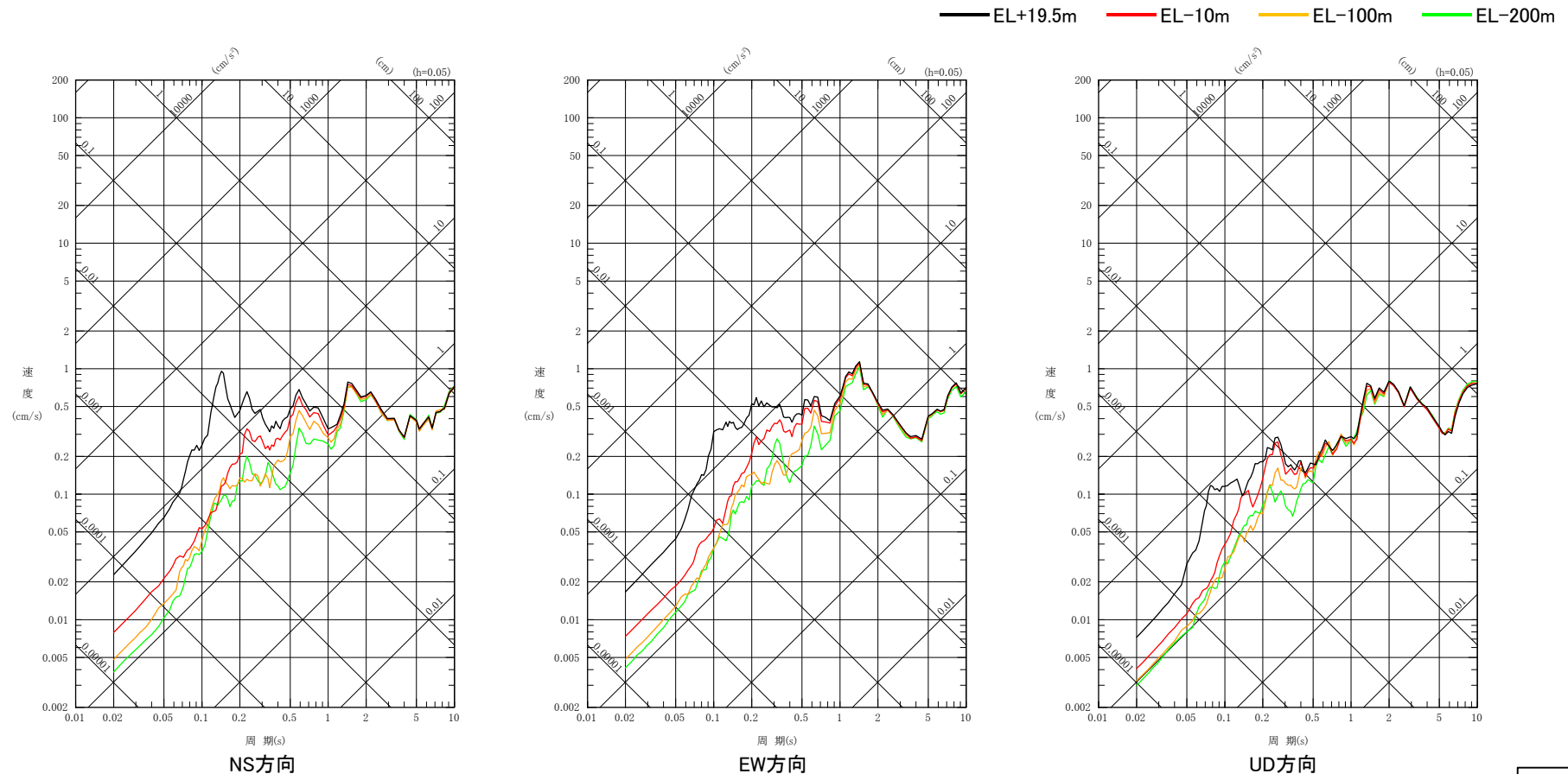


(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (2/11)

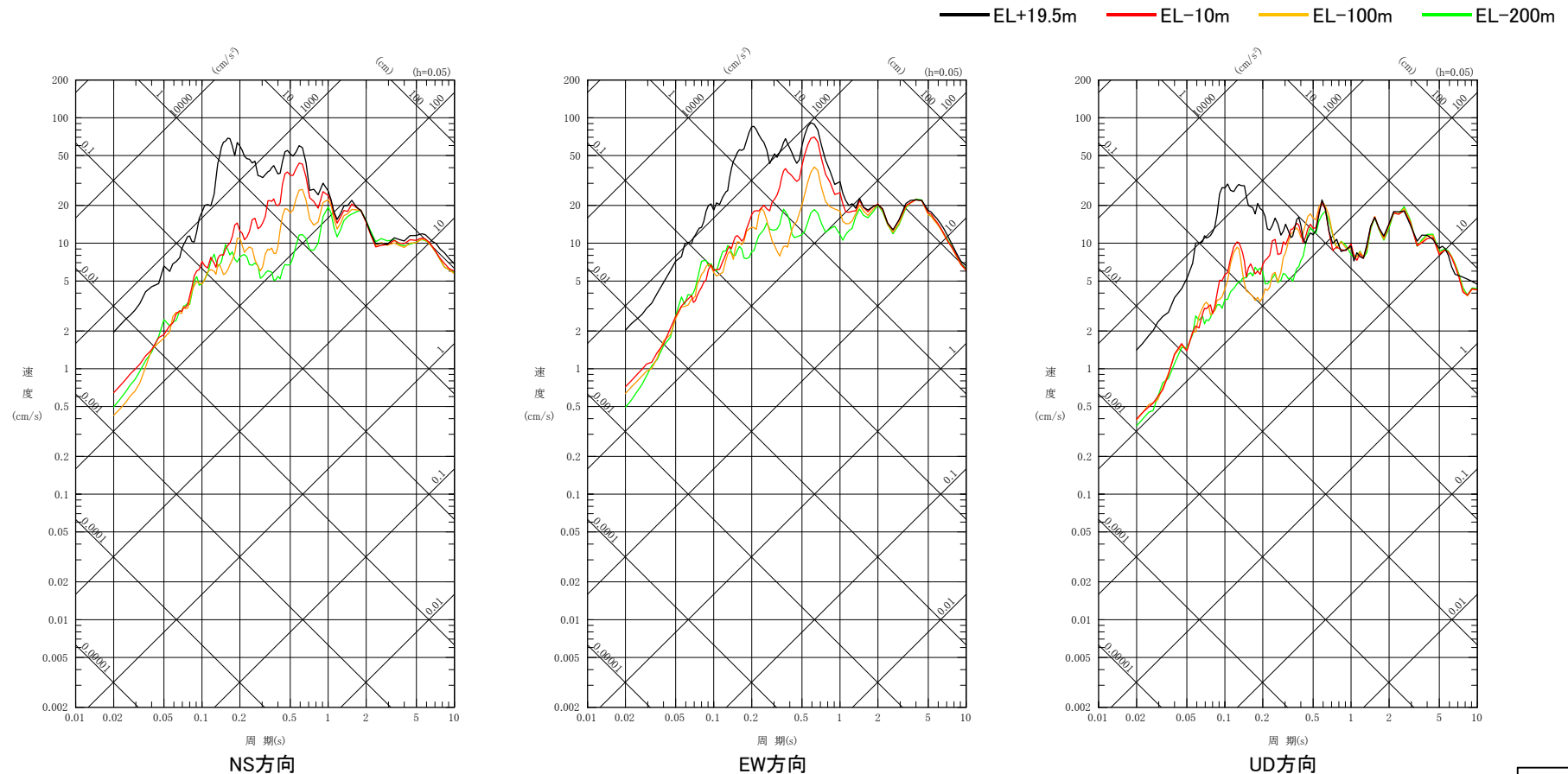
○ No.2(2004年新潟県中越地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



深度別の擬似速度応答スペクトル(No.2(2004年新潟県中越地震))

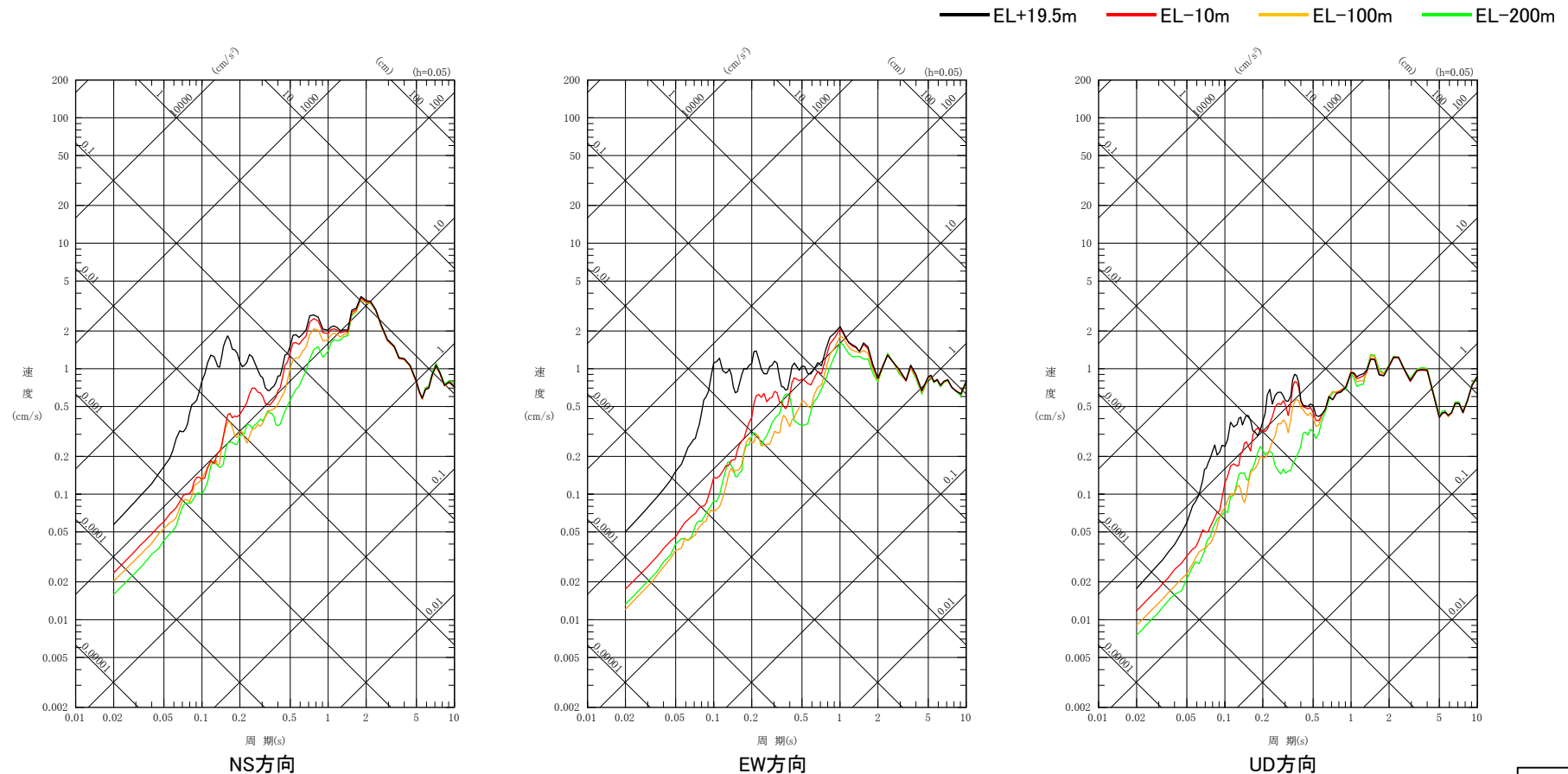
(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (3/11)

○ No.3(2007年能登半島地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (4/11)

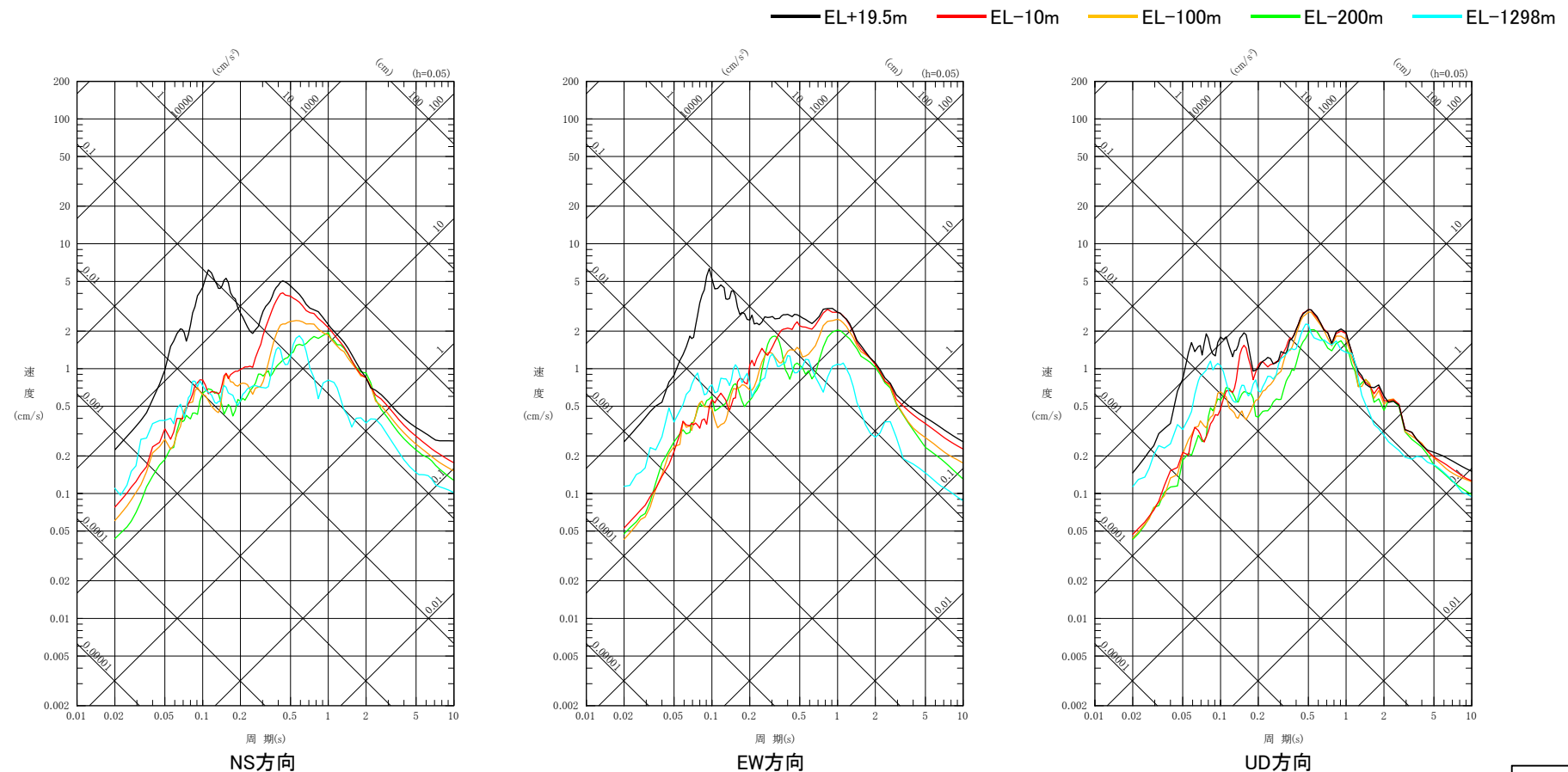
○ No.4 (2007年新潟県中越沖地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



深度別の擬似速度応答スペクトル(No.4(2007年新潟県中越沖地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (5/11)

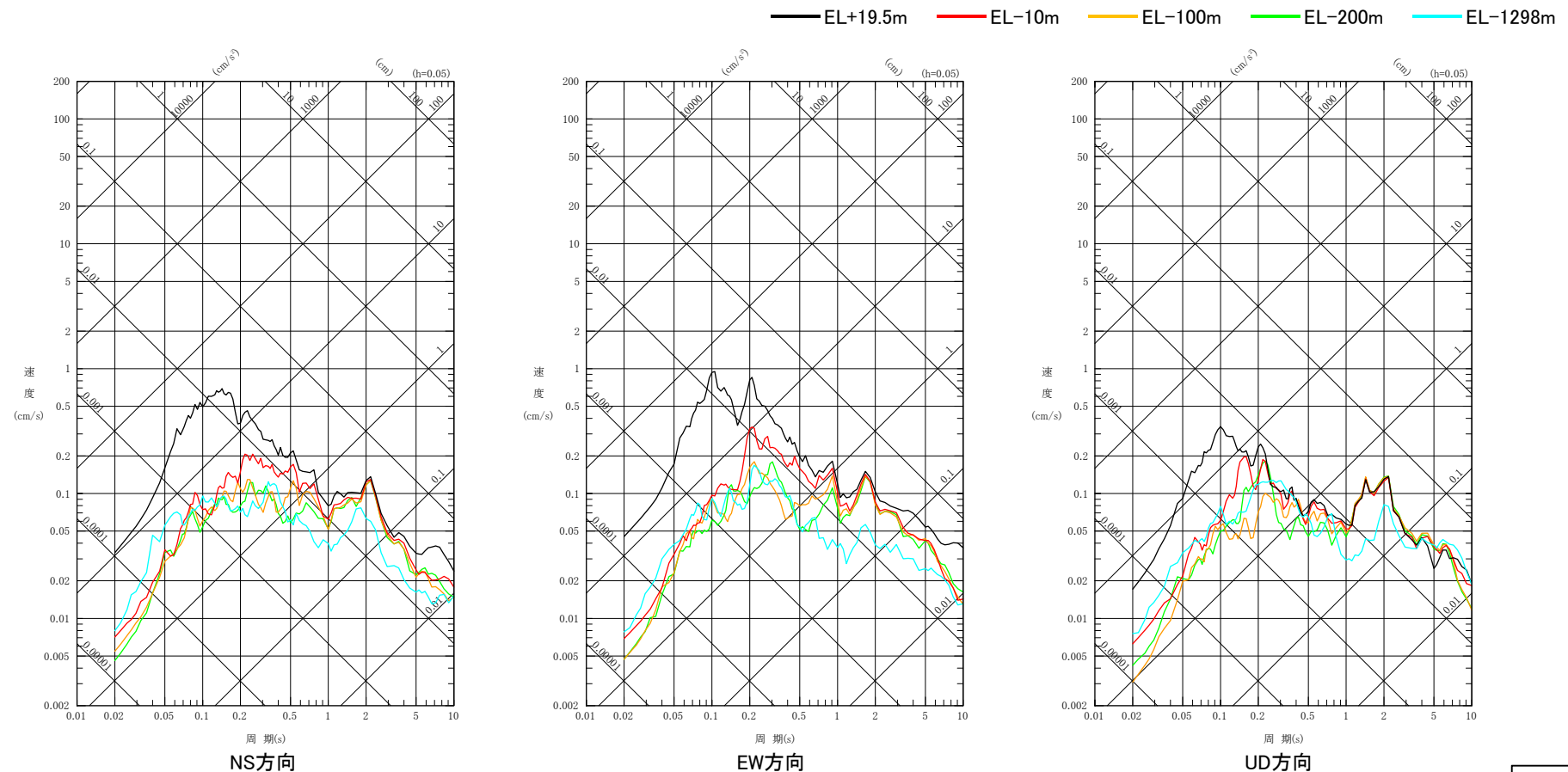
○ No.5(2020/03/13 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m ~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



深度別の擬似速度応答スペクトル(No.5(2020/03/13 石川県能登地方の地震))

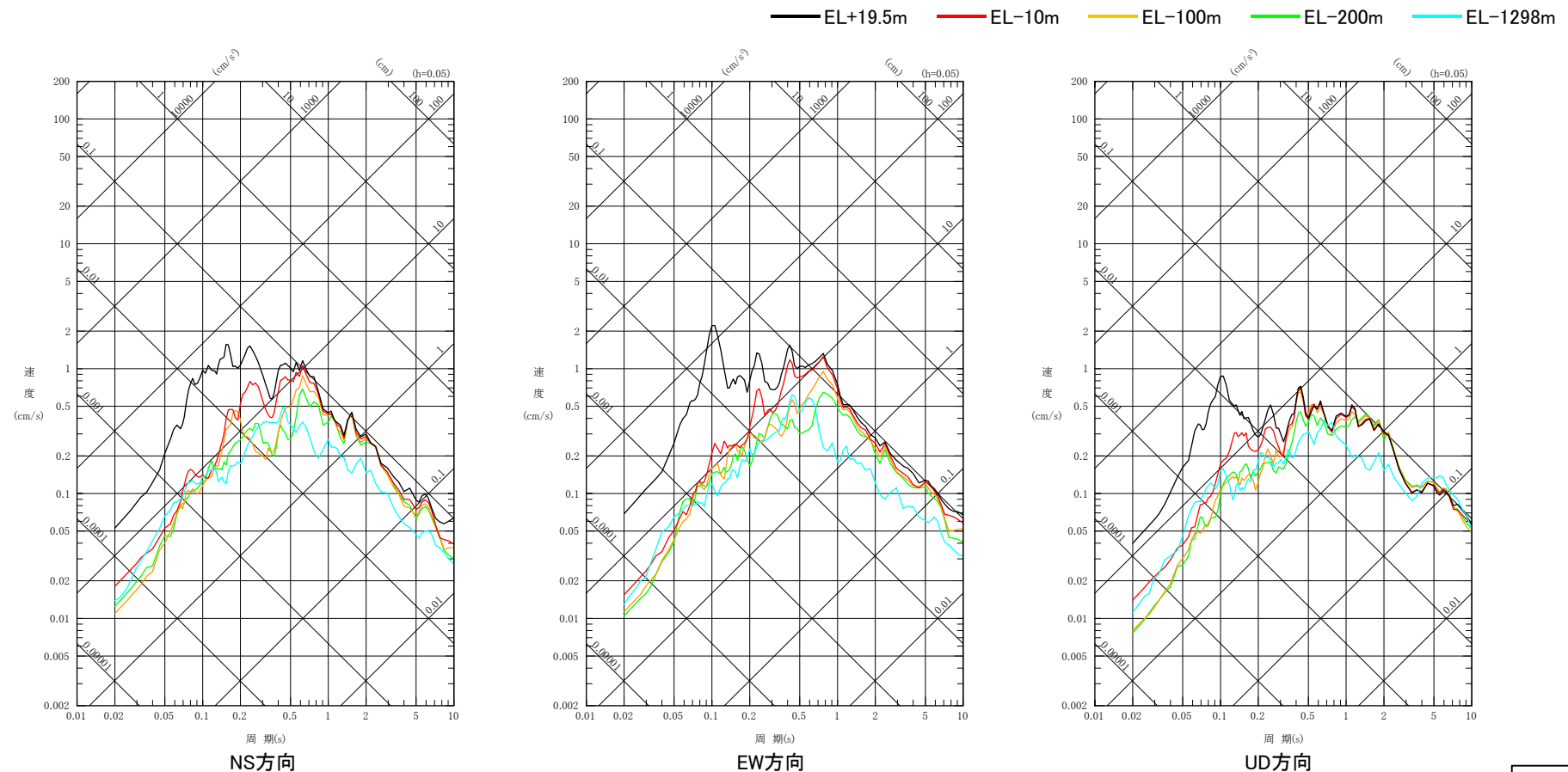
(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (6/11)

○ No.6(2021/09/16 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m ~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (7/11)

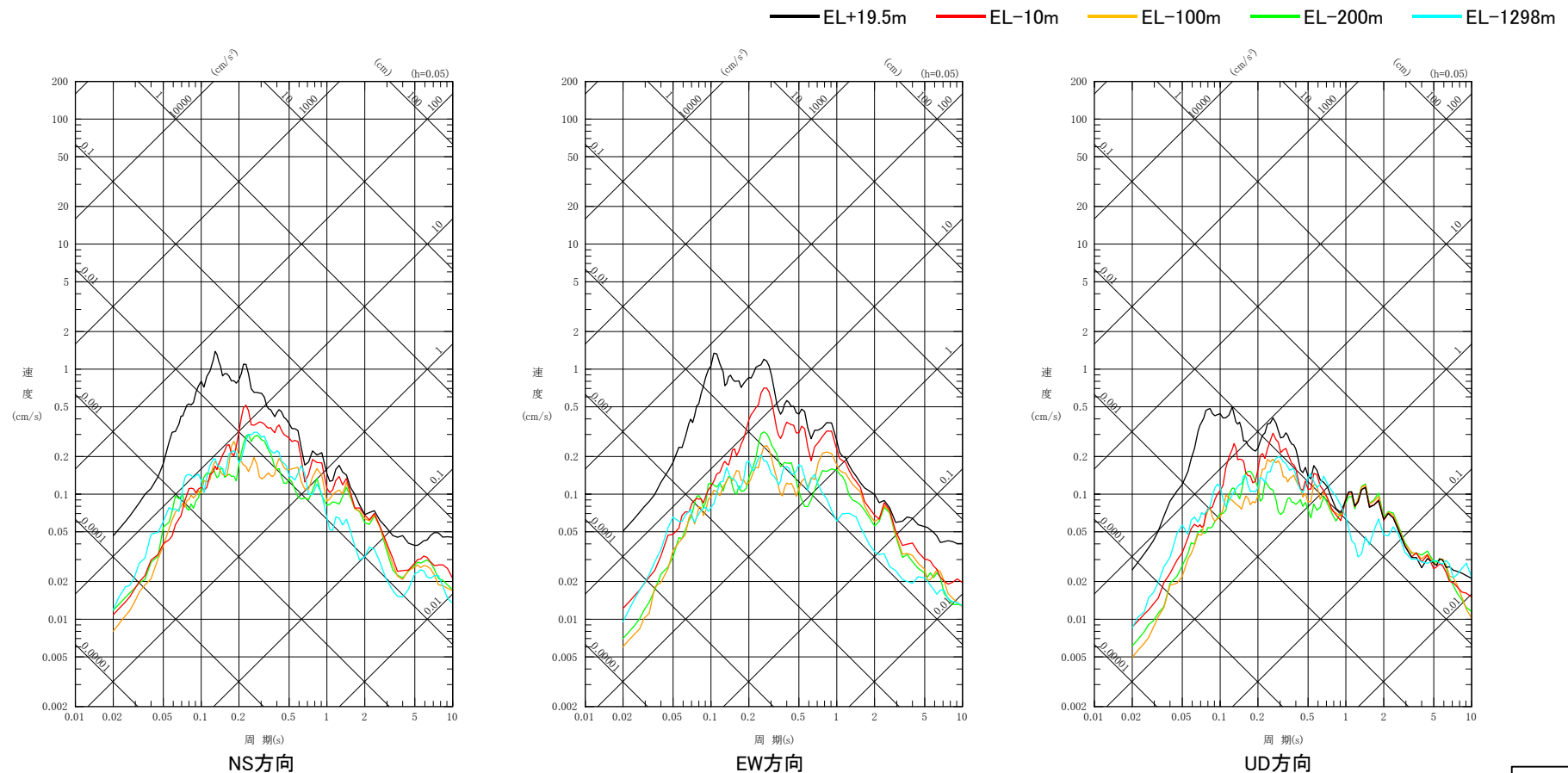
○ No.7(2022/06/19 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m ~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



深度別の擬似速度応答スペクトル(No.7(2022/06/19 石川県能登地方の地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (8/11)

