて（重力異常の低い地域）にて実施した。小半径微動アレイ観測は、大半径微動アレイ観測（3.3.1 節）を補完する地点で実施した。同図には、大分平野、別府扇状地および由布院盆地で実施した大半径微動アレイ観測（3.3.1 節）における観測地点も併せて示す。なお、小半径微動アレイ観測と大半径微動アレイ観測は 12 台の同時測定を基本としたため、産業技術総合研究所が所有する固有周期 10 秒の 3 成分速度計を用いている。

観測にあたっては、データロガーと駆動用 12V 鉛バッテリーをプラスチックケースに入れ、これらを速度計と接続して使用した。速度計は水平成分を南北（磁北）、東西方向に合わせ、水平をとった後、センサー全体をプラスチックバケツで覆った。観測の様子を写真 3.3.2-46 に示す。

図 3.3.2-9 および図 3.3.2-10 に単点微動観測による水平/上下スペクトル比（H/V スペクトル）を示す。既往速度構造モデルのレイリー波基本モード楕円率に基づく H/V 比も図に併せて示す。観測地点の名称は、観測年月日 20yy 年 mm 月 dd 日と観測地域名 site（図 3.3.2-8 参照）を基に yyymmddsite-number が基本となっている（例外あり）。

坂ノ市アレイ（SAKA01～08）では、番号が若いほど海寄りであるが、海から内陸に向かうにつれて H/V スペクトルの 0.1Hz から 1Hz の間のピーク位置が高周波数側に移動する。この地域では重力異常分布（図 3.3.2-7）に基づくと内陸ほど基盤深度が小さくなっていると想定されるが、卓越周期が短周期化することとよく対応すると考えられる。また、杵築地域（KTK）では、0.1Hz から 1Hz にかけて明瞭なピークが見られる地点が存在し、既往速度構造モデルの H/V 理論値のピークと対応する（150203KTK-01～07 など）。重力異常の Low 地域を縦断する庄内-別府アレイでは、低周波数側に不明瞭ながらも H/V スペクトルのピークがあり、既往速度構造モデルの H/V 理論値とも概ね対応するように見られる地点（150203SB-01～03, 09～12 など）とピークが判然としない地点がある。単点微動観測に基づく H/V スペクトルは、深部速度構造を拘束する上で重要な情報を保持していると考えられるが、今後の精査が必要である。

大半径微動アレイ観測（3.3.1 節）の観測点における H/V スペクトルと既往モデルからの H/V 理論値（レイリー波楕円率）を図 3.3.2-11 から図 3.3.2-16 に示す。XL, LL, L アレイの全観測点と SM アレイ中心点について示す。詳細な解析は次年度以降の課題である。

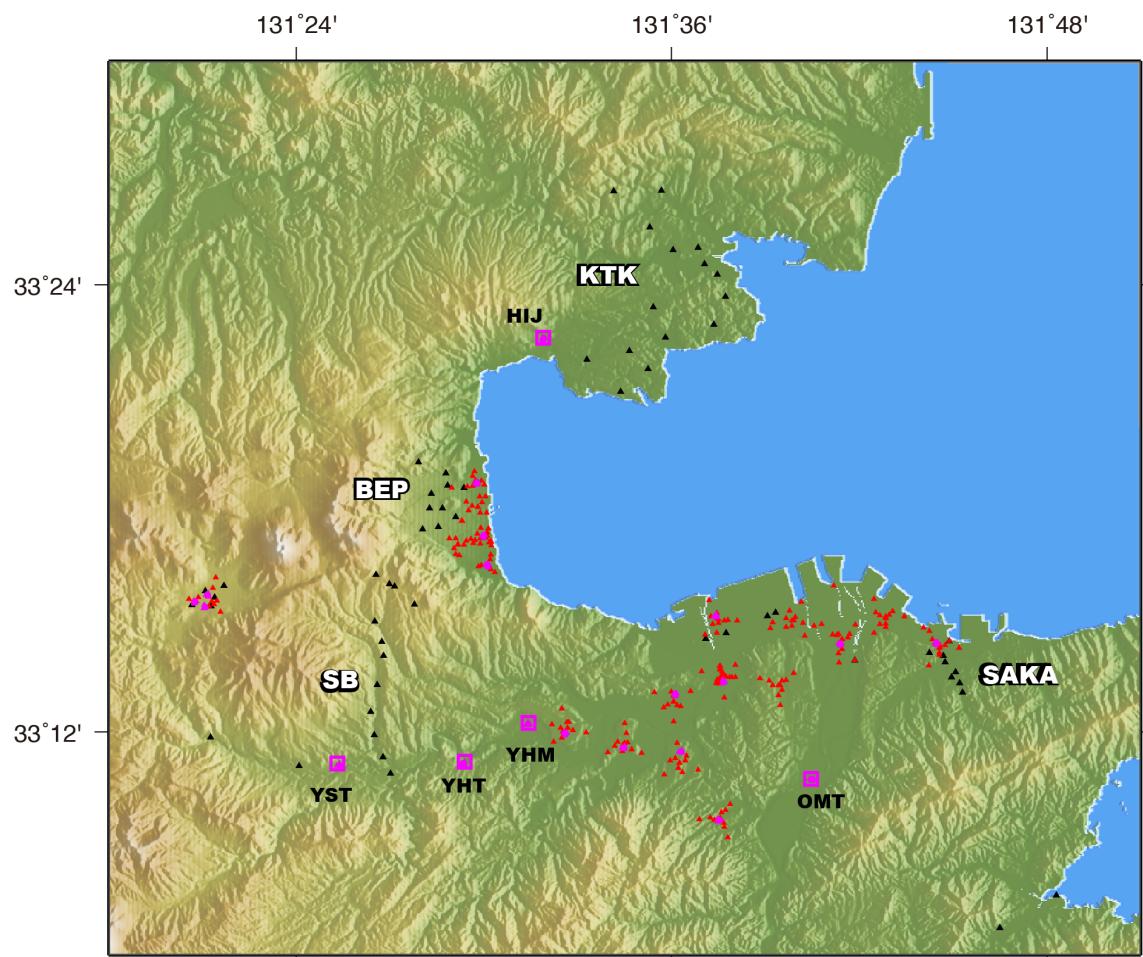


図 3.3.2-8 別府湾周辺広域における単点微動観測地点および小半径アレイ観測分布図（黒三角：単点微動観測（20秒計）、赤紫四角：小半径アレイ観測、赤三角：大半径微動アレイ観測点（3.3.1 参照））（白抜き字：単点微動観測領域名（KTK：杵築、BEP：別府、SB、庄内-別府、SAKA：坂ノ市）、黒字：小半径アレイ名（HIJ：日出町、YST：由布市庄内町高岡、YHT：由布市挟間町谷、YHM：由布市挟間町挟間、OMT：大分市松岡））



写真 3.3.2-46 単点微動観測の様子（左：別府市内、右：神楽女湖）（速度計はバケツ内、ロガー等はプラスチックケース内に格納）

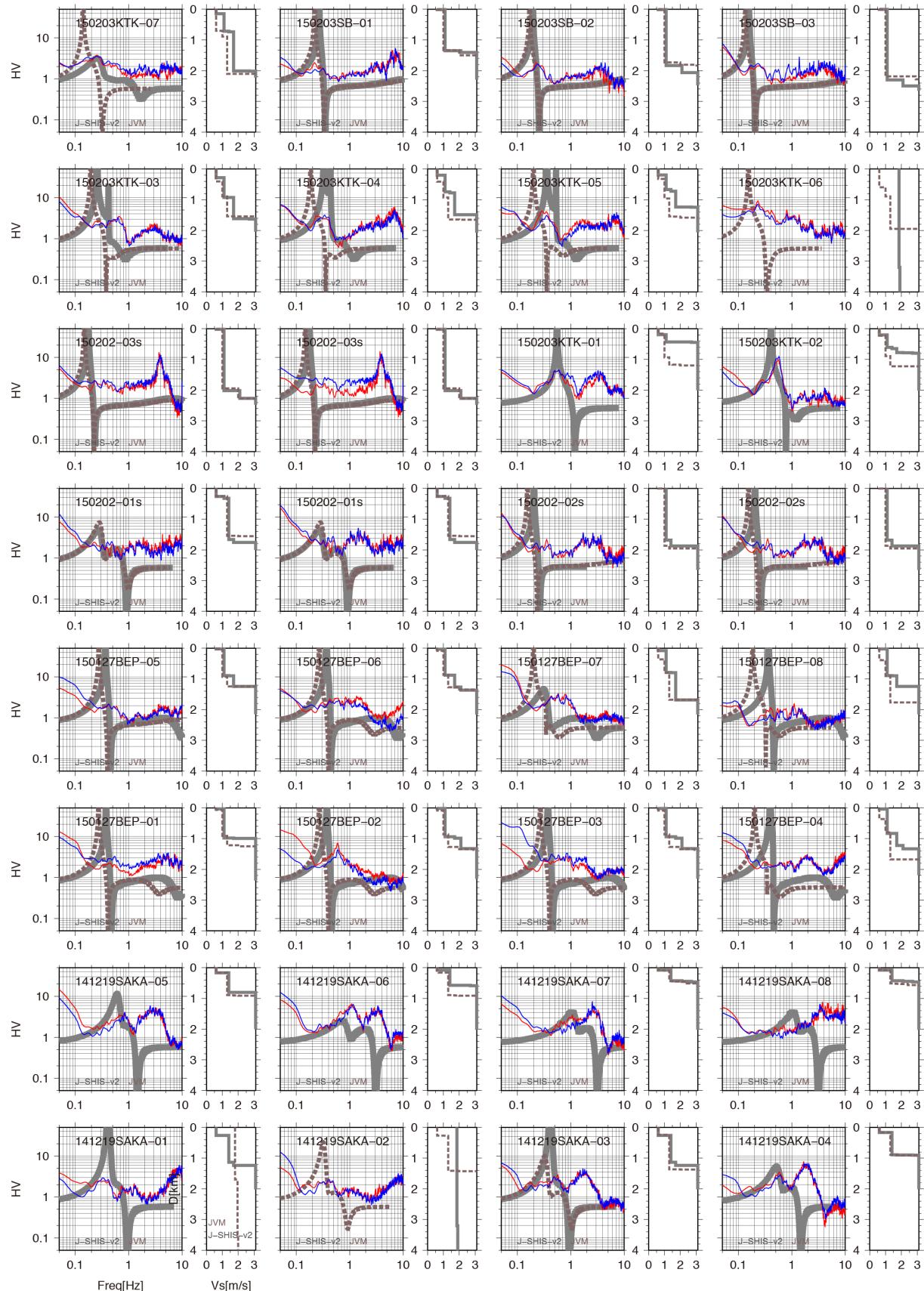


図 3.3.2-9 20 秒速度計を用いた別府湾周辺域の単点微動 H/V スペクトル（その 1）（赤：EW/UD, 青：NS/UD, 太線は既往速度構造モデルのレイリー波梢円率 H/V）

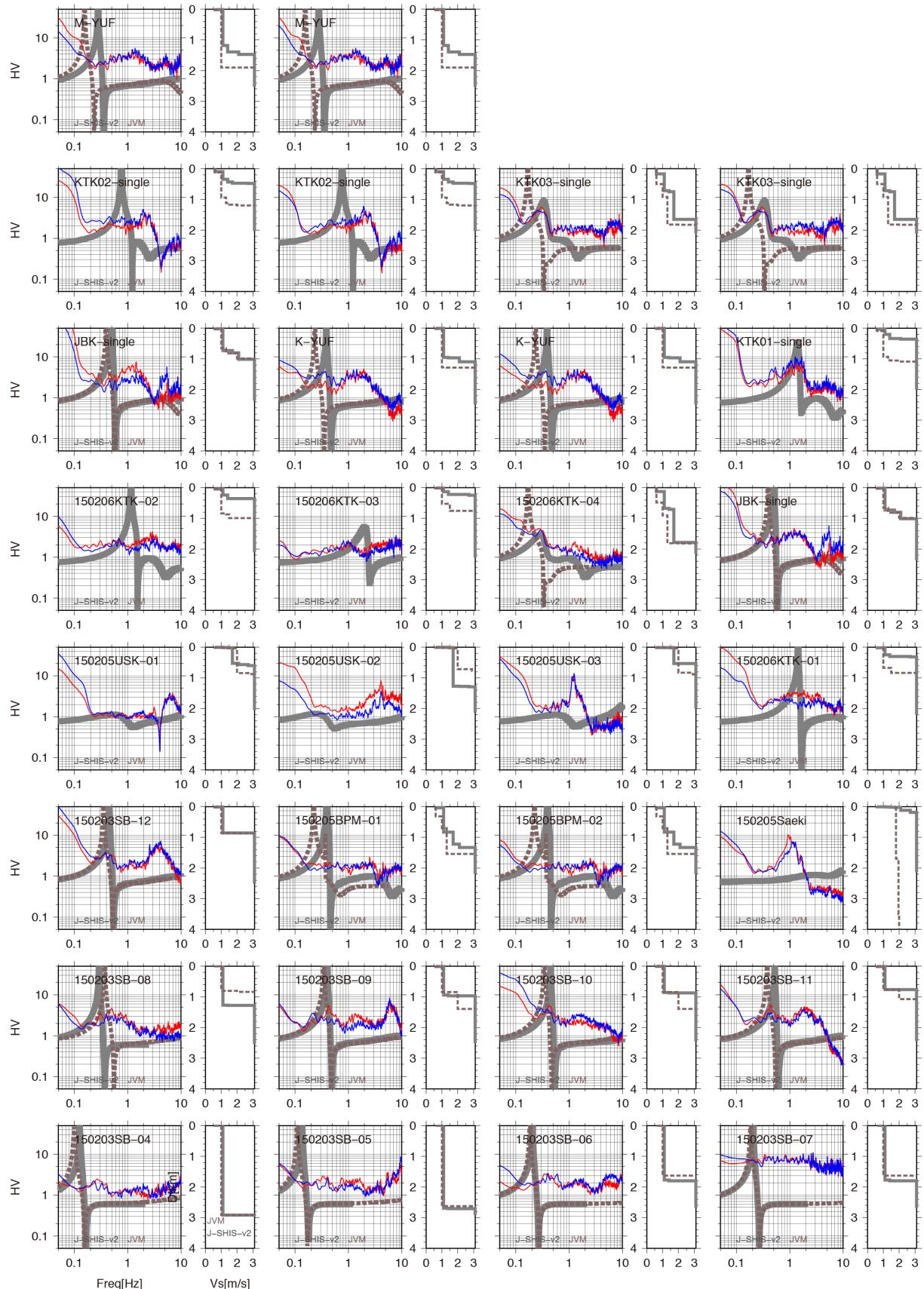


図 3.3.2-10 20 秒速度計を用いた別府湾周辺域の単点微動 H/V スペクトル(その 2)(赤 : EW/UD, 青 : NS/UD, 太線は既往速度構造モデルのレイリー波梢円率 H/V)

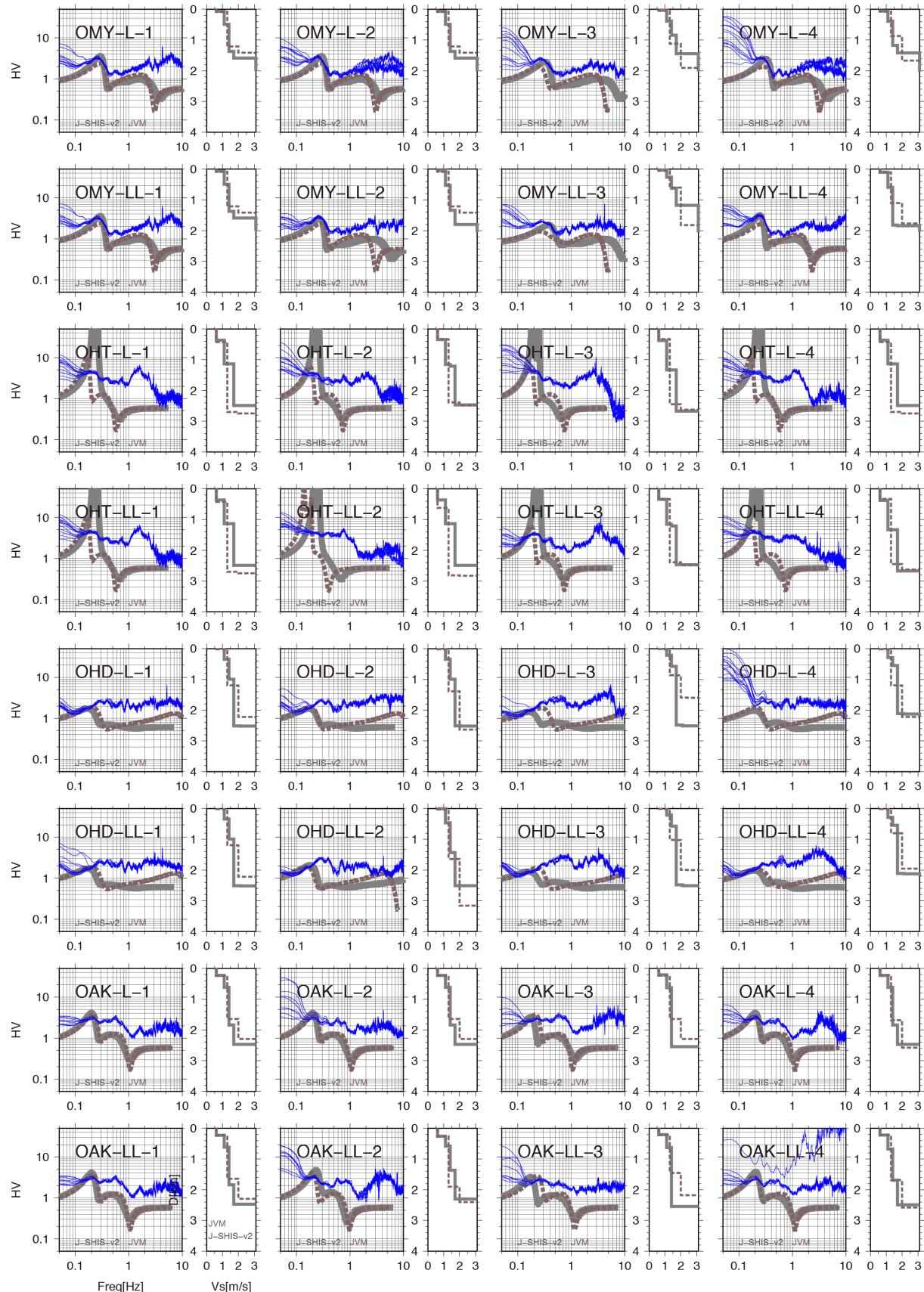


図 3.3.2-11 大半径微動アレイ観測点毎の微動 H/V スペクトル(その 1)(青:水平動/UD,  
太線は既往速度構造モデルのレイリー一波梢円率 H/V)

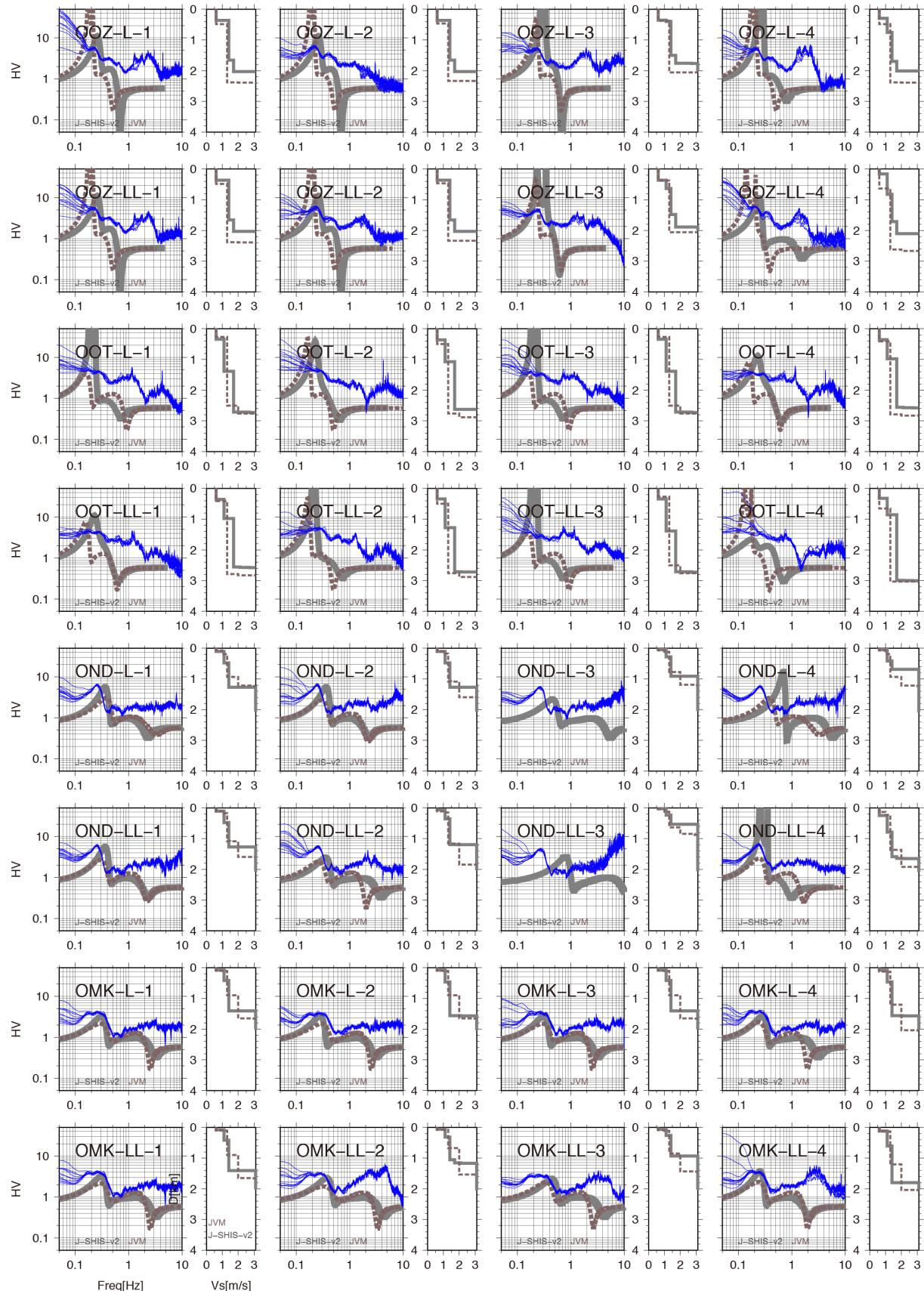


図.3.3.2-12 大半径微動アレイ観測点毎の微動 H/V スペクトル(その 2)(青:水平動/UD,  
太線は既往速度構造モデルのレイリー一波樽円率 H/V)