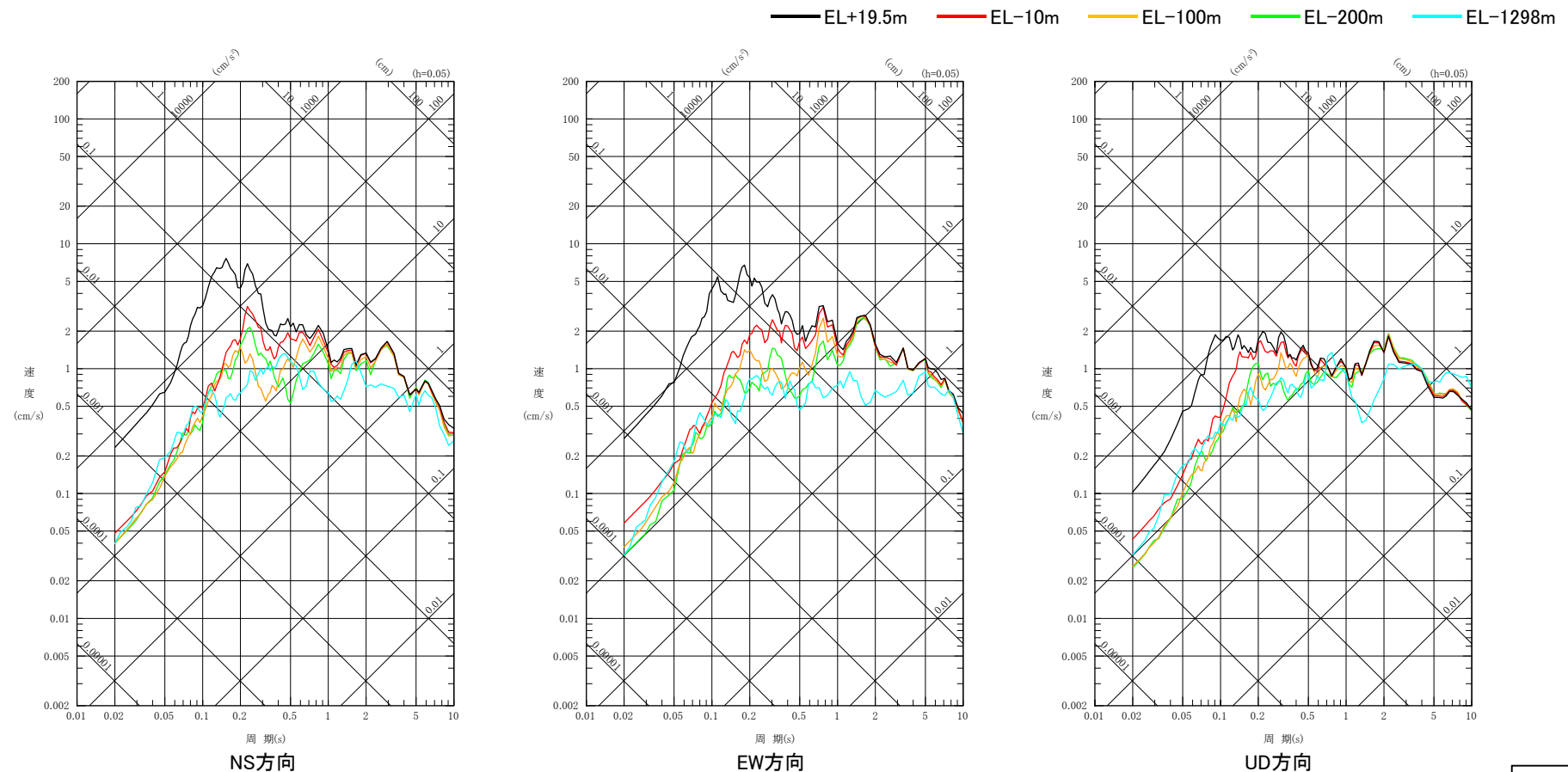
○ No.8(2022/06/20 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m ~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



深度別の擬似速度応答スペクトル(No.8(2022/06/20 石川県能登地方の地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (9/11)

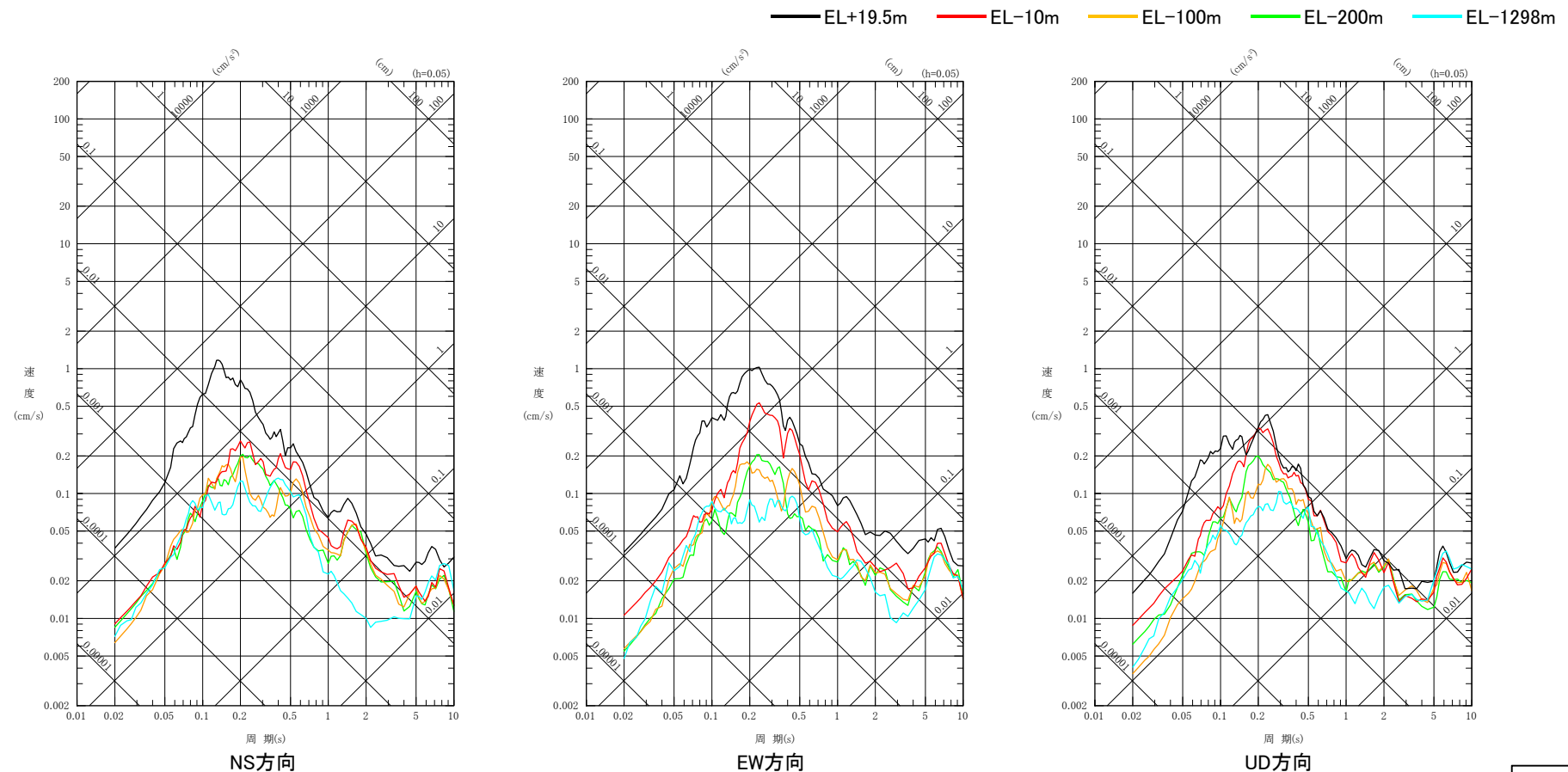
○ No.9(2023/05/05 14:42 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



深度別の擬似速度応答スペクトル(No.9(2023/05/05 14:42 石川県能登地方の地震))

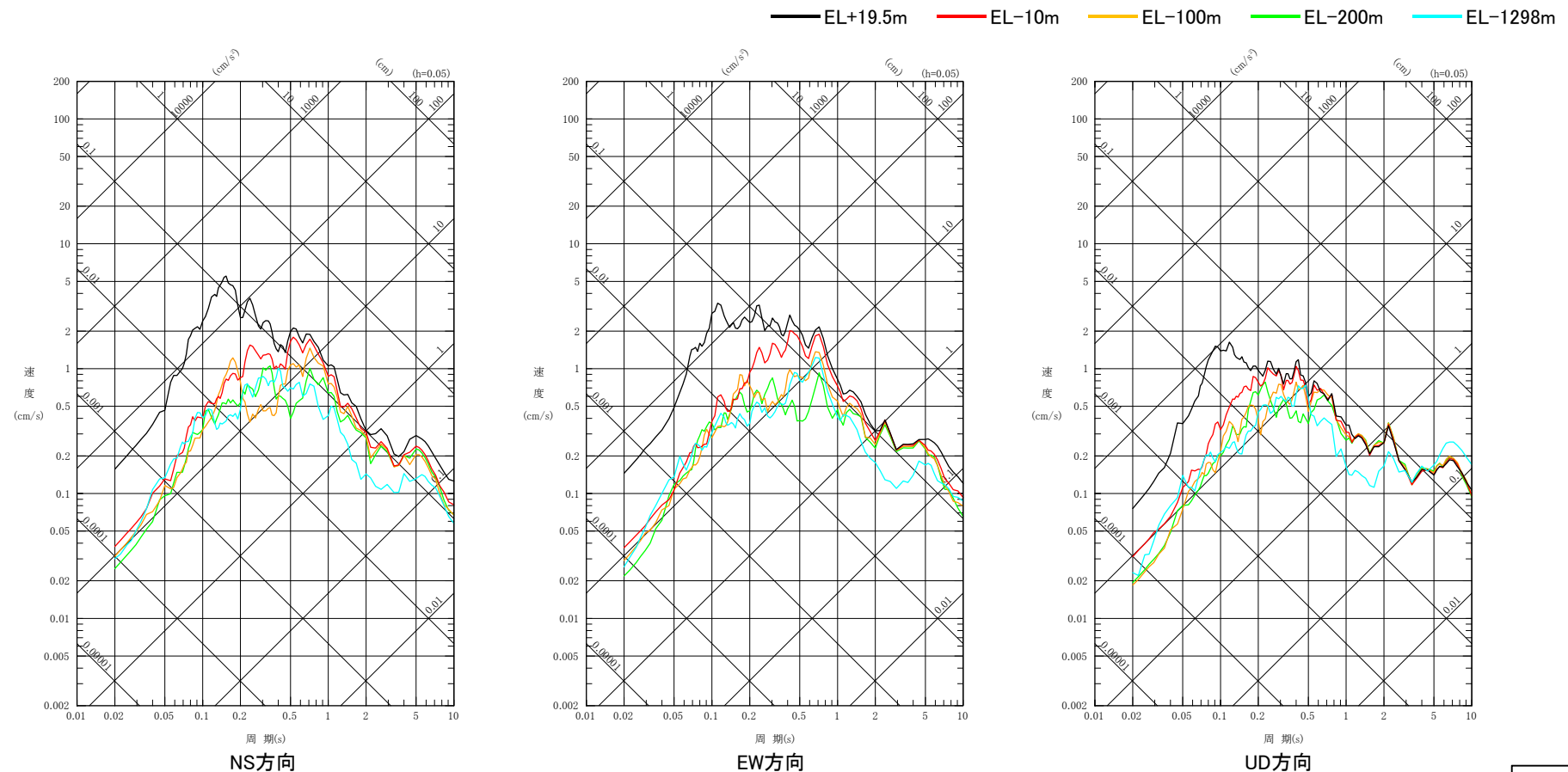
(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (10/11)

○ No.10(2023/05/05 14:53 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。



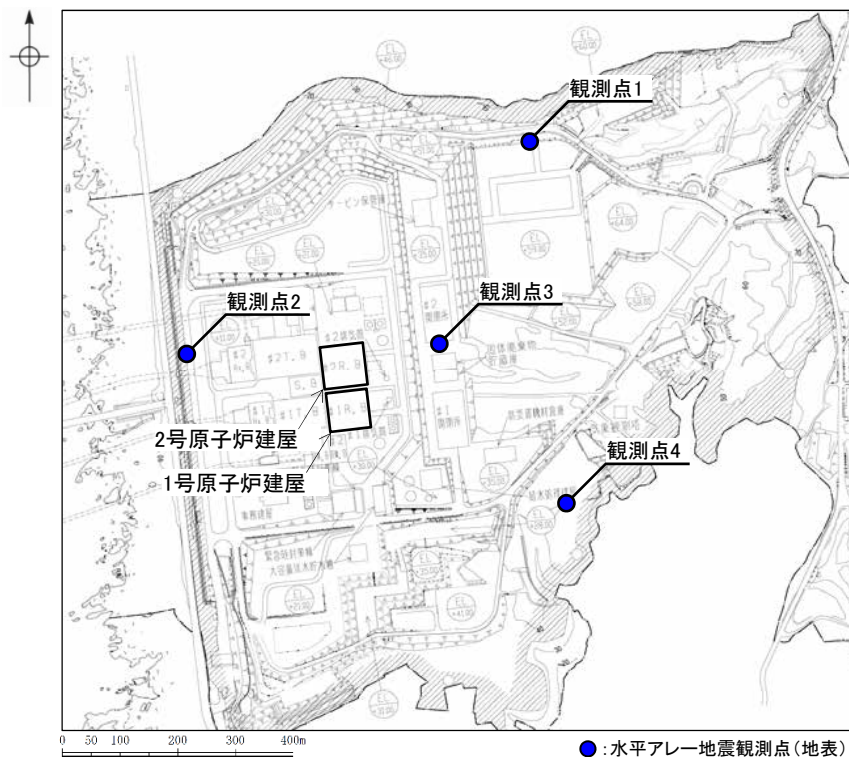
(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 ー深度別の応答スペクトルー (11/11)

○ No.11(2023/05/05 21:58 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, 周期0.2秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。

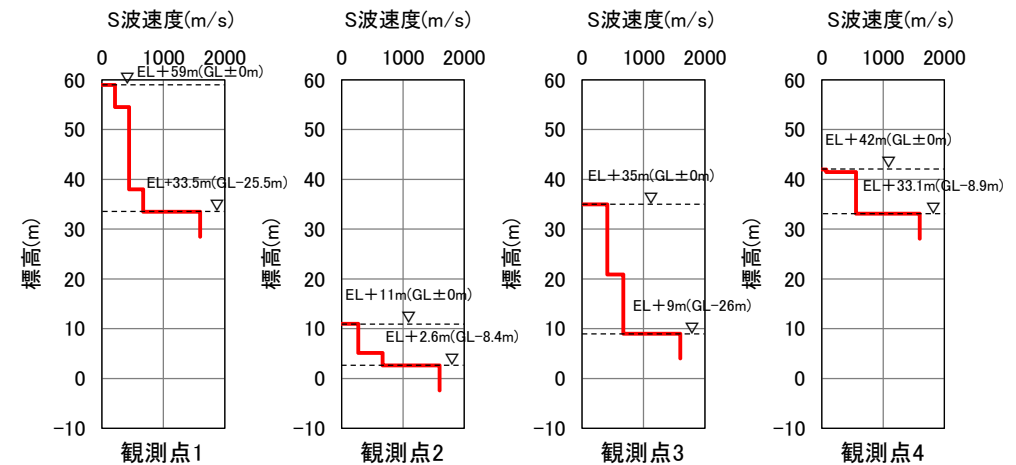


(1) 検討方法

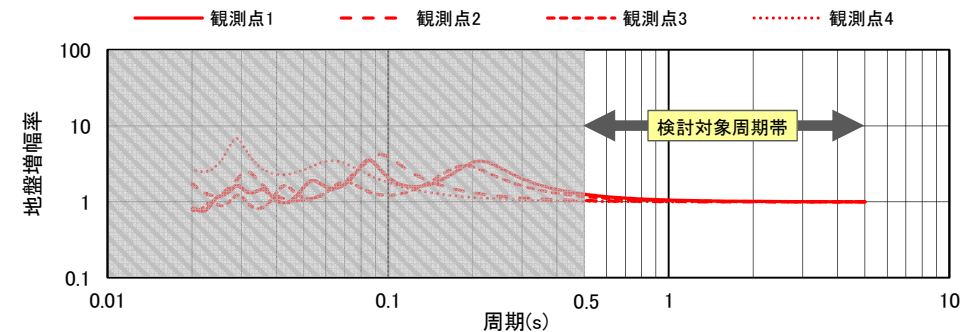
- 敷地の地震基盤以浅の速度構造を把握するため、左下図に示す水平アレー地震観測点(地表)において、観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比※1を確認し、地震波の到来方向ごとに比較した。
- 各観測点付近の表層地盤のS波速度構造※2と水平方向の地盤増幅率※3を右下図に示す。
- 地盤増幅率をみると、周期0.5秒未満の短周期側では、各観測点の増幅特性が異なっており、応答スペクトル比にはS波速度1000m/s未満となる表層地盤の速度構造の違いによる影響が含まれると考えられることから、本検討では周期0.5秒以上の長周期側を対象とした、表層地盤より深部の速度構造について確認した。



水平アレー地震観測点配置図



各観測点の表層地盤のS波速度構造



各観測点の表層地盤の地盤増幅率(水平方向)

※1 地震基盤においては、観測点位置によらず同様の揺れであると考えられることから、観測点間の応答スペクトル比は、地震基盤以浅の速度構造の違いが反映されているものとする。なお、全観測点の中で最も振幅レベルが小さく、表層地盤が薄い観測点4を基準点とする。

※2 半径数m程度の三角形アレー等を複数配置した微動アレー探索により推定した。

※3 表層地盤のS波速度構造より、最下層に対する地表(GL±0m)の地盤増幅率を算定した。

(2) 検討の対象とした地震 ―地震の諸元―

○ 検討の対象とした地震の諸元を下表に示す。検討の対象は、2016年1月～2018年2月及び2020年10月～2023年2月に観測された地震のうち、SN 比が大きい78地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
1	2016/02/03	21:28	36.4062	137.6380	0.00	4.4	109.1	東
2	2016/03/07	05:58	35.8363	135.8663	12.59	3.9	156.2	南
3	2016/05/23	19:03	36.8070	137.8983	2.77	3.3	108.1	東
4	2016/06/23	12:59	35.7768	136.4485	8.81	3.4	144.7	南
5	2016/06/25	13:51	36.8182	137.8323	0.00	4.8	102.1	東
6	2016/06/27	03:28	36.8203	137.8392	0.00	3.4	102.6	東
7	2016/06/27	19:48	36.8172	137.8400	0.00	3.3	102.8	東
8	2016/06/27	20:11	36.8180	137.8370	0.00	2.9	102.5	東
9	2016/06/29	04:30	36.8158	137.8325	0.00	3.3	102.2	東
10	2016/07/01	08:04	36.8227	137.8457	0.00	4.6	103.1	東
11	2016/07/15	02:29	36.7330	135.2505	21.15	3.7	136.5	西
12	2016/08/20	08:14	37.2592	136.6910	8.17	3.9	22.2	北
13	2016/09/03	08:29	36.8362	137.8515	0.00	3.4	103.2	東
14	2016/09/26	04:01	38.2747	137.8308	30.89	4.0	166.3	北
15	2016/10/21	14:07	35.3805	133.8562	10.61	6.6	318.4	西
16	2016/11/15	01:46	37.3063	137.0903	8.68	2.8	42.2	東
17	2016/11/19	11:48	33.8427	135.4635	51.35	5.4	375.0	南
18	2016/12/06	09:05	36.0078	137.3443	5.11	4.5	129.3	南
19	2017/01/10	06:52	35.7957	136.9197	9.83	3.8	141.4	南
20	2017/01/17	15:53	36.5885	135.9817	21.79	3.6	84.6	西
21	2017/03/05	08:53	36.0072	137.3463	6.00	3.1	129.4	南
22	2017/04/01	19:43	37.3132	136.7688	5.11	3.6	28.3	北
23	2017/05/27	22:50	36.0662	135.5433	17.16	5.1	153.0	南
24	2017/06/25	07:02	35.8680	137.5865	6.66	5.6	153.2	南
25	2017/06/25	09:24	35.8635	137.5668	5.90	4.5	152.7	南
26	2017/06/25	15:17	35.8568	137.5843	6.60	4.7	154.1	南
27	2017/08/13	07:14	37.0970	136.8145	3.75	1.7	8.8	東
28	2017/09/08	12:42	37.2918	136.7457	7.11	3.6	25.7	北
29	2020/10/19	03:27	35.2118	136.6313	41.94	4.1	205.3	南
30	2020/11/29	17:15	36.4340	136.7155	8.65	2.5	69.6	南
31	2020/12/28	03:15	37.0360	136.4037	9.77	3.6	28.9	西
32	2021/02/13	23:07	37.7288	141.6985	55.38	7.3	446.4	東
33	2021/03/11	19:57	36.2198	137.6533	3.73	4.3	124.8	南
34	2021/07/17	18:07	36.3243	137.6155	2.57	4.3	114.0	南
35	2021/07/18	18:50	37.0382	139.2767	3.50	4.7	226.8	東
36	2021/07/24	15:11	38.0403	137.9325	18.18	3.7	152.2	北
37	2021/07/26	21:20	37.5027	137.2107	12.66	2.7	65.2	北
38	2021/07/27	17:31	36.0902	137.3172	10.42	3.2	120.0	南
39	2021/08/08	01:42	37.5112	137.2197	13.39	2.9	66.4	北
40	2021/08/14	22:38	37.5088	137.2230	13.50	4.2	66.4	北
41	2021/08/16	05:03	35.4510	136.3343	13.00	4.6	182.1	南
42	2021/08/16	08:17	35.4552	136.3303	13.33	4.4	181.7	南
43	2021/08/21	16:40	37.5163	137.2388	13.17	3.7	68.0	北
44	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9	東
45	2021/09/19	17:18	36.3455	137.6247	0.00	5.3	112.9	南
46	2021/09/19	17:19	36.3415	137.6198	0.99	4.9	112.9	南
47	2021/09/19	18:59	36.3033	137.6253	3.17	4.4	116.3	南
48	2021/09/19	19:04	36.2872	137.6323	4.02	4.7	118.0	南
49	2021/09/24	18:48	37.3658	138.4017	16.18	4.1	152.5	東
50	2021/09/27	19:54	36.2715	137.6327	4.37	4.3	119.3	南

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
51	2022/03/08	01:58	37.5248	137.2372	13.51	4.8	68.6	北
52	2022/03/16	23:36	37.6967	141.6230	56.61	7.4	439.3	東
53	2022/03/23	09:23	37.5150	137.2987	13.82	4.3	71.5	東
54	2022/04/04	10:26	37.5172	137.2262	13.92	4.3	67.3	北
55	2022/04/30	18:06	35.0463	135.5643	12.47	4.3	246.8	南
56	2022/05/02	14:52	37.5273	137.3017	12.45	4.1	72.7	北
57	2022/06/12	18:14	37.5120	137.2268	13.30	3.0	66.9	北
58	2022/06/16	02:27	37.5295	137.2363	12.84	4.0	68.9	北
59	2022/06/17	00:51	33.9123	134.5888	45.35	4.9	399.6	南
60	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1	北
61	2022/06/19	16:38	37.5152	137.2620	11.96	3.3	69.3	北
62	2022/06/19	19:22	37.5247	137.2740	11.28	3.2	70.8	北
63	2022/06/20	03:03	37.5252	137.2725	11.30	2.9	70.7	北
64	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5	東
65	2022/08/29	22:25	37.5197	137.2123	12.82	3.1	66.7	北
66	2022/09/07	17:48	36.5532	137.5975	3.71	3.3	96.0	東
67	2022/09/22	16:27	37.3168	137.8183	17.92	2.5	101.0	東
68	2022/10/13	11:56	37.5120	137.2170	11.38	3.1	66.3	北
69	2022/10/25	07:08	37.5217	137.2127	13.31	3.2	66.9	北
70	2022/11/14	22:27	37.5195	137.2597	11.92	4.2	69.5	北
71	2022/11/26	21:58	37.5358	137.2285	12.79	4.2	69.0	北
72	2022/12/05	02:47	37.5155	137.2237	13.78	3.2	67.0	北
73	2022/12/11	00:27	37.5260	137.2930	12.35	3.6	72.0	北
74	2022/12/11	02:22	37.5290	137.2922	12.09	3.0	72.2	北
75	2023/01/06	13:44	37.5065	137.2743	13.42	4.5	69.3	北
76	2023/01/06	23:53	37.4922	137.2168	12.45	3.9	64.7	北
77	2023/02/21	07:47	37.5098	137.2282	13.11	3.2	66.8	北
78	2023/02/21	22:53	37.5253	137.2735	11.51	4.1	70.8	北

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net観測値データ」に基づく

到来方向	地震数
東方向	20個
西方向	4個
南方向	24個
北方向	30個
全方向	78個

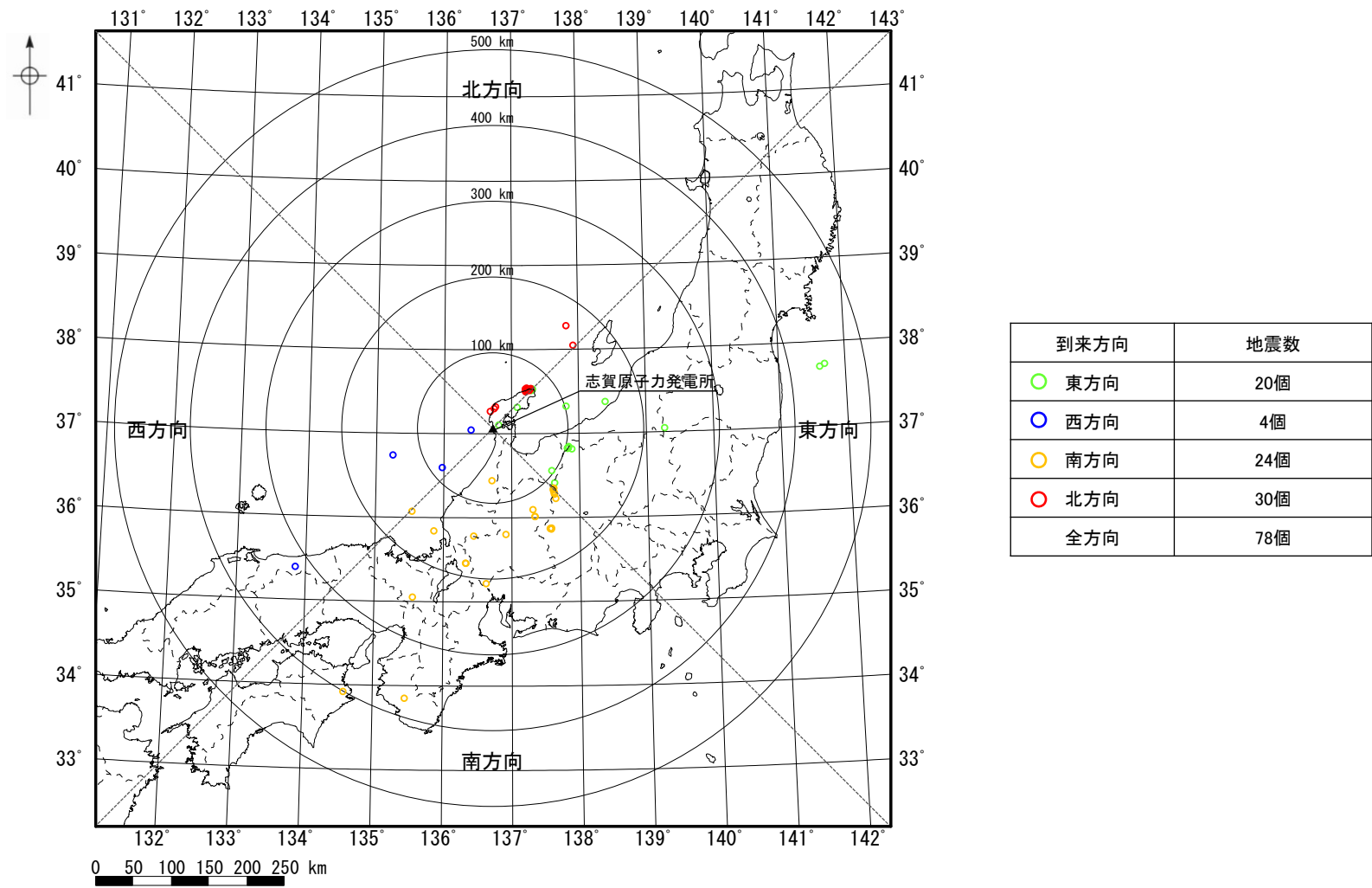
※ 観測点3のNS方向のNo.3～12及びEW方向のNo.29, 32～33, 43～48, 53～56については、地震計の不具合により適切な観測記録が得られなかったことから検討対象外とした。