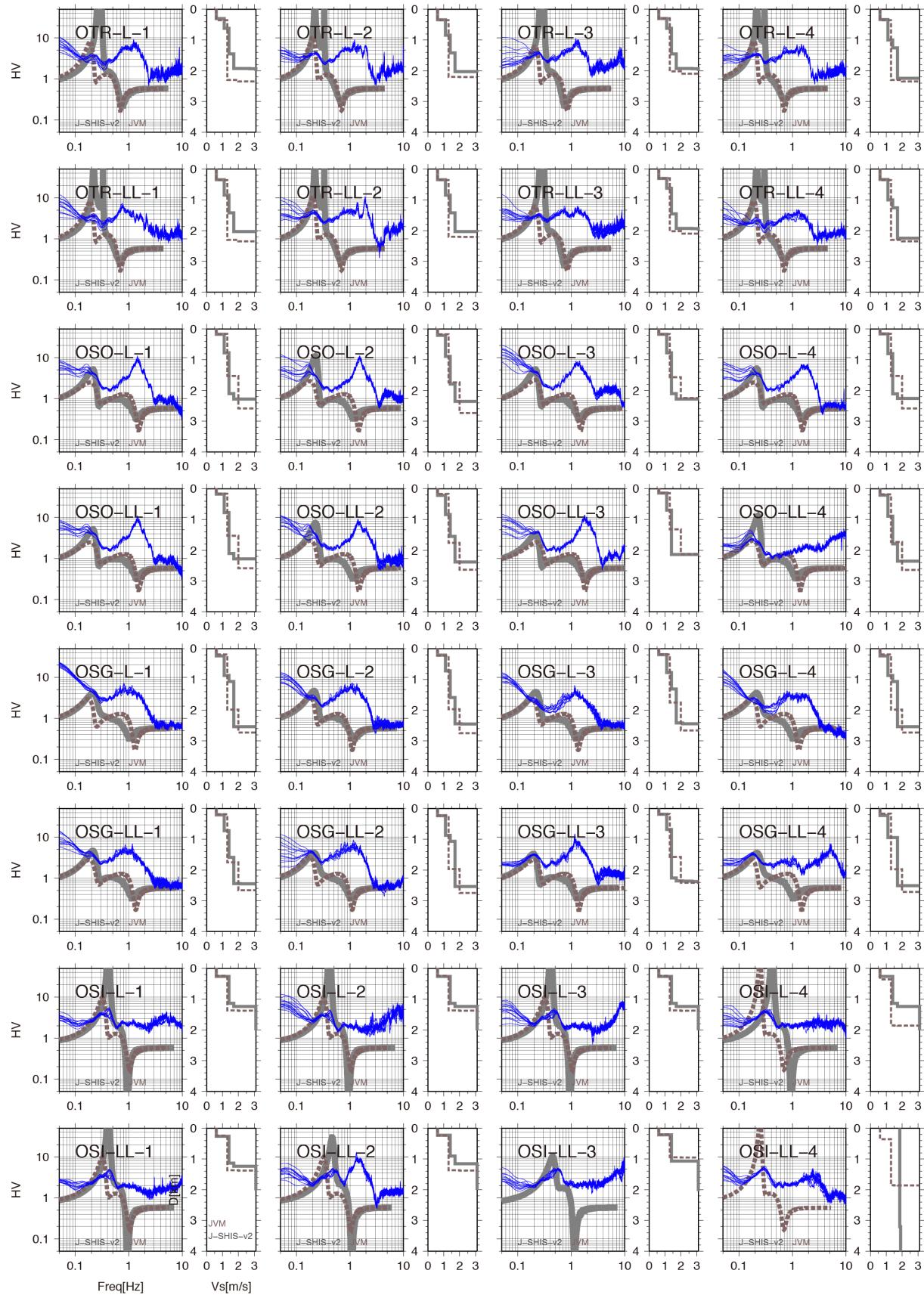


図 3.3.2-13 大半径微動アレイ観測点毎の微動 H/V スペクトル(その 3)(青:水平動/UD,  
太線は既往速度構造モデルのレイリー一波槽円率 H/V)

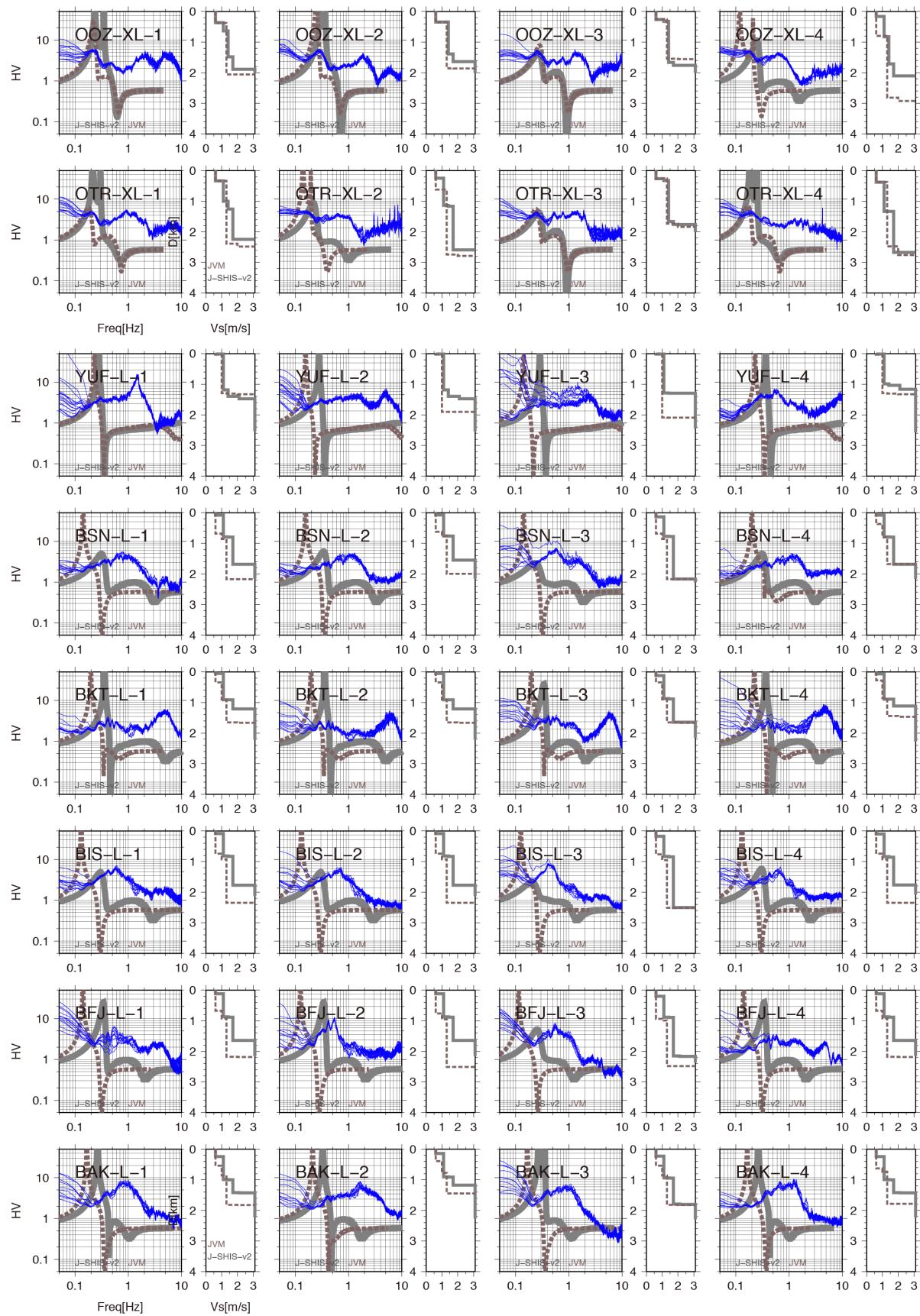


図 3.3.2-14 大半径微動アレイ観測点毎の微動 H/V スペクトル(その 4)(青:水平動/UD,  
太線は既往速度構造モデルのレイリー一波槽円率 H/V)

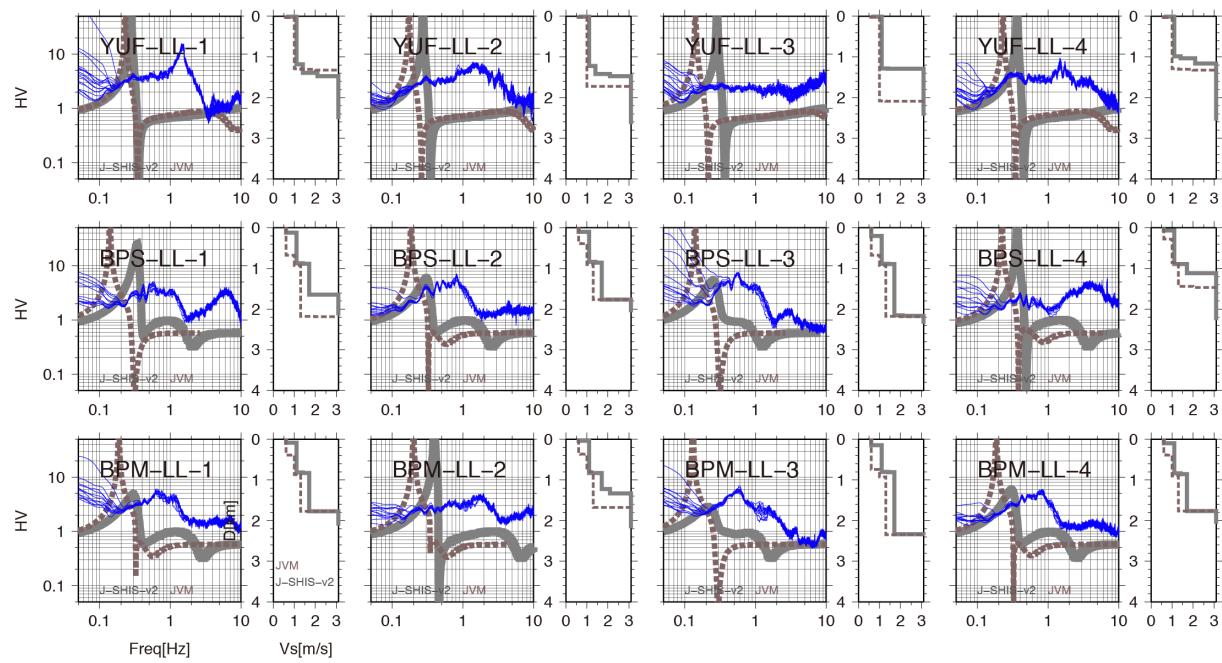


図 3.3.2-15 大半径微動アレイ観測点毎の微動 H/V スペクトル(その 5)(青:水平動/UD,  
太線は既往速度構造モデルのレイリーー波権円率 H/V)

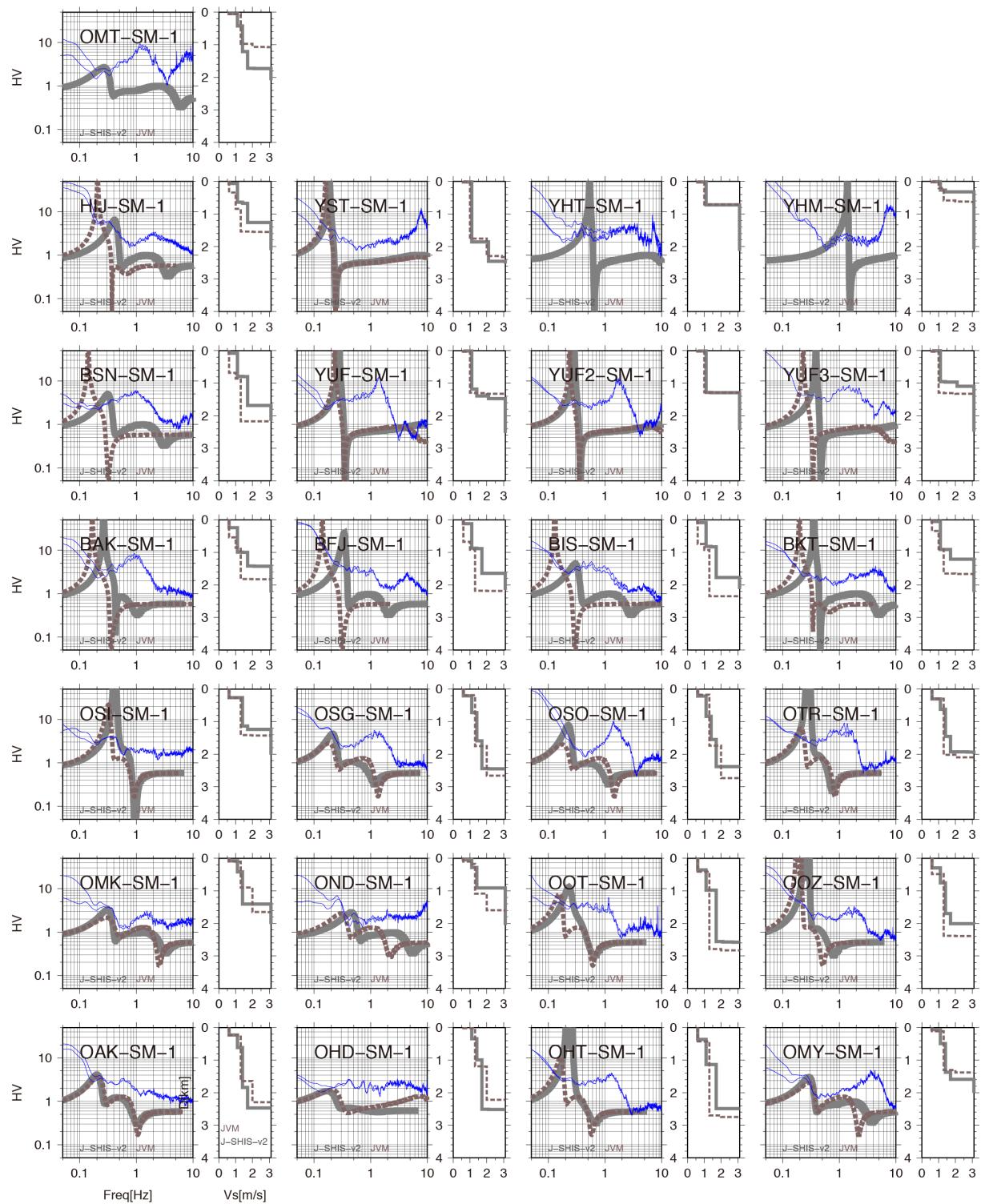


図 3.3.2-16 別府湾周辺域における小半径アレイ（SM アレイ）中心点の H/V スペクトル  
(青 : 水平動/UD, 太線は既往速度構造モデルのレイリー波梢円率 H/V)

## ii) 小半径微動アレイ観測

別府湾周辺域の速度構造モデルの高度化を目的に、大半径微動アレイ観測を補完するよう、速度計を用いた小半径微動アレイ観測を実施した。今年度の対象地点は、日出町 (HIJ), 由布市庄内町 (YST), 由布市挾間町 (YHT, YHM) および大分平野南東部 (OMT) である。日出町は次年度の大半径微動アレイ観測の候補地、由布市の3点は大分川沿い、OMTは大分平野南東縁 (大野川沿い) である (図3.3.2-8)。

観測は3.3.1節の大半径微動アレイ観測と同じ機器 (固有周期10秒の速度計と24bitデータロガー) を用いて実施し、SM、S、SSアレイを展開した。それぞれ2時間程度の測定を実施した。観測の様子を写真3.3.2-47に示す。



写真3.3.2-47 小半径アレイ観測の様子 (OMTアレイ)

速度時刻歴データについて、微動アレイ解析ソフトウェア「BID02.0」 (Tada et al., 2009) を用いて解析した。ここでは、レイリー波を対象とし、観測記録のうち上下動成分のみを解析に用いた。図3.3.2-17にSPAC法解析結果、図3.3.2-18にV法およびCCA法の解析結果と既往速度構造モデル (J-SHIS-v2モデル, JVMモデル) の理論位相速度を示す。3～5 Hz以上の位相速度解析結果はほぼ安定しており、表層部の速度構造の検証には有用なデータであると考えられる。低周波数側については、SPAC法では周波数 2 Hz程度が解析限界であるが、V法、CCA法では0.6 Hz程度まで解析能があるよう見える。検証は今後の課題である。

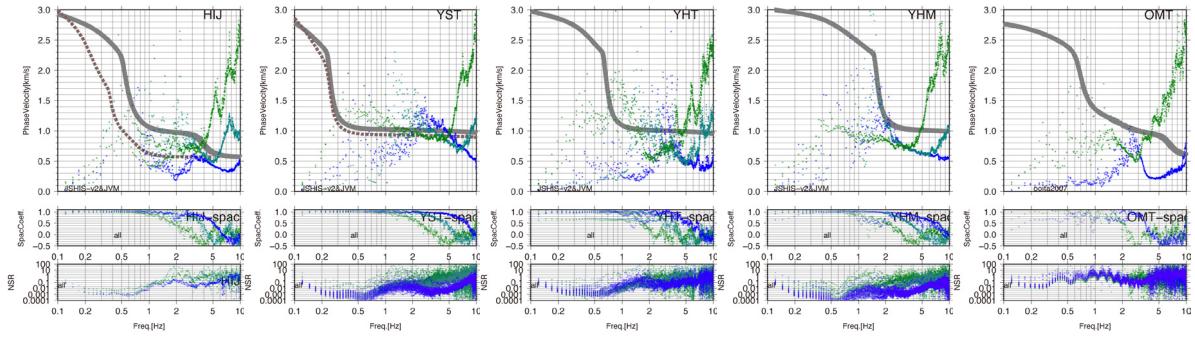


図3.3.2-17 小半径微動アレイ記録のSPAC法解析結果と既往速度構造モデルの理論位相速度（左からHIJ, YST, YHT, YHM, OMTの各アレイ）（上段：位相速度，中段：SPAC係数，下段：SN比）

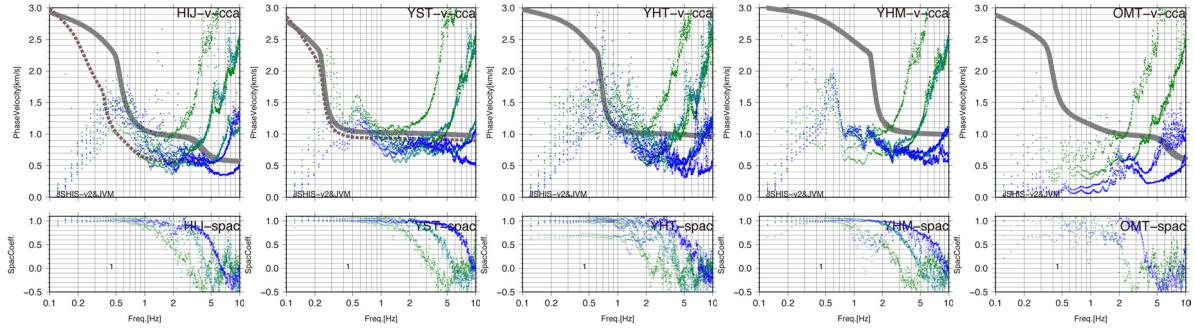


図3.3.2-18 小半径微動アレイ記録のV法, CCA法解析結果と既往速度構造モデルの理論位相速度（左からHIJ, YST, YHT, YHM, OMTの各アレイ）（上段：位相速度，下段：SPAC係数（参考））