※ 震央の方位は志賀原子力発電所から震央位置を望む方位を示す。

※ 検討に用いた各地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルはデータ集P.167～245。

(2)検討の対象とした地震 ー震央分布図ー

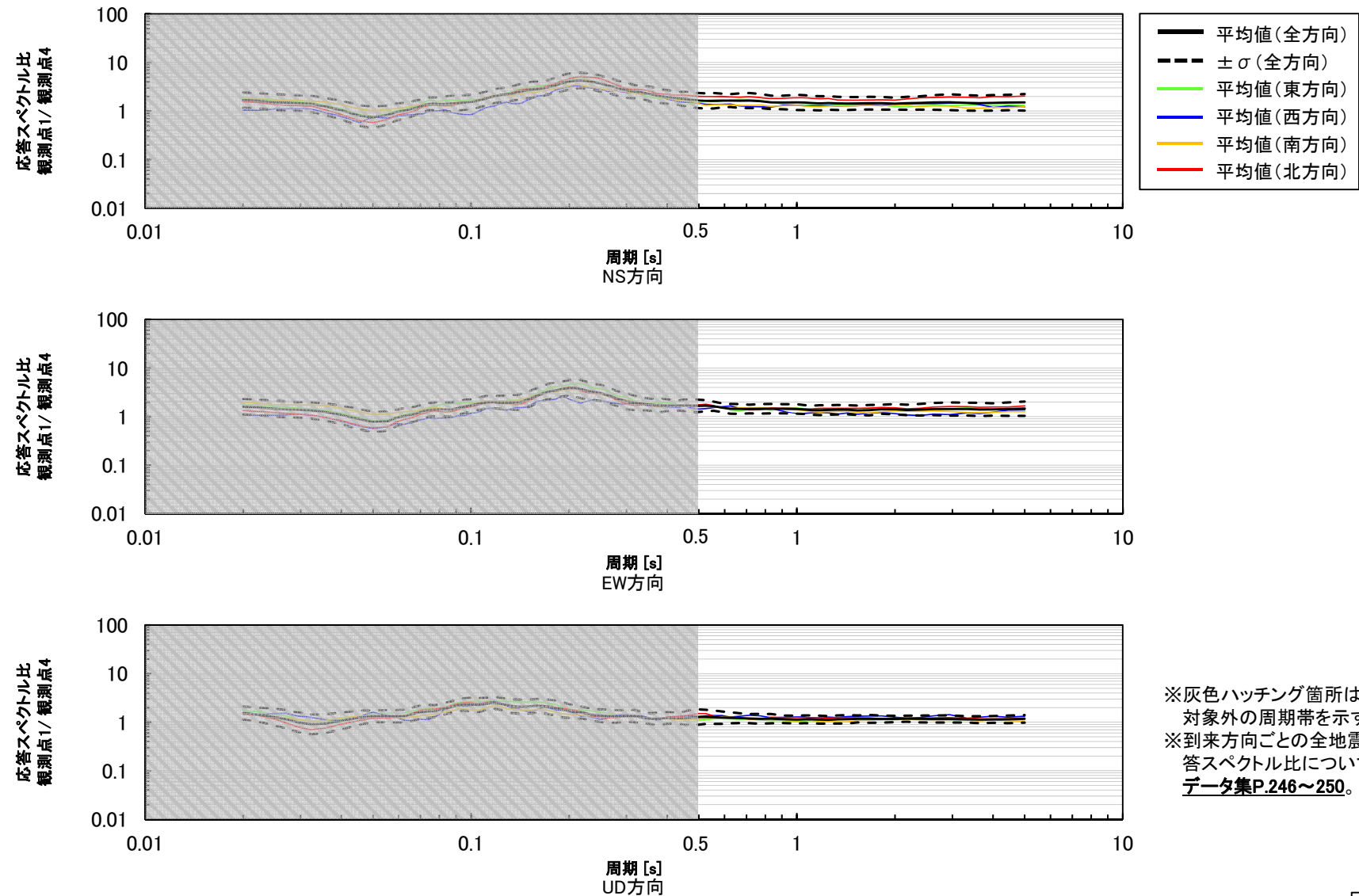
○ 検討の対象とした地震の震央分布図を下図に示す。



検討の対象とした地震の震央分布図

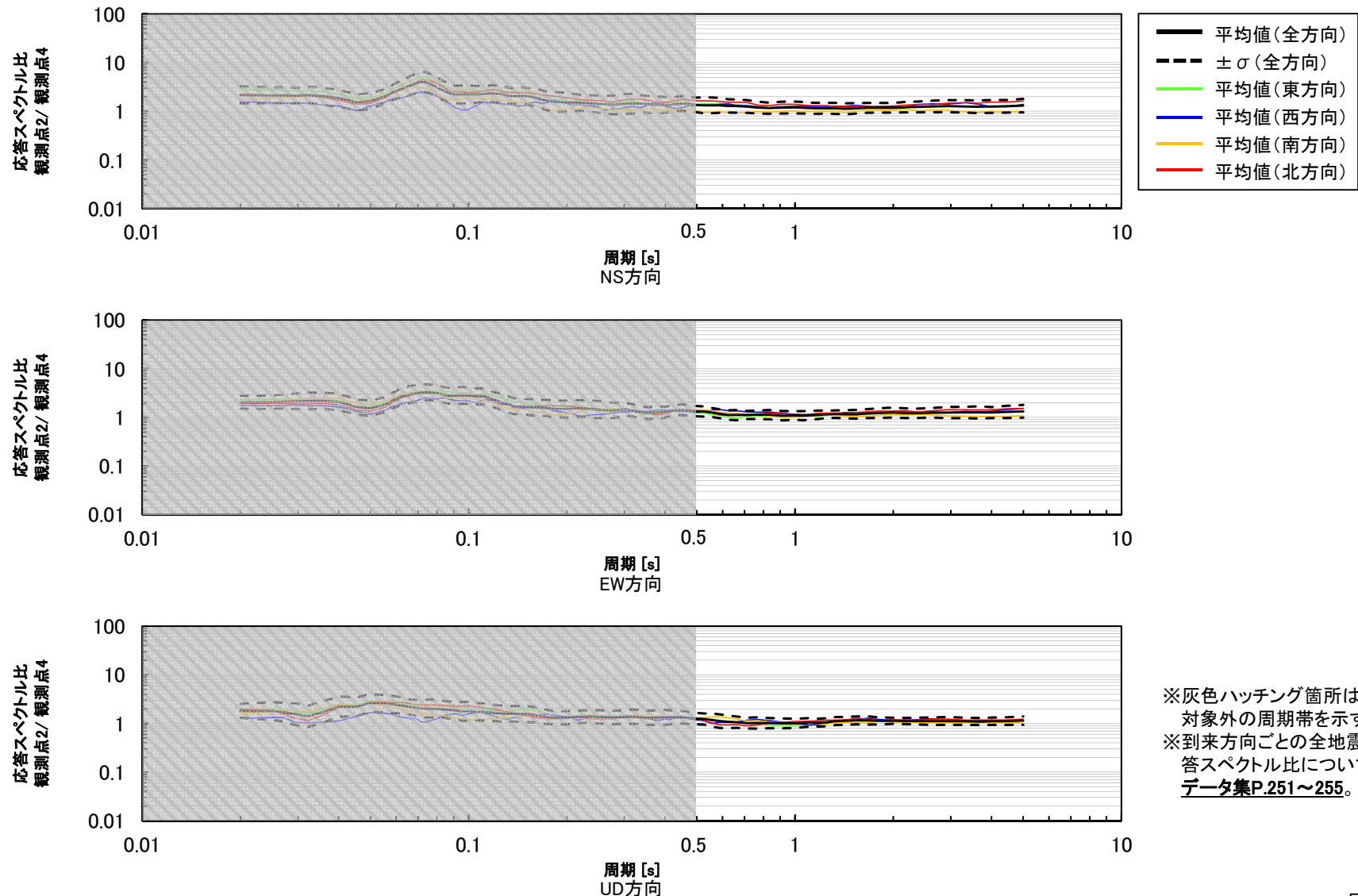
(3) 検討結果 一観測点1/観測点4ー

- 観測点4に対する観測点1の応答スペクトル比の平均値を地震波の到来方向ごとに比較した結果、検討対象とした周期帯(周期0.5秒以上)において、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。



(3) 検討結果 ー観測点2/観測点4ー

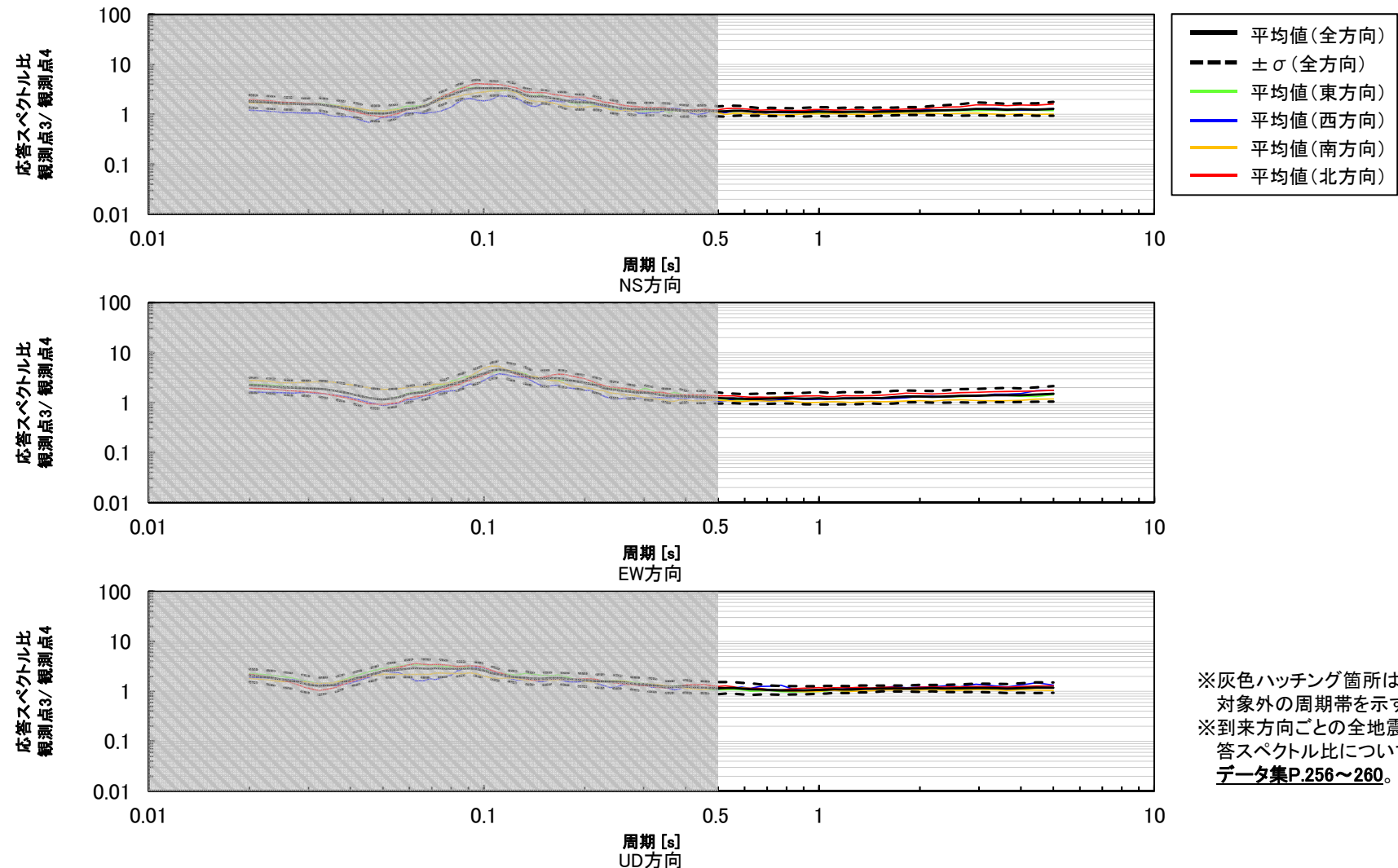
- 観測点4に対する観測点2の応答スペクトル比についても、観測点4に対する観測点1の応答スペクトル比と同様、検討対象とした周期帯(周期0.5秒以上)において、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。



応答スペクトル比(観測点2/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較

(3) 検討結果 一観測点3/観測点4ー

- 観測点4に対する観測点3の応答スペクトル比についても、観測点4に対する観測点1の応答スペクトル比と同様、検討対象とした周期帯(周期0.5秒以上)において、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。



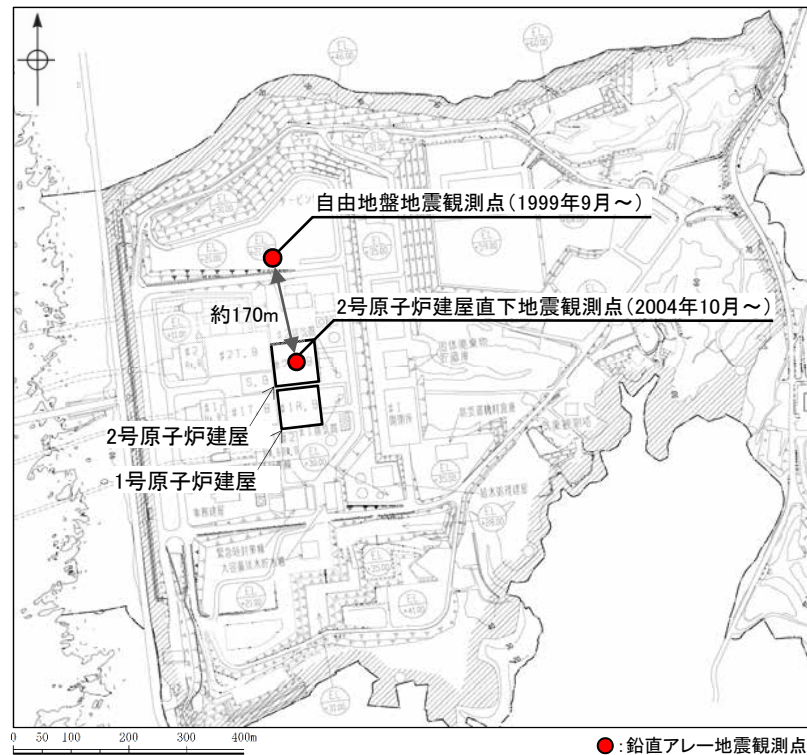
※灰色ハッチング箇所は検討対象外の周期帯を示す。
 ※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、
データ集P.256～260。

応答スペクトル比(観測点3/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較

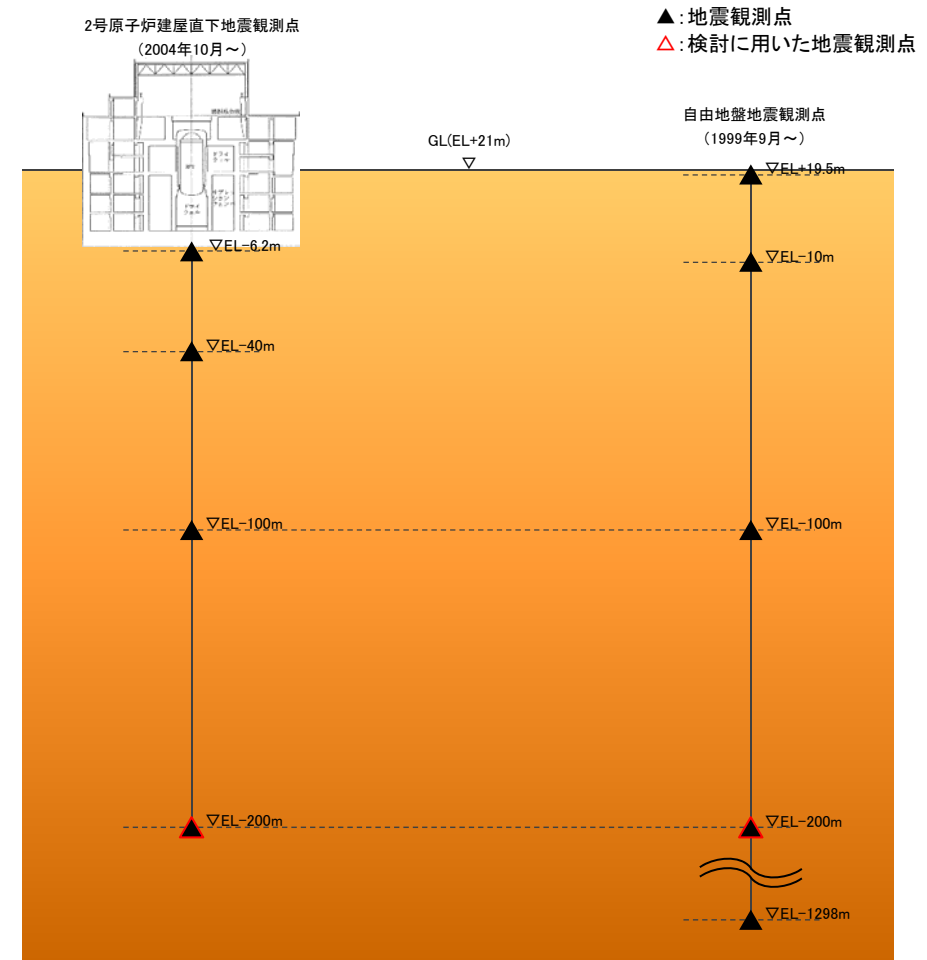
- 観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1～4周辺において、地震基盤以浅の速度構造(表層地盤を除く)に顕著な違いはないと考えられる。

(1) 検討方法

- 敷地の地震基盤以浅の速度構造を把握するため、表層地盤や建屋等の施設の影響が小さいと考えられるEL-200mの地震観測点間の応答スペクトル比※を確認し、地震波の到来方向ごとに比較した。



検討対象の地震観測点配置図



鉛直アレー地震観測点断面図

※ 地震基盤においては、観測点位置によらず同様の揺れであると考えられることから、観測点間の応答スペクトル比は、地震基盤以浅の速度構造の違いが反映されているものとする。

(2) 検討の対象とした地震 ー地震の諸元ー

- 検討の対象とした地震の諸元を下表に示す。検討の対象は、2004年10月～2023年5月に2号原子炉建屋直下EL-200mと自由地盤EL-200mで同時に観測された地震のうち、2地点のNS成分、EW成分、UD成分の最大加速度が全て1cm/s²以上を記録し、観測記録の信頼周期上限が5秒程度以上である55地震とした。

検討の対象とした地震の諸元 *

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
1	2006/03/26	09:44	37.0180	136.8908	12.85	3.9	15.4	東
2	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1	北
3	2007/03/25	10:16	37.2300	136.6573	5.41	4.1	19.8	北
4	2007/03/25	11:19	37.2670	136.7007	6.84	4.2	23.0	北
5	2007/03/25	12:24	37.1995	136.7205	11.98	3.7	15.4	北
6	2007/03/25	13:02	37.2082	136.7180	12.48	3.9	16.4	北
7	2007/03/25	14:55	37.1660	136.6953	10.37	3.8	12.0	北
8	2007/03/25	15:43	37.2940	136.7718	8.90	4.5	26.2	北
9	2007/03/25	15:57	37.2288	136.7337	11.42	3.8	18.7	北
10	2007/03/25	16:53	37.2203	136.6657	7.72	3.7	18.5	北
11	2007/03/25	18:11	37.3043	136.8395	13.45	5.3	28.8	北
12	2007/03/26	02:14	37.1578	136.6695	11.96	4.2	11.9	北
13	2007/03/26	02:25	37.1838	136.5938	6.95	3.7	18.1	北
14	2007/03/26	07:16	37.1668	136.4893	0.00	5.3	24.2	西
15	2007/03/26	13:47	37.2703	136.6570	4.30	4.4	24.1	北
16	2007/03/26	14:46	37.1653	136.5518	8.62	4.8	19.4	西
17	2007/03/26	18:02	37.2762	136.7007	5.91	4.6	24.0	北
18	2007/03/27	11:33	37.2267	136.6793	7.43	3.8	18.9	北
19	2007/03/28	00:57	37.2510	136.7215	9.89	4.0	21.1	北
20	2007/03/28	08:08	37.2223	136.7088	13.29	4.9	18.0	北
21	2007/03/28	10:51	37.1757	136.6118	10.18	4.6	16.3	北
22	2007/03/28	13:05	37.2820	136.6832	6.79	4.7	24.9	北
23	2007/03/28	21:16	37.1903	136.5823	6.10	3.8	19.3	北
24	2007/03/31	08:09	37.2347	136.7598	13.47	4.4	19.5	北
25	2007/04/02	08:01	37.2073	136.6468	6.99	4.1	17.7	北
26	2007/04/11	22:11	37.0742	136.4268	8.20	4.3	26.7	西
27	2007/04/26	11:30	37.2342	136.7443	10.90	3.9	19.3	北
28	2007/05/02	20:44	37.3307	136.7628	6.59	4.7	30.1	北
29	2007/06/08	03:17	37.2245	136.6762	7.75	3.4	18.7	北
30	2007/06/11	03:45	37.2442	136.6547	7.29	5.0	21.3	北
31	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6	21.0	南
32	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8	東
33	2007/09/20	20:05	37.1485	136.4970	8.94	3.9	22.6	西
34	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8	28.9	北
35	2008/04/29	06:58	37.2325	136.7308	10.91	3.8	19.1	北
36	2008/05/02	05:46	37.2347	136.6207	3.78	4.0	21.5	北
37	2008/07/15	14:41	37.1470	136.5913	10.35	3.9	15.4	西
38	2008/07/27	10:53	37.0998	136.8142	2.08	3.2	8.9	東
39	2009/05/23	05:15	37.1438	136.5355	10.91	3.9	19.3	西
40	2013/04/04	01:58	36.7340	136.7850	12.93	4.2	36.6	南
41	2014/09/27	00:35	37.2377	136.6780	8.30	4.1	20.1	北
42	2015/02/01	00:42	37.2618	137.1442	14.84	4.4	43.3	東
43	2015/04/21	05:15	36.9450	136.7195	7.58	3.1	12.9	南
44	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8	北
45	2020/04/06	05:00	37.2677	136.8118	12.05	4.0	24.2	北
46	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9	東
47	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1	北
48	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5	東
49	2023/01/06	13:44	37.5065	137.2743	13.42	4.5	69.3	北
50	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8	北

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
51	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7	北
52	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6	北
53	2023/05/09	05:14	37.5208	137.3103	14.52	4.7	72.7	東
54	2023/05/09	05:16	37.5262	137.3173	13.86	4.4	73.6	東
55	2023/05/10	07:14	37.6010	137.2857	12.34	4.9	77.8	北

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく

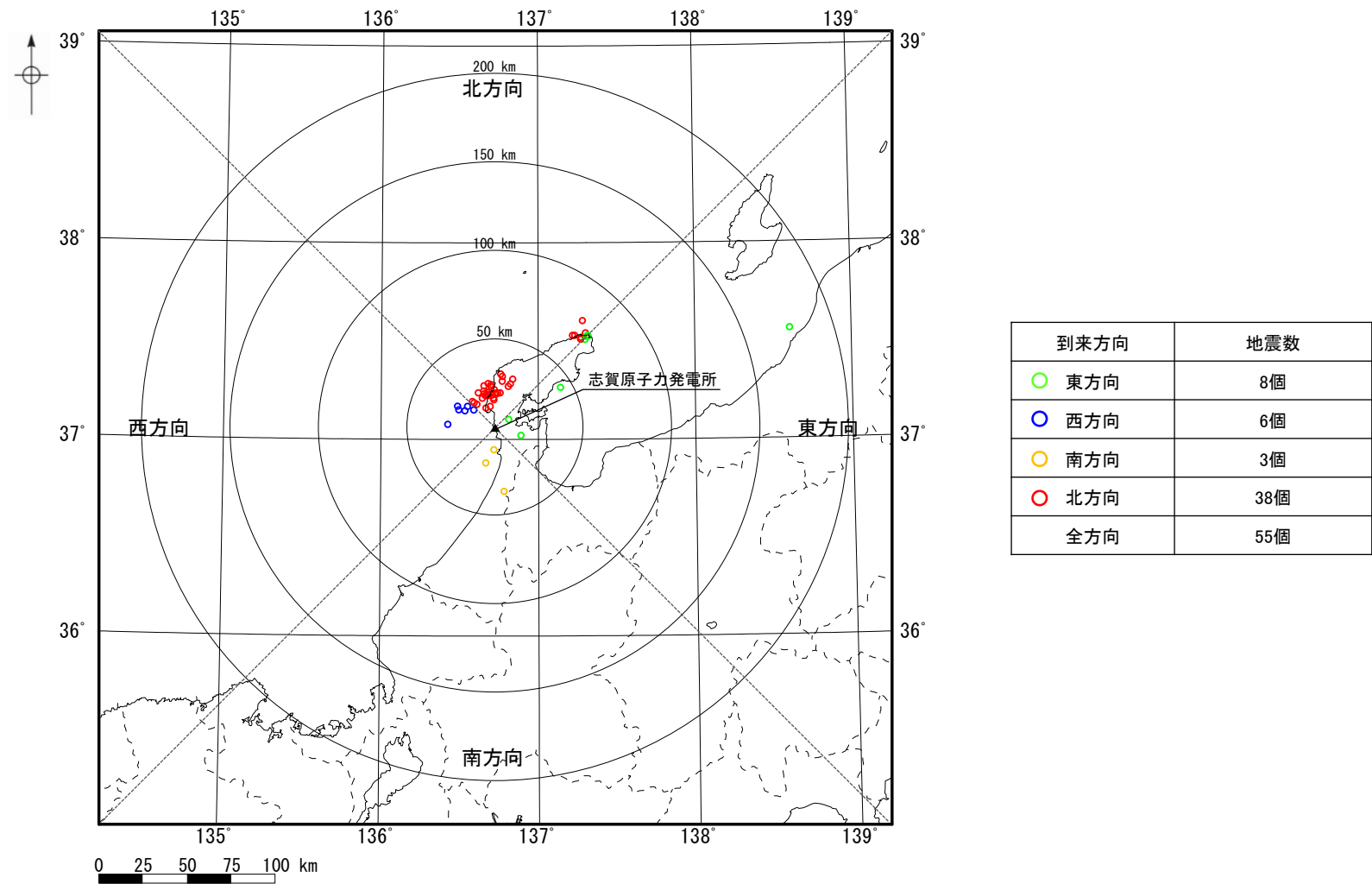
到来方向	地震数
東方向	8個
西方向	6個
南方向	3個
北方向	38個
全方向	55個