### 3)連続微動観測と地震波干渉法解析

#### a) 別府湾周辺における微動連続観測網の構築

大分堆積盆地の最深部は別府湾下に位置する。別府-万年山断層帯の想定震源域が別府湾内を横断していることから、この厚い堆積層により地震波が増幅され、周辺域の地震動に大きな影響を及ぼすと考えられる。これまで、別府湾領域では重力異常データ (Kusumoto et al., 1996) や音波探査データ (由佐ほか, 1992) に基づいた地下構造のモデル化が実施されているが、S 波速度構造を対象とした直接的な検証は行われていない。海域下の S 波速度を直接的に調査する方法としては、海底地震計による地震探査や地震波トモグラフィなどが考えられる。しかし、海底地震計の設置・運用には多大なコストを要するほか、音波探査等の能動的構造探査を行う場合を別にすると、地震活動が低調な場合にはデータ蓄積に長い年月を要する。そこで本調査では、近年適用例の増えている、陸域での微動記録による地震波干渉法を用いることにした。

地震波干渉法は、2 地点間（観測点ペア）で得られた微動記録からペア間のグリーン関

数を求めようとする方法である。無相関な微動源が等方的に分布する理想的な場合には、観測点ペアの微動記録の相互相關関数からペア間のグリーン関数が得られることが理論的に示されている（例えば、Snieder, 2004 ; Wapenaar and Fokkema, 2006）。したがって、海を挟む 2 観測点からなるペアを組み、地震波干渉法によるグリーン関数を得ることで海域の地下構造に関する情報が得られると期待される。先行事例としては相模湾（山中ほか、2010）、駿河湾（Chimoto et al., 2011）、大阪湾（Asano et al., 2012）、伊勢湾（林田ほか、2014）、若狭湾（佐藤ほか、2014）等が挙げられ、海域を挟む多点での微動連続観測記録に地震波干渉法を適用し、表面波の群速度、位相速度あるいは相互相關関数そのものを用いて海域下の速度構造推定や速度構造モデルの妥当性評価が行われている。いずれの事例においても、数ヶ月から数年間にわたる連続記録を用いることで抽出される波群の S/N 比の向上が図られている。

本業務では別府湾を取り囲むように地震計を配置し、全 12 地点からなる連続微動観測網を構築した。図 3.3.3-1 に観測点配置図を、表 3.3.3-1 に観測点一覧を示す。図 3.3.3-1 には、周辺の Hi-net 観測点および J-SHIS 深部地下構造モデル V2 の基盤深度についてもカラーコンターで示している。連続微動観測点は大分堆積盆地内もしくは盆地端に配置しており、全ての 2 観測点ペア（66 組）をとると別府湾、大分平野部など基盤深度の大きな領域を密にカバーする。観測点間隔の最短距離は 6.4km (BEP09-BEP10)、最長距離は 65.2km (BEP06-BEP12) である。本観測網による微動連続記録を用いた地震波干渉法解析により、海域部をはじめとする大分堆積盆の速度構造モデルの改良に資する情報が抽出できると期待される。

連続微動観測点は、小型広帯域速度計センサー、低消費電力データロガー、GPS アンテナ、ソーラーパネル、観測装置収納コンテナおよびこれらを保護収納する架台で構成される。写真 3.3.3-1 に BEP01 観測点における連続微動観測装置の設置状況を示す。センサーおよびデータロガーには、産業技術総合研究所が所有する広帯域速度型地震計 Trillium Compact (Nanometrics 製：固有周期 120 秒、感度 750V/m/s)、低消費電力データ収録装置 LS-8800 (白山工業製：24bit A/D) を用いた。これらを 22Ah シールドバッテリー 1 台に接続して電力供給し、20W ソーラーパネルとパワーコントローラにて随時充電するシステムとした。万一の電力途絶に備え、復電後に自動的に観測が再開されるように設定した。観測点の設営にあたっては、各点で地面を 30cm 程度掘り下げて突き固めた後にプラスチック製ハンドホールを挿入し、底面を速乾性セメントで固定して土台を作成した。この上に地震計を設置し、方位を磁北に合わせて水平固定した。地震計周囲に珪砂を充填し、蓋をした後に上面にソーラーパネルを備え付けた架台を固定した。

微動は 3 成分（水平動 2 成分、上下動 1 成分）観測、サンプリング周波数は 100Hz とした。波形記録は WIN フォーマットで収録されており、BEP12 観測点を除いてチャンネル番号は小さい順より南北 (NS)、東西 (EW)、上下 (UD) 成分に対応するように接続している (BEP12 観測点については UD、NS、EW の順で接続)。観測記録は毎正時より 1 時間毎にデータロガー内の記録媒体 (SD カード) に保存されており、1 ファイルの容量は約 2.3MB である。全地点でオンライン観測を実施しており、定期的に現地を訪問してデータを回収するとともに、機材の設置状況および作動状況を確認している。

BEP01～BEP11 観測点については平成 26 年 8 月末から 9 月初めにかけて順次展開し、連続観測を開始した。また、後述する Hi-net 観測点の予備解析結果に鑑みて、12 月中旬には愛媛県の佐田岬半島に観測点を構築した。なお、BEP08 観測点では 9 月より観測を開始したが、データロガーの GPS 時刻同期機能に不具合が生じ、実際の時刻と記録上の時刻との間に明瞭なずれが見られた。観測記録の時刻精度が確保されていることが地震波干渉法の解析における極めて重要な条件であることから、機能の復旧が確認されるまでの期間（2014 年 9 月 2 日～2015 年 1 月 14 日）の全記録を解析から除外した。

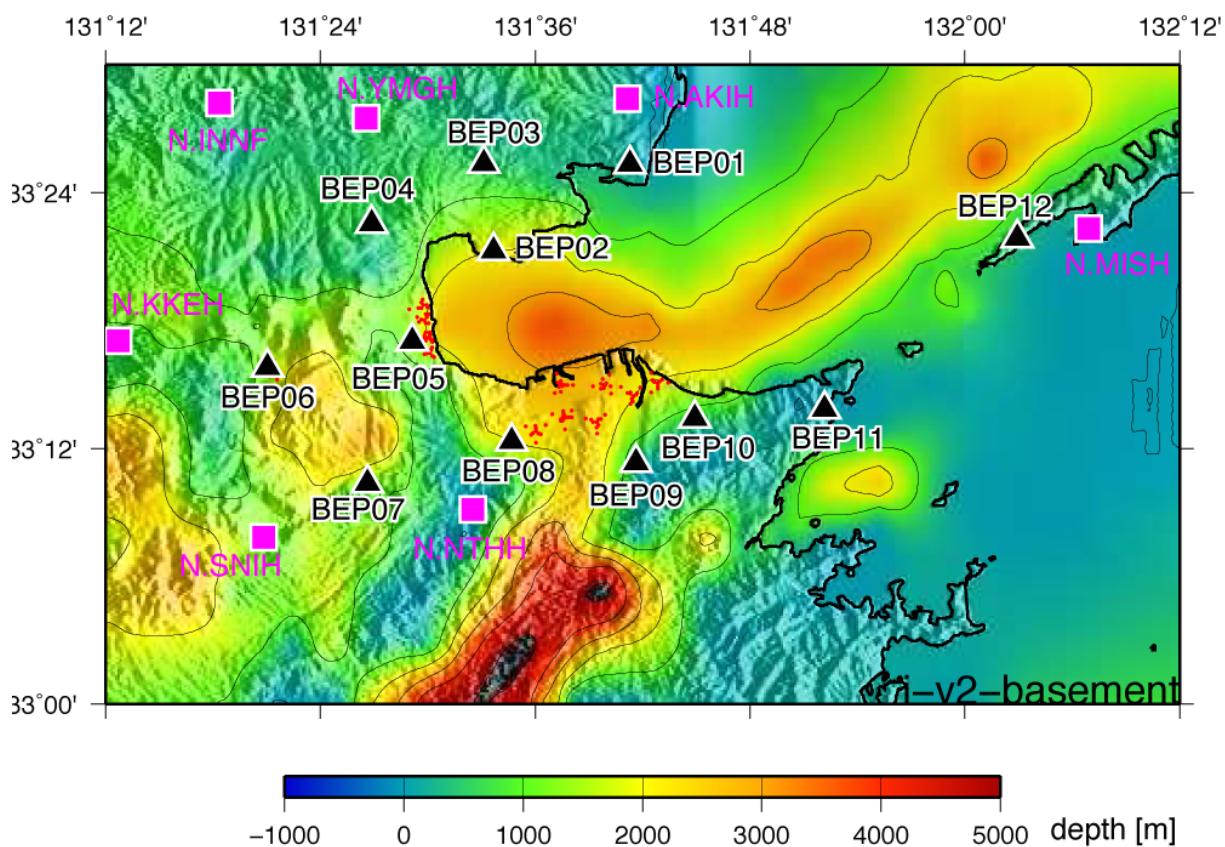


図 3.3.3-1 連続微動観測点の配置図（背景は J-SHIS-v2 構造モデルの基盤深度）

表 3.3.3-1 本調査観測による連続微動観測地点一覧（座標は世界測地系）

コード	北緯(°)	東経(°)	標高(m)	住所	設置日
BEP01	33.42228	131.68851	26	杵築市狩宿	2014/08/30
BEP02	33.35463	131.56121	139	日出町大神	2014/08/30
BEP03	33.42276	131.55213	38	日出町藤原井之辻	2014/08/31
BEP04	33.37580	131.44762	420	杵築市山香町久木野尾	2014/09/01
BEP05	33.28400	131.48547	84	別府市野口原 (京都大学地球熱学研究施設)	2014/09/02
BEP06	33.26361	131.35091	450	由布市湯布院町川上	2014/08/31
BEP07	33.17303	131.44363	160	由布市庄内町五ヶ瀬	2014/08/31
BEP08	33.20559	131.57822	45	大分市上宗方（宗方小学校）	2014/09/02 (2015/01/13)
BEP09	33.18921	131.69380	13	大分市宮河内迫	2014/09/01
BEP10	33.22370	131.74877	10	大分市小佐井	2014/09/02
BEP11	33.23095	131.86971	13	大分市佐賀関町白木浜 (旧白木小学校)	2014/09/03
BEP12	33.36472	132.04917	5	愛媛県西宇和郡伊方町正野 (佐田岬半島)	2014/12/19



写真 3.3.3-1 連続微動観測装置の設置状況（BEP01 地点）

図 3.3.3-2 には 12 観測点において同時刻に観測された微動波形の一例を示し、図 3.3.3-3 には 2015 年 1 月に観測された記録から求めた上下動成分のパワースペクトル密度

を示す。微動の振幅レベルは昼間の標準的な値である  $10^{-6}\text{m/s} \sim 10^{-5}\text{m/s}$  の範囲であり、別府湾の北側に位置する観測点 (BEP01～BEP04) および BEP07、BEP11 観測点では長周期成分に富む波形が見られる。また、本観測では広帯域地震計を用いていることから、パワースペクトル密度からは周期 10 秒以上 (0.1Hz 以下) の脈動も捉えられていることが分かる。本調査で対象とする速度構造モデル（深部地盤モデル）の検証を行うためには概ね 0.1～1.0Hz 程度の周波数帯域の微動を観測する必要があることから、本観測網により、地震波干渉法解析に資するデータが取得可能であると期待される。

本観測網による観測開始以後、大分県周辺で複数の小規模地震が発生し、また、遠方でも比較的規模の大きい地震が発生している。図 3.3.3-4 には 2015 年 2 月 5 日 4 時 6 分に伊予灘で発生した微小地震 ( $M_{\text{JMA}}1.0$ 、深さ 62km) の際に全地点で観測した波形記録を、図 3.3.3-5 には 2015 年 2 月 17 日 8 時 6 分に太平洋の三陸沖で発生した地震 ( $M_{\text{JMA}}6.9$ 、深さ 13km) の観測波形記録を示す。いずれの地震波形も振幅が小さく、トリガーア式強震計や震度計などでは記録されない可能性が高いが、本観測網では明瞭なシグナルが捉えられている。また、三陸沖の地震については表面波が卓越しており、全地点で明瞭な分散性が見られる。この地震について全観測点のフーリエスペクトルを比較したところ（図 3.3.3-6）、既往の地下構造モデル (J-SHIS-v2) で堆積層の厚さが 1500m を超えると考えられる地点 (BEP02、BEP08) では、水平動成分で 0.1～1.0Hz、上下動成分で 0.2～1.0Hz のスペクトル振幅が他観測点と比較して有意に卓越しており、堆積盆地の影響によるものと考えられる。

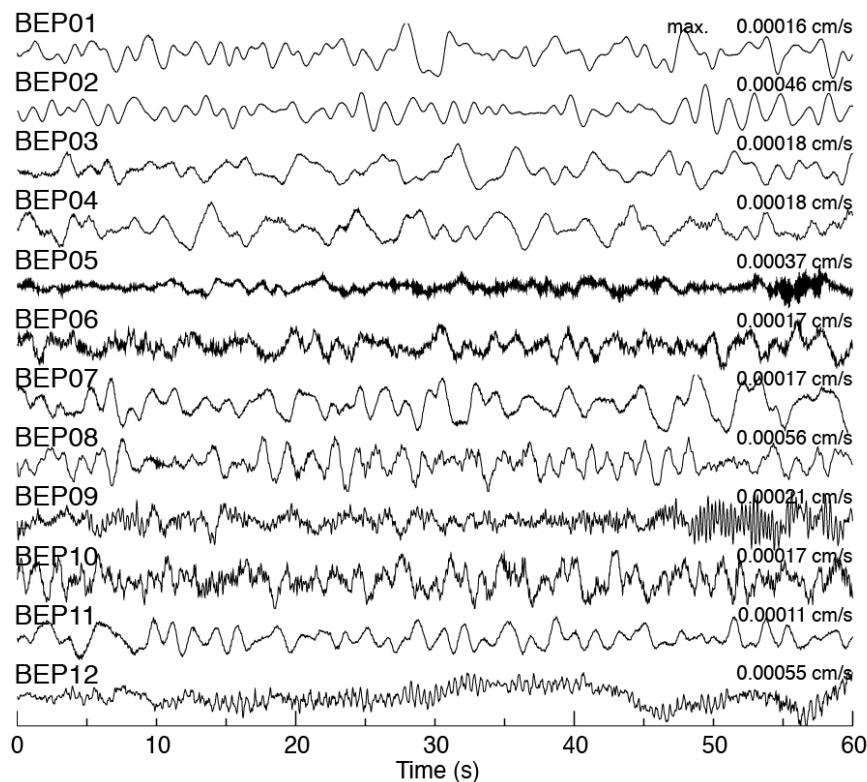


図 3.3.3-2 観測された微動波形の例 (2015/2/6 10:00 より 1 分間の上下動成分、0-10Hz)

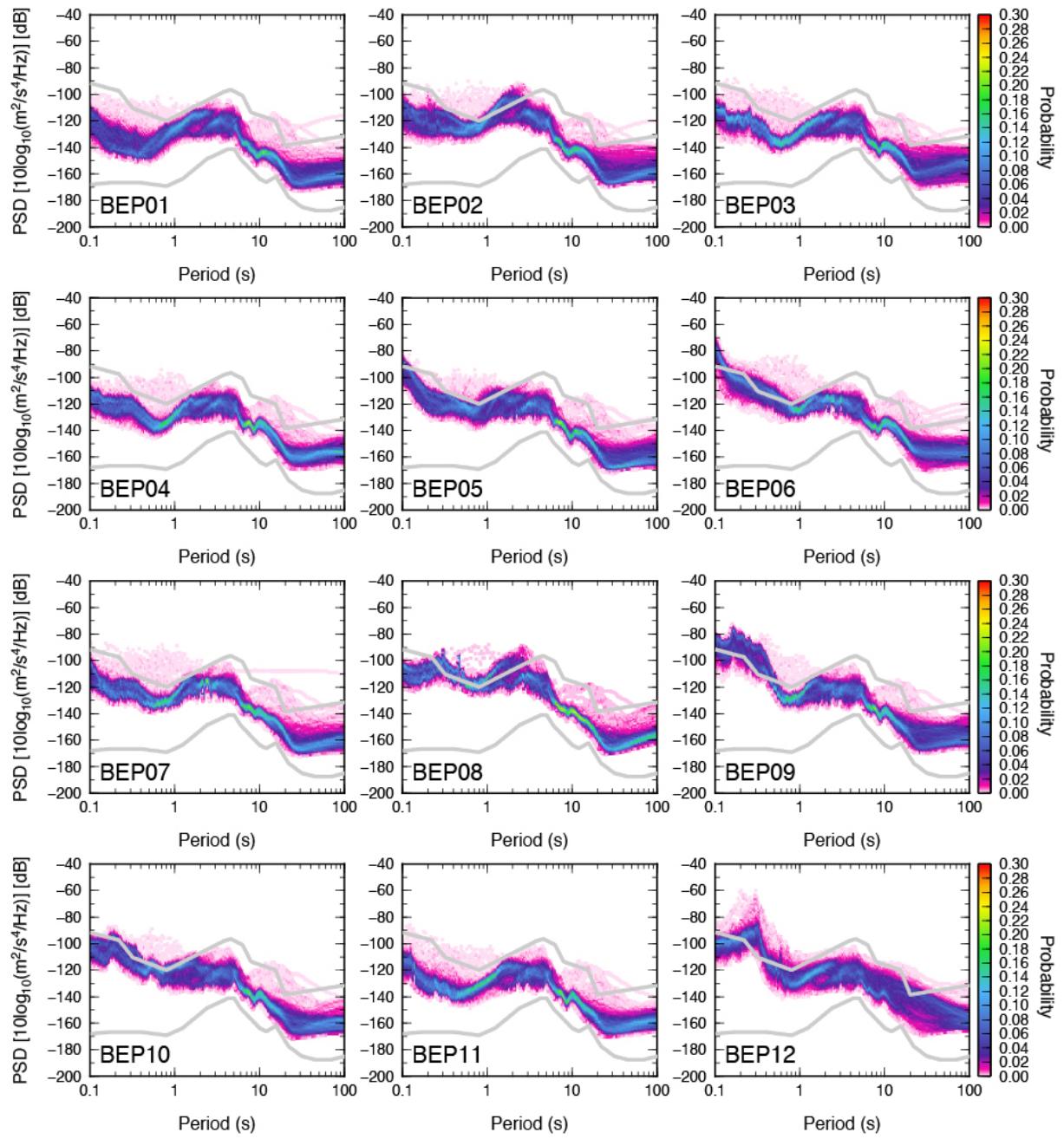


図 3.3.3-3 各観測点の微動記録から求めたパワースペクトル密度（2015年1月、上下動成分）。

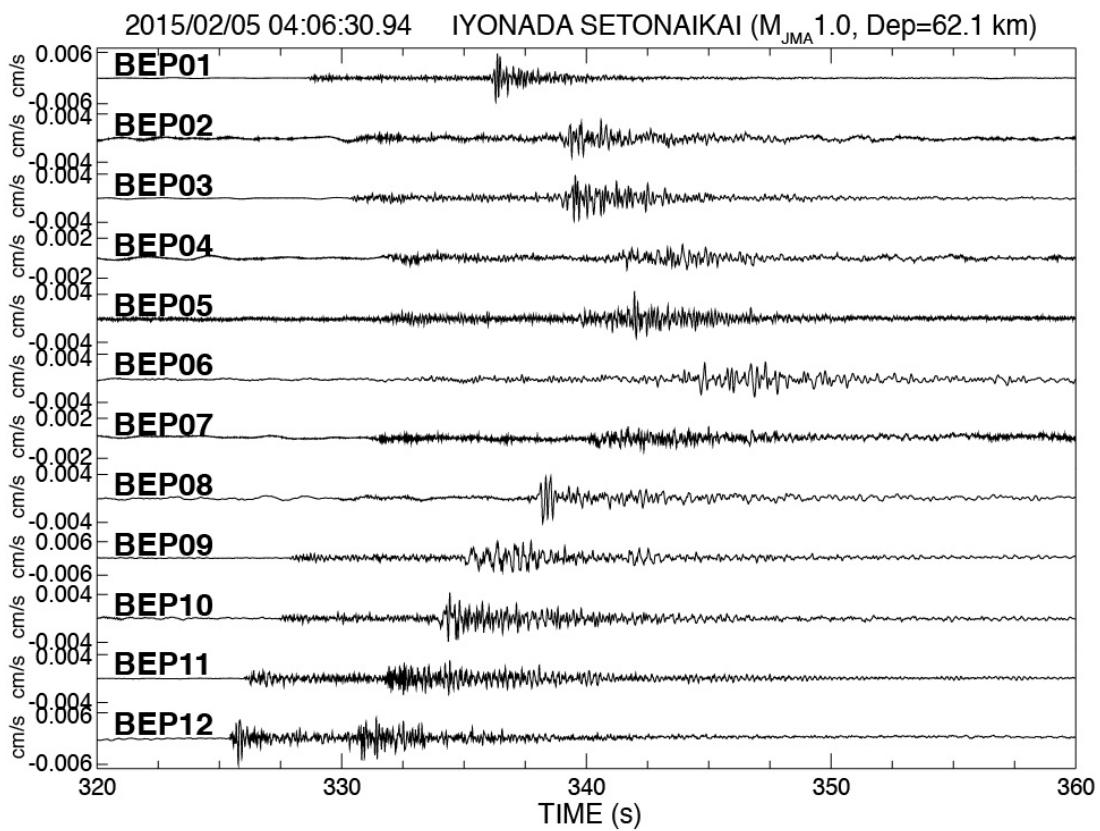


図 3.3.3-4 2015 年 2 月 5 日伊予灘の地震の観測波形（南北成分、フィルターなし）

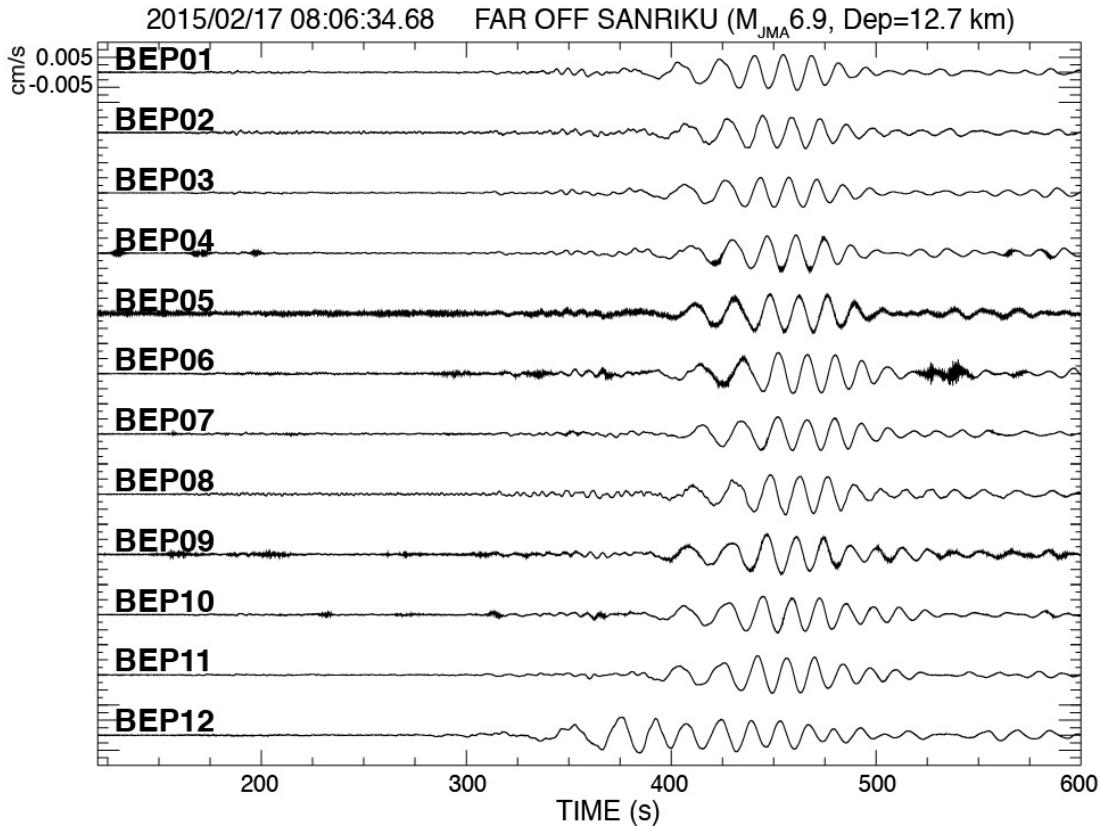


図 3.3.3-5 2015 年 2 月 17 日三陸沖の地震の観測波形（上下動成分、フィルターなし）

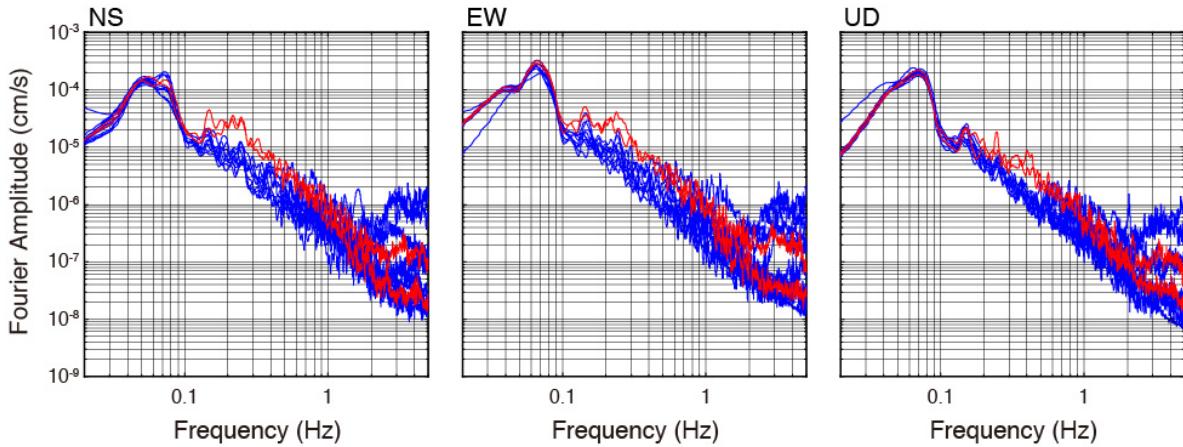


図 3.3.3-6 2015 年 2 月 17 日三陸沖の地震の観測波形のフーリエスペクトル。赤線は BEP02、BEP08 観測点のスペクトル、青線はそれ以外の観測点のスペクトルに対応する (P 波到達時から 655.36 秒の区間、0.02Hz の Parzen ウィンドウで平滑化)。

b) 別府湾周辺地域における地震波干渉法解析

i) Hi-net データを用いた予備解析

前述の通り、微動記録による地震波干渉法を実施する際には、長期間の連続観測記録が必要となる。別府湾の周囲には防災科学技術研究所の Hi-net 観測点が 6 点展開されていることから、本調査では連続観測網記録による地震波干渉法解析の予備検討として、別府湾周辺地域で過去に観測された Hi-net 観測記録に対して同手法を適用し、導出される相互相関関数（波群形状、群速度）の特徴およびデータ処理に必要な観測期間の目安について把握を行った。公開されている Hi-net 観測記録は固有周波数 1Hz の短周期地震計で記録されたものであり、センサー感度は 1Hz 以下の周波数帯域では周波数の 2 乗に比例して低下するが、周波数特性を補正することで約 0.1Hz 程度までの低周波数帯における微動の検出が可能であることが確認されている（例えば、Takagi et al., 2012；林田ほか, 2014）。

本検討では 2010 年 1 月～12 月の期間に収録された Hi-net 連続観測記録（3 成分）を用いて、2 観測点間（全 15 ペア）の相互相関関数を導出した。観測点間隔の最短距離は 18.3km (N. NTHH-N. SNIH) 、最長距離は 84.7km (N. KKEH-N. MISH) である。はじめに、連続波形記録を毎正時より 1 時間の時間長に分割し、基線補正を施した後に Hi-net 地震計の特性を周波数領域で補正した。次に、Running Absolute Mean 法 (Bensen et al., 2007) による振幅値の正規化を行い、0.1～0.5 Hz の周波数帯域を対象として同時刻に得られた 2 地点の波形の相互相関関数 (-500～500 秒) を計算した。水平動 2 成分については、2 地点の方位角より Radial (R) 成分と Transverse (T) 成分に回転し、7 成分 (Z-Z, Z-R, Z-T, R-Z, T-Z, R-R, T-T) の相互相関関数を導出した。なお、Hi-net の地震計の設置方位は必ずしも設計通りの方角に対応していないことから、防災科学技術研究所による公表値を用いて補正を行った。なお、ここで Z-R と表記した成分は、観測点 A の Z 成分と観測点 B の R 成分との相互相関関数、すなわち観測点 A で鉛直方向に点加振を与えた際の、観測点 B の R 成分における応答に対応する。1 年間分の相互相関関数をスタッキング処理することで、最終的な相互相関関数とした。その結果、全ての成分の相互相関関数には、表面波に

対応すると考えられる波群が見られた（図 3.3.3-7）。これらの波群には分散性が見られ、堆積層が浅い領域を跨ぐ観測点ペアでは継続時間が短い波群が明瞭に見られ、一方、堆積層が厚い領域を跨ぐペアで抽出される波群は不明瞭である（図 3.3.3-8）。波群の SN 比（ここでは、波群振幅の最大値とタイムラグ 450～500 秒間の相互相関関数の平均振幅との比の常用対数を SN 比と定義する）を周波数毎に見たところ、全地点で観測期間が長くなるにつれて SN 比が向上する傾向が見られた（図 3.3.3-9）。SN 比が 2 を超えると波群の抽出が容易となり、およそ 1 年間程度の観測記録を用いることで、多くのペアで 0.2Hz 以上の帯域において SN 比が 2 を超えている。なお、0.2Hz 以下の衆多数帯域では微動の振幅レベルが低下し、季節によってはセンサーの自己ノイズを下回ることもあるため、SN 比の増分は低调である。したがって、対象地域において低周波数帯域での微動をより安定的に捉えるためには、本調査で展開した観測網のように長周期地震計あるいは広帯域地震計記録による検討が必要であると考えられる。

導出した相互相関関数に対してマルチプルフィルタ解析（Dziewonski et al., 1969）を施し、周波数毎の波群の群速度を推定した。本解析では、相互相関関数の時刻零を起点として時刻歴正方向と負方向に分離し、相加平均処理を行った波形を解析対象とした。図 3.3.3-10 には、周波数毎に抽出した波群と推定した群速度の一例（N. SNIH-N. YM GH ペア）を示し、図 3.3.3-11 には全観測点ペアの相互相関関数を用いて同様に推定した 0.2Hz（周期 5 秒）、0.5Hz（周期 2 秒）における群速度の空間分布を示す。また、図 3.3.3-12 には山上・他（2010）の手法に倣い、J-SHIS 速度構造モデルにより算出したレイリー波群速度の理論値を示す。推定値は 0.2Hz 前後の低周波数側で理論値と概ね対応しているが、0.5Hz 前後の高周波数側では推定値と理論値の間に乖離が見られる。この差異は、速度構造モデルの修正により改善される可能性が考えられるが、別府湾周辺に位置する Hi-net 観測点が限られているため、より詳細な検討は本調査で展開した連続観測網記録を用いて行うこととする。

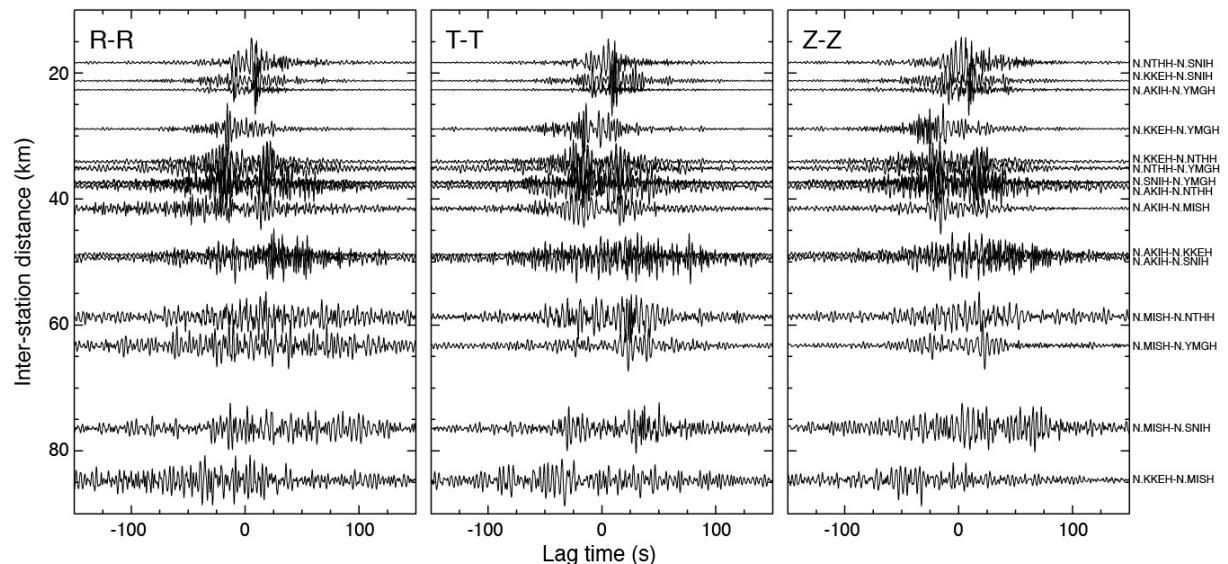


図 3.3.3-7 Hi-net 記録から導出した相互相関関数のペーストアップ  
(R-R、T-T、Z-Z 成分)

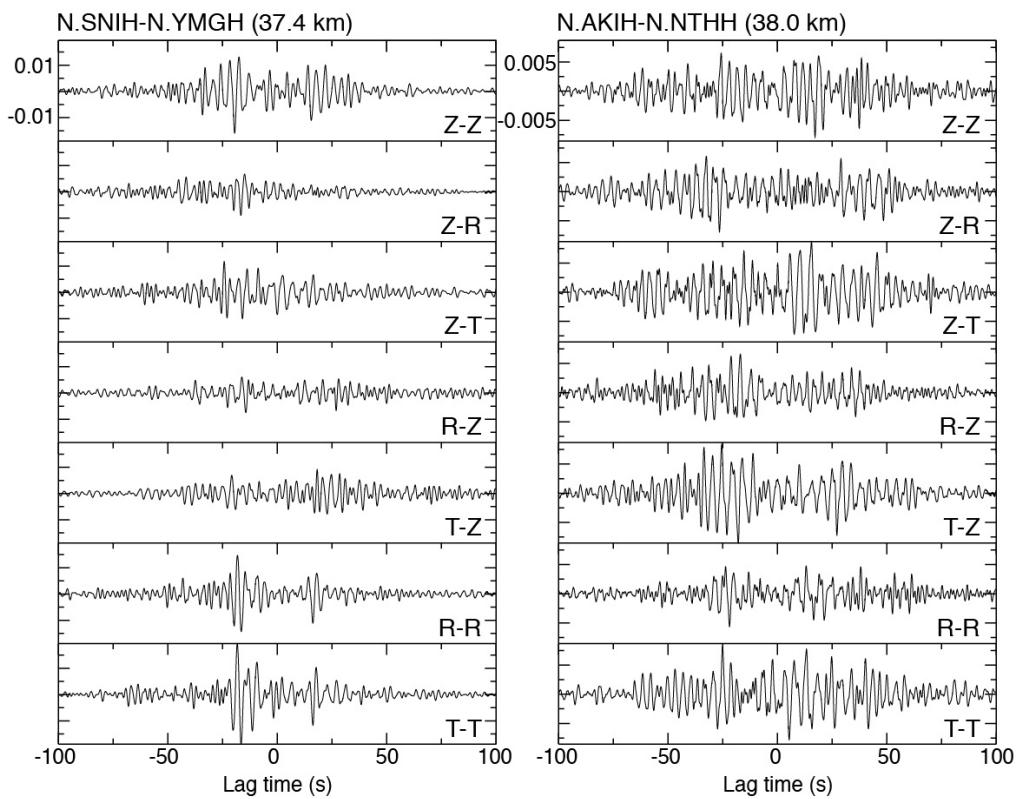


図 3.3.3-8 導出した全成分の相互相関関数の例（左は別府湾外を結ぶ観測点ペア N.SNIH-N.YMGH、右は別府湾を跨ぐ観測点ペア N.AKIH-N.NTHH）。

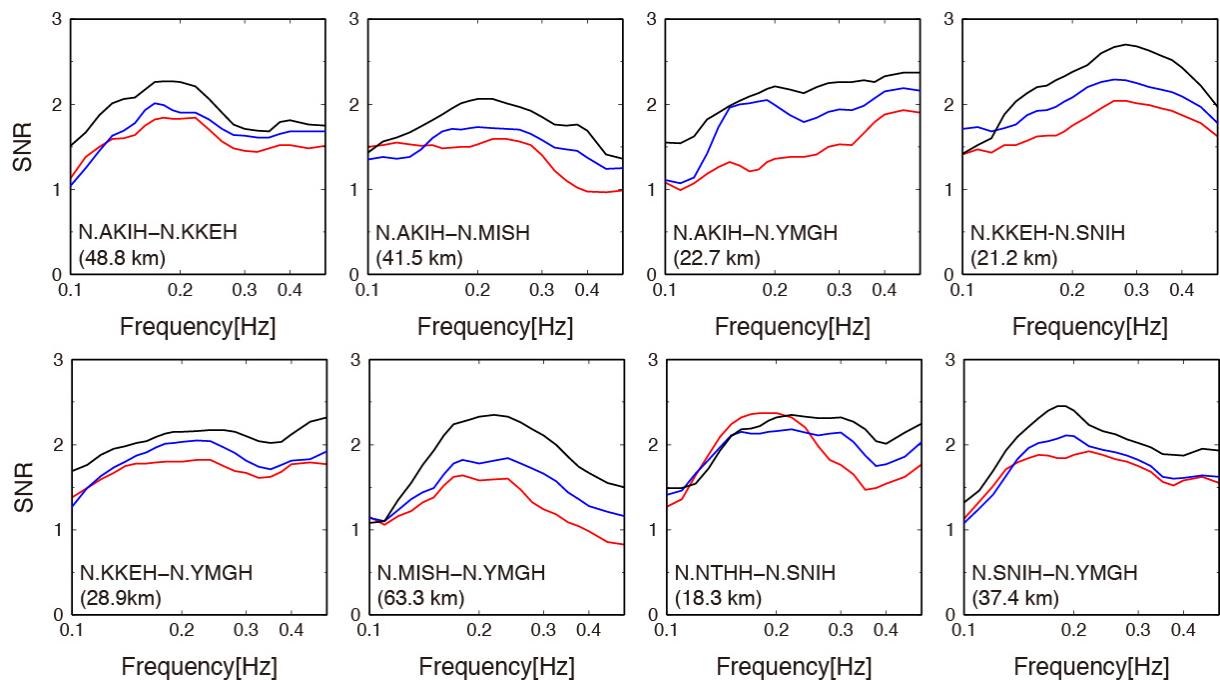


図 3.3.3-9 導出した相互相関関数の波群の周波数毎の SN 比。線の色はスタッキング処理をしたデータ量を示す（赤線：500 時間、青線：2000 時間、黒線：8000 時間）。

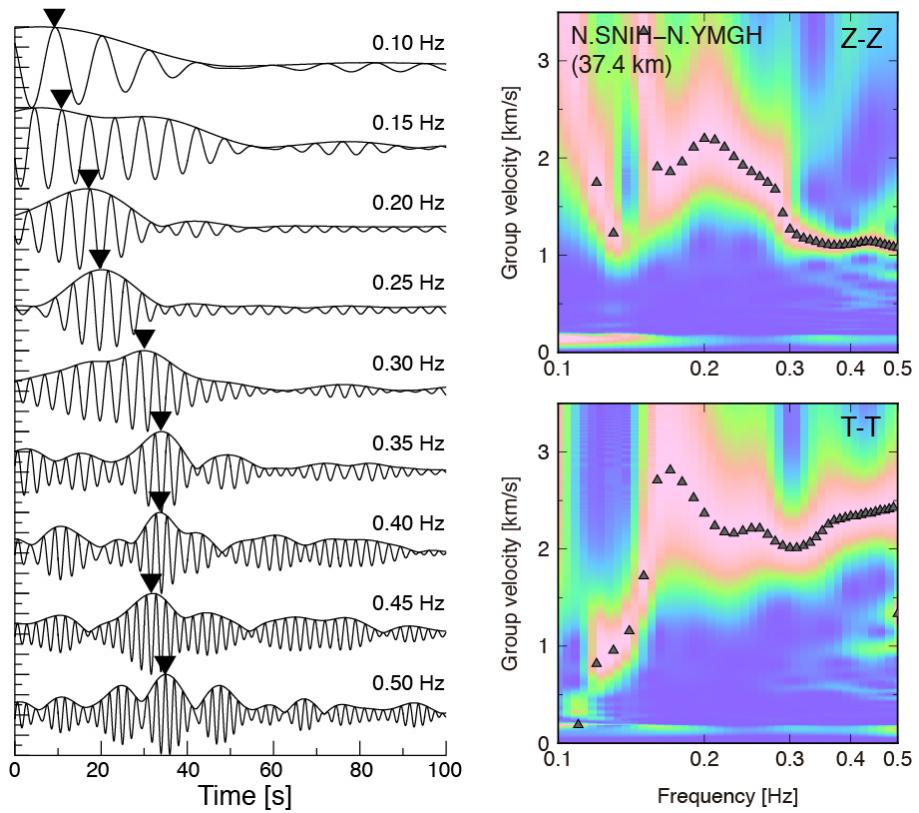


図 3.3.3-10 (左) マルチプルフィルタ解析による周波数毎の波群およびエンベロープの例 (N. SNIH-N. YMGH、Z-Z 成分)。(右) 同処理により推定された波群の群速度 (Z-Z 成分、T-T 成分)。