※ 震央の方位は志賀原子力発電所から震央位置を望む方位を示す。

※ 検討に用いた各地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルはデータ集P.262～317。

(2)検討の対象とした地震 ー震央分布図ー

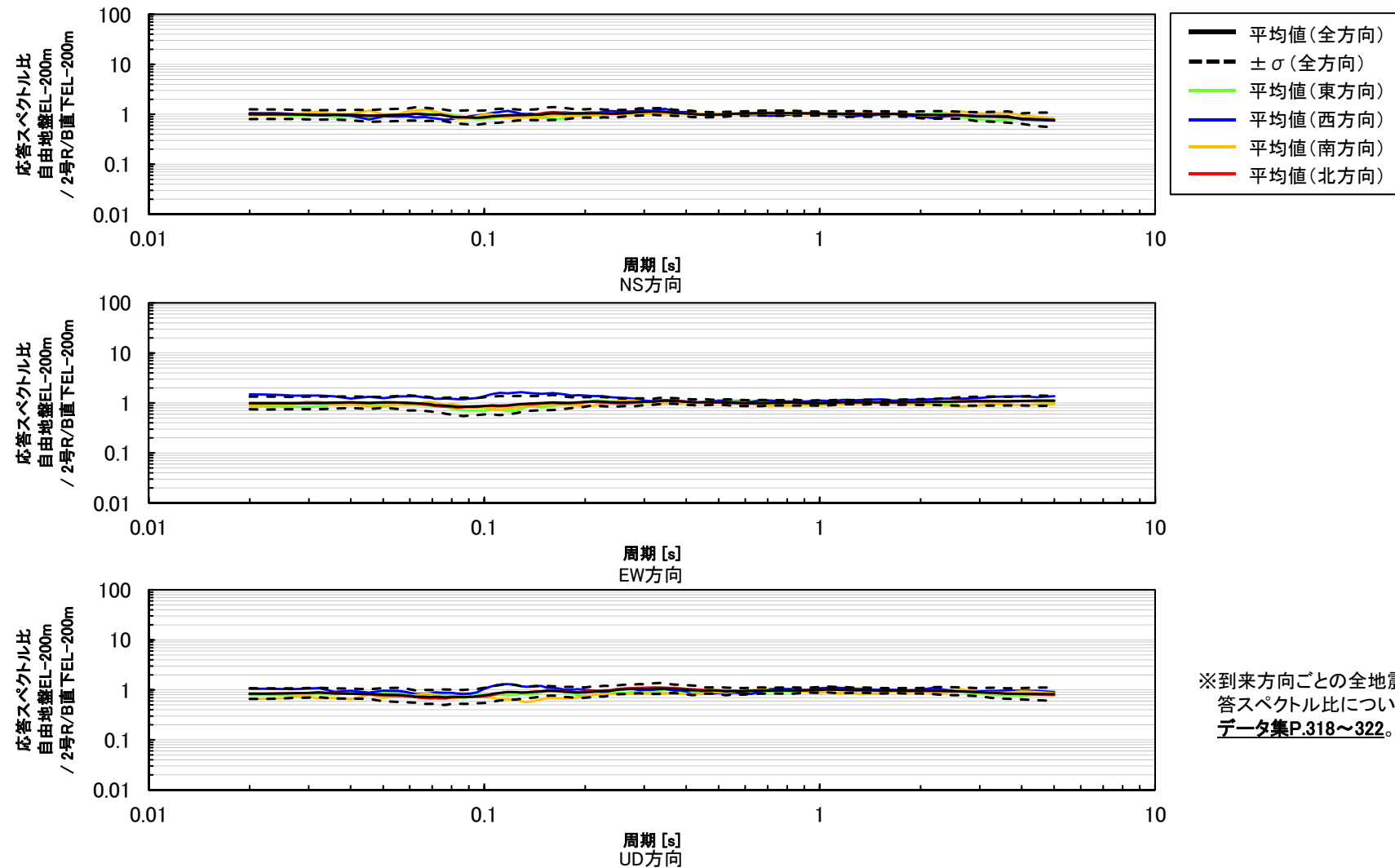
○ 検討の対象とした地震の震央分布図を下図に示す。



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果

- 2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比を地震波の到来方向ごとに比較した結果、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。



※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、データ集P.318～322。

応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋直下EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較

- 2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、2号原子炉建屋直下地震観測点周辺と自由地盤地震観測点周辺において、EL-200m～地震基盤の速度構造に顕著な違いはないと考えられる。

-
- 自由地盤地震観測点(1999年9月～)
- 2号原子炉建屋
- 1号原子炉建屋
- 0 50 100 200 300 400m
- : 鉛直アレー地震観測点

▲:地震観測点
△:検討対象の地震観測点

自由地盤地震観測点
GL(EL+21m) (1999年9月～)

▽

▽EL+19.5m

▽EL-10m

▽EL-100m

▽EL-200m

▽EL-1298m※

鉛直アレー地震観測点断面図

(2) 検討の対象とした地震 ー地震の諸元ー

- 検討の対象とした地震の諸元を下表に示す。検討の対象は、1999年9月～2023年5月に自由地盤EL-200mと自由地盤EL-10mで同時に観測された地震のうち、2地点のNS成分、EW成分、UD成分の最大加速度が全て1cm/s²以上を記録し、観測記録の信頼周期上限が5秒程度以上である83地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
1	2000/06/07	06:16	36.8265	135.5630	21.30	6.2	106.9	西
2	2001/01/22	09:43	37.1975	136.7928	17.69	3.7	16.3	北
3	2004/10/23	18:34	37.3063	138.9300	14.17	6.5	197.5	東
4	2006/03/26	09:44	37.0180	136.8908	12.85	3.9	15.4	東
5	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1	北
6	2007/03/25	10:10	37.2540	136.6867	5.95	3.6	21.7	北
7	2007/03/25	10:16	37.2300	136.6573	5.41	4.1	19.8	北
8	2007/03/25	10:21	37.1768	136.6190	8.56	3.5	16	北
9	2007/03/25	10:36	37.1972	136.6995	11.20	4.1	15.3	北
10	2007/03/25	11:19	37.2670	136.7007	6.84	4.2	23	北
11	2007/03/25	11:25	37.1993	136.7040	12.02	3.3	15.5	北
12	2007/03/25	11:43	37.2165	136.6927	8.55	3.6	17.5	北
13	2007/03/25	12:24	37.1995	136.7205	11.98	3.7	15.4	北
14	2007/03/25	13:02	37.2082	136.7180	12.48	3.9	16.4	北
15	2007/03/25	13:56	37.2143	136.6877	10.17	3.5	17.4	北
16	2007/03/25	14:08	37.2065	136.7062	12.50	3.5	16.3	北
17	2007/03/25	14:55	37.1660	136.6953	10.37	3.8	12	北
18	2007/03/25	15:43	37.2940	136.7718	8.90	4.5	26.2	北
19	2007/03/25	15:57	37.2288	136.7337	11.42	3.8	18.7	北
20	2007/03/25	16:53	37.2203	136.6657	7.72	3.7	18.5	北
21	2007/03/25	17:08	37.1823	136.6767	10.31	3.4	14.2	北
22	2007/03/25	17:54	37.2437	136.7302	9.91	3.8	20.3	北
23	2007/03/25	18:11	37.3043	136.8395	13.45	5.3	28.8	北
24	2007/03/25	19:02	37.1868	136.6477	10.69	3.5	15.6	北
25	2007/03/26	02:14	37.1578	136.6695	11.96	4.2	11.9	北
26	2007/03/26	02:25	37.1838	136.5938	6.95	3.7	18.1	北
27	2007/03/26	02:34	37.2102	136.7128	11.98	3.5	16.6	北
28	2007/03/26	03:21	37.2345	136.7445	11.13	3.6	19.3	北
29	2007/03/26	07:16	37.1668	136.4893	0.00	5.3	24.2	西
30	2007/03/26	11:58	37.2183	136.7320	13.58	3.6	17.5	北
31	2007/03/26	13:47	37.2703	136.6570	4.30	4.4	24.1	北
32	2007/03/26	14:46	37.1653	136.5518	8.62	4.8	19.4	西
33	2007/03/26	18:02	37.2762	136.7007	5.91	4.6	24	北
34	2007/03/26	18:26	37.1935	136.6602	10.03	3.6	15.9	北
35	2007/03/26	21:30	37.1863	136.6473	9.55	3.9	15.6	北
36	2007/03/27	11:33	37.2267	136.6793	7.43	3.8	18.9	北
37	2007/03/28	00:57	37.2510	136.7215	9.89	4	21.1	北
38	2007/03/28	08:08	37.2223	136.7088	13.29	4.9	18	北
39	2007/03/28	10:51	37.1757	136.6118	10.18	4.6	16.3	北
40	2007/03/28	13:05	37.2820	136.6832	6.79	4.7	24.9	北
41	2007/03/28	21:16	37.1903	136.5823	6.10	3.8	19.3	北
42	2007/03/29	03:17	37.1610	136.6705	10.55	3.2	12.2	北
43	2007/03/29	10:46	37.2297	136.6888	8.31	3.8	19	北
44	2007/03/29	15:34	37.1782	136.6275	10.83	3.5	15.7	北
45	2007/03/31	08:09	37.2347	136.7598	13.47	4.4	19.5	北
46	2007/04/02	02:51	37.2105	136.6898	12.41	4.2	16.9	北
47	2007/04/02	08:01	37.2073	136.6468	6.99	4.1	17.7	北
48	2007/04/11	22:11	37.0742	136.4268	8.20	4.3	26.7	西
49	2007/04/26	11:30	37.2342	136.7443	10.90	3.9	19.3	北
50	2007/05/02	20:44	37.3307	136.7628	6.59	4.7	30.1	北

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
51	2007/05/11	02:12	37.1185	136.3117	10.56	4.5	37.4	西
52	2007/06/08	03:17	37.2245	136.6762	7.75	3.4	18.7	北
53	2007/06/11	03:45	37.2442	136.6547	7.29	5	21.3	北
54	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6	21	南
55	2007/07/09	16:00	37.3243	136.7580	10.04	4.2	29.4	北
56	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8	東
57	2007/08/16	18:52	37.0703	136.7162	2.50	0.7	1.4	北
58	2007/09/20	20:05	37.1485	136.4970	8.94	3.9	22.6	西
59	2007/12/18	02:53	37.2365	136.7477	9.22	3.9	19.6	北
60	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8	28.9	北
61	2008/04/29	06:58	37.2325	136.7308	10.91	3.8	19.1	北
62	2008/05/02	05:46	37.2347	136.6207	3.78	4	21.5	北
63	2008/07/15	14:41	37.1470	136.5913	10.35	3.9	15.4	西
64	2008/07/27	10:53	37.0998	136.8142	2.08	3.2	8.9	東
65	2009/05/23	05:15	37.1438	136.5355	10.91	3.9	19.3	西
66	2012/11/16	15:57	37.1613	136.5583	9.50	3.6	18.7	西
67	2013/04/04	01:58	36.7340	136.7850	12.93	4.2	36.6	南
68	2014/09/27	00:35	37.2377	136.6780	8.30	4.1	20.1	北
69	2015/02/01	00:42	37.2618	137.1442	14.84	4.4	43.3	東
70	2015/04/21	05:15	36.9450	136.7195	7.58	3.1	12.9	南
71	2018/01/05	11:02	36.8712	136.9803	13.65	4	30.9	東
72	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8	北
73	2020/04/06	05:00	37.2677	136.8118	12.05	4	24.2	北
74	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9	東
75	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1	北
76	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5	73.5	東
77	2023/01/06	13:44	37.5065	137.2743	13.42	4.5	69.3	北
78	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8	北
79	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5	67.7	北
80	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6	北
81	2023/05/09	05:14	37.5208	137.3103	14.52	4.7	72.7	東
82	2023/05/09	05:16	37.5262	137.3173	13.86	4.4	73.6	東
83	2023/05/10	07:14	37.6010	137.2857	12.34	4.9	77.8	北

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく

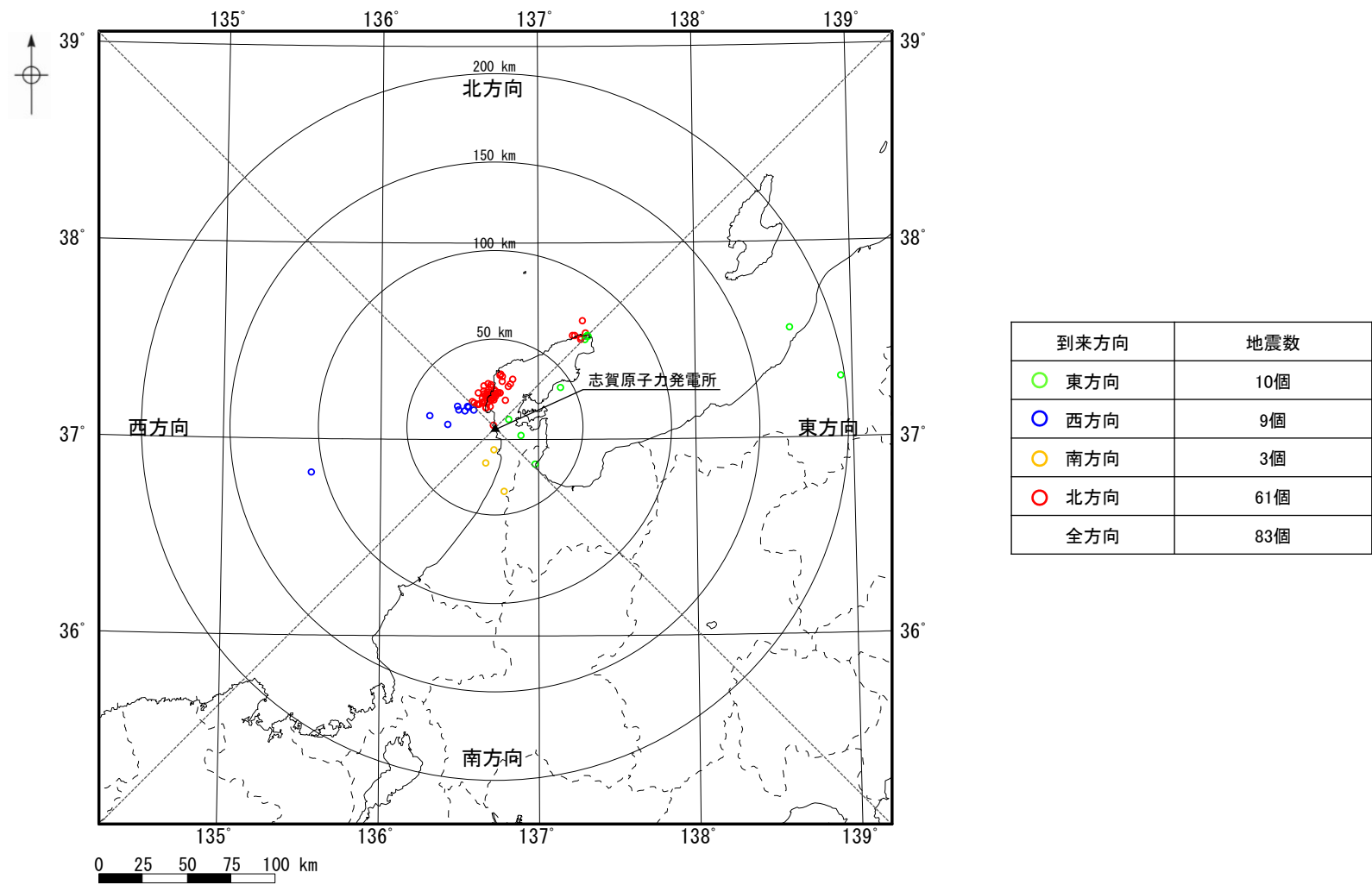
到来方向	地震数
東方向	10個
西方向	9個
南方向	3個
北方向	61個
全方向	83個

※ 震央の方位は志賀原子力発電所から震央位置を望む方位を示す。

※ 検討に用いた各地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルはデータ集P.324～407。

(2)検討の対象とした地震 ー震央分布図ー

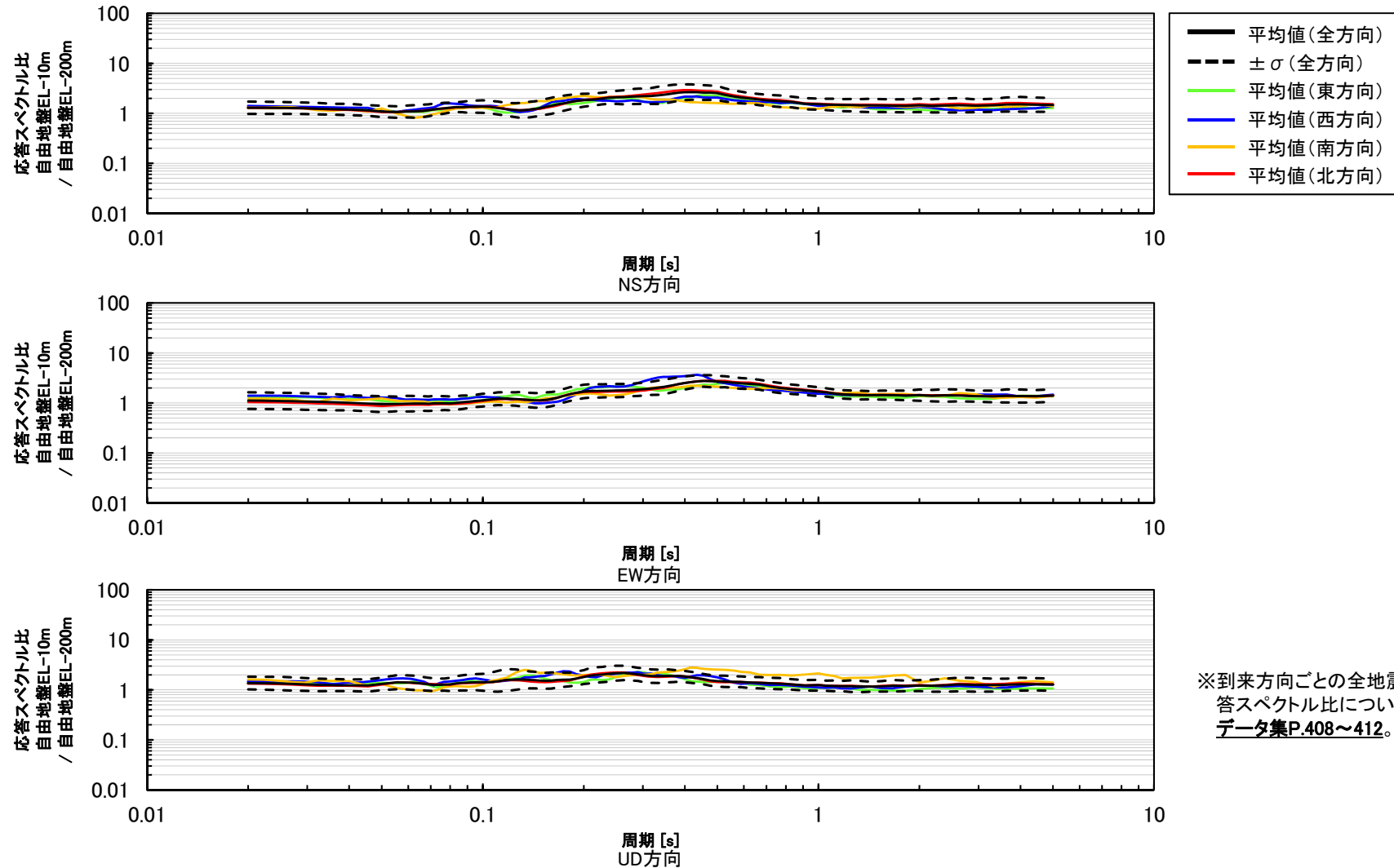
○ 検討の対象とした地震の震央分布図を下図に示す。



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果

- 自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比を地震波の到来方向ごとに比較した結果、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはない。



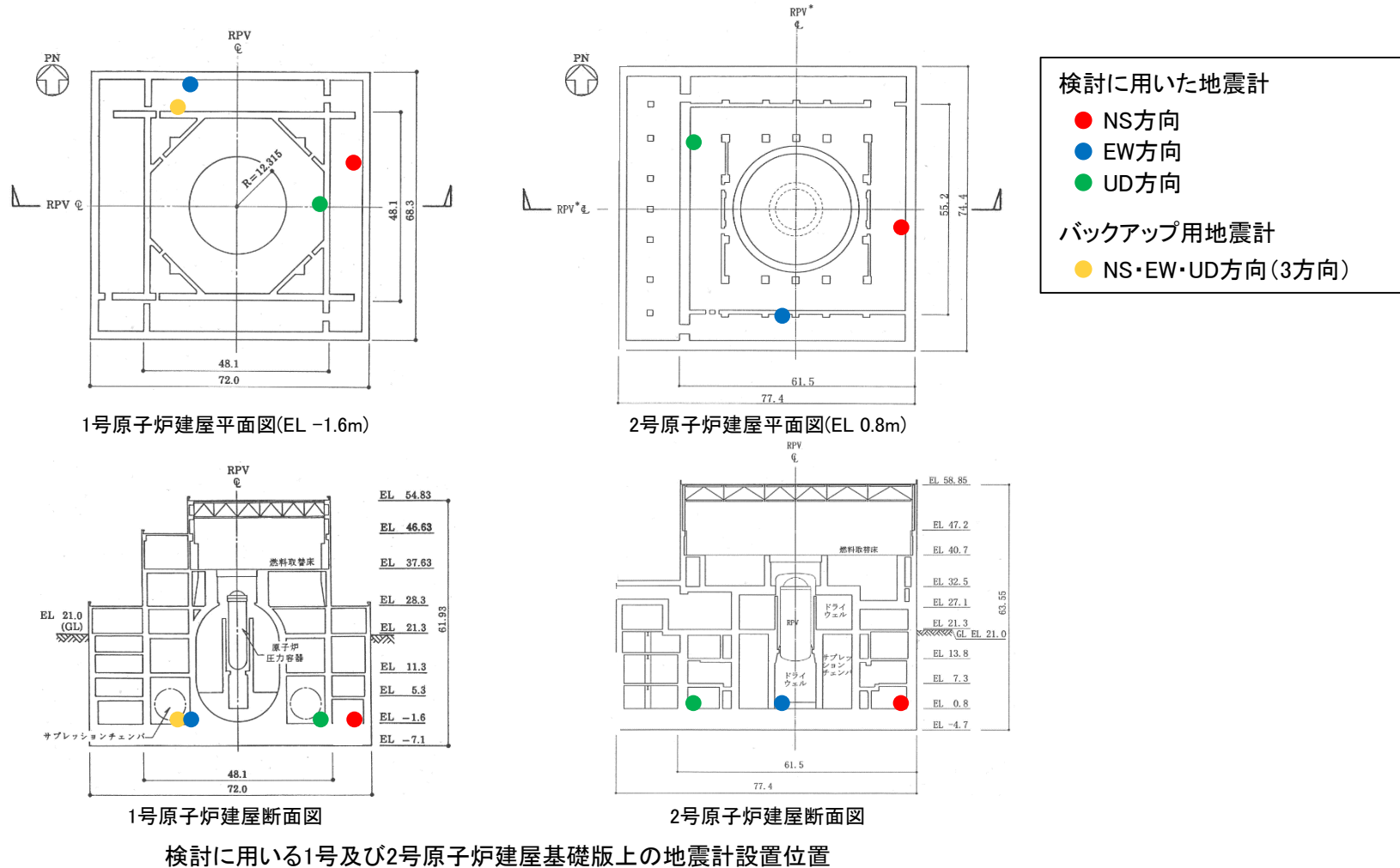
※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、データ集P.408～412。

応答スペクトル比(自由地盤EL-10m/自由地盤EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較

- 自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはないことから、自由地盤地震観測点周辺のEL-10m～EL-200mに、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

(1) 検討方法

- 敷地の地震基盤以浅の速度構造を把握するため、原子炉建屋基礎版上における加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを1号と2号で比較した。
- 検討に用いる1号及び2号原子炉建屋基礎版上の地震計の設置位置を下图に示す。



※ 断面図の地震計設置位置は、平面図に示される地震計設置位置を当該断面に投影して示す。

※ 2007年3月25日能登半島地震本震(M6.9)については、検討に用いた地震計のうち1号原子炉建屋基礎版上の地震計の不具合により、観測記録が得られていないことから、バックアップ用地震計により得られた観測記録を用いた。

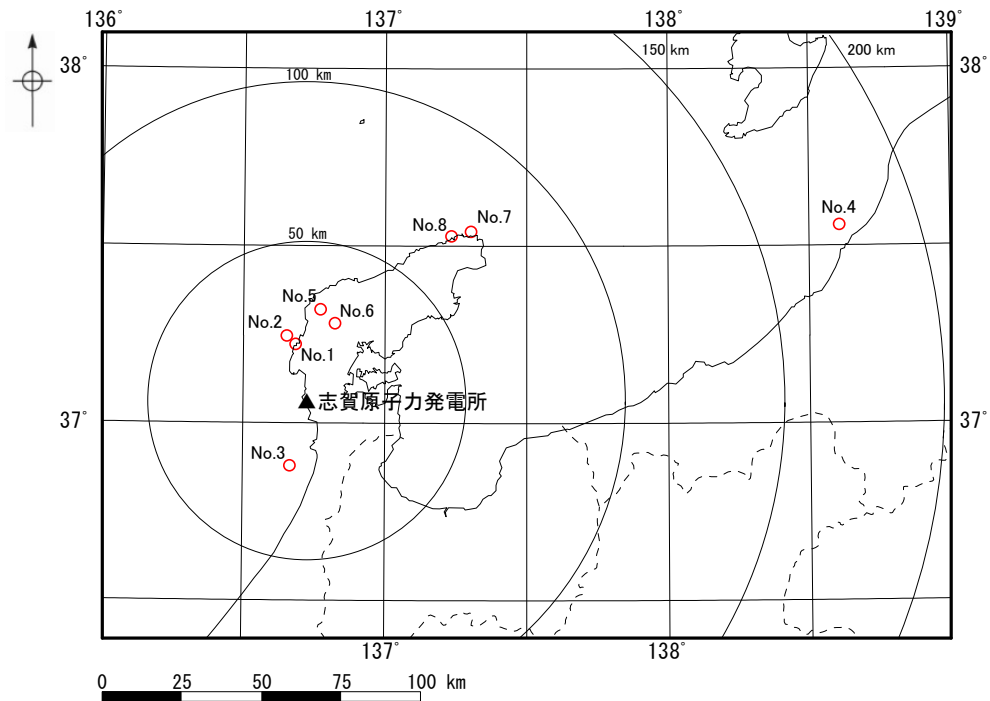
(2) 検討の対象とした地震

- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。
- 検討の対象は、2004年10月～2023年5月に1号と2号で同時に観測された地震のうち、最大加速度10cm/s²程度以上を記録し、観測記録の信頼周期上限が5秒程度以上である8地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	原子炉建屋基礎版上最大加速度 (cm/s ²)					
	日付	時刻	北緯 (°)	東經 (°)	深さ (km)	M		1号			2号		
								NS	EW	UD	NS	EW	UD
1	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1	163.2	239.4	150.8	179.4	254.2	204.2
2	2007/06/11	03:45	37.2442	136.6547	7.29	5.0	21.3	34.9	30.4	18.1	36.2	33.2	17.4
3	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6	21.0	20.2	24.8	10.6	22.1	26.5	13.0
4	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8	5.9	5.9	2.9	6.1	7.2	3.9
5	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8	28.9	9.3	6.9	4.5	7.5	8.2	5.0
6	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8	29.2	19.6	16.4	31.7	21.5	16.9
7	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8	18.4	20.8	14.0	24.1	17.6	11.9
8	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6	10.3	12.1	7.9	11.2	12.3	9.7