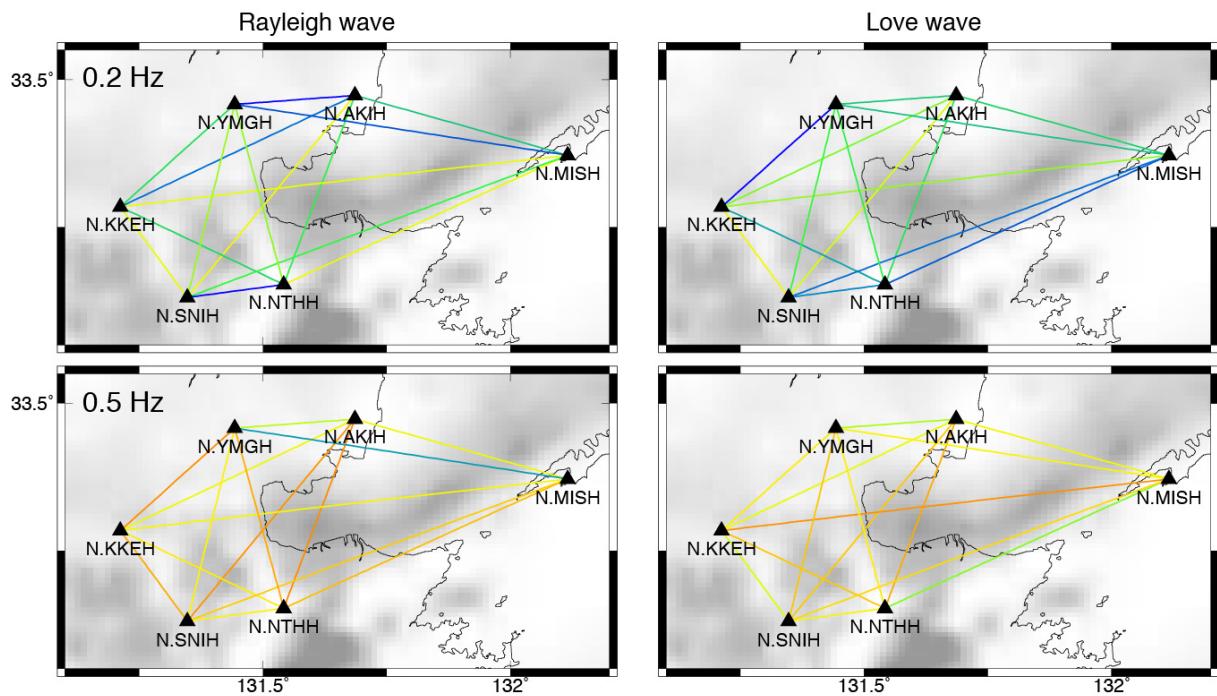


図 3.3.3-11 相互相関関数より推定した表面波（レイリー波、ラブ波）群速度の空間分布  
(観測点を結ぶ線の色で示す。暖色系：速度小、寒色系：速度大)

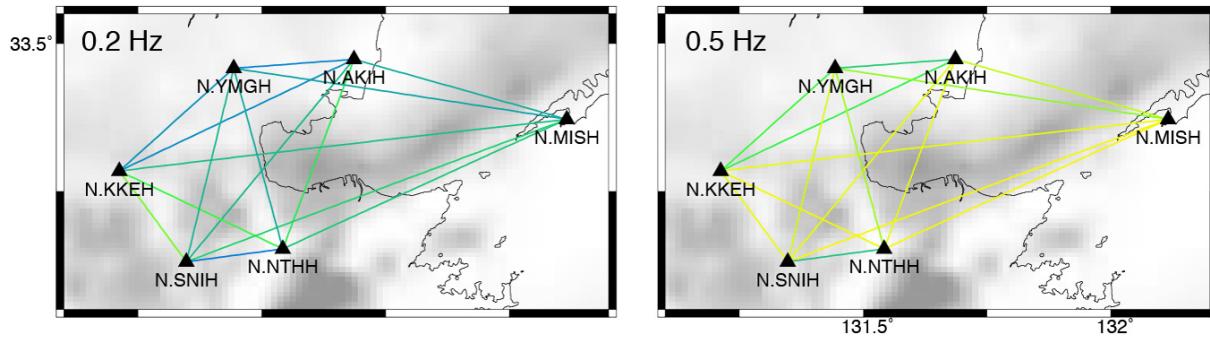


図 3.3.3-12 J-SHIS 深部地下構造モデルより推定したレイリー波群速度の空間分布  
(観測点を結ぶ線の色で示す。暖色系：速度小，寒色系：速度大)

### ii) 微動連続観測網データを用いた暫定解析

本調査において別府湾周辺に展開した連続微動観測記録を用いて、Hi-net 記録と同様の手順で地震波干渉法解析を実施した。2014 年 9 月～2015 年 1 月の期間に取得した記録を解析の対象とした。本観測網ではより低周波数帯域の微動の検出が可能であり、なおかつ Hi-net と比較してより高密度に観測点が展開されていることから、解析の対象とする周波数帯域を 0.05～1.0Hz とした。図 3.3.3-13 には、R-R、T-T、Z-Z 成分で得られた相互相関関数のペーストアップを示す。全体的に、時間零を対称とした波群が全成分で確認されるが、観測点間距離が増大するにつれて波群が不明瞭となっている。また、図 3.3.3-14 には観測点ペア BEP02-BEP09、BEP07-BEP09 で得られた全成分の相互相関関数を示す。Hi-net 記録による予備検討結果と同様、堆積層が浅い領域を跨ぐ観測点ペアでは継続時間が短く振幅の大きい波群が、堆積層が厚い領域を跨ぐペアでは継続時間が長い波群が得られた。図 3.3.3-15 には、マルチプルフィルタ解析により推定した Z-Z 成分の波群の群速度と周波数毎の波群の SN 比の例を示す。観測点ペアによっては分散性をもつ波群が検出されつつあるが、全体的に波群の SN 比が低いため、SN 比が 2 を下回る周波数帯域での群速度推定が困難である。特に、BEP08、BEP12 観測点では解析に用いることのできる測定期間が他の観測点と比較して短い（1ヶ月前後）ため、これらの観測点を対象として地震波干渉法を適用するには、データ量が極めて不十分である可能性が高い。Hi-net 記録を用いた予備解析では、1年間程度のデータを用いることで SN 比が大幅に向上していることから、今後も継続的な観測を実施し、データを蓄積する必要性があると考えられる。

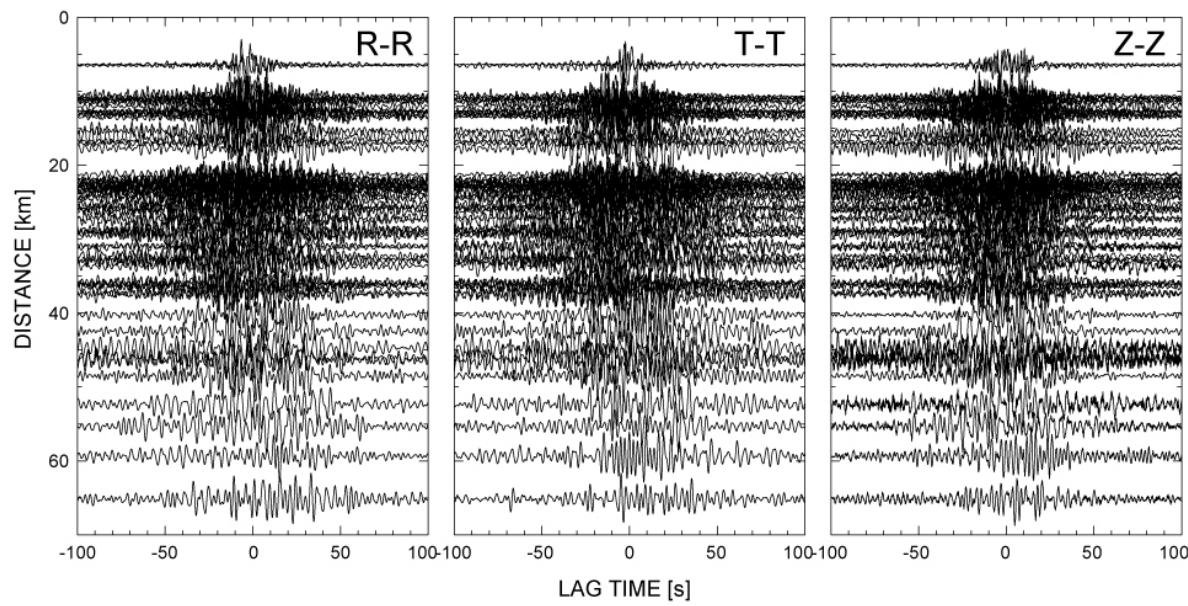


図 3.3.3-13 連続観測網記録から導出した相互相関関数のペーストアップ (R-R、T-T、Z-Z 成分)

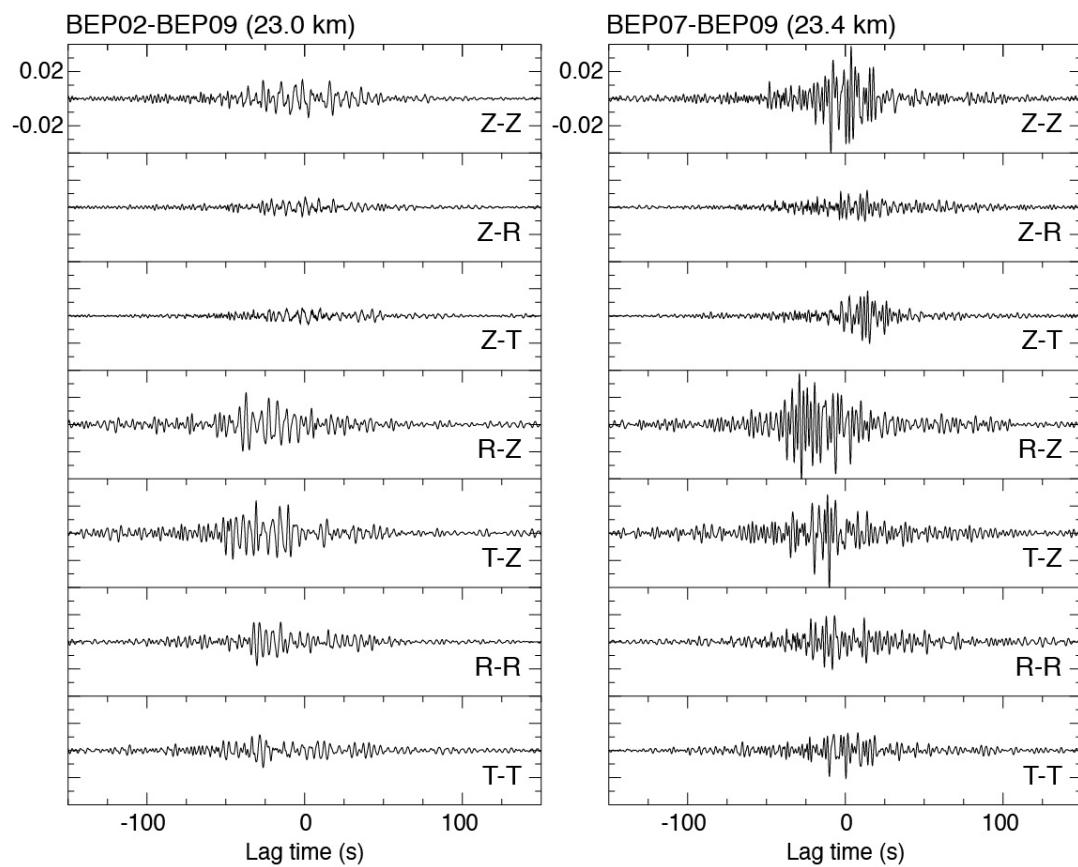


図 3.3.3-14 導出した全成分の相互相関関数の例 (左は別府湾を跨ぐ観測点ペア BEP02-BEP09、右は別府湾外を結ぶ観測点ペア BEP07-BEP09)。

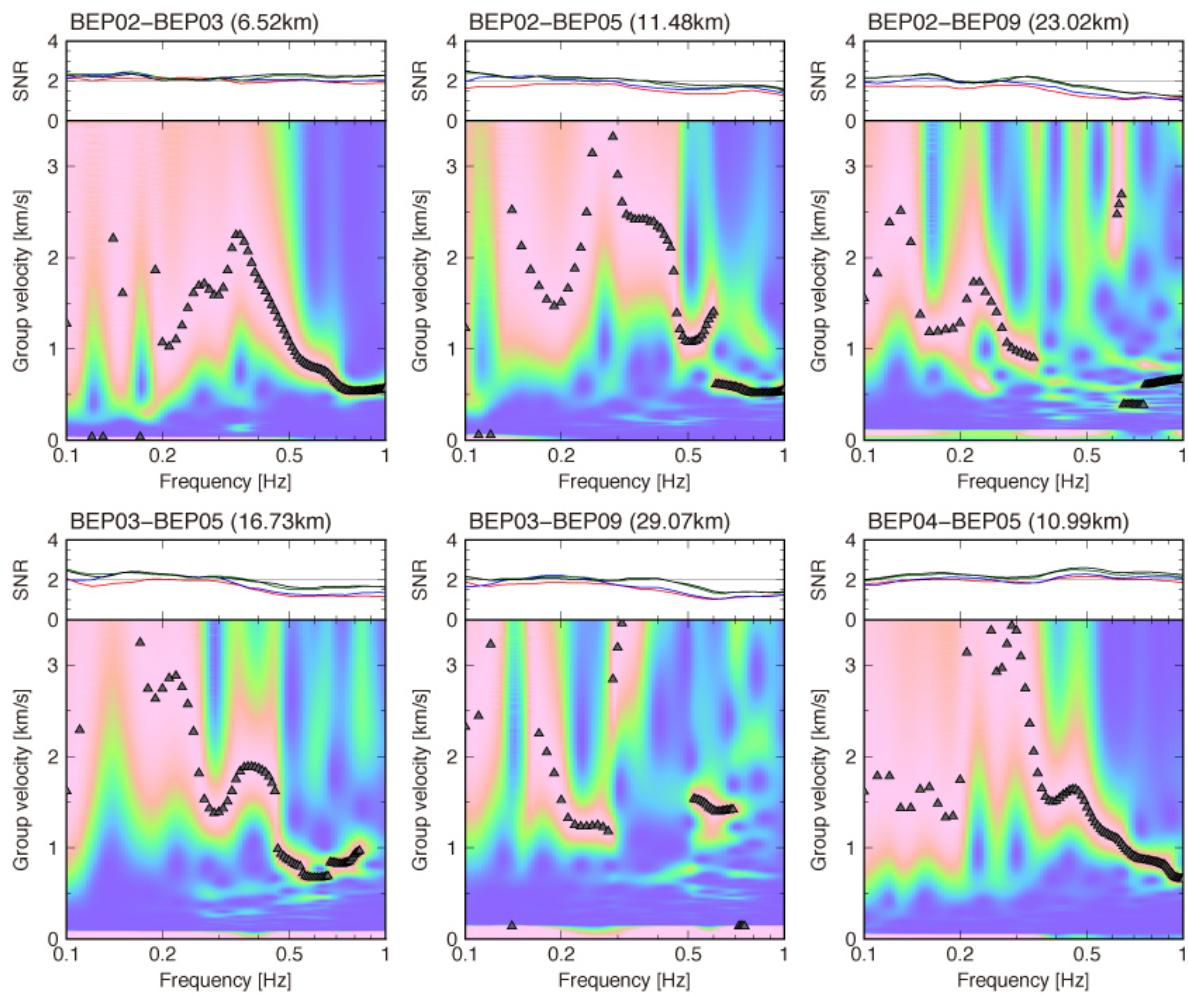


図 3.3.3-15 (上段) 波群の周波数毎の SN 比 (赤線 : 500 時間、青線 : 1000 時間、黒線 : 2000 時間)。(下段) 相互相関関数より推定した群速度の一例。いずれも Z-Z 成分での処理結果を示す。

#### 4) 地震波形記録の収集・解析

a) 大分県内の地震波形記録の収集・整理 地震波形記録は、速度構造モデルの精度検証に有用である。大分県域の速度構造モデルの作成（大分県、2008）および精度評価（岩城ほか、2009）においては、地震波形記録が活用されているが、自治体震度計データは使用されていない。大分県域では、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），気象庁観測点網および自治体震度計網が展開されている。このうち、大分県自治体震度計網は全49点で構成される。これらは、全て加速度計から成り、自治体役場・支所、消防署等の公共施設に設置されている。この大分県震度計観測網に、公共施設設置の防災科研観測点6点、気象庁観測点3点を加えた計58点の観測点は、大分県震度情報ネットワークとして観測点IDが振られている。これらを表3.3.4-1に、観測点配置図を図3.3.4-1に示す。このたび、大分県生活管理部防災危機管理課の協力を得て、大分県の自治体震度計の地震波形記録を収集した。本業務により、2005年3月以降の計51地震について、自治体震度計の地震波形記録が収集された。地震の一覧を表3.3.4-2に、震央分布図を図3.3.4-2に示す。主な震源域は、2005年3月20日福岡県西方沖地震（M7.0）とその余震、2007年6月別府湾北西部付近の浅い地震（最大M4.9），伊予灘付近のやや深い地震（最大は2014年3月14日のM6.2），大分県中部の深い地震（D=145km, M6.2）である。表3.3.4-3に地震毎の地震波形記録の収集状況を、表3.3.4-4に同地震における防災科研強震観測網での波形収録状況を示す。なお、観測点コードは表3.3.4-1、地震コードは表3.3.4-3と同一である。自治体震度計の記録のほとんどは継続時間60秒のデータになっている。

#### b) 地震波形記録の解析

##### i) H/Vスペクトルの検討

収集した地震観測記録の主要動部分（後続波含む）を用いて、水平・上下スペクトル比（H/Vスペクトル）を算定した。大分県震度計データのH/Vスペクトルを図3.3.4-3に、防災科研強震観測網データのH/Vスペクトルを図3.3.4-4に示す。

##### ii) R/Vスペクトルの検討

R/Vスペクトルの算定ではS波初動から20.48秒以降の後続波部分を用いた。ただし、上述のとおり、大分県の強震観測データが60秒間のものが多いため、後続波部分を抽出できる地震を選定した。その結果4地震が選定された。これらの震源要素を表3.3.4-5に、震央位置図を図3.3.4-5に示す。大分県震度計データのR/Vスペクトルを図3.3.4-6に、防災科研強震観測網データのR/Vスペクトルを図3.3.4-7に示す。

表 3.3.4-1 大分県震度情報ネットワーク一覧（座標は世界測地系）

No	観測点ID	観測点名称 MOLENAME	気象庁発表名称 M24ZEN_NM	観測点所在地	所属	緯度	経度
1	OITA0001	大分市	大分市舞鶴町	大分市舞鶴町1-1-1（大分市消防局）	自治体	33度14分24.0秒	131度36分59.5秒
2	OITA0002	野津原	大分市野津原	大分市大字野津原800（野津原支所）	自治体	33度9分47.0秒	131度31分48.2秒
3	OITA0003	佐賀関	大分市佐賀関	大分市大字佐賀関1407-27（佐賀関市民センター）	自治体	33度14分57.9秒	131度52分24.9秒
4	OITA0004	別府市	別府市上野口町	別府市上野口町1-15（別府市役所）	自治体	33度17分5.2秒	131度29分25.8秒
5	OITA0005	中津市	中津市豊田町	中津市豊田町14-3（中津市役所）	自治体	33度35分53.6秒	131度11分19.8秒
6	OITA0006	三光	中津市三光	中津市三光原口644-7（三光支所）	自治体	33度33分19.8秒	131度12分4.5秒
7	OITA0007	本耶馬溪	中津市本耶馬溪町	中津市本耶馬溪町曾木1800（本耶馬溪支所）	自治体	33度29分45.2秒*	131度10分10.9秒*
8	OITA0008	耶馬溪	中津市耶馬溪町	中津市耶馬溪町大字柿坂138-1（耶馬溪支所）	防災科研	33度27分17.6秒	131度6分51.1秒
9	OITA0009	山国	中津市山国町	中津市山国町守実130（山国支所）	自治体	33度24分8.7秒	131度2分30.1秒
10	OITA0010	日田市	日田市田島	日田市田島2-6-1（日田市役所）	自治体	33度19分14.9秒*	130度56分29.3秒*
11	OITA0011	前津江	日田市前津江町	日田市前津江町大野2189-1（前津江振興局）	自治体	33度12分34.9秒	130度55分5.5秒
12	OITA0012	中津江	日田市中津江村柄野	日田市中津江村柄野353（中津江振興局）	自治体	33度8分11.2秒	130度56分15.9秒
13	OITA0013	上津江	日田市上津江町	日田市上津江町川原2710（上津江振興局）	自治体	33度5分41.7秒	130度58分34.4秒
14	OITA0014	大山	日田市大山町	日田市大山町西大山3545-1（大山振興局）	自治体	33度15分26.9秒	130度58分0.6秒
15	OITA0015	天瀬	日田市天瀬町	日田市天瀬町桜竹671-2（天瀬振興局）	防災科研	33度15分19.8秒	131度1分13.1秒
16	OITA0016	佐伯市	佐伯市役所	佐伯市中村南町1-1（佐伯市役所）	自治体	32度57分36.8秒	131度53分57.0秒
17	OITA0017	上浦	佐伯市上浦	佐伯市上浦大字津井浦1400-3（上浦振興局）	自治体	33度3分11.6秒	131度55分50.9秒
18	OITA0018	弥生	佐伯市弥生	佐伯市弥生大字上小倉656-1（弥生振興局）	自治体	32度58分5.9秒	131度50分14.2秒
19	OITA0019	本匠	佐伯市本匠	佐伯市本匠大字波寄2685（本匠振興局）	自治体	32度57分2.5秒	131度47分18.4秒
20	OITA0020	宇目	佐伯市宇目	佐伯市宇目大字千束1060-1（宇目振興局）	自治体(新設)	32度51分29.1秒	131度39分24.8秒
21	OITA0021	直川	佐伯市直川	佐伯市直川大字赤木105（直川振興局）	自治体	32度53分46.6秒*	131度46分41.6秒*
22	OITA0022	鶴見	佐伯市鶴見	佐伯市鶴見大字松浦2008-6（鶴見振興局）	自治体	32度56分42.5秒	131度57分36.7秒
23	OITA0023	米水津	佐伯市米水津	佐伯市米水津大字浦代浦1239-2（米水津振興局）	自治体	32度55分16.2秒*	131度58分34.3秒*
24	OITA0024	蒲江	佐伯市蒲江	佐伯市蒲江大字蒲江浦4491-59（蒲江地区公民館）	気象庁	32度48分6秒	131度55分18秒
25	OITA0025	臼杵	臼杵市臼杵	臼杵市大字臼杵72-1（臼杵市役所）	自治体	33度7分32.3秒	131度48分17.9秒
26	OITA0026	野津	臼杵市野津町	臼杵市野津町大字野津市326-1（野津市役所）	自治体	33度2分33.9秒	131度41分33.2秒
27	OITA0027	津久見市	津久見市宮本町	津久見市宮本町20-15（津久見市役所）	自治体	33度04分21.0秒	131度51分39.4秒
28	OITA0028	竹田市	竹田市会々	竹田市大字会々1650（竹田市役所）	自治体	32度58分25.5秒	131度23分51.8秒
29	OITA0029	荻	竹田市荻町	竹田市荻町馬場426-20（荻支所）	自治体	32度55分27.1秒	131度17分53.5秒
30	OITA0030	久住	竹田市久住町	竹田市久住町大字久住6161-1（久住支所）	自治体	33度1分15.6秒*	131度17分39.0秒*
31	OITA0031	直入	竹田市直入町	竹田市直入町大字長湯8201（直入支所）	自治体	33度4分42.4秒*	131度23分4.5秒*
32	OITA0032	豊後高田市	豊後高田市御玉	豊後高田市御玉114（豊後高田市役所）	防災科研	33度33分29.9秒	131度26分56.0秒
33	OITA0033	真玉	豊後高田市真玉	豊後高田市中真玉2144-12（真玉支所）	自治体	33度36分32.9秒*	131度28分31.4秒*
34	OITA0034	香々地	豊後高田市香々地	豊後高田市見目118（香々地支所）	自治体	33度39分49.8秒	131度31分43.9秒
35	OITA0035	杵築市	杵築市杵築	杵築市大字杵築377（杵築市役所）	自治体(新設)	33度25分0.9秒	131度36分58.7秒
36	OITA0036	大田	杵築市大田	杵築市大田石丸445（大田支所）	自治体	33度29分44.3秒*	131度33分25.4秒*
37	OITA0037	山香	杵築市山香町	杵築市山香町大字原1010-2（山香支所）	自治体	33度26秒45.7秒	131度30分4.2秒
38	OITA0038	宇佐市	宇佐市上田	宇佐市大字上田1030-1（宇佐市役所）	自治体	33度31分55.8秒	131度20分58.9秒
39	OITA0039	院内	宇佐市院内町	宇佐市院内町山城32（院内支所）	防災科研	33度25分27.8秒	131度18分53.3秒
40	OITA0040	安心院	宇佐市安心院町	宇佐市安心院町下毛2115（安心院支所）	自治体	33度26分20.6秒	131度21分14.7秒
41	OITA0041	豊後大野市	豊後大野市三重町	豊後大野市三重町市場1200（豊後大野市役所）	気象庁	32度58分42秒	131度35分6秒
42	OITA0042	清川	豊後大野市清川町	豊後大野市清川町砂田1844（高齢者生活福祉センターみづば苑）	自治体	32度58分2.2秒*	131度30分46.9秒*
43	OITA0043	緒方	豊後大野市緒方町	豊後大野市緒方町馬場36（緒方支所）	自治体	32度58分13秒	131度28分25.1秒
44	OITA0044	朝地	豊後大野市朝地町	豊後大野市朝地町朝地891（朝地支所）	自治体	33度0分18.2秒	131度25分51.2秒
45	OITA0045	大野	豊後大野市大野町	豊後大野市大野町田中81-1（大野支所）	自治体	33度2分18.3秒	131度30分5.1秒
46	OITA0046	千歳	豊後大野市千歳町	豊後大野市千歳町新殿706-1（千歳支所）	自治体	33度2分25.9秒	131度35分45.6秒
47	OITA0047	犬飼	豊後大野市犬飼町犬飼	豊後大野市犬飼町犬飼28（犬飼支所）	自治体	33度4分19.1秒	131度38分6.5秒
48	OITA0048	庄内	由布市庄内町	由布市庄内町柿原302（庄内支所）	自治体	33度10分47.4秒	131度25分35.5秒
49	OITA0049	挾間	由布市挾間町	由布市挾間町向原128-1（挾間支所）	自治体	33度11分52.8秒	131度30分47.1秒
50	OITA0050	湯布院	由布市湯布院町川上	由布市湯布院町川上3738-1（湯布院支所）	自治体	33度15分50.4秒*	131度21分27.5秒*
51	OITA0051	国東市	国東市田深	国東市国東町田深275-1（国東市役所）	防災科研	33度33分59.8秒	131度44分16.1秒
52	OITA0052	国見	国東市国見町伊美	国東市国見町伊美2873（国見中学校構内）	防災科研	33度40分41.9秒	131度35分37.0秒
53	OITA0053	武蔵	国東市武蔵町	国東市武蔵町古市684（武蔵総合支所）	自治体	33度30分1.0秒	131度43分9.9秒
54	OITA0054	安岐	国東市安岐町	国東市安岐町中國100（安岐総合支所）	自治体	33度27分59.9秒	131度41分35.3秒
55	OITA0055	姫島村	姫島村役場	東国東郡姫島村1630-1（姫島村役場）	自治体	33度43分28.2秒	131度38分42.4秒
56	OITA0056	日出町	日出町役場	速見郡日出町2974-1（日出町役場）	自治体	33度22分8.9秒*	131度31分56.9秒*
57	OITA0057	九重町	九重町後野上	玖珠郡九重町大字後野上8-1（九重町役場）	自治体	33度13分41.9秒*	131度11分21.7秒*
58	OITA0058	玖珠町	玖珠町帆足	玖珠郡玖珠町大字帆足268-5（玖珠町役場）	気象庁	33度17分0秒	131度9分6秒

特記事項 \*印の緯度・経度は、屋内設置のため、屋外にて測定し、離隔距離から換算した推定値を示す。（緯度：1秒=30.8m、経度：1秒=25.9mで換算）

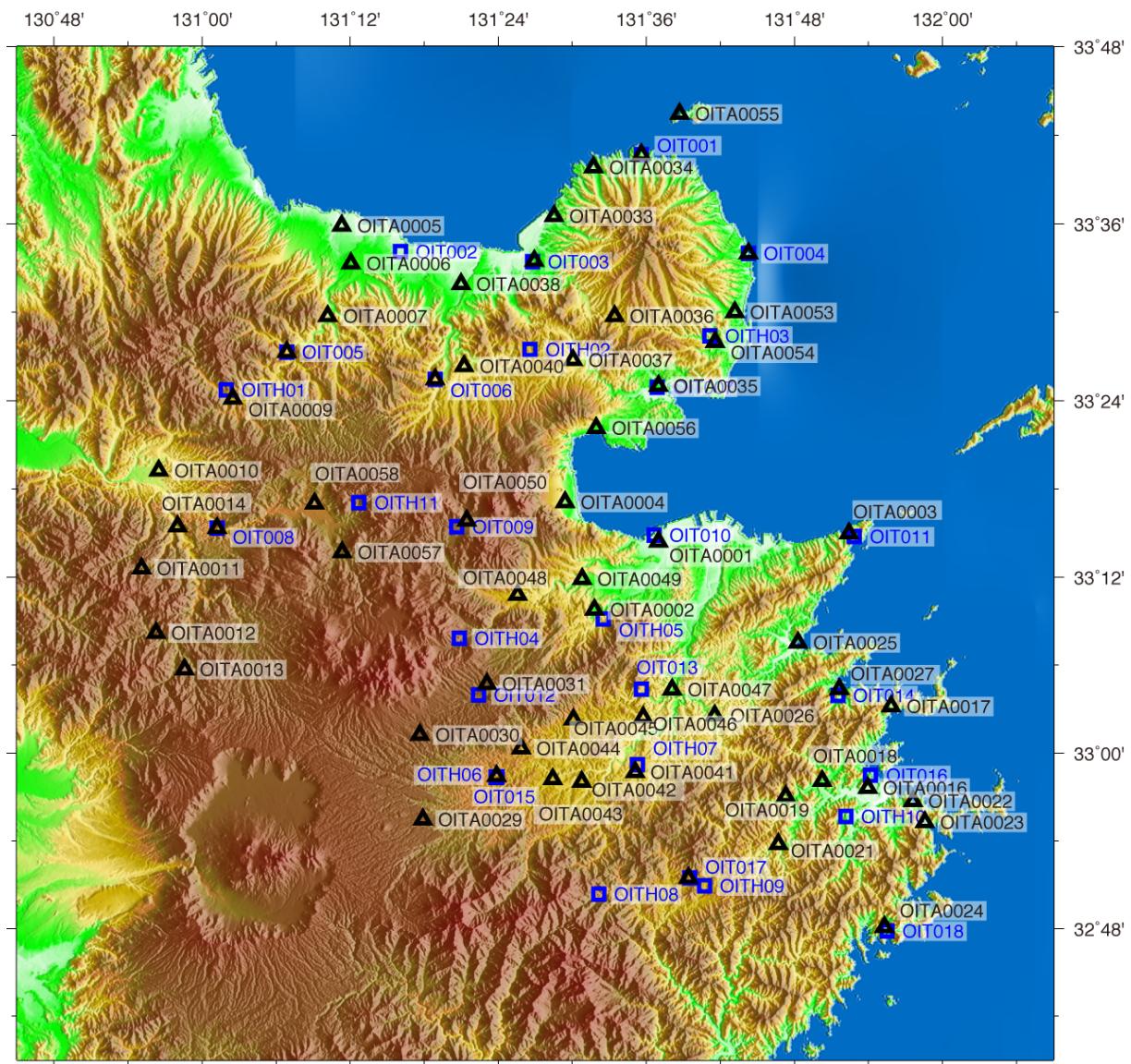


図 3.3.4-1 大分県震度情報ネットワークおよび大分県内の K-NET, KiK-net 観測網分布

表 3.3.4-2 自治体震度計の地震波形記録を収集した地震一覧（気象庁一元化震源）

整理番号	発震時					緯度		経度		深さ(km)	マグニチュード	震央位置	
1	2005	3	20	10	53	40.32	33	44.35	130	10.58	9.24	7.0	NW OFF KYUSHU
2	2005	3	20	20	8	22.46	33	47.88	130	6.32	13.42	4.4	NW OFF KYUSHU
3	2005	3	20	20	38	16.43	33	44.77	130	10.21	11.16	4.5	NW OFF KYUSHU
4	2005	3	21	23	59	21.95	33	47.12	130	6.05	11.99	4.8	NW OFF KYUSHU
5	2005	3	22	15	55	33.45	33	43.52	130	10.61	10.53	5.4	NW OFF KYUSHU
6	2005	4	20	6	11	26.83	33	40.69	130	17.29	13.50	5.8	CENTRAL FUKUOKA PREF
7	2005	4	20	9	9	42.90	33	40.72	130	17.03	13.31	5.1	CENTRAL FUKUOKA PREF
8	2005	5	2	1	23	57.67	33	40.22	130	19.23	11.36	5.0	CENTRAL FUKUOKA PREF
9	2005	5	25	20	31	31.17	33	19.45	132	17.26	54.10	4.6	BUNGO CHANNEL
10	2005	5	31	11	4	14.73	31	18.37	131	32.71	28.63	5.8	SE OFF OSUMI PEN
11	2005	6	3	4	16	41.84	32	29.73	130	32.87	10.89	4.8	AMAKUSA REGION
12	2005	6	27	23	39	50.18	33	45.52	131	28.01	17.46	3.9	SUONADA SETONAIKAI
13	2005	8	17	17	56	52.66	33	17.89	131	23.41	9.98	3.4	NORTHERN OITA PREF
14	2005	9	4	19	6	24.36	33	30.24	132	5.70	53.73	4.3	IYONADA SETONAIKAI
15	2005	12	17	23	27	33.34	33	54.19	131	14.39	15.55	3.7	SUONADA SETONAIKAI
16	2005	12	31	22	26	42.99	33	7.59	131	23.98	122.94	4.5	NORTHERN OITA PREF
17	2006	2	1	12	15	4.32	33	30.59	132	18.01	45.54	4.3	IYONADA SETONAIKAI
18	2006	2	16	3	46	29.89	33	21.51	132	13.60	44.29	3.9	IYONADA SETONAIKAI
19	2006	3	27	11	50	26.37	32	36.10	132	9.42	34.76	5.5	HYUGANADA REGION
20	2006	5	28	20	36	33.03	33	20.56	131	47.84	80.30	4.3	IYONADA SETONAIKAI
21	2006	6	12	5	1	24.98	33	8.12	131	26.13	145.17	6.2	NORTHERN OITA PREF
22	2006	7	11	3	9	16.83	34	1.53	131	10.02	15.81	4.0	YAMAGUCHI PREF
23	2006	9	26	7	3	48.34	33	30.37	131	53.08	70.14	5.3	IYONADA SETONAIKAI
24	2006	9	27	7	51	16.72	33	30.62	131	53.50	70.49	3.8	IYONADA SETONAIKAI
25	2006	11	19	13	29	2.11	33	20.85	132	26.48	41.38	4.2	SW EHIME PREF
26	2007	4	26	9	2	56.95	33	53.36	133	35.08	39.10	5.3	NE EHIME PREF
27	2007	6	6	23	5	2.03	33	20.10	131	29.99	10.50	4.1	NORTHERN OITA PREF
28	2007	6	6	23	42	50.52	33	20.03	131	29.71	11.24	4.9	NORTHERN OITA PREF
29	2007	6	6	23	57	9.31	33	20.08	131	29.05	10.87	3.7	NORTHERN OITA PREF
30	2007	6	7	0	18	34.85	33	19.81	131	29.77	12.00	4.2	NORTHERN OITA PREF
31	2007	6	7	11	19	9.51	33	19.54	131	28.58	7.57	4.2	NORTHERN OITA PREF
32	2007	6	7	14	58	49.88	33	18.86	131	29.22	8.49	3.8	NORTHERN OITA PREF
33	2007	6	7	20	49	28.67	33	19.97	131	30.88	9.36	3.4	NORTHERN OITA PREF
34	2007	6	7	20	50	40.81	33	20.07	131	30.72	7.77	4.7	NORTHERN OITA PREF
35	2007	6	8	20	21	10.66	33	18.77	131	28.55	9.58	3.3	NORTHERN OITA PREF
36	2010	12	26	20	25	5.77	34	0.38	131	16.12	12.74	3.9	YAMAGUCHI PREF
37	2011	1	3	8	22	30.05	33	40.30	130	25.03	12.95	3.8	NE FUKUOKA PREF
38	2011	4	22	3	44	40.28	33	1.71	130	44.13	11.73	3.8	NW KUMAMOTO PREF
39	2011	6	28	21	18	26.23	33	1.49	130	44.14	11.28	4.2	NW KUMAMOTO PREF
40	2011	10	5	23	33	27.59	32	54.84	130	51.02	9.69	4.5	NW KUMAMOTO PREF
41	2012	4	2	16	39	7.18	33	47.00	132	10.97	56.47	4.1	IYONADA SETONAIKAI
42	2012	5	25	4	43	10.23	33	31.34	131	56.70	63.47	4.0	IYONADA SETONAIKAI
43	2012	8	21	2	22	15.69	33	16.02	132	8.80	45.78	3.8	BUNGO CHANNEL
44	2012	12	2	16	29	4.24	33	20.22	131	49.01	69.59	3.9	IYONADA SETONAIKAI
45	2012	12	22	15	15	30.39	33	31.18	132	18.04	46.64	4.5	IYONADA SETONAIKAI
46	2013	3	28	19	16	49.40	32	47.91	132	2.00	42.17	4.1	HYUGANADA REGION
47	2014	3	14	2	6	50.86	33	41.50	131	53.48	78.04	6.2	IYONADA SETONAIKAI
48	2014	3	22	20	5	39.08	33	40.74	131	53.88	76.96	4.2	IYONADA SETONAIKAI
49	2014	5	21	10	11	24.13	33	39.83	131	55.70	76.56	4.0	IYONADA SETONAIKAI
50	2014	8	14	7	51	29.34	33	49.43	131	52.55	76.73	4.4	SUONADA SETONAIKAI
51	2014	8	29	4	14	35.51	32	8.47	132	8.73	18.18	6.0	HYUGANADA REGION

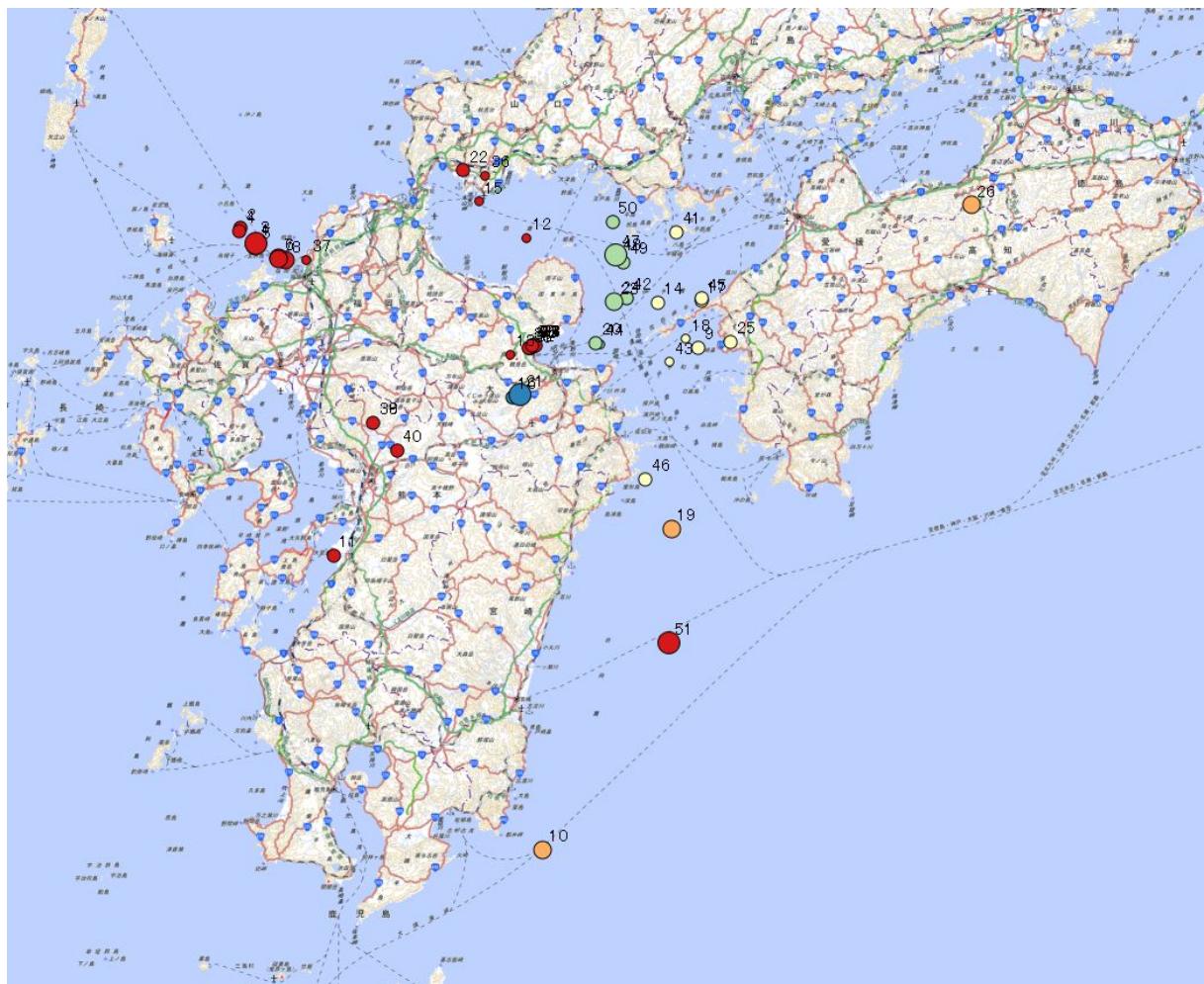


図 3.3.4-2 自治体震度計で地震波形が記録された地震の震央分布図（震央近くの数字は表 3.3.4-2 の整理番号）

表 3.3.4-3 自治体震度計の地震記録収集状況

表 3.3.4-4 防災科研強震観測網 (K-NET、KiK-net) の地震記録状況 (表 3.3.4-3 の地震限定)