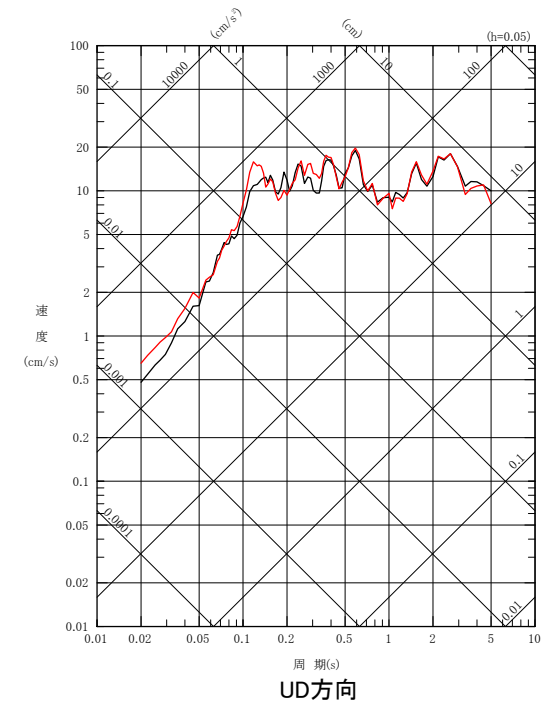
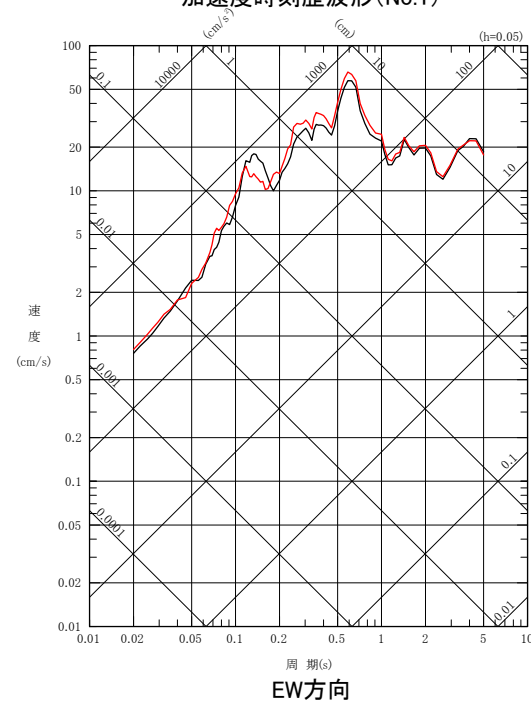
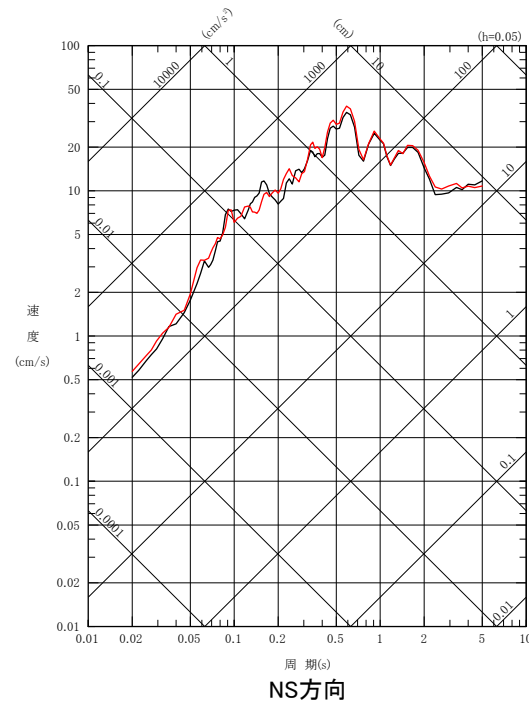
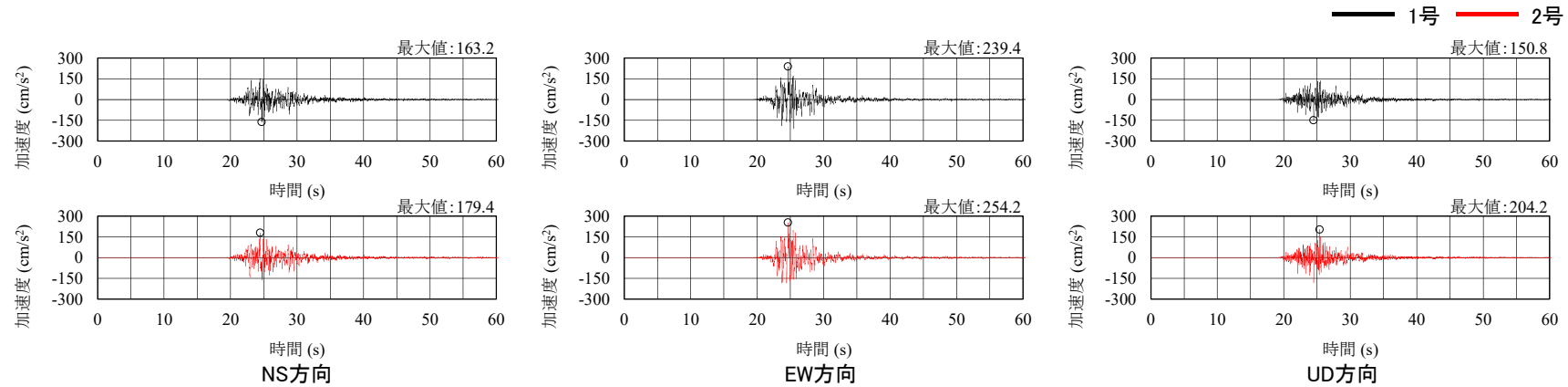
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果(1/8)

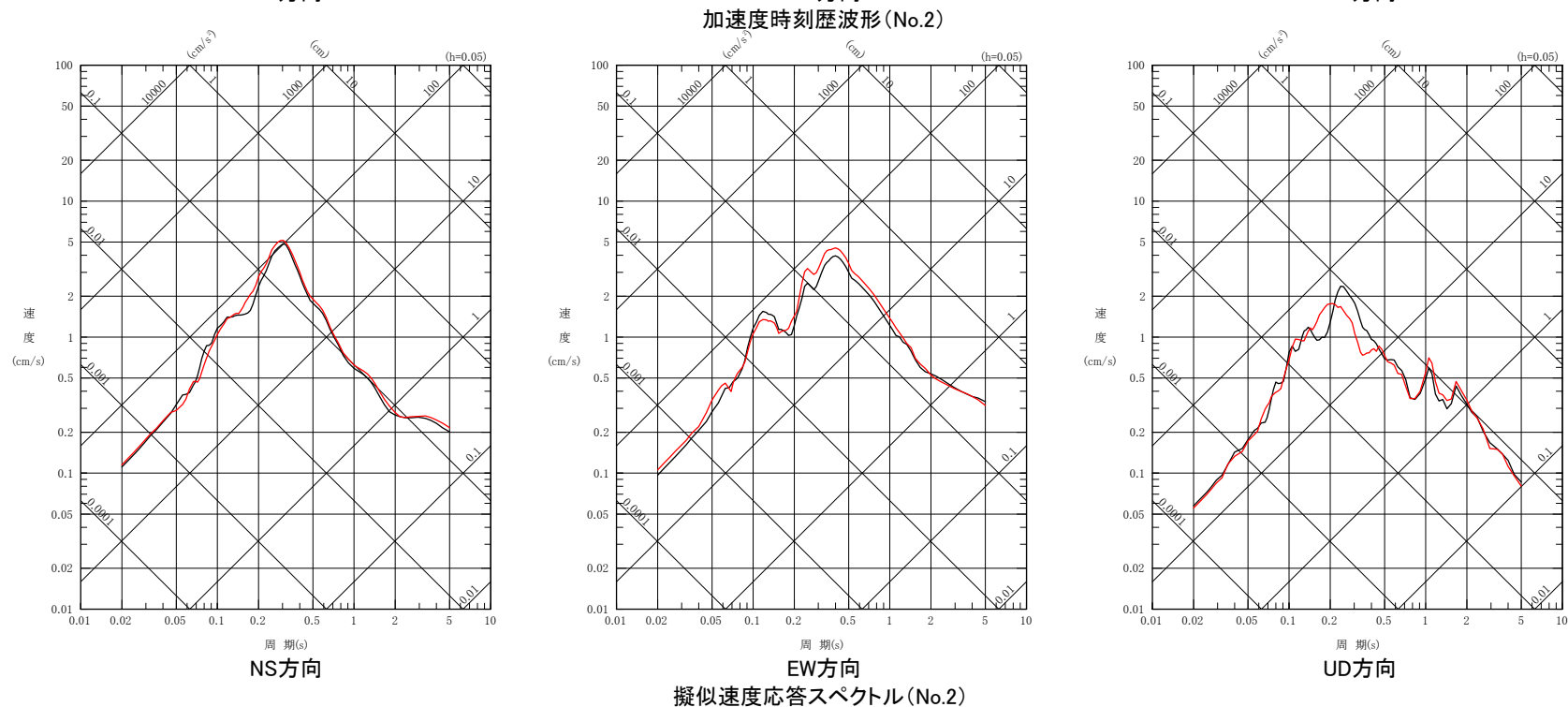
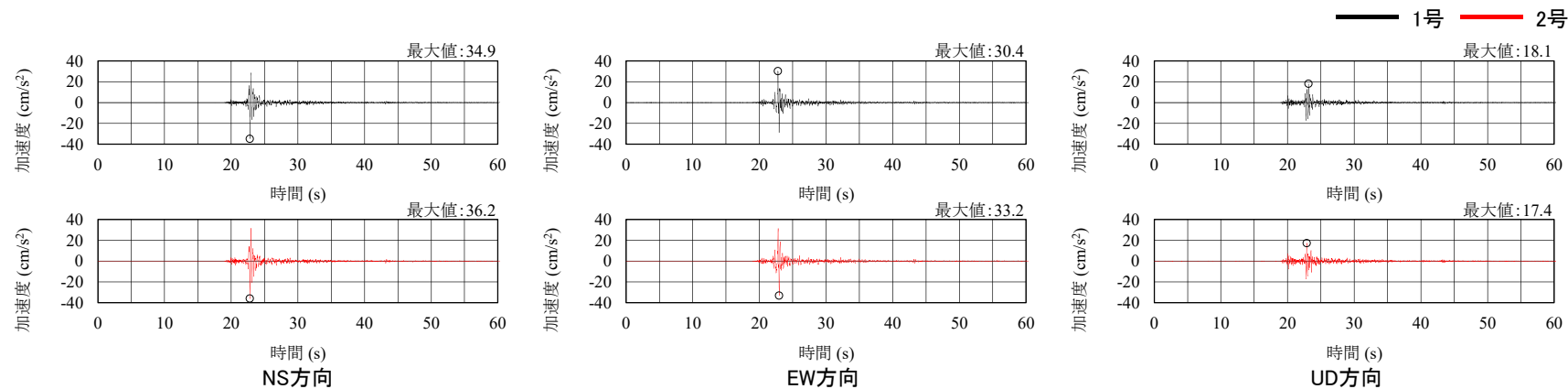
○ No.1の地震について、1号及び2号原子炉建屋基礎版上における加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを比較した結果、1号と2号に顕著な違いはない。



擬似速度応答スペクトル(No.1)

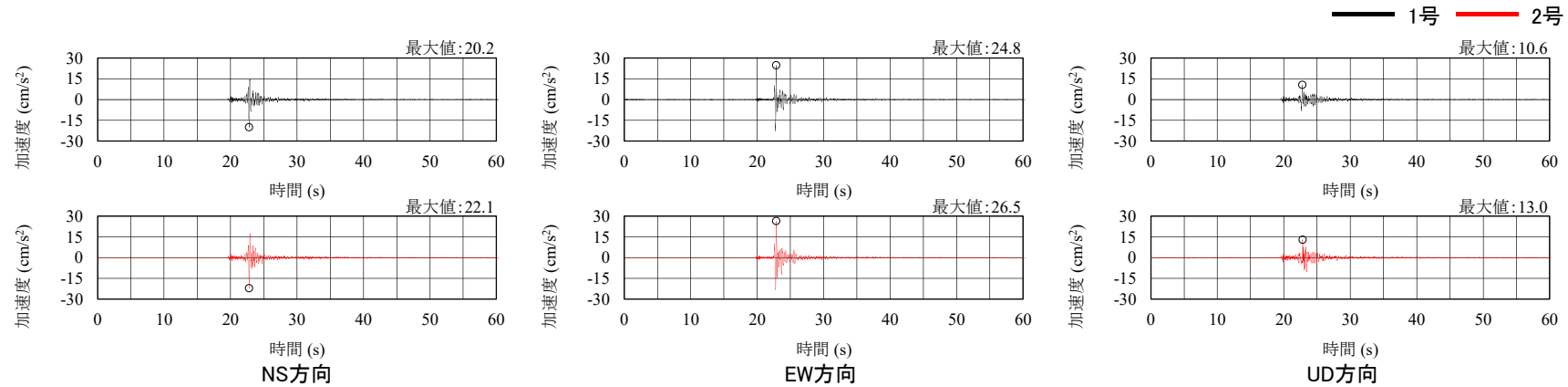
(3) 検討結果 (2/8)

○ No.2の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。

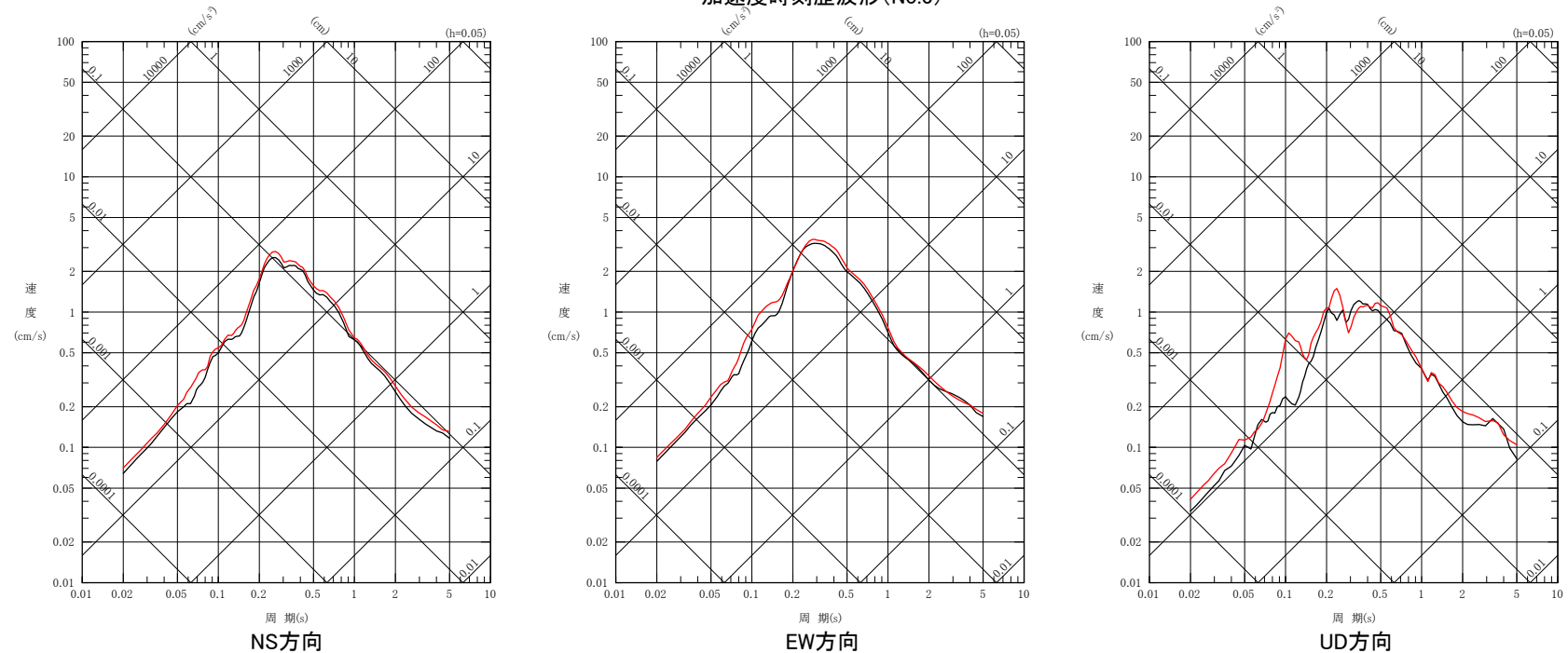


(3) 検討結果 (3/8)

○ No.3の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。



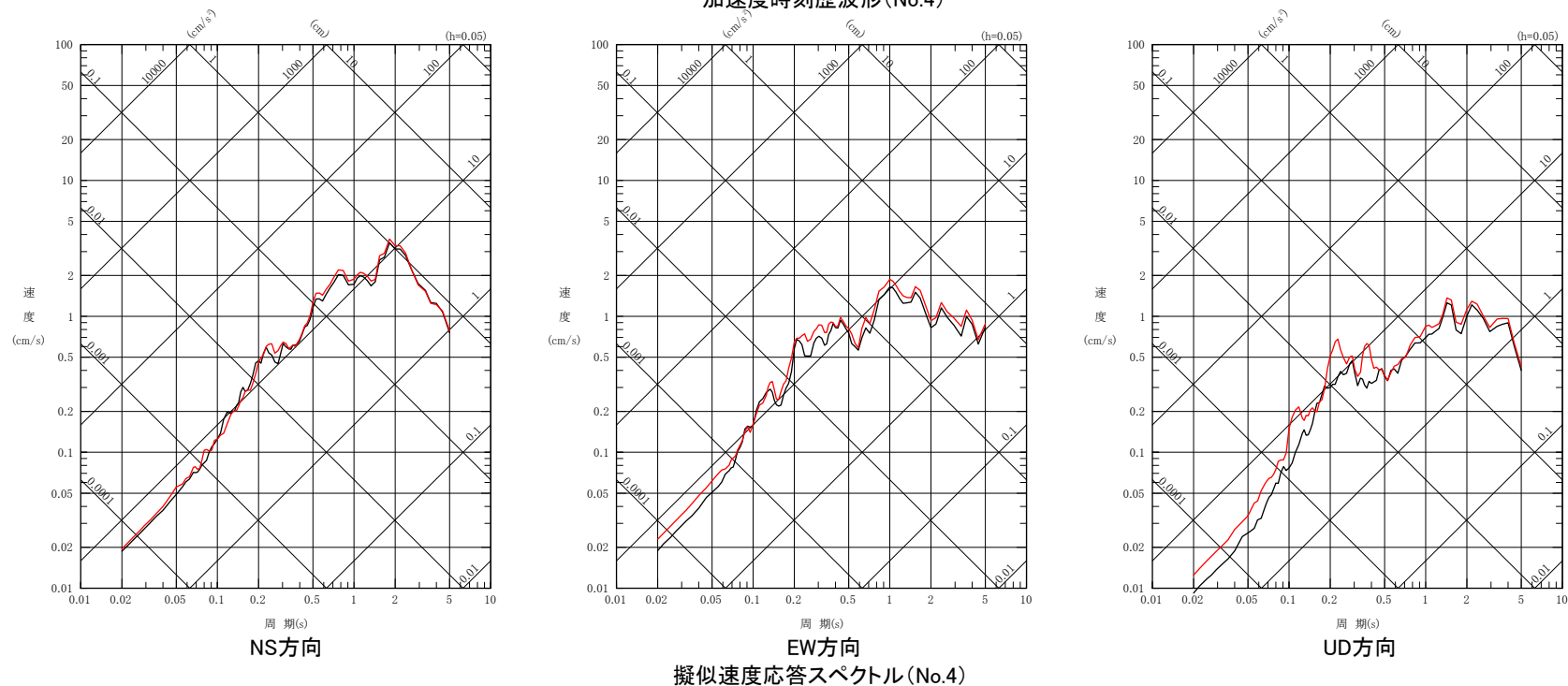
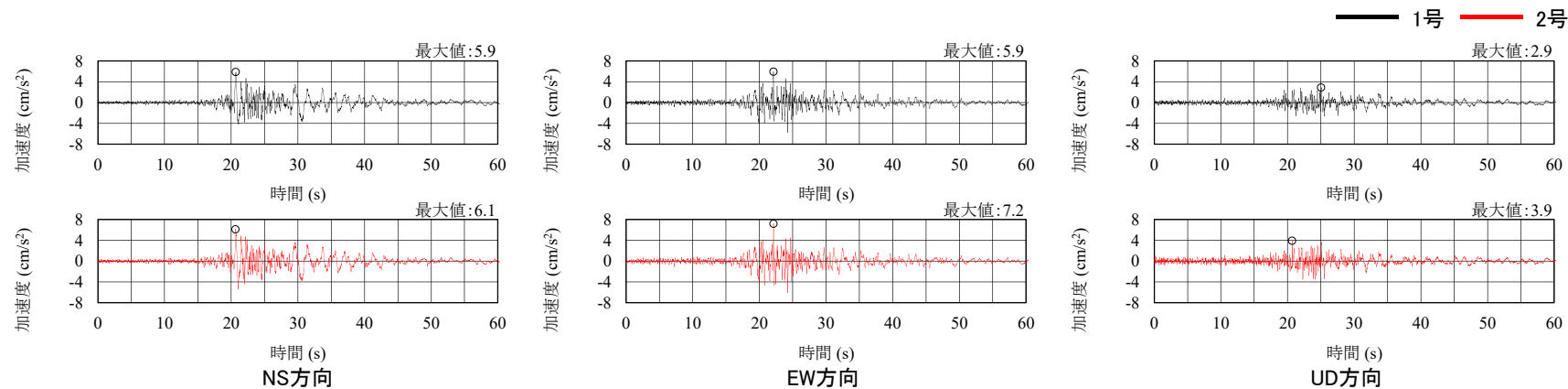
加速度時刻歴波形 (No.3)



擬似速度応答スペクトル (No.3)

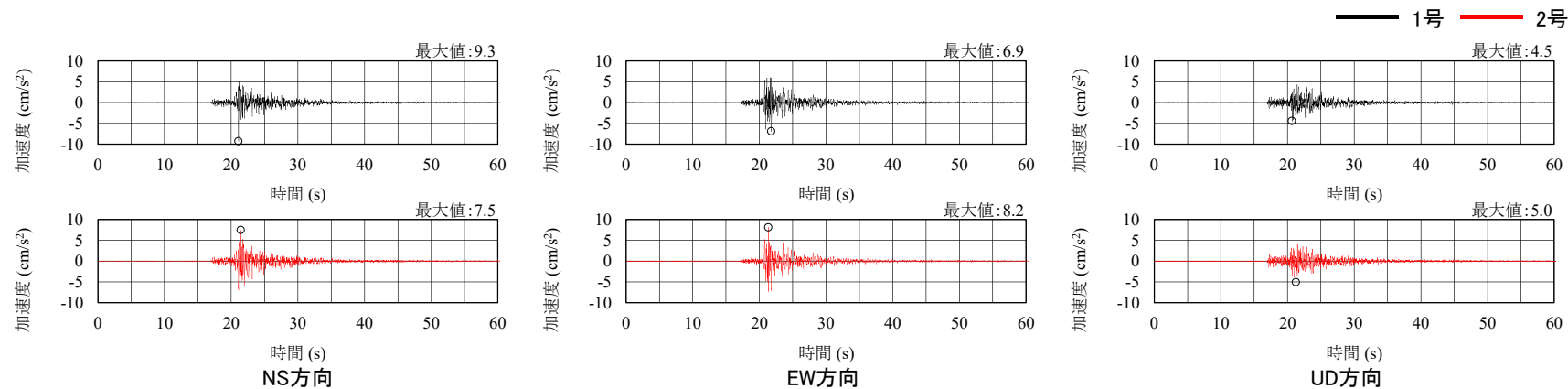
(3) 検討結果 (4/8)

○ No.4の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。

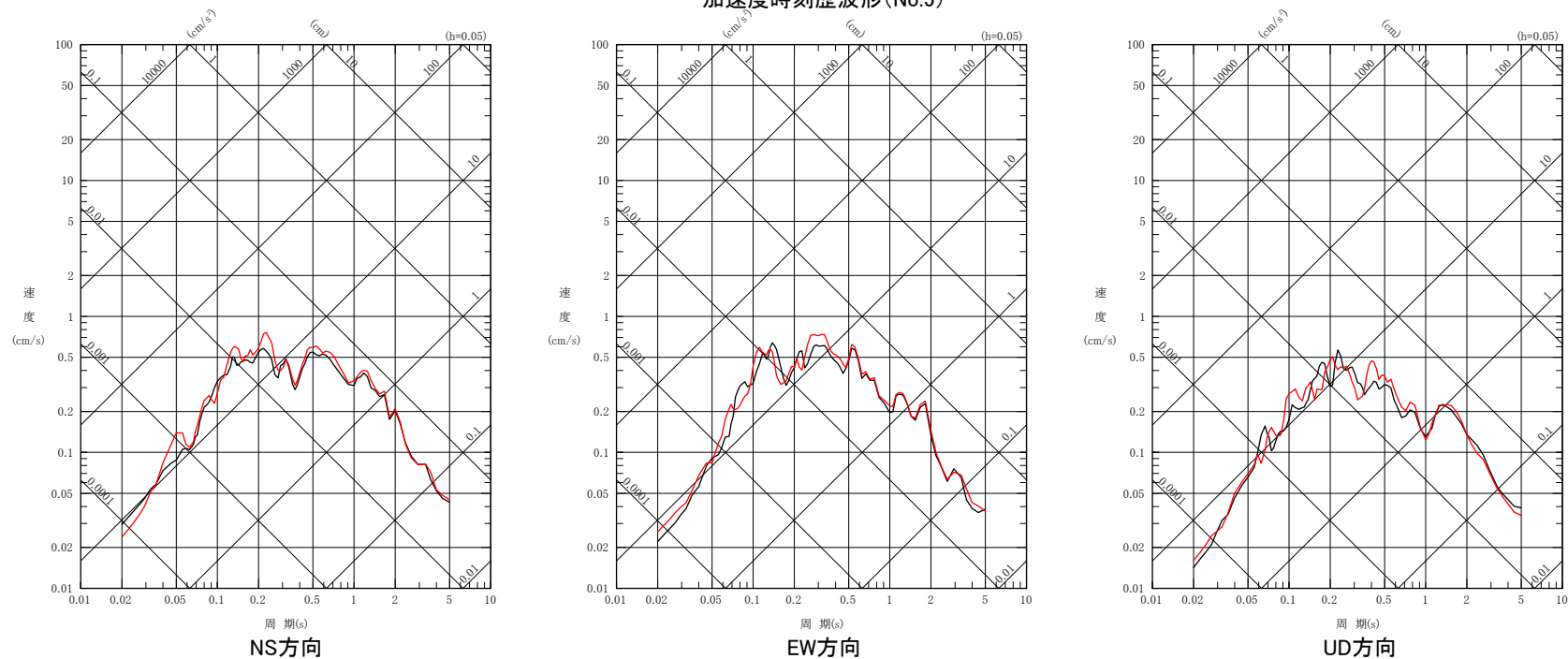


(3) 検討結果 (5/8)

○ No.5の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。



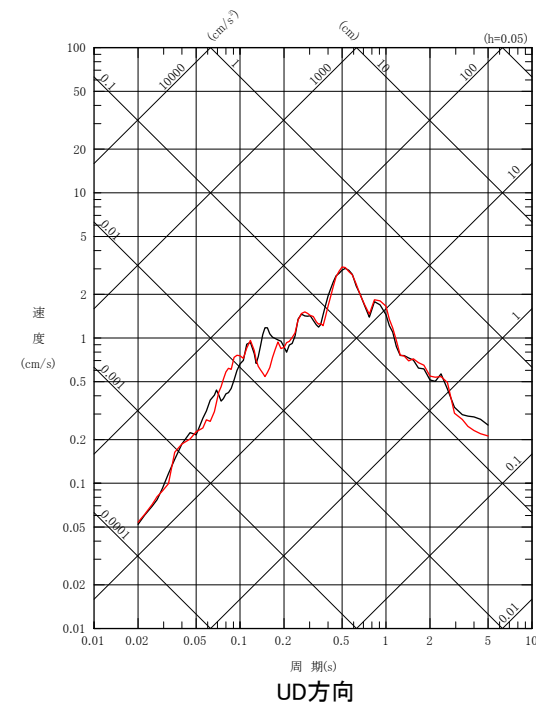
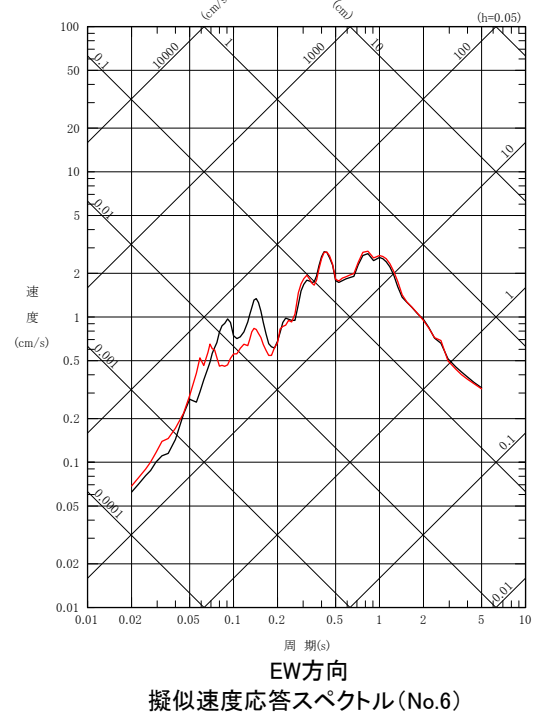
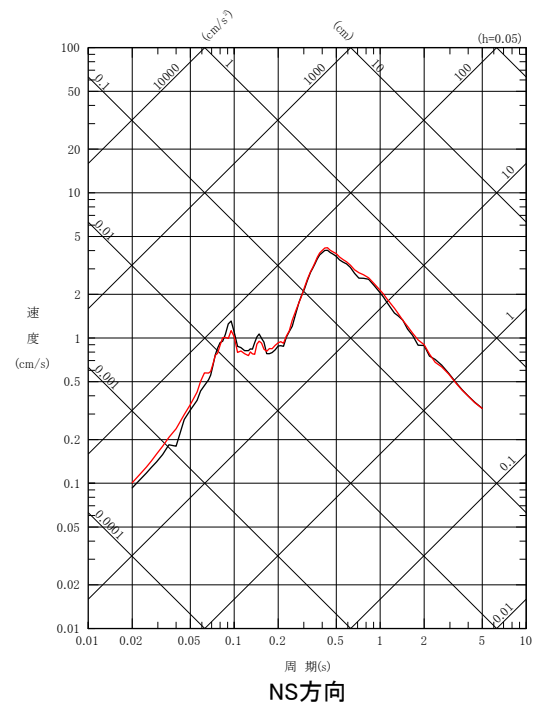
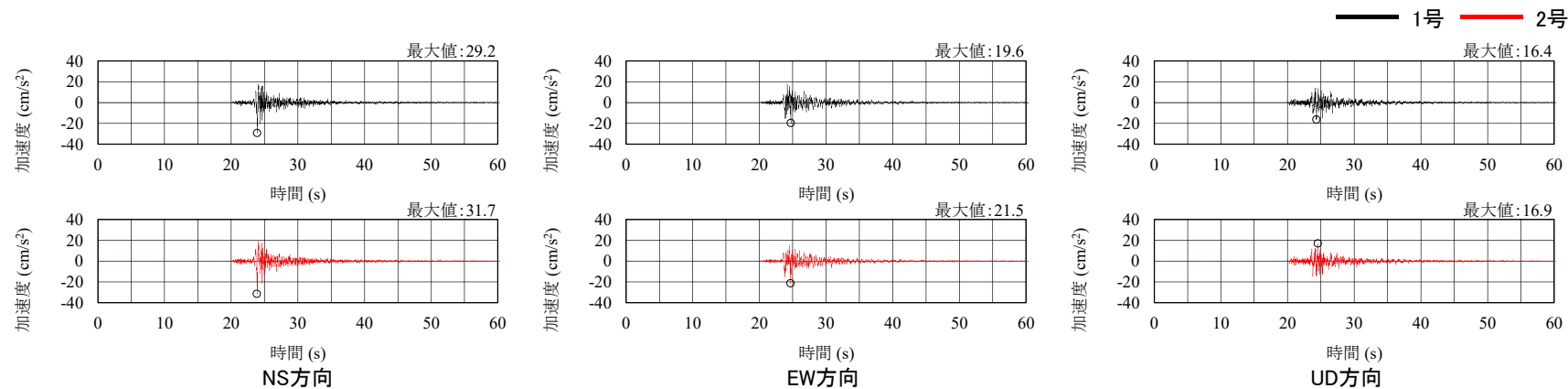
加速度時刻歴波形 (No.5)



擬似速度応答スペクトル (No.5)

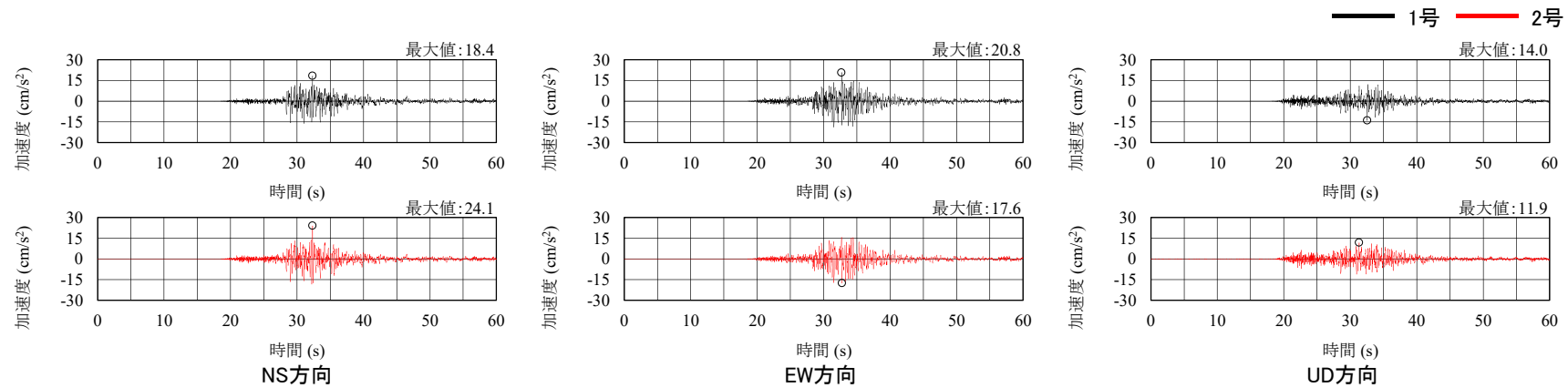
(3) 検討結果(6/8)

○ No.6の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。

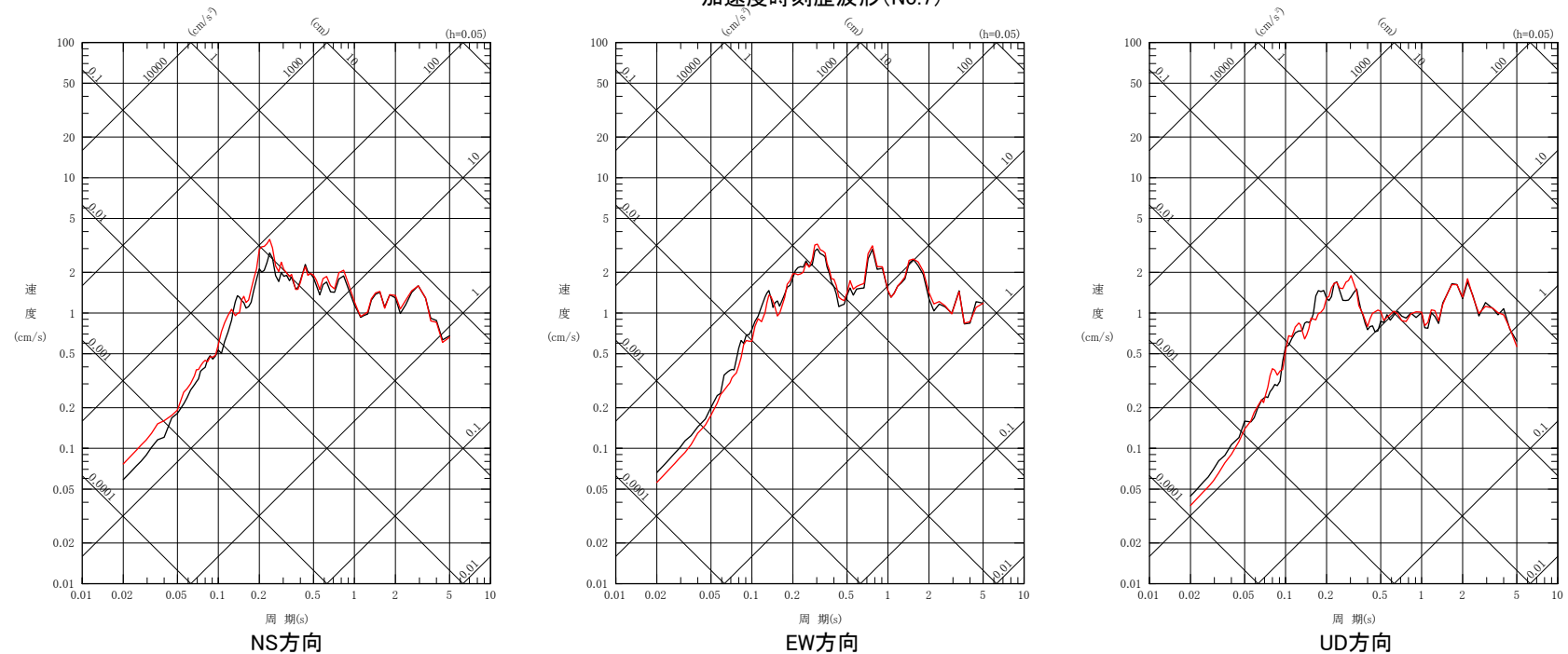


(3) 検討結果 (7/8)

○ No.7の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。



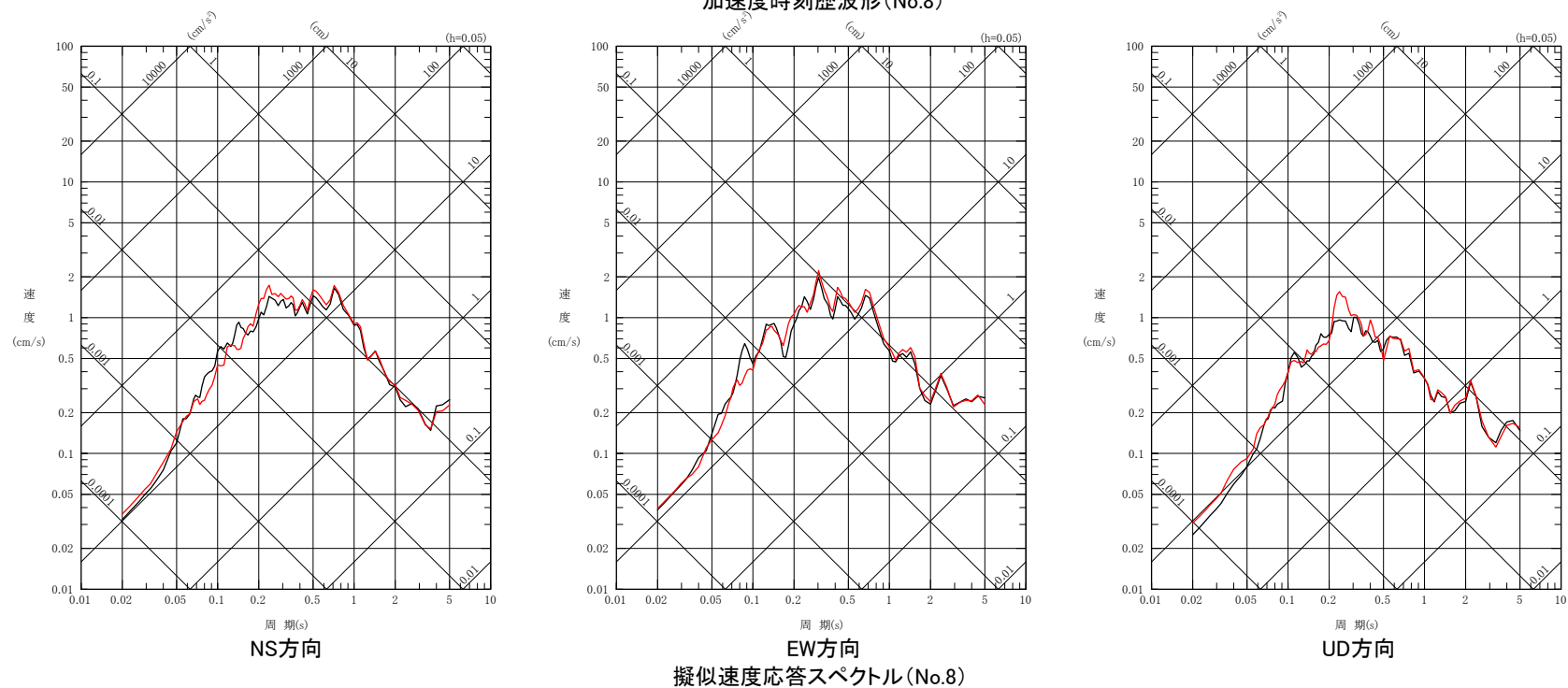
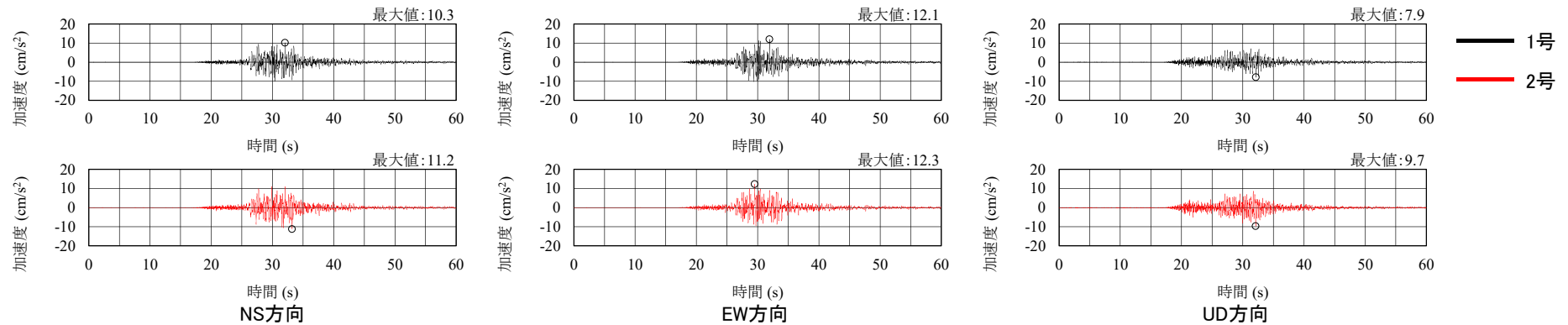
加速度時刻歴波形 (No.7)



擬似速度応答スペクトル (No.7)

(3) 検討結果(8/8)

○ No.8の地震についても, No.1の地震と同様, 1号と2号に顕著な違いはない。



➤ No.1～8の地震について, 加速度時刻歴波形及び応答スペクトルに顕著な違いはないことから, 1号原子炉建屋周辺及び2号原子炉建屋周辺において, 地震基盤以浅の速度構造に顕著な違いはないと考えられる。

まとめ

1.3.1 水平アレー地震観測記録(地表)を用いた検討

- 敷地の地震基盤以浅の速度構造を把握するため、水平アレー地震観測点(地表)において、観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比を確認し、地震波の到来方向ごとに比較した。
- 観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1～4周辺において、地震基盤以浅の速度構造(表層地盤を除く)に顕著な違いはないと考えられる。

1.3.2 水平アレー地震観測記録(地中)を用いた検討

- 敷地の地震基盤以浅の速度構造を把握するため、EL-200mの地震観測点間の応答スペクトル比を確認し、地震波の到来方向ごとに比較した。
- 2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、2号原子炉建屋直下地震観測点周辺と自由地盤地震観測点周辺において、EL-200m～地震基盤の速度構造に顕著な違いはないと考えられる。

1.3.3 鉛直アレー地震観測記録を用いた検討

- 敷地のEL-10m～EL-200mの速度構造を把握するため、鉛直アレー地震観測点間の応答スペクトル比を確認し、地震波の到来方向ごとに比較した。
- 自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはないことから、自由地盤地震観測点周辺のEL-10m～EL-200mに、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

1.3.4 原子炉建屋基礎版上の地震観測記録を用いた検討

- 敷地の地震基盤以浅の速度構造を把握するため、原子炉建屋基礎版上における加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを1号と2号で比較した。
- 加速度時刻歴波形及び応答スペクトルに顕著な違いはないことから、1号原子炉建屋周辺及び2号原子炉建屋周辺において、地震基盤以浅の速度構造に顕著な違いはないと考えられる。

➤ 敷地の地震基盤以浅の速度構造に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないものと評価した。

まとめ

1.1 地質・地質構造の調査

- 敷地周辺の地質は、新第三紀以降の地層が基盤である花崗岩類を直接覆っており、敷地近傍においては岩稲階の別所岳安山岩類が広く分布している。
- 敷地近傍に分布する中新世～第四紀の地層は、概ね水平ないし非常に緩く傾斜して分布している。
- 敷地の地質は、新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類が広く分布しており、安山岩を主体とし、凝灰角礫岩を挟在するものの、敷地の速度構造は概ね水平な層構造を呈す。ただし、周囲と異なる速度特性を示す範囲として、第3'速度層及び第4'速度層が認められることについては、二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果を踏まえ、第3'速度層及び第4'速度層が解放基盤表面での地震動へ与える影響は小さいものと評価した。
- 敷地の地震基盤面は、D-8.6孔の位置においては、深さ1km程度に位置する。

1.2 物理探査による地下構造の検討

- 敷地周辺の地震基盤面は深さ1km程度であり、概ね水平に分布しているものと評価した。
- 敷地周辺の地震基盤面より深部の速度構造に顕著な不整形はないものと評価した。
- 原子炉設置付近の第3速度層上面に顕著な不整形はないものと評価した。

1.3 観測記録による地下構造の検討

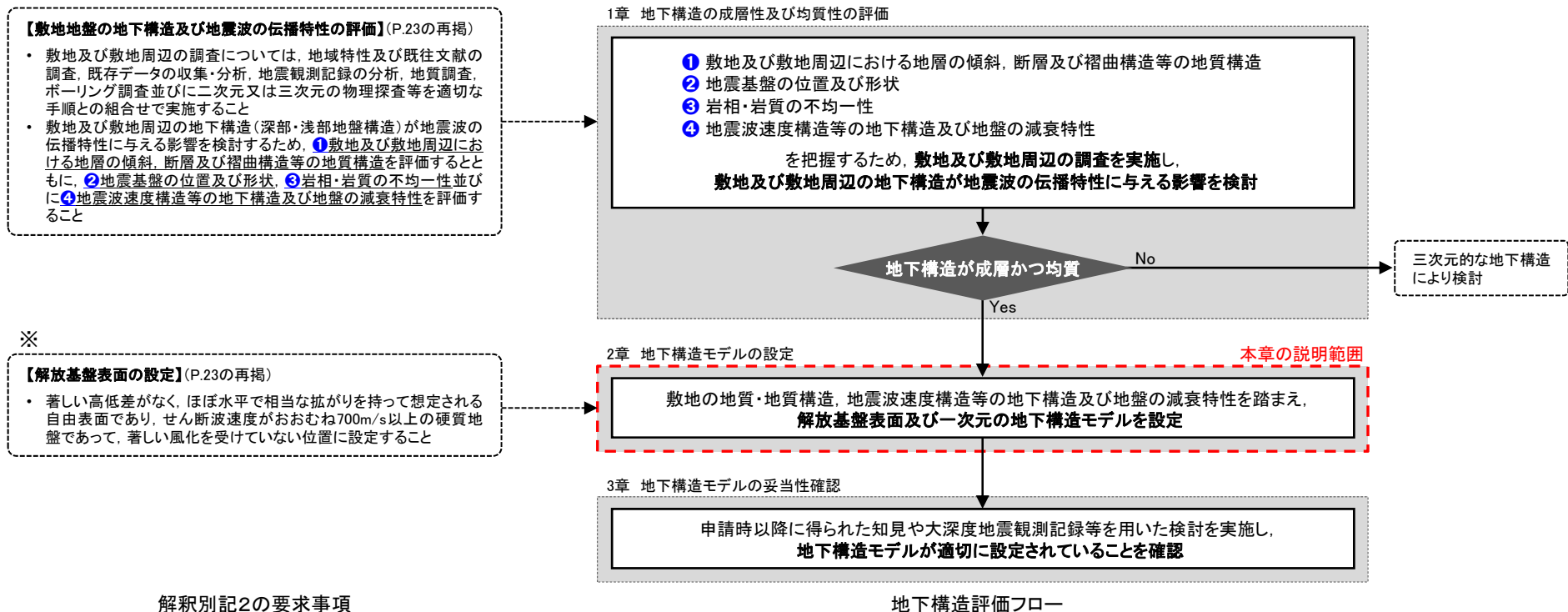
- 敷地の地震基盤以浅の速度構造に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないものと評価した。

➤ 以上により、敷地の地下構造は成層かつ均質と評価できるものと判断した。

2. 地下構造モデルの設定

(1) 地下構造モデルの設定方法

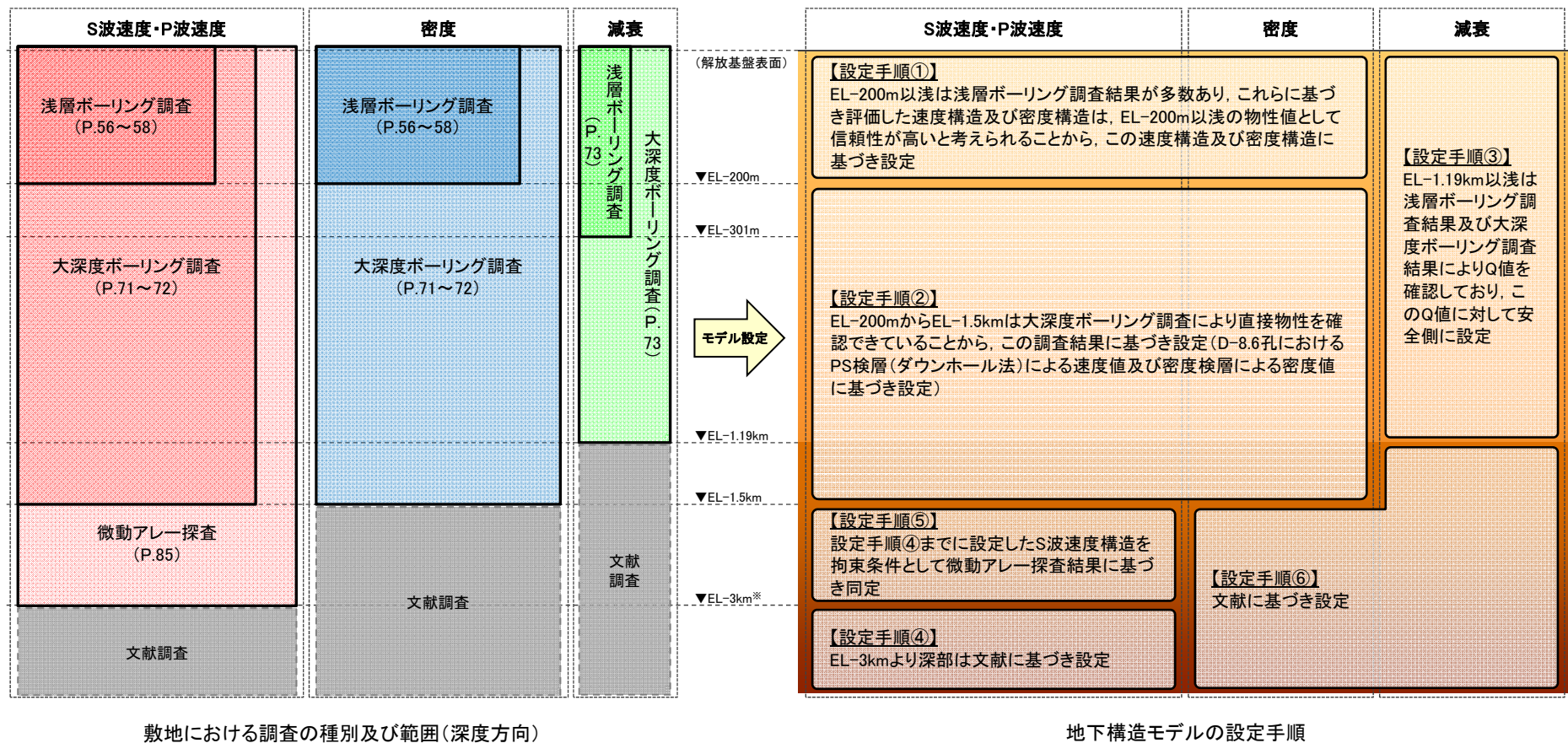
- 1章の地下構造の成層性及び均質性の評価により、敷地の地下構造は成層かつ均質と評価した。
- 2章では、下図の地下構造評価フローに基づき、「敷地近傍地下構造調査(精査)」及び「広域地下構造調査(概査)」により把握した敷地の地質・地質構造、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を踏まえ、解放基盤表面及び一次元の地下構造モデルを設定する。
- 解放基盤表面は解釈別記2の要求事項※を踏まえ設定する。
- 地下構造モデルの設定に用いた敷地における調査の種別及び範囲、並びに地下構造モデルの設定手順を次頁に示す。



2. 地下構造モデルの設定

(2) 敷地における調査の種別及び範囲、並びに地下構造モデルの設定手順

- 敷地の地下構造は成層かつ均質と評価できることから、鉛直アレー地震観測を実施している自由地盤位置(P.102に示す自由地盤地震観測点)において一次元の地下構造モデルを設定する。
- 一次元の地下構造モデルは、左下図に示す敷地における地盤調査(浅層ボーリング調査、大深度ボーリング調査及び微動アレー探査)の結果に基づき設定する。また、これら地盤調査の範囲より深部については文献に基づき設定する。
- 敷地における調査結果を踏まえた地下構造モデルの設定手順を右下図に示す。



※ 微動アレー探査のアレー半径(1km)を踏まえて設定。

(3) 解放基盤表面の設定

■ 解放基盤表面の設定に係る解釈別記2の要求事項

著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりを持って想定される自由表面であり、せん断波速度がおおむね700m/s以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていない位置に設定すること

■ 敷地地盤の特徴

- 敷地の地質・地質構造は、安山岩(均質)、安山岩(角礫質)及び凝灰角礫岩からなる新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類が広く分布し、ほぼ水平な構造と判断される。(詳細はP.43～53参照)
- 敷地のEL-200m以浅の速度構造は、第1速度層から第4速度層に分類され、概ね水平な層構造を呈す。また、第3速度層以深は、せん断波速度が1500m/s以上の硬質地盤である。(詳細はP.56～58, P.96参照)
- 原子炉設置位置の岩盤にはほとんど変質部は認められず、主に(Ba)級、(Bb)級の岩級区分を示す安山岩が広く分布していることから、著しい風化を受けていないと判断される。(詳細はP.54参照)

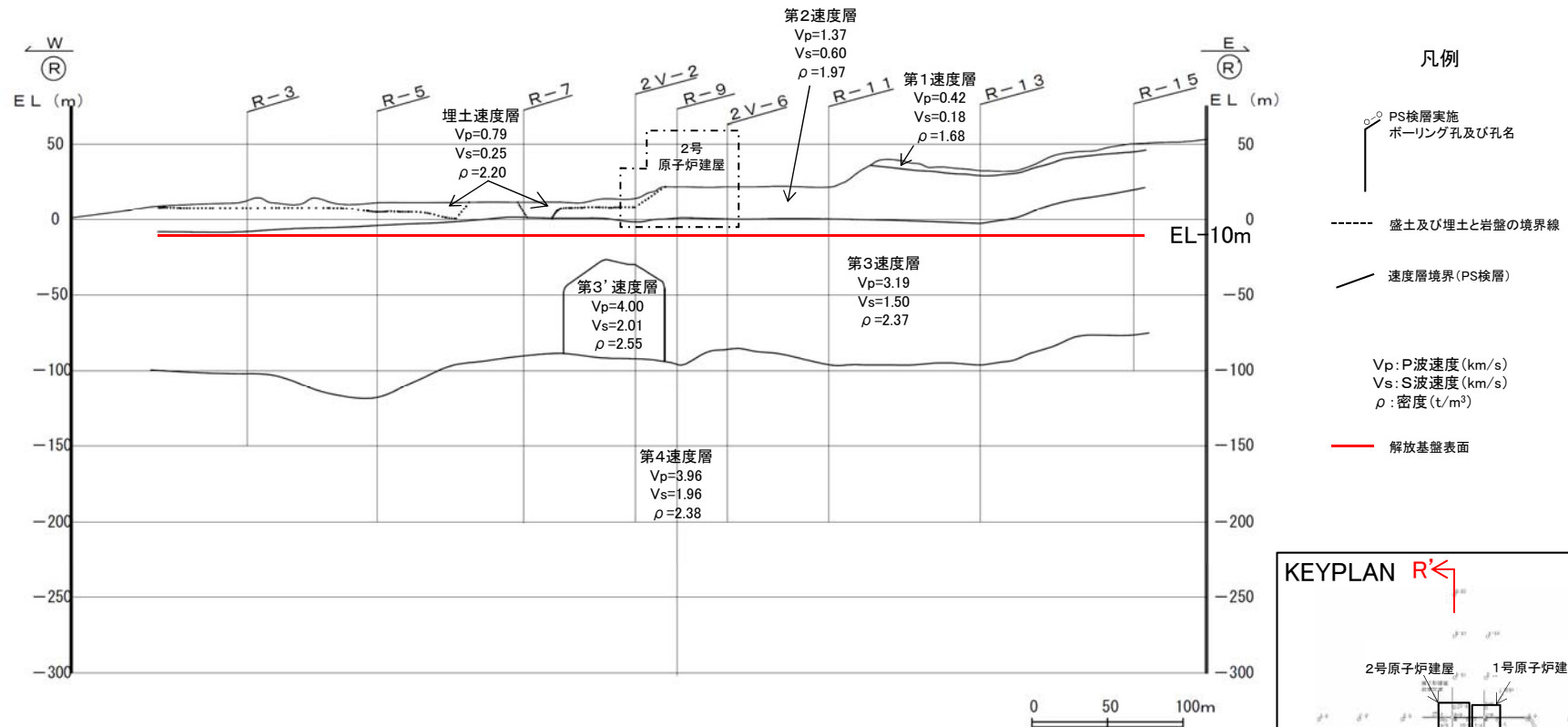


- 敷地地盤は、安山岩を主体とした別所岳安山岩類が広く分布し、ほぼ水平で相当な広がりをもっており、せん断波速度が1500m/sである第3速度層において著しい風化を受けていないと判断されるEL-10mの位置を解放基盤表面として設定する。(設定した解放基盤表面の位置はP.145～146の速度構造及び密度構造断面参照)

2. 地下構造モデルの設定

(4) 設定手順① EL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度(1/3)

- EL-200m以浅は浅層ボーリング調査結果が多数あり, これらに基づき評価した速度構造及び密度構造は, EL-200m以浅の物性値として信頼性が高いと考えられることから, EL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度は, この速度構造及び密度構造に基づき設定した。
- EL-200m以浅の速度構造及び密度構造断面(R-R'断面)を下図に示す。

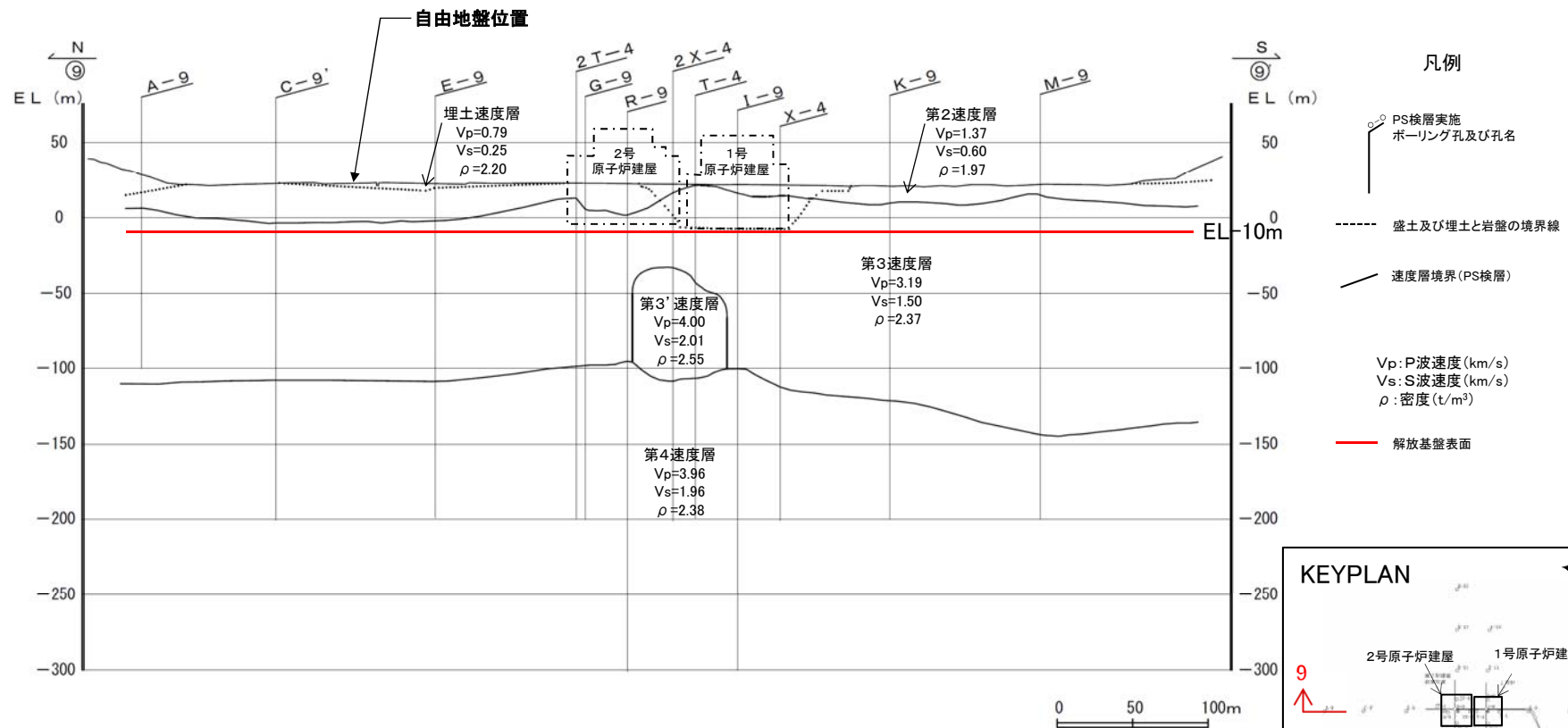


速度構造及び密度構造断面(R-R'断面)※

※ 速度構造及び密度構造断面の設定の詳細はP.56参照。

(4) 設定手順① EL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度(2/3)

- EL-200m以浅の速度構造及び密度構造断面(9-9'断面)を下図に示す。
- 地下構造モデルは、自由地盤位置の速度構造及び密度構造に基づき設定した。自由地盤位置の速度構造及び密度構造を次頁に示す。



速度構造及び密度構造断面(9-9'断面)※

※ 速度構造及び密度構造断面の設定の詳細はP.58参照。

(4) 設定手順① EL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度(3/3)

- 前頁に示す速度構造及び密度構造断面における自由地盤位置の速度構造及び密度構造を左上表に示す。
- 左上表の層区分の標高は、自由地盤位置の鉛直アレー地震計の設置に際して別途実施したボーリング調査による層区分(左下表)を踏まえて設定した。また、左上表の速度及び密度は、前頁に示す速度構造及び密度構造断面における自由地盤位置の速度及び密度を示す。
- なお、原子炉設置位置付近の速度構造等の調査結果(P.56～58, P.71)において、EL-200mに速度及び密度の明瞭な境界はみられないが、左上表に示す速度構造及び密度構造は、EL-200m以浅の多数の浅層ボーリング調査結果に基づくものであり、物性値として信頼性が高いと考えられることから、地下構造モデルのEL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度は、左上表に示す速度構造及び密度構造に基づき設定し、EL-200mに層境界を設定した。

自由地盤位置の速度構造及び密度構造

層区分	標高EL※1	V _s ※2 (km/s)	V _p ※2 (km/s)	密度※2 (t/m ³)
埋土速度層	+21m ~ +17.1m	0.25	0.79	2.20
第2速度層	+17.1m ~ -4.9m	0.60	1.37	1.97
第3速度層	-4.9m ~ -108.9m	1.50	3.19	2.37
第4速度層	-108.9m ~ -200m	1.96	3.96	2.38

※1: 自由地盤位置の鉛直アレー地震計(EL+19.5m, -10m, -100m, -200m)の設置に際して別途実施したボーリング調査による層区分(下表)を踏まえて設定した。

※2: 前頁に示す速度構造及び密度構造断面における自由地盤位置の速度及び密度を示す。

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V _s (km/s)	P波速度 V _p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

98.9: 浅層ボーリング調査結果に基づき設定した範囲

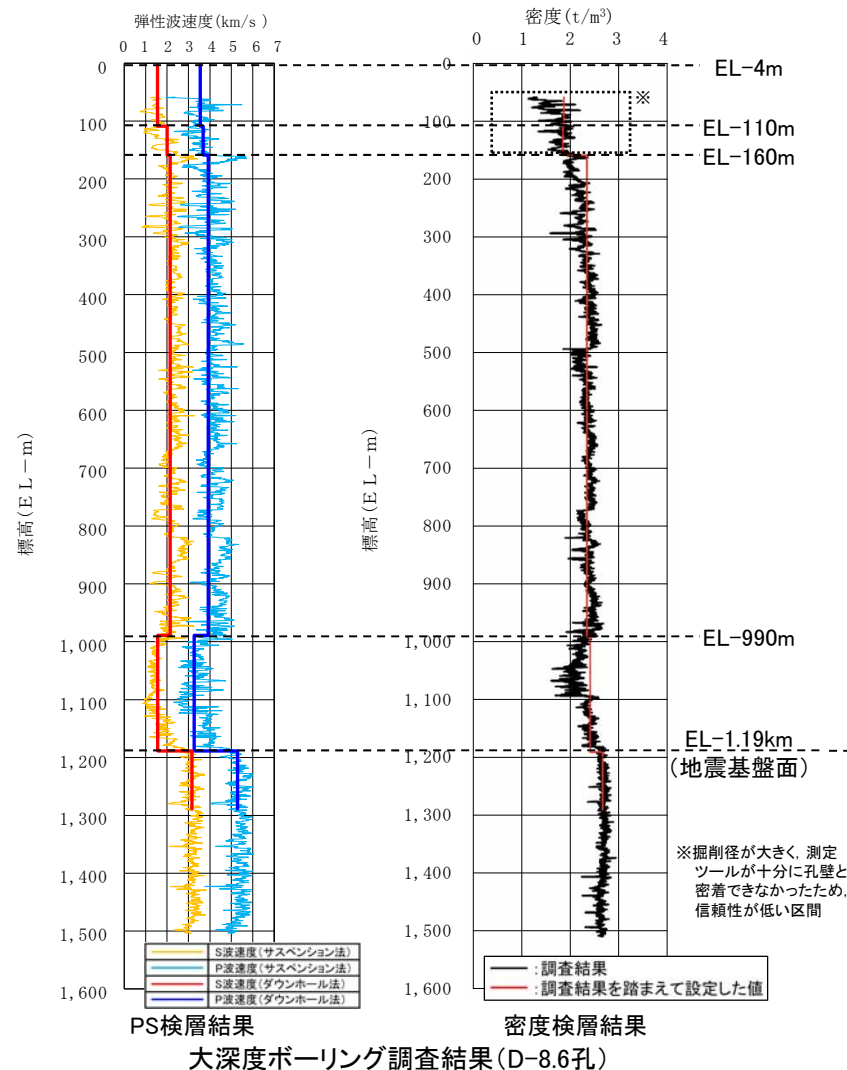
自由地盤位置の鉛直アレー地震計の設置に際して
実施したボーリング調査による層区分

層区分	標高EL
埋土速度層	+21m ~ +17.1m
第2速度層	+17.1m ~ -4.9m
第3速度層	-4.9m ~ -108.9m
第4速度層	-108.9m ~ -200m

2. 地下構造モデルの設定

(5) 設定手順② EL-200mからEL-1.5kmのS波速度, P波速度及び密度

- EL-200mからEL-1.5kmのS波速度, P波速度及び密度は, 大深度ボーリング調査により直接物性を確認できていることから, 当該深度の地下構造モデルのS波速度, P波速度及び密度はこの調査結果に基づき設定した。大深度ボーリング調査は2孔(K-13.6孔及びD-8.6孔)で実施しているが, 2孔の物性値(S波速度, P波速度及び密度)は同程度の値を示す(P.71~72)ことから, 自由地盤位置において, より深部まで物性を把握できているD-8.6孔の調査結果(PS検層(ダウンホール法)による速度値及び密度検層による密度値)に基づき設定した。なお, D-8.6孔のEL-200m以浅の速度構造は, EL-160mに層境界がみられるが, これを境界として, 速度値に顕著な違いはなく, また, 設定した地下構造モデルの速度構造とも整合的である。
- また, D-8.6孔のPS検層結果よりS波速度が3km/s程度以上となる地震基盤面が深さ1.19kmに位置すること, 及び物理探査による地下構造の検討(1.2節)の結果より敷地周辺の地震基盤面は深さ1km程度であり, 概ね水平に分布していることを踏まえ, 敷地の地震基盤面はEL-1.19kmと設定した。



大深度ボーリング調査結果 (D-8.6孔) による層区分毎の速度 (ダウンホール法) 及び密度

層区分	標高EL	Vs (km/s)	Vp (km/s)	密度 (t/m³)
1 (第3速度層)	-4m ~ -110m	1.55	3.55	1.87※
2 (第4速度層)	-110m ~ -160m	2.00	3.69	1.85※
3	-160m ~ -990m	2.14	3.92	2.34
4	-990m ~ -1190m	1.56	3.26	2.41
5	-1190m ~ -1290m	3.16	5.29	2.67

※ 掘削径が大きく, 測定ツールが十分に孔壁と密着できなかったため, 信頼性が低い区間

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km*	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

大深度ボーリング調査結果に基づき設定した範囲

* EL-1.19km~EL-1.5kmの物性値をEL-1.5km~1.79kmの区間まで適用できることについては, 設定手順⑤ (P.153~154) において確認

(6) 設定手順③ EL-1.19km以浅の減衰

- EL-1.19km以浅の減衰は、浅層ボーリング調査結果及び大深度ボーリング調査結果によりQ値を確認しており、当該深度の地下構造モデルのQ値は、この調査結果に対して安全側に設定した。
- 浅層ボーリング調査(R-9孔)及び大深度ボーリング調査(D-8.6孔)によるQ値測定結果(P.73)を下表に示す。
- R-9孔とD-8.6孔の層区分1及び層区分2はそれぞれ第3速度層及び第4層速度層に対応するものとし、EL-10m～EL-108.9mのQ値は層区分1のQ値測定結果を、EL-108.9m～EL-200mのQ値は層区分2のQ値測定結果を上回るように設定した。またEL-200m～EL-990mのQ値はD-8.6孔の層区分3のQ値測定結果を、EL-990m～EL-1.19kmのQ値はD-8.6孔の層区分4のQ値測定結果を上回るように設定した。

最大振幅法によるQ値測定結果

調査位置	層区分	標高EL (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値
R-9孔	1 (第3速度層)	1 ~ -97	24	10.4
	2 (第4速度層)	-97 ~ -301	25	8.9
D-8.6孔	1 (第3速度層)	-4 ~ -110	32	8.1
	2 (第4速度層)	-110 ~ -160	26	7.6
	3	-160 ~ -990	27	27.4
	4	-990 ~ -1190	22	47.0

設定した地下構造モデル

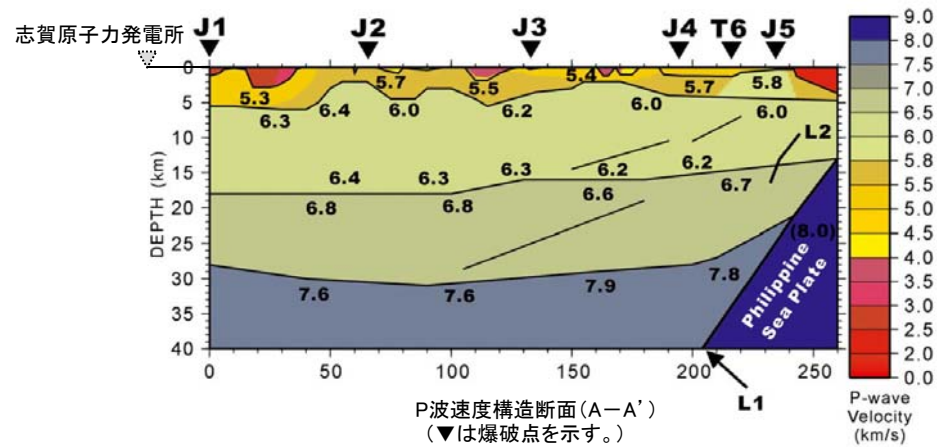
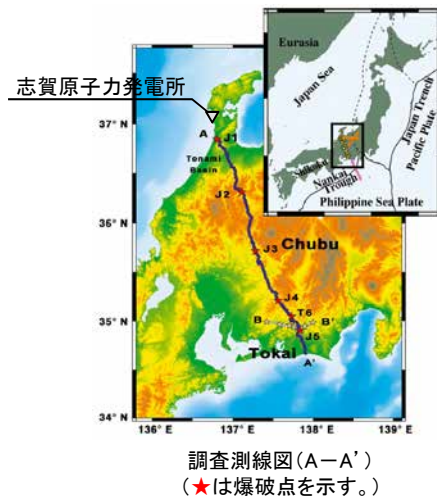
標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m						
-108.9m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-200m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-990m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-1.19km	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.79km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-3km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-5.5km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-18km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-28km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□: 浅層ボーリング調査結果及び大深度ボーリング調査結果に対して安全側に設定した範囲
Q値は、 $Q=1/2h$ の関係式より算出した。(調査結果を上回るQ値になるように減衰定数hを設定)

2. 地下構造モデルの設定

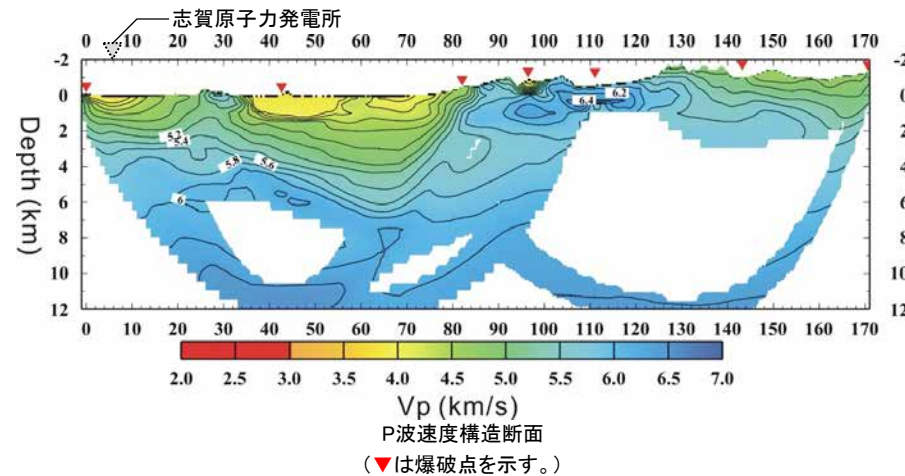
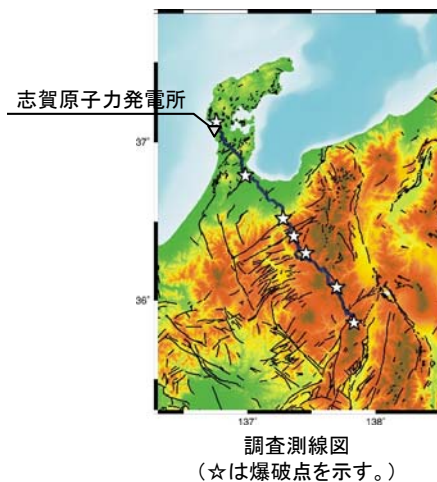
(7) 設定手順④ EL-3km以深のS波速度及びP波速度 (1/3)

- 地下構造モデルのEL-3kmより深部の速度構造は文献に基づき設定した。
- 敷地周辺においては、Iidaka et al.(2003)(P.81) 及びIidaka et al.(2008)(P.82) により詳細なP波速度構造が求められている。Iidaka et al.(2003)は、Iidaka et al.(2008)と比較して調査測線が長く、深さ40kmまでの大局的なP波速度構造が求められている。一方で、Iidaka et al.(2008)は、Iidaka et al.(2003)と比較して調査測線が短い、敷地の近くにおいては深さ5km程度以浅についてより詳細なP波速度構造が求められている。
- このことを踏まえ、深さ5km程度以深についてはIidaka et al.(2003)、深さ5km程度以浅についてはIidaka et al.(2008)に基づき設定した。



Iidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆



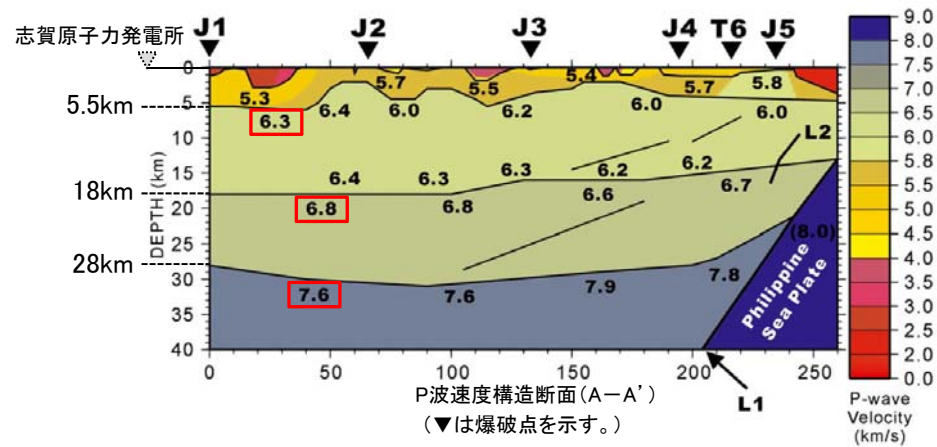
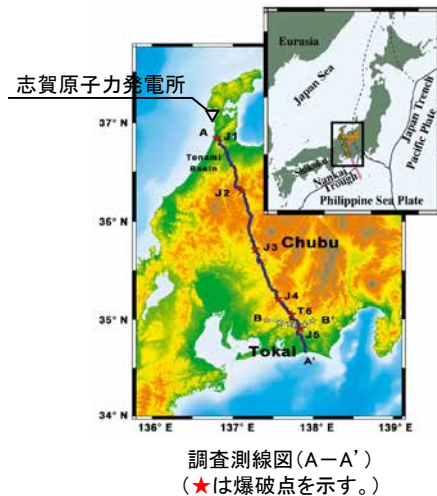
Iidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2008)に一部加筆

2. 地下構造モデルの設定

(7) 設定手順④ EL-3km以深のS波速度及びP波速度 (2/3)

- Iidaka et al.(2003)による敷地周辺の深さ5km程度以深のP波速度構造に基づき、地下構造モデルのEL-5.5km以深のP波速度構造を設定した。
- また、設定したP波速度に対応するS波速度は、地殻構造の平均的な V_s-V_p 関係($V_s=V_p/\sqrt{3}$)に基づき設定した。



Iidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

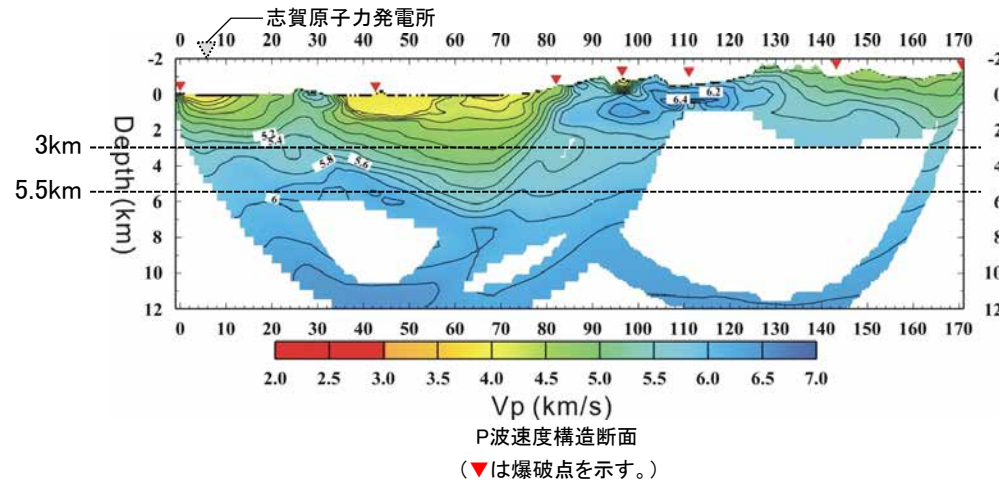
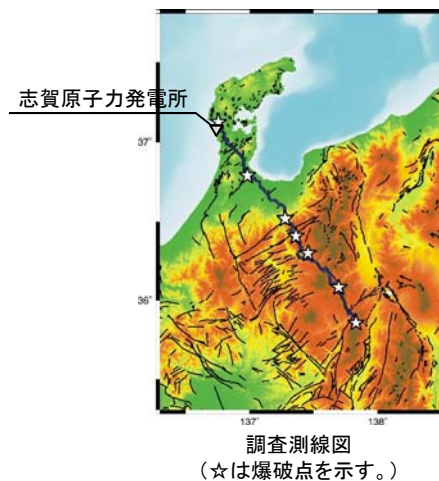
：Iidaka et al.(2003)に基づき設定した範囲

：地殻構造の平均的な V_s-V_p 関係に基づき設定した範囲

2. 地下構造モデルの設定

(7) 設定手順④ EL-3km以深のS波速度及びP波速度 (3/3)

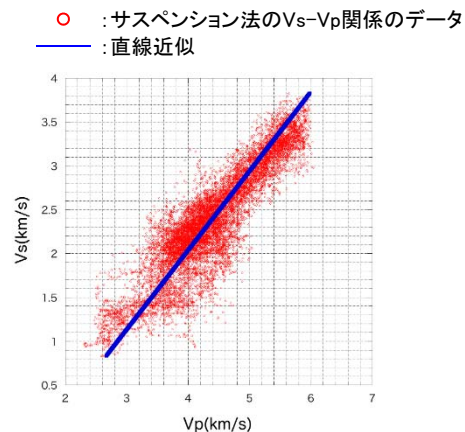
- Iidaka et al.(2008)によるP波速度構造に基づき、地下構造モデルのEL-5.5kmからEL-3kmまでのP波速度構造を設定した。
- Iidaka et al.(2008)による敷地の近くにおけるP波速度構造を見ると、深さ5.5kmから3kmの範囲において深さ方向の速度の変化は比較的緩やかであることから、深さ5.5km～3kmをひとつの層として設定することとし、この層のP波速度は深さ3km程度におけるP波速度値(5.6km/s)とした。
- また、設定したP波速度に対応するS波速度については、設定したP波速度(5.6km/s)が大深度ボーリング調査(D-8.6孔)におけるサスペンション法の V_s - V_p 関係のデータ(左下図中赤丸)の範囲内であることから、敷地の特性をより反映させるため、この V_s - V_p 関係のデータの直線近似(左下図中青線)に基づき設定した。



Iidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2008)に一部加筆

設定した地下構造モデル



大深度ボーリング調査(D-8.6孔)における
サスペンション法の V_s - V_p 関係

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

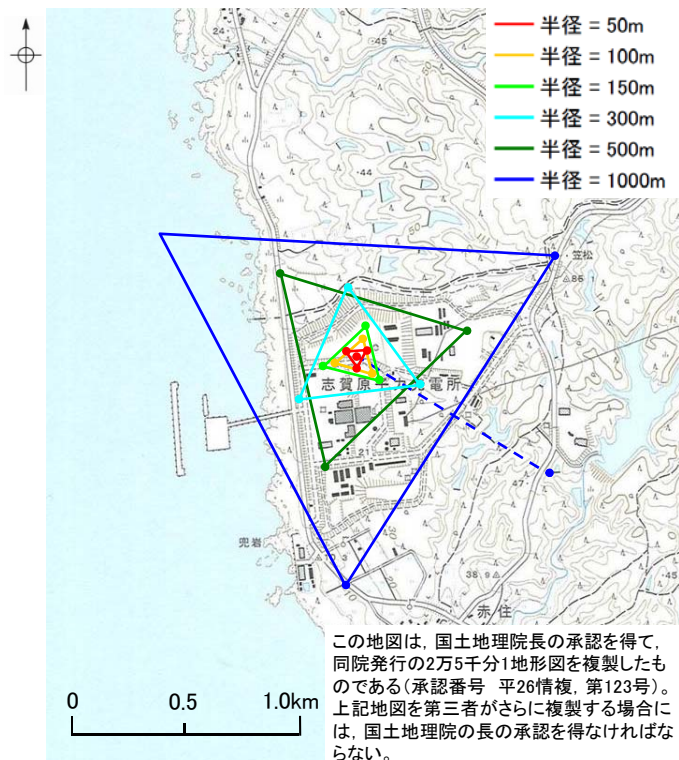
■ : Iidaka et al.(2008)に基づき設定した範囲

■ : 大深度ボーリング調査結果による V_s - V_p 関係に基づき設定した範囲

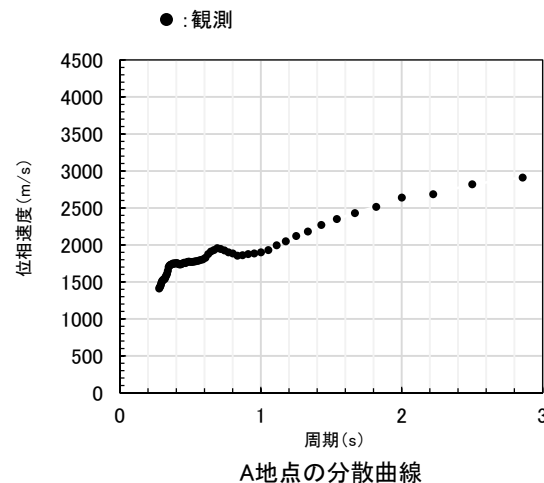
2. 地下構造モデルの設定

(8) 設定手順⑤ EL-1.19kmからEL-3kmのS波速度及びP波速度(1/2)

- 地下構造モデルのEL-1.19kmからEL-3kmのS波速度構造は、設定手順④までに設定したS波速度構造を拘束条件として微動アレー探査結果に基づき同定した。
- S波速度構造の同定は、敷地における微動アレー探査(A地点)により得られた分散曲線に整合する理論分散曲線を与える速度構造を探索することにより行った。
- 微動アレー探査地点、探査により得られた分散曲線及び探索範囲を下記に示す。



微動アレー探査地点(A地点)



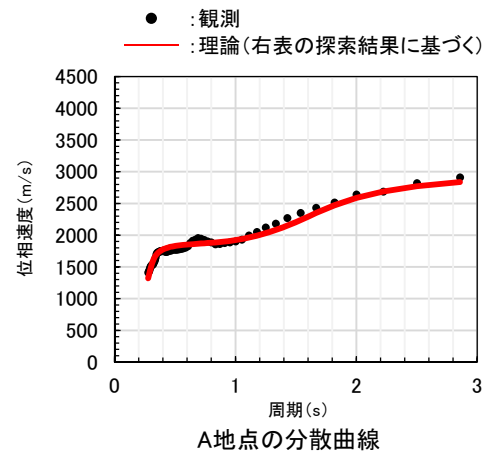
探索範囲

標高EL	No.	層厚(m)	S波速度 Vs (km/s)
-10m	1	98.9	1.50
-108.9m	2	91.1	1.96
-200m	3	790	2.14
-990m	4	200	1.56
-1190m	5		3.16
	6		
-3000m	7	∞	3.5

- : 浅層ボーリング調査結果(設定手順①)
- : 大深度ボーリング調査結果(設定手順②)
- : 文献(Iidaka et al.(2008))(設定手順④)
- : 探索範囲

(8) 設定手順⑤ EL-1.19kmからEL-3kmのS波速度及びP波速度 (2/2)

- EL-1.19kmからEL-3kmの探索結果を下图に示す。
- 地下構造モデルのEL-1.19kmからEL-3kmのS波速度構造 (No.5層及びNo.6層の境界 (EL-1.79km) 及びS波速度 (3.3km/s)) は、この探索結果に基づき設定した。
- また、設定したS波速度に対応するP波速度については、設定したS波速度 (3.3km/s) が大深度ボーリング調査 (D-8.6孔) におけるサスペンション法の V_s - V_p 関係のデータ (左下図中赤丸) の範囲内であることから、敷地の特性をより反映させるため、この V_s - V_p 関係のデータの直線近似 (左下図中青線) に基づき設定した。



探索結果

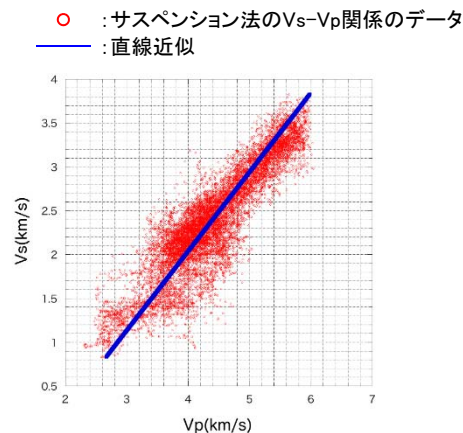
標高EL	No.	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)
-10m			
-108.9m	1	98.9	1.50
-200m	2	91.1	1.96
-990m	3	790	2.14
-1190m	4	200	1.56
-1790m	5	600	3.16
-3000m	6	1,210	3.3
	7	∞	3.5

探索範囲

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m						
-108.9m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-200m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-990m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-1190m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

探索範囲

大深度ボーリング調査結果による V_s - V_p 関係に基づき設定した範囲大深度ボーリング調査 (D-8.6孔) におけるサスペンション法の V_s - V_p 関係

(9) 設定手順⑥ EL-1.79km以深の密度及びEL-1.19km以深の減衰

- 地下構造モデルのEL-1.79km以深の密度及びEL-1.19km以深の減衰は文献に基づき設定した。
- 岩田・関口(2002)は、震源近傍で得られている強震記録と測地データをもとに、2000年鳥取県西部地震の詳細な断層破壊過程及びその震源モデルに基づく震源域強震動を推定し、推定された強震動分布には破壊伝播速度の空間変化等の破壊過程の複雑な要素が強く影響していること等を報告している。岩田・関口(2002)で用いられている地下構造モデル(左上表)は、京都大学防災研究所地震予知センター鳥取地震観測所が震源決定に用いている速度構造を参考とした1次元モデルであり、2000年鳥取県西部地震の震源過程解析及び震源域強震動シミュレーションに用いられており、シミュレーション波形は観測記録とよく対応することが確認されている。
- EL-1.79km以深の密度及びEL-1.19km以深の減衰は、設定した地下構造モデルの速度に概ね対応する岩田・関口(2002)で用いられている地下構造モデル(左上表)の速度の層の密度及び Q_s 値に基づき設定した。なお、EL-1.79km～EL-5.5kmの密度は、一般的に深部ほど密度が大きくなることを踏まえ、EL-1.19km～EL-1.79kmの密度 2.67t/m^3 を下回らないよう設定した。
- なお、岩田・関口(2002)で用いられている地下構造モデル(左上表)の減衰及び密度は、Horikawa(2008)に示される地下構造モデル(京都大学防災研究所による北陸地方の震源決定において採用されている深部の地下構造モデル、右下表)とも整合的である。

京都大学防災研究所地震予知センター鳥取地震観測所
が震源決定に用いている速度構造を参考とした1次元モデル

Top depth of the layer (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (g/cm ³)	Q_p	Q_s
0	5.5	3.18	2.6	400	200
2.	6.1	3.53	2.7	550	270
16.	6.7	3.87	2.8	800	400
38.	7.8	4.51	3.1	1000	500

※ 岩田・関口(2002)より抜粋

京都大学防災研究所による北陸地方の震源決定において
採用されている深部の地下構造モデル

H	V_p	V_s	ρ	Q_p	Q_s
$4 - H_s$	5.5	3.2	2.6	400	200
20	6.1	3.53	2.7	600	300
16	6.65	3.84	2.8	800	400
∞	8.0	4.62	3.2	1000	500

H : Thickness (km), V_p : P-wave velocity (km/s), V_s : S-wave velocity (km/s), ρ : Density (g/cm³), H_s : Net thickness of a sedimentary part (km).

※ Horikawa(2008)より抜粋

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□: 岩田・関口(2002)に基づき設定した範囲

※ 減衰定数 h は、 $h=1/2Q$ の関係式より算出した。

(10) 地下構造モデルの設定結果

➤ 以上により、敷地の地下構造モデルを下表の通り設定した。

設定した地下構造モデル

	標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
解放基盤表面 ▽	-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
	-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
	-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
地震基盤面 ▽	-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
	-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
	-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
	-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
	-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
	-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

 : 浅層ボーリング調査結果に基づき設定
 : 大深度ボーリング調査結果に基づき設定
 : 浅層ボーリング調査結果及び大深度ボーリング調査結果に対して安全側に設定
 : 微動アレー探索結果に基づき設定
 : 文献に基づき設定

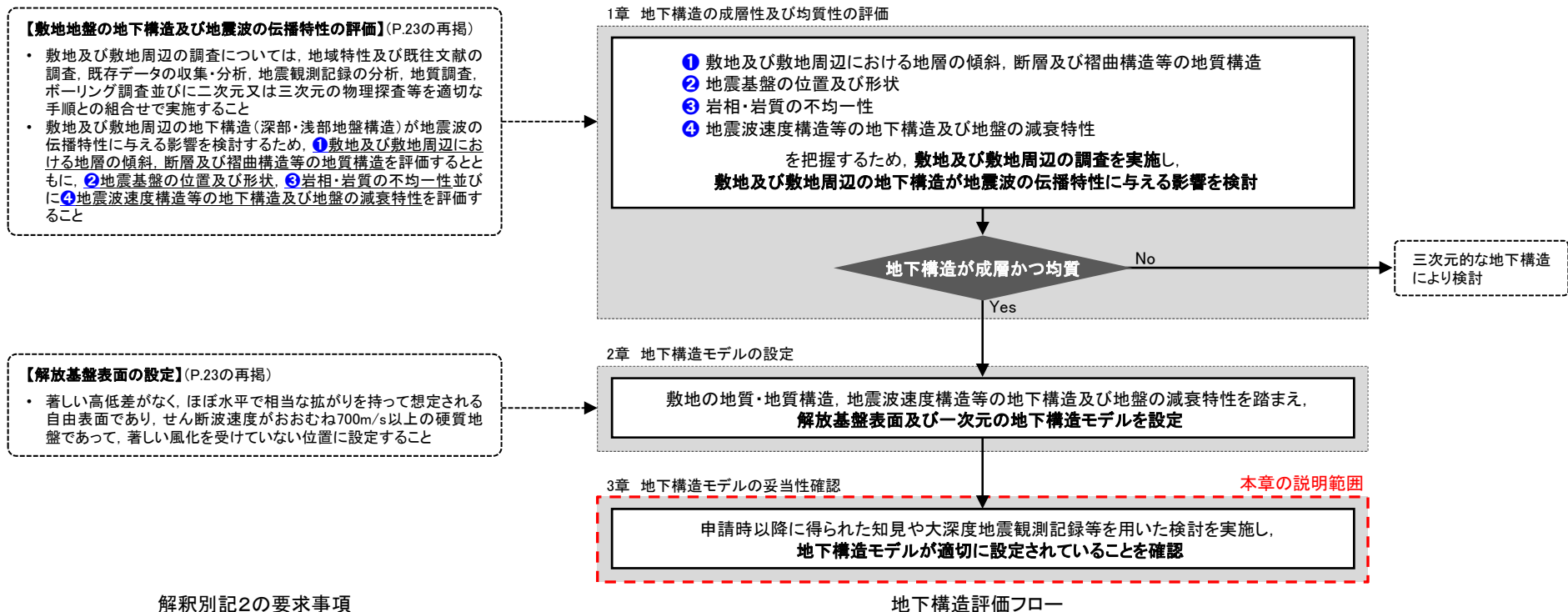
↑統計的グリーン関数法
 ↓理論的手法

※ 統計的グリーン関数法及び理論的手法に用いる範囲を表の右側に示す。

3. 地下構造モデルの妥当性確認

(1) 地下構造モデルの妥当性確認の方法

- 2章では、「敷地近傍地下構造調査(精査)」及び「広域地下構造調査(概査)」により把握した敷地の地質・地質構造、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を踏まえ、解放基盤表面及び一次元の地下構造モデルを設定した。
- 3章では、下図の地下構造評価フローに基づき、申請時以降に得られた知見や大深度地震観測記録等を用いた検討を実施し、地下構造モデルが適切に設定されていることを確認する。
- 地下構造モデルの妥当性確認の手法等の概要を次頁に示す。



(2) 地下構造モデルの妥当性確認の手法等の概要

○ 地下構造モデルの妥当性確認の手法等の概要を下図に示す。

3.1 地盤増幅特性の妥当性確認

設定した地下構造モデルの地震基盤面から解放基盤表面までの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、以下を実施する。

- 敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地震基盤面に対する解放基盤表面の地盤増幅率を比較する。(3.1.1項)
- 敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較する。(3.1.2項)

3.2 減衰構造の妥当性確認

設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の減衰構造はボーリング調査結果に対して安全側に設定している。ここでは、地下構造モデルの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、以下を実施する。

- 地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.1項)
- 敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.2項)
- 敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.3項)

3.3 速度構造の妥当性確認

設定した地下構造モデルのEL-3kmより浅部の速度構造は敷地における地盤調査(浅層ボーリング調査、大深度ボーリング調査及び微動アレー探査)の結果に基づき設定し、またEL-3km以深の速度構造は文献に基づき設定している。ここでは、地下構造モデルの速度構造が適切に設定されていることを確認するため、以下を実施する。

- 敷地における微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルに基づく位相速度を比較する。(3.3節(1))
- 敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルに基づく群速度を比較する。(3.3節(2))
- 申請時以降に得られた知見において評価された敷地位置における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較する。(3.3節(3))

設定した地下構造モデル

解放基盤表面 ▽	標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 η (%)	Q値
	-10m	99.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
	-109.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
	-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
地震基盤面 ▽	-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
	-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
	-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
	-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
	-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
	-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	-26km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□ : 3.1節で確認する範囲

□ : 3.2節で確認する範囲

□ : 3.3節で確認する範囲

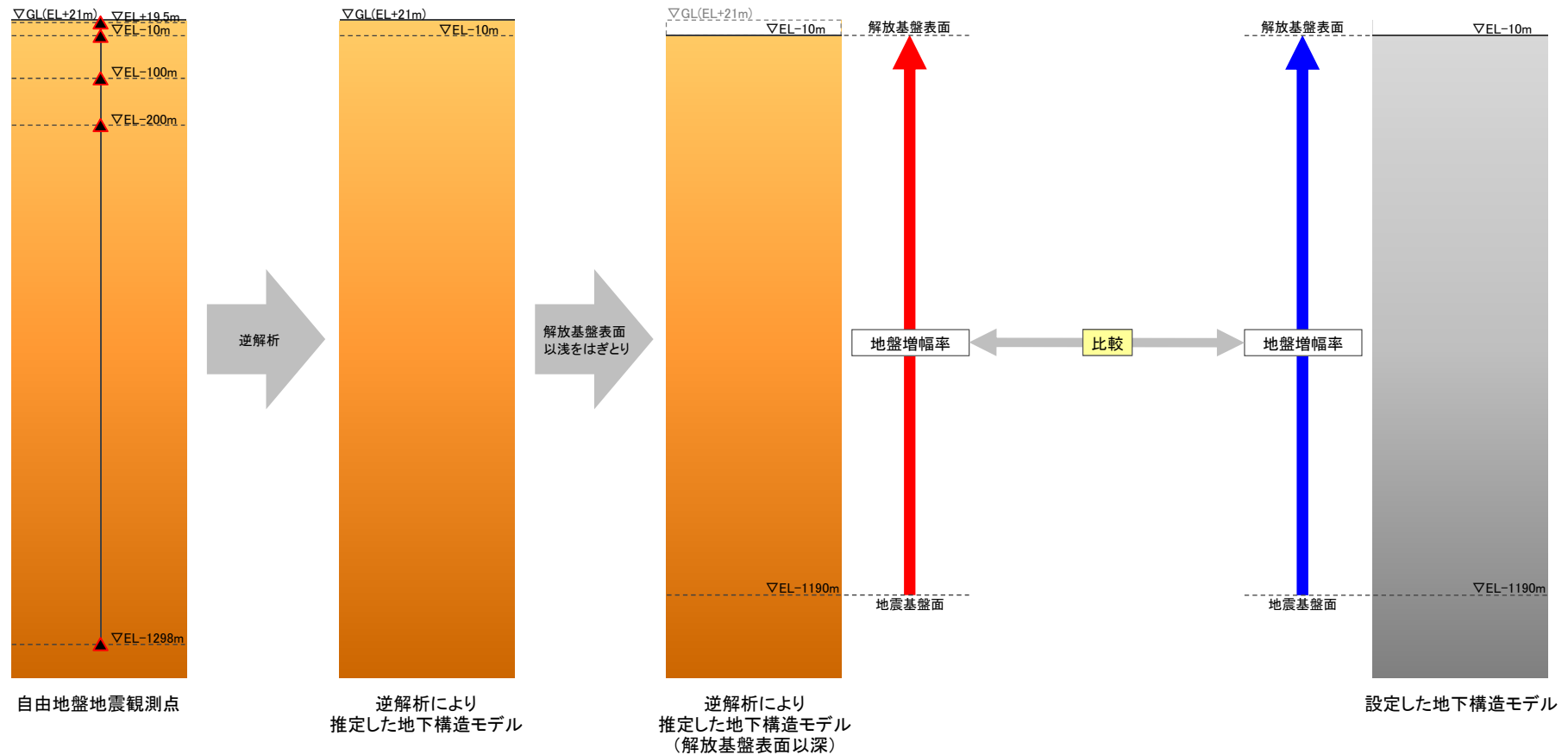
3.1 地盤増幅特性の妥当性確認

(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地盤増幅率を比較した。
- 逆解析は、自由地盤地震観測点における鉛直アレー地震観測点間の伝達関数を対象として、遺伝的アルゴリズムにより行った。

▲ : 地震観測点

△ : 検討に用いた地震観測点



検討の概要

(2) 初期モデル及び探索範囲

- 初期モデル及び探索範囲を下表に示す。
- 初期モデルのEL-200m以浅の層厚、密度及び速度(EL-4.9m以浅を除く)は自由地盤位置における速度構造及び密度構造(P.147参照)に基づき、またEL-200m以深の層厚、密度及び速度はD-8.6孔における大深度ボーリング調査結果(P.148参照)に基づき設定した。EL-4.9m以深の減衰定数の下限値($h_{\min}$)はQ値測定結果(P.149参照)に基づき設定した。

初期モデル及び探索範囲

▽ 地表	標高EL	No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	減衰定数 h(f)					
							水平			鉛直		
							h _{min}	h ₀	α	h _{min}	h ₀	α
	+21.0m	1	1.5	2.20	125~500	198~1580	0.0250 ~ 0.1000	0.01~1	0~2	0.0250 ~ 0.1000	0.01~1	0~2
	+19.5m▲	2	2.4									
	+17.1m	3	22									
▽ 解放基盤	-4.9m	4	22	1.97	300~1200	685~2740	0.0500	0.01~1	0~2	0.0500	0.01~2	0~2
	-10m▲	5	5.1									
	-100m▲	6	8.9									
▽ 地震基盤面	-108.9m	7	91.1	2.38	1500	3190	0.0182	0.01~1	0~2	0.0182	0.01~1	0~2
	-200m▲	8	790	2.34	1960	3960						
	-990m	9	200	2.41	2140	3260						
	-1190m	10	108	2.67	1560	3260						
	-1298m▲	11	∞									

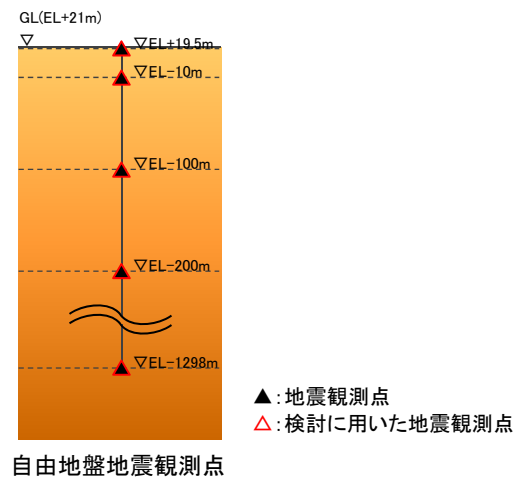
$$h(f)=h_0 \times f^{-\alpha} \text{ (ただし, } h_{\min} \leq h(f) \leq 1 \text{)}$$

■ : 探索範囲

▲ : 検討に用いた地震観測点

(3) 検討の対象とした地震

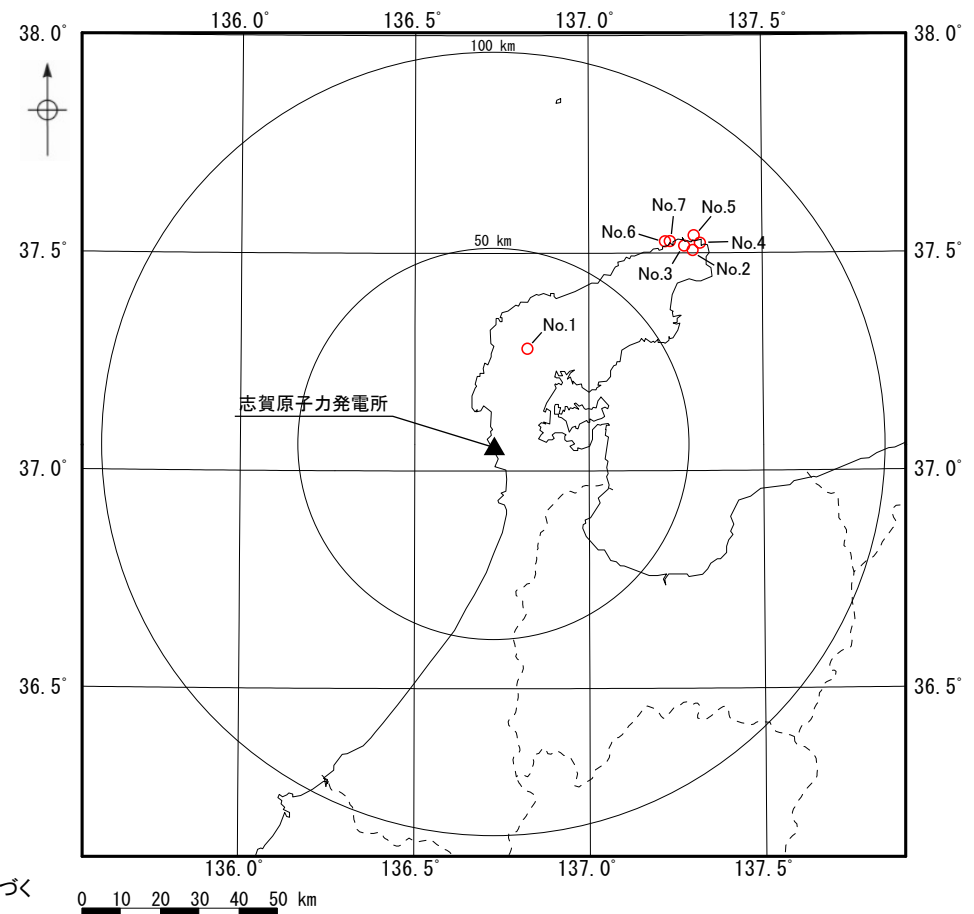
- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。
- 検討の対象は、2019年7月～2023年5月に自由地盤地震観測点における各観測点で同時に観測された地震のうち、敷地から100km以内において発生したM5以上の7地震とした。



検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
2	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
3	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
4	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
5	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
6	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
7	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(4) 逆解析結果(1/2)

- 逆解析により推定した地下構造モデルを下表に示す。
 ○ 観測記録に基づく伝達関数と逆解析により推定した地下構造モデルによる理論伝達関数を比較した結果を次頁に示す。

逆解析により推定した地下構造モデル

▽ 地表	標高EL	No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	減衰定数 h(f)					
							水平			鉛直		
							h _{min}	h ₀	α	h _{min}	h ₀	α
	+21.0m	1	1.5	2.20	267	297	0.0365	0.553	1.118	0.0537	0.507	0.644
	+19.5m▲	2	2.4									
	+17.1m	3	22									
▽ 解放基盤	-4.9m	4	22	1.97	980	1429	0.0500	0.464	1.177	0.0500	1.767	1.343
	-10m▲	5	5.1									
	-100m▲	6	90									
▽ 地震基盤面	-108.9m	7	91.1	2.38	1960	3960	0.0182	0.042	1.948	0.0182	0.108	1.225
	-200m▲	8	790	2.34	2140	3920						
	-990m	9	200	2.41	1560	3260	0.0106					
	-1190m	10	108	2.67	3160	5290						
	-1298m▲	11	∞									

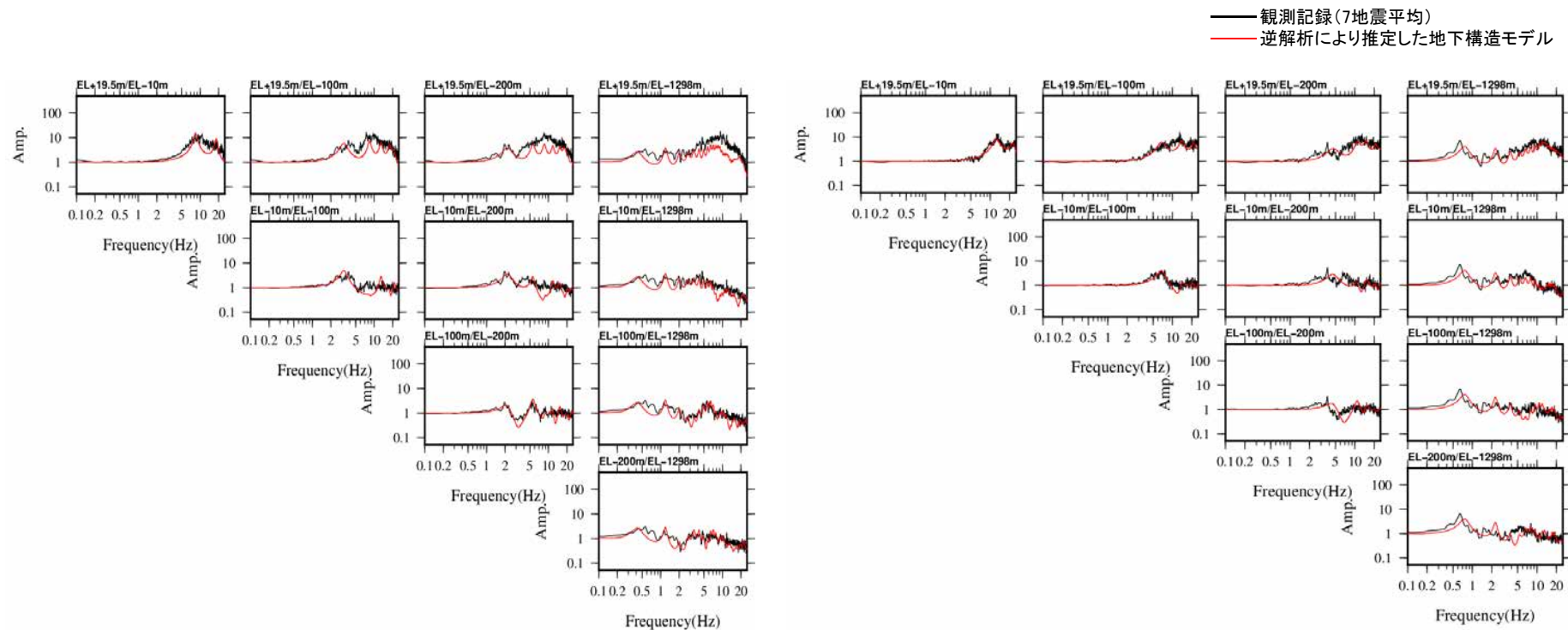
$$h(f)=h_0 \times f^{-\alpha} \text{ (ただし, } h_{min} \leq h(f) \leq 1 \text{)}$$

探索範囲

▲ : 検討に用いた地震観測点

(4) 逆解析結果 (2/2)

- 逆解析により推定した地下構造モデルによる理論伝達関数は観測記録に基づく伝達関数と整合的であることから、逆解析により推定した地下構造モデルは適切に求められているものと考えられる。(初期モデルにおいて設定した層厚、密度、並びにEL-4.9m以深の速度及び減衰定数の下限値($h_{\min}$)についても適切に設定されているものと考えられる。)



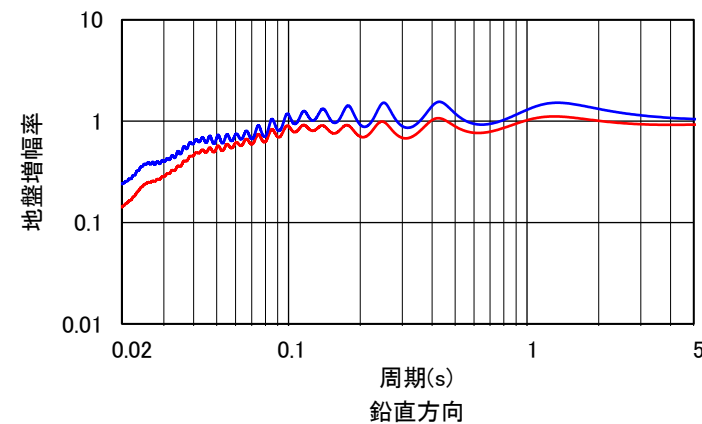