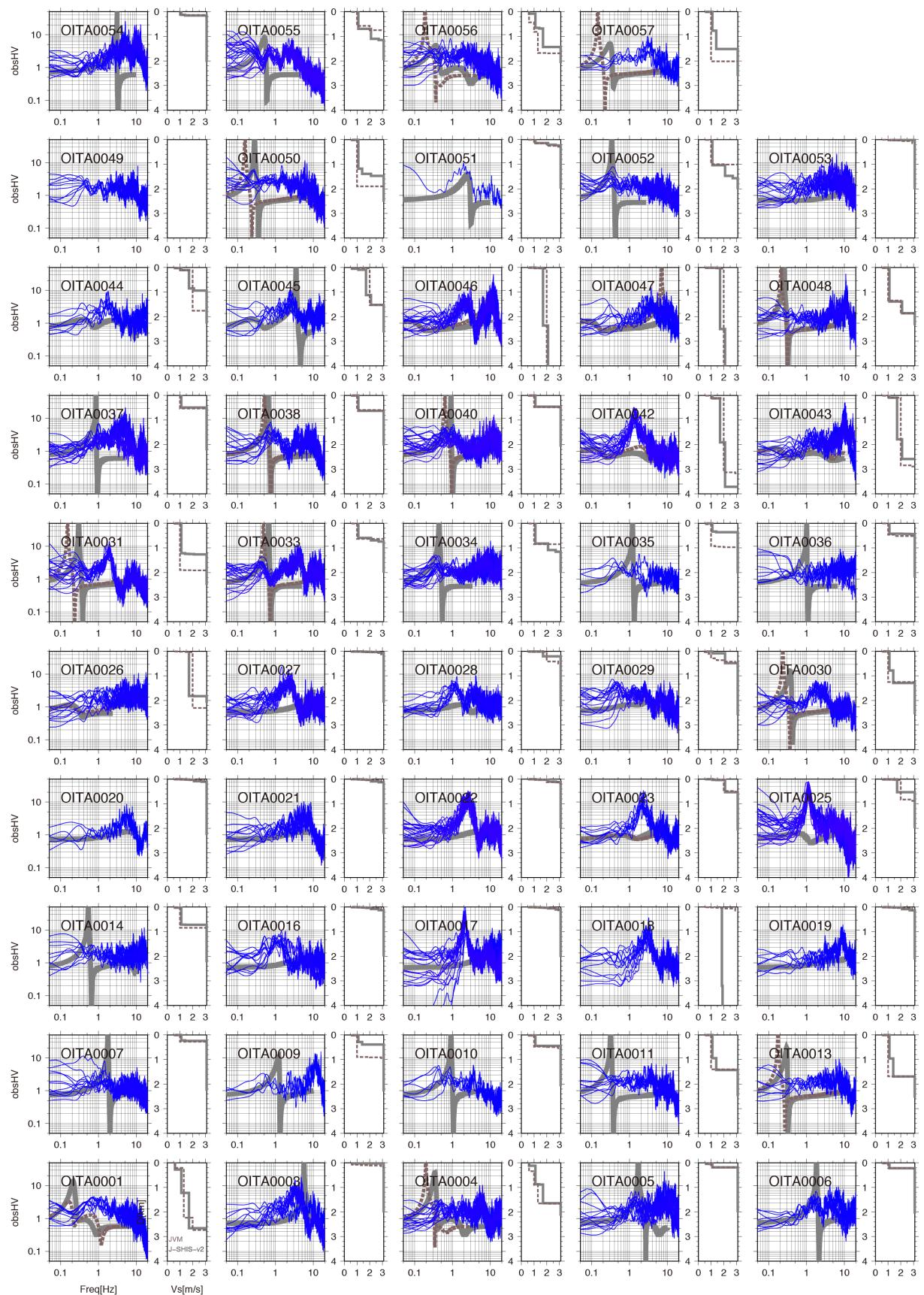


図 3.3.4-3 大分県自治体震度計の強震観測記録から求めた H/V スペクトル

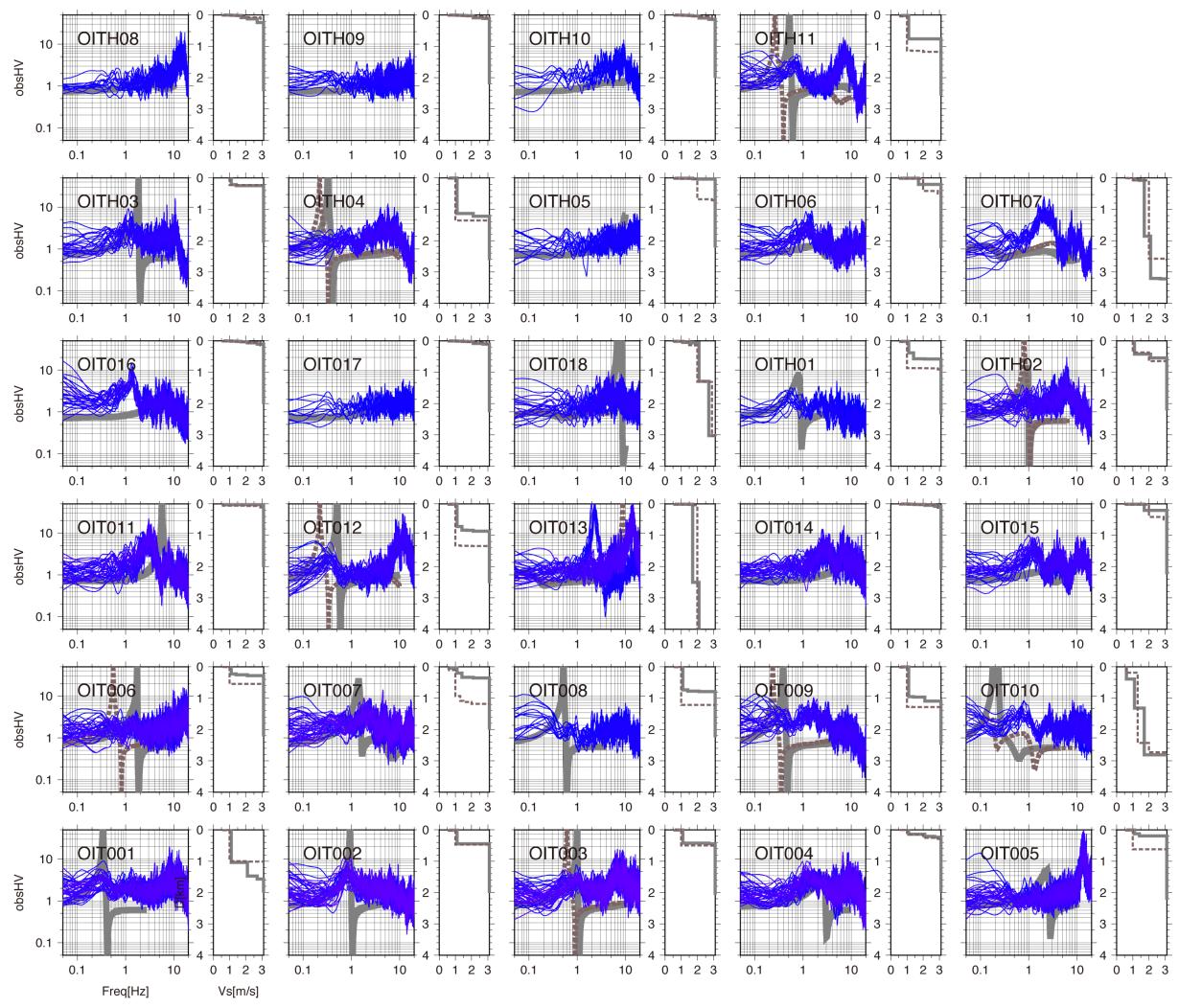


図 3.3.4-4 大分県内 K-NET, KiK-net の強震観測記録から求めた H/V スペクトル

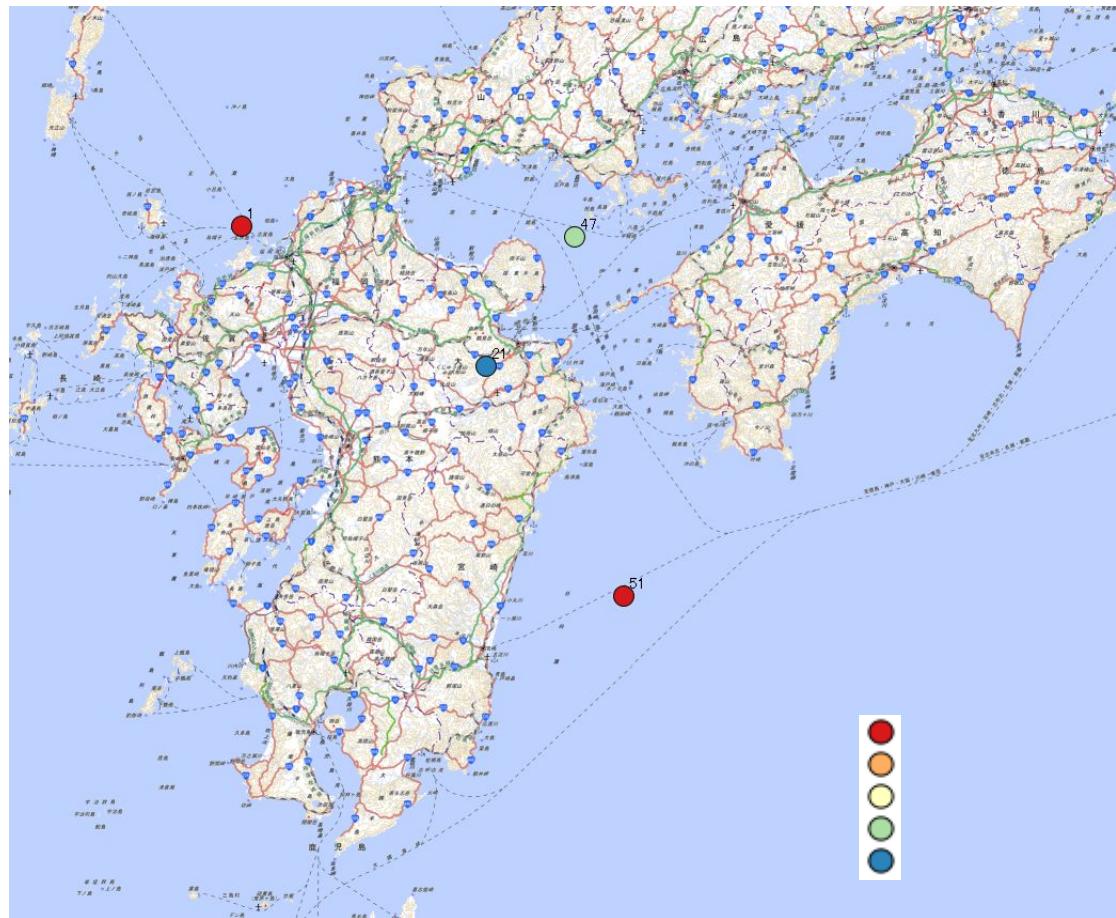


図3.3.4-5 R/Vスペクトルの算定に用いた観測地震の震央図

表 3.3.4-5 R/V スペクトルの算定に用いた観測地震一覧

	発震時							緯度		経度		深さ (km)	M	震央位置
1	2005	3	20	10	53	40.32	33	44.35	130	10.58	9.24	7.0	NW OFF KYUSHU	
21	2006	6	12	5	1	24.98	33	8.12	131	26.13	145.17	6.2	NORTHERN OITA PREF	
47	2014	3	14	2	6	50.86	33	41.50	131	53.48	78.04	6.2	IYONADA SETONAIKAI	
51	2014	8	29	4	14	35.51	32	8.47	132	8.73	18.18	6.0	HYUGANADA REGION	

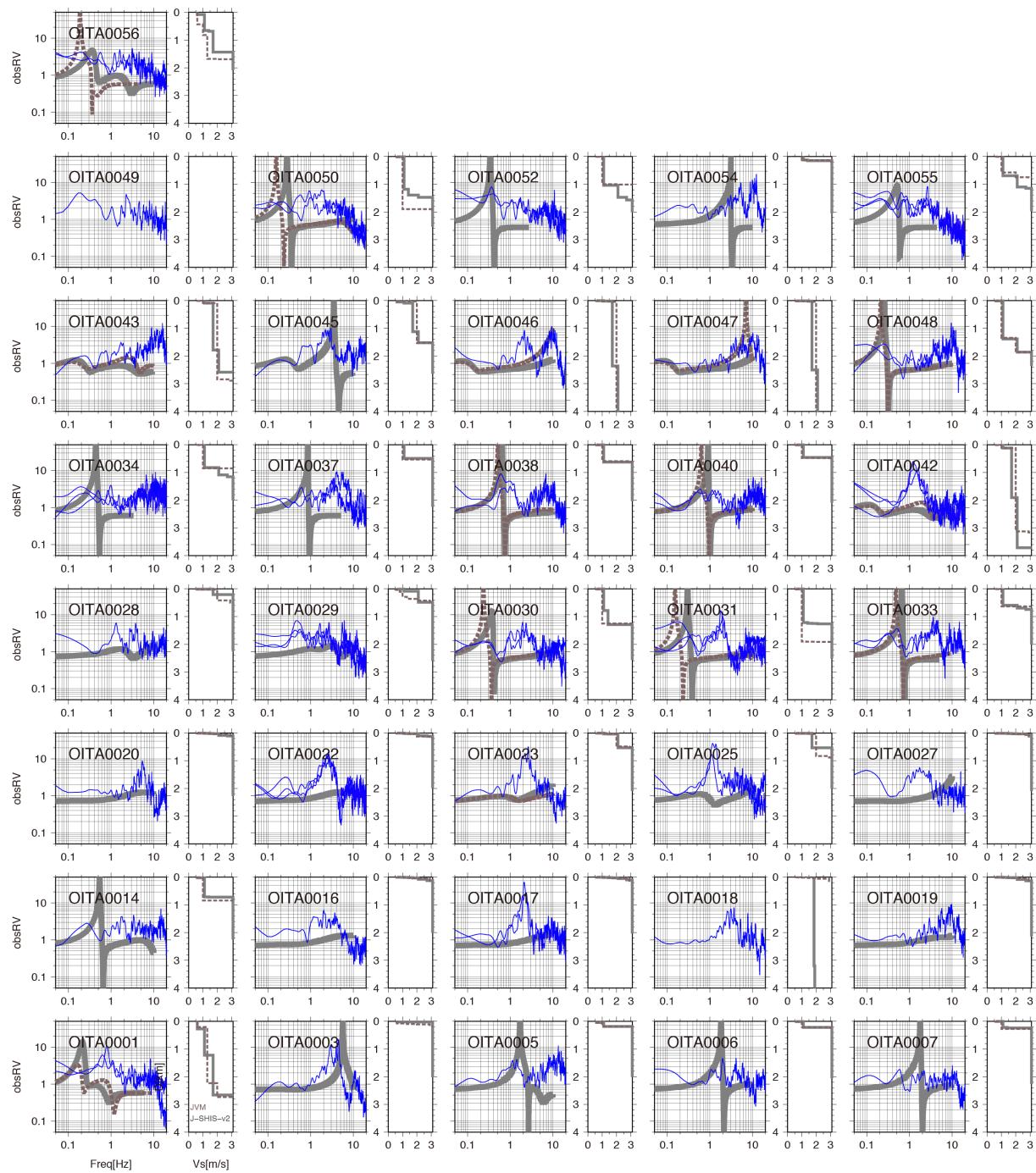


図 3.3.4-6 大分県自治体震度計の強震観測記録 R/V スペクトル

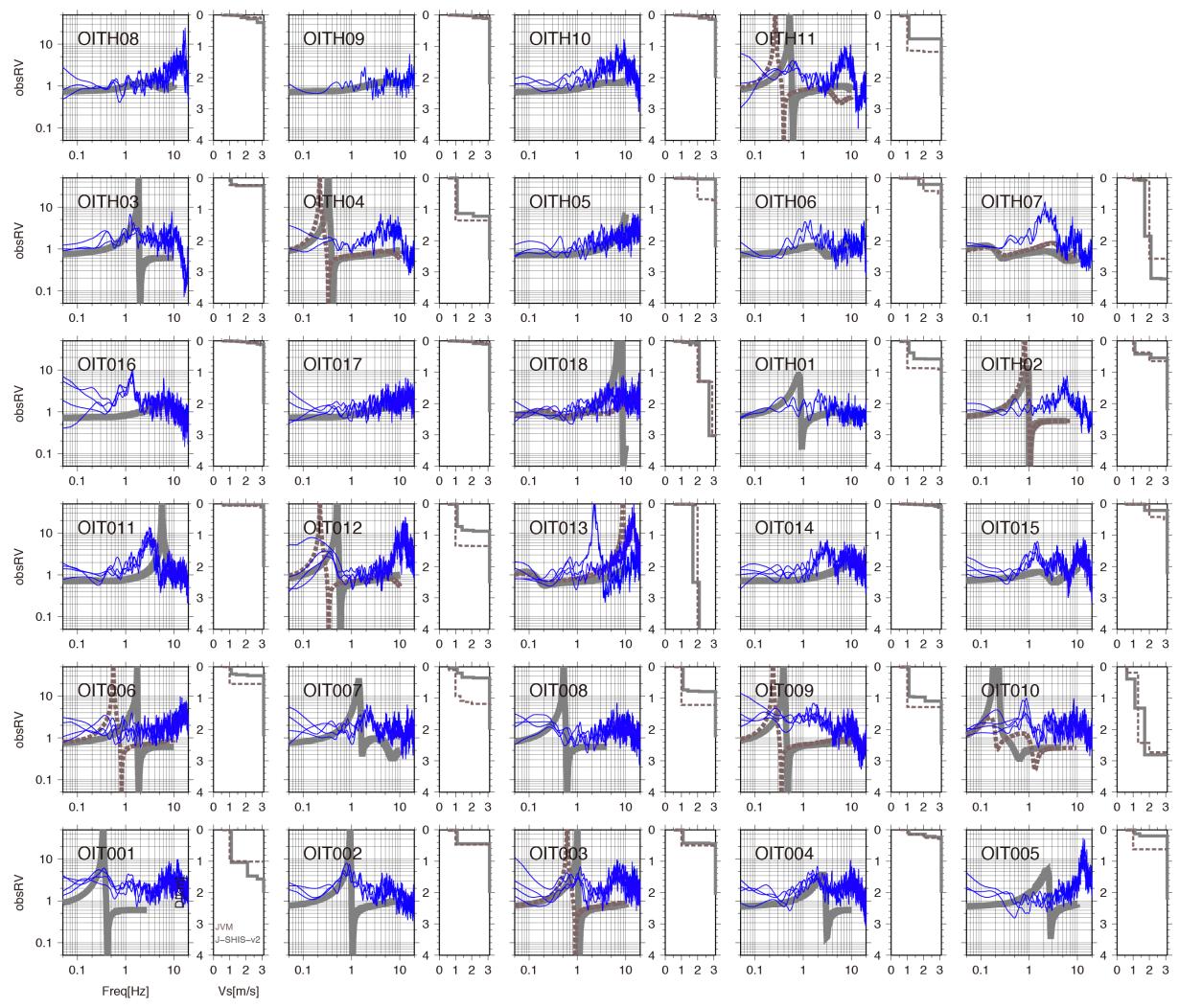


図 3.3.4-7 大分県内 K-NET, KiK-net 観測点の強震観測記録 R/V スペクトル

## 5) 震源モデルの構築

### a) 動的破壊伝播シミュレーションによる破壊シナリオの検討

領域分割法を用いて高速化した動的境界積分方程式法コード (Ando, 2014) を、任意形状の断層面と地表面を考慮できるように拡張した。ここで用いた手法は、計算コストを、従来の動的境界積分方程式法の  $O(N^3)$  から  $O(N^2)$  へ低減したものである。

次に、別府-万年山断層系の一部の断層モデルを作成した。断層面・地表面は、任意形状に対応するため、非構造の三角形メッシュを用いて離散化した。断層形状モデル(図 3.3.5-1)には、大分県(2013)で構築された、別府地溝南縁断層の東側の 2 つのセグメントを考慮した。なお、大分県(2013)モデルの当該 2 セグメントは、2 枚の矩形断層面から構成されているが、この単純化のため、一部不自然にオーバーラップする部分がある。よって、当該部分は、2 枚の面の交線で接合し、1 つの断層面を構成するものとした。さらに、計算コードの動作検証の目的のために、単純な条件下でのシミュレーションを実施した。断層の摩擦、応力パラメタは、コード検証のため断層面上で一様として、動力学的な破壊伝播過程を計算した。

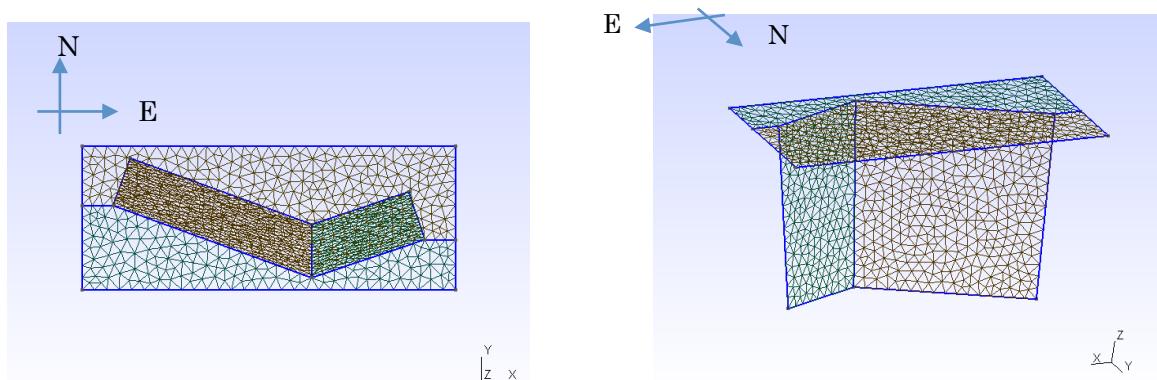


図 3.3.5-1 モデル化した断層面と地表面の形状。それぞれ上空から（左）、北東上空から（右）みたところ。境界要素法における離散化に用いた三角形非構造メッシュを併せて示す。

計算結果を、スナップショットとして図 3.3.5-2 に示す。破壊開始位置は、断層面の中央部の地表付近に仮定しており、左上のパネルで滑りが生じている所である。その後、時間が経過するほど断層面上を滑りが弾性波速度付近で伝播しており、破壊先端付近で最も高速の滑りが生じている。一方、下パネルに示したように、地表面の地震動は断層が地表面を切った場所で上下動の極性が変化しており、その速度は断層面の破壊フロントの直上で大きくなっている。また、地下の断層形状を反映した扇形に下向き速度が広がる地震動分布が得られている。これらの計算結果は、物理的に妥当であり、シミュレーションに用いたコードが正常に動作していることが確認できた。

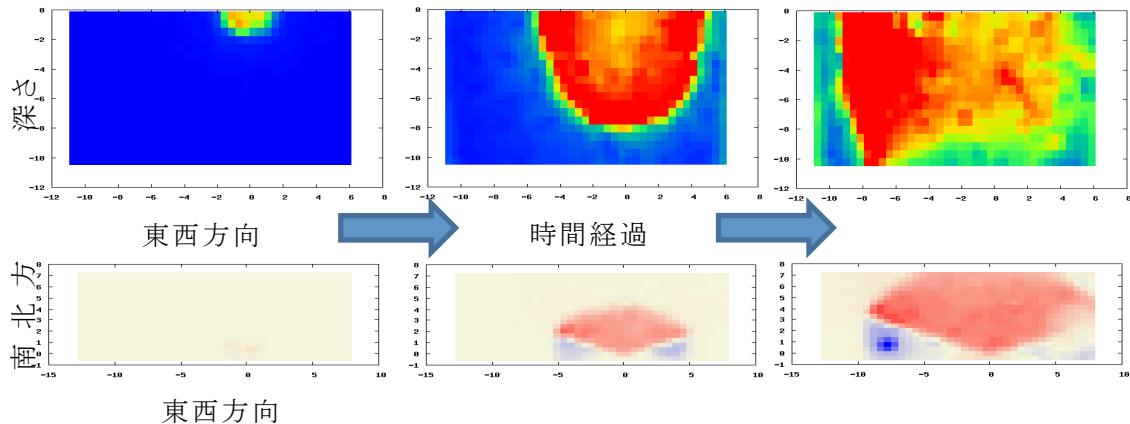


図 3.3.5-2 計算された動的破壊過程のスナップショット。右側のパネルに行くほど、時間が経過している。(上) 断層面状の正断層センスの滑り速度。暖色系になるほど高速。(下) 地表面上の上下動速度。赤色が下向き、青色が上向き。

#### b) 短い活断層および正断層の震源特性調査

別府-万年山断層帯は、地表では長さ 20km 以下の正断層の集合であるという特徴がある（地震調査研究推進本部、2005）。一方、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）（入倉・三宅、2001；地震調査研究推進本部、2009b）では、既往地震の震源パラメタの統計解析（Wells and Coppersmith、1994；Somerville et al., 1999 など）に基づいて巨視的パラメタが設定されているが、主に長さ 20km 以上の横ずれ断層もしくは逆断層の震源パラメタに基づいている。したがって、「レシピ」に基づく断層モデルが別府-万年山断層帯に適しているかどうかは検討の余地がある。

既往の別府-万年山断層帯の強震動予測に使用された震源モデルとして、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2009a）と大分県（2013）が挙げられる。これらの震源モデルは、短い活断層の集合体を単純化した断層面が表現されていること、および正断層の地殻内地震の正断層であるという 2 点の特徴を有している。正断層や逆断層の震源モデルの場合、予測地震動が強まるシナリオとしては、図 3.3.5-3 に示されるような正断層あるいは逆断層の傾斜方向に沿った破壊伝播指向性効果と、正断層あるいは逆断層の断層面のパッチ（= すべりが大きなアスペリティあるいは応力降下が大きな強震動生成域）の垂直方向に生成される焦点効果があり、パッチの応力降下量の設定とその破壊様式のモデル化が重要である。

断層長さが 20km 以下の短い活断層については、松田式（松田、1975）の適用範囲以下であることから、現時点では震源モデルの扱いに関する方針は様々となっている。断層長さ 20km 以下の短い活断層は、地中における断層長さの一部分が見えていると解釈し、断層長さを 20km ( $M_{JMA}$  6.8 相当、 $M_w$  6.5 相当) まで拡張するケースもあれば、最新の知見の活用という記述に留めているケースも見受けられる。近年 Leonard (2014) によって、短い活断層と地中斷層長さの関係式が図 3.3.5-4 として提示されている。この関係式は海外の活断層データベースに依っているため、国内の活断層データベースを加味し、経験式を再構築する必要がある。

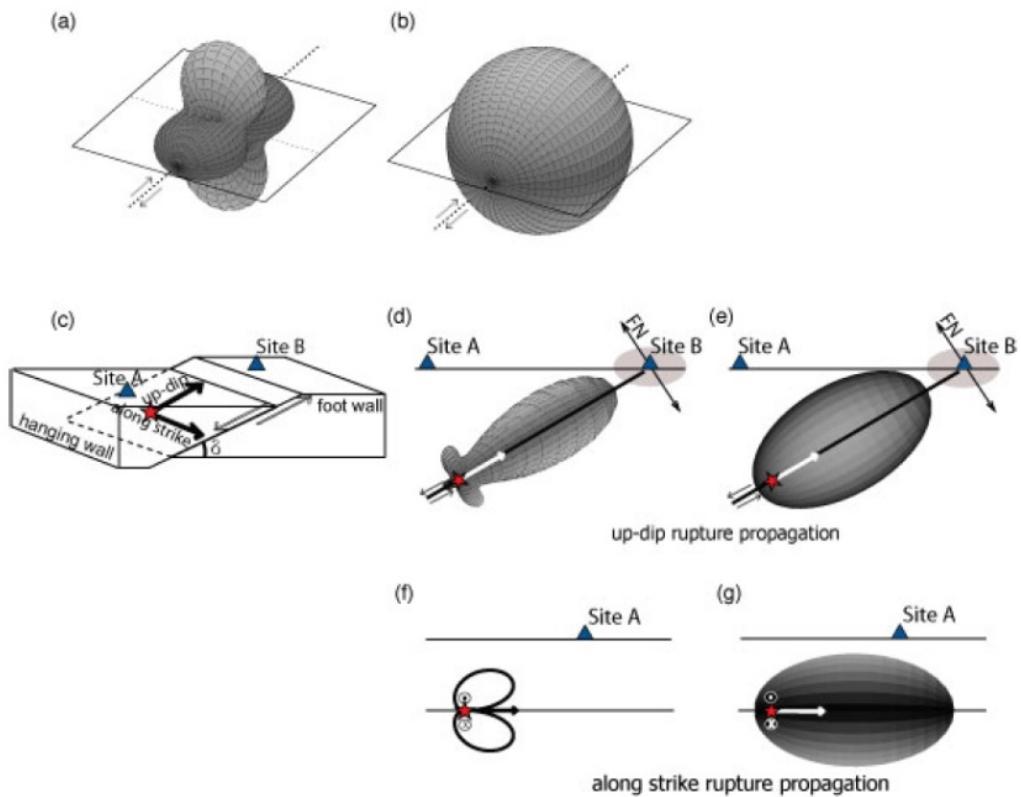


図 3.3.5-3 傾斜する断層における強震動の生成メカニズム (Poiata et al., 2012)。

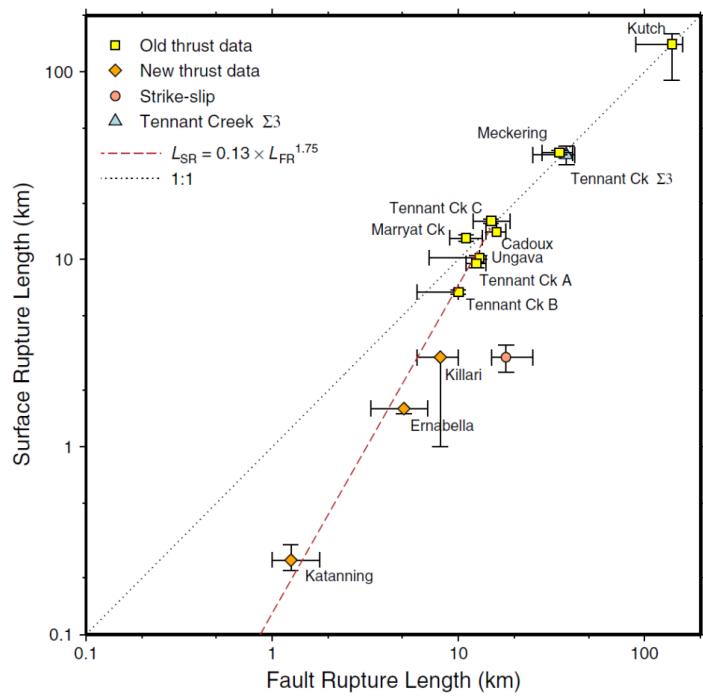


図 3.3.5-4 短い活断層と地中斷層長さの関係式 (Leonard, 2014)。

また、正断層の震源特性については、これまでの文献調査により、正断層の応力降下量は、横ずれ断層や逆断層と同様であるという研究 (Somei et al., 2014) や、 $b$  値の違いを指摘する研究 (Schorlemmer et al., 2005) がある。しかしながら、別府一万年山断層帶の想定震源域における地震活動は非常に低调であり、 $b$  値から震源特性を拘束することは難しい。一方、九州地域の地殻内地震に関しては、応力降下量が大きいと指摘する研究 (Oth, 2013) もあるが、小さいと指摘する研究 (佐藤, 2010) もある。さらに、Somei et al. (2014) に示される本震と余震の応力降下量の違いを検討する必要がある。したがって、九州地域の地殻内で発生する地震の地域性を、距離減衰式との乖離から推定することが有効であると考えられる。

上記より、別府一万年山断層帶の強震動予測における震源モデルの構築に際しては、断層長さが 20km 以下の短い活断層と震源断層長さの関係式の再構築、地殻内地震の正断層の応力降下量の設定、九州地域の地殻内で発生する本震の平均応力降下量が重要な要素となると考えられる。

### (c) 結論ならびに今後の課題

#### 1) 微動アレイ探査

固有周期 10 秒の 3 成分速度計を用いて大分平野 12 カ所、別府扇状地 5 カ所、由布院盆地 1 カ所にて最大半径 1 km 程度の微動アレイ観測を実施し、0.2Hz から 5-10Hz の範囲でレリーフ波の位相速度の暫定値を得た。既往速度構造モデルから計算される理論位相速度と観測値との比較を行った。今後は、別府湾北岸域における微動アレイ観測を追加すること、SPAC 法以外のアレイ解析手法も総合した観測位相速度の絞り込みと速度構造の逆解析が課題である。

#### 2) 単点微動観測および小半径微動アレイ観測

大分平野の沖積層分布地域に 3 測線を設定し可搬型 3 成分加速度計 12 台を用いた単点微動同期観測を実施した。観測した水平上下スペクトル比 (H/V スペクトル) には表層地盤特性に対応すると地域性が見られた。また、別府湾周辺地域の広域における 3 成分速度計による単点微動観測では、H/V スペクトルの 0.1Hz から 1 Hz 帯のピークが深部速度構造と対応する可能性が見出された。さらに、小半径微動アレイ観測を実施し、浅層の S 波速度構造推定のためのデータを蓄積した。今後は、さらなるデータの追加とともに、ボーリングデータ等を合わせ、H/V スペクトルおよび小半径微動アレイ観測結果を満足する浅部・深部地下構造モデルの構築が課題である。

#### 3) 連続微動観測網の構築と地震波干渉法解析

別府湾を取り囲む全 12 点の広帯域地震計連続微動観測網を構築し、地震波干渉法解析のための観測データを蓄積した。別府湾周辺域の防災科研 Hi-net の 1 年間分の観測記録を用いた干渉法予察解析を実施し、別府湾広域の長測線での平均的な群速度を推定した。連続微動観測網で得られた 5 ヶ月分のデータを用いた地震波干渉法解析を行い、観測点ペアによつては分散性をもつ波群が検出されつつあることを確認し、いくつかの観測点ペアについて群速度の暫定値を得た。今後は、連続微動観測を継続して地震波干渉法解析を実施し、

より多くの観測点ペアで群速度を推定すること、群速度データおよび相互相関関数を満足する地下速度構造モデルの構築が課題である。

#### 4) 地震観測波形の収集・解析

大分県内の強震観測点・震度観測点等の地震波形記録を収集し、整理を行った。大分県自治体震度計の記録を収集することによって広範囲の地震記録の収集を行うことができた。地震記録を用いて、H/Vスペクトル、R/Vスペクトルの検討を実施し、観測点周辺の地下構造モデルの修正に資するデータセットを構築した。今後は、引き続きデータ収集を進めるとともに、解析結果や時刻歴波形を用いて大分県広域の速度構造モデルの妥当性検証が課題である。

#### 5) 震源モデルの構築

別府湾南縁断層帯について、大分県(2013)のモデルを参考に断層形状モデルを作成した。境界積分方程式法を用いた数値計算コードを開発し、動的破壊過程のシミュレーションを行い、コードの動作を確認した。モデルの高精度化を行い、動力学的に妥当な破壊シナリオを検討することが課題である。また、別府一万年山断層帯の震源モデル構築に際して、断層長さが20km以下の短い活断層と震源断層長さの関係式の再構築、地殻内地震の正断層の応力降下量の設定、九州地域の地殻内で発生する本震の平均応力降下量の把握の3点がキーパラメータであることを確認した。今後は、震源モデル構築に資するデータを収集し、検討を進めることが課題である。

#### (d) 引用文献

- Aki, K., Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, 415-456, 1957.
- Ando, R., New Efficient Dynamic 3-D Boundary Integral Equation Method applicable to Non-Planar Fault Geometry Dipping in Elastic Half Space, AGU Fall meeting, S21B-4431, 2014.
- Asano, K., T. Iwata, and H. Sekiguchi, Application of Seismic Interferometry in the Osaka Basin for Validating the Three-dimensional Basin Velocity Structure Model, Proc. 15th World Conf. Earthq. Eng., Paper No. 0666, 2012.
- Bensen, G. D., M. H. Ritzwoller, M. P. Barmin, A. L. Levshin, F. Lin, M. P. Moschetti, N. M. Shapiro, and Y. Yang, Processing Seismic Ambient Noise Data to Obtain Reliable Broad-band Surface Wave Dispersion Measurements, Geophys. J. Int., 169, 1239-1260, 2007.
- Capon, J., High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis, Proceedings of the IEEE, 57, 1408-1418, 1969.
- Chimoto, K., and H. Yamanaka, Tomographic Estimation of Surface-wave Group Velocity using Seismic Interferometry in Southern Kanto, Japan, Proc. 4th IASPEI/IAEE Int'l Symp.: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 5.6., 2011.
- Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, A new method to determine phase velocities of

- Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, 69, 1535–1551, 2004
- Cho, I., T. Tada, and Y. Shinozaki, Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *J. Geophys. Res.*, 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235, 2006.
- Dziewonski, A., S. Bloch, and M. Landisman, A Technique for the Analysis of Transient Seismic Signals, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 59, 427–444, 1969.
- 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.
- 林田拓己・吉見雅行・堀川晴央, 中京地域堆積盆地における表面波群速度の推定—Hi-net連続地震観測記録を用いた地震波干渉法に基づく検証—, 地震, 66, 127–145, 2014.
- 入倉孝次郎・三宅弘恵, シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849–875, 2001.
- 岩城麻子・岩田知孝・関口春子・浅野公之・吉見雅行・鈴木晴彦, 大分平野における想定南海地震による長周期地震動のシミュレーション, 地震, 61, 161–173, 2009.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 別府-万年山断層帯の評価, 73pages, 2005.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 「長周期地震動予測地図」2009年試作版, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_choshuki/](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/), 2009a.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 震源断層を特定した地震の地震動予測手法(「レシピ」), [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/g\\_furoku3.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf), 2009b.
- Kusumoto, S., Y. Fukuda, S. Takemoto, and Y. Yusa, Three-dimensional subsurface structure in the eastern part of the Beppu-Shimabara graben Kyushu, Japan, as revealed by gravimetric data, *J. Geodetic Soc. Japan*, 42, 167–181, 1996.
- Leonard, M., Self-consistent earthquake fault-scaling relations: Update and extension to stable continental strike-slip faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104, 2953–2965, 2014.
- 松田時彦, 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 28, 269–284, 1975.
- 宮腰研・岡田廣・凌甦群, 微動探査法における推定可能な微動中の表面波位相速度の波長範囲, 物理探査学会第94回学術講演会論文集, 178–182, 1996.
- 宮腰研・山本容維・凌甦群・岩田知孝, 微動アレイ観測による大分平野の地下構造調査, 日本地球惑星科学連合2007年大会予稿集, S150-P005, 2007.
- Nishida, K., H. Kawakatsu, and K. Obara, Three-dimensional crustal S-wave velocity structure in Japan using microseismic data recorded by Hi-net tiltmeters, *J. Geophys. Res.*, 113, B10302, doi:10.1029/2007JB005395, 2008.
- 大分県, 平成11年度地震関係基礎調査交付金「別府-万年山断層帯に関する調査成果報告書」, 2000.
- 大分県, 平成13年度地震関係基礎調査交付金「別府-万年山断層帯に関する調査成果報告書」, 2002
- 大分県, 大分県地震被害想定調査報告書, 230pages, 2008.

大分県, 大分県津波浸水予測調査結果（確定値）について, 2013.

Okada, H., The Microtremor Survey Method (translated by Koya Suto), Geophysical Monograph Series, No. 12, Society of Exploration Geophysicists, 2003.

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, 6, 402-417, 1990.

Oth, A., On the characteristics of earthquake stress release variations in Japan. Earth Planet. Sci. Lett., 377-378, 132-141, 2013.

Poiaia, N., H. Miyake, and K. Koketsu, Generation mechanism of near-fault ground motion pulses for dip-slip faulting, Proc. 15th World Conf. Earthq. Eng., Paper No. 0872, 2012.

佐藤智美, 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文集, 651, 923-932, 2010.

佐藤浩章・栗山雅之・東貞成・岡崎敦, 地震波干渉法による表面波の分散性データを用いた若狭湾地域の深部地盤構造の推定, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, 955-963, 2014.

Schorlemmer, D., S. Wiemer, and M. Wyss, Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes, Nature, 437, 539-542, 2005.

Shapiro, N.M. and M. Campillo, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, Geophys. Res. Lett., 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491, 2004.

Snieder, R., Extracting Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, Physical Review, E69, 046610, 2004.

Somei, K., K. Asano, T. Iwata, and K. Miyakoshi, Source scaling of inland crustal earthquake sequences in Japan using the S-wave coda spectral ratio method, Pure Appl. Geophys., 171, 2747-2766, 2014.

Somerville, P.G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada, Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70, 59-80, 1999.

Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, Beyond the SPAC method: exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, Bull. Seism. Soc. Am., 97, 2080- 2095, doi:10.1785/0120070058, 2007.

Tada, T., I. Cho, and Y. Shinozaki, New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology. ([http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publications/Doc/conference\\_7th.pdf](http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publications/Doc/conference_7th.pdf)), 2010

Takagi, R., T. Okada, H. Nakahara, N. Umino, and A. Hasegawa, Coseismic Velocity Change in and around the Focal Region of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake,

- J. Geophys. Res., 117, B06315, doi:10.1029/2012JB009252, 2012.
- Wapenaar, K. and J. Fokkema, Green's function representations for seismic interferometry, Geophysics, 71, SI33-SI46, 2006.
- Wells, D.L. and K.J. Coppersmith, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull. Seis. Soc. Am., 84, 974-1002, 1994.
- 中山浩明・地元孝輔・諸井孝文・池浦友則・纈纈一起・坂上 実・中井正一・関口 徹・小田義也, 南関東地域における微動の長期連続観測記録の地震波干渉法処理による表面波の群速度の推定, 物理探査, 63, 409-425, 2010.
- 吉見雅行・山田浩二・秋永康彦, 大分平野南部における反射法地震探査, 日本地震学会 2007 年秋季大会講演予稿集, P2-066, 2007.
- 吉見雅行・吉田邦一・関口春子・堀川晴央・竿本英貴・松浦旅人, 微動アレイ探査で推定した大分平野の S 波速度構造, 活断層・古地震研究報告, 8, 295-315, 2008.
- 由佐悠紀・竹村恵二・北岡豪一・神山孝吉・堀江正治・中川一郎・小林芳正・久保寺 章・須藤靖明・井川 猛・浅田正陽, 反射法地震探査と重力測定による別府湾の地下構造, 地震 2, 45, 199-212, 1992.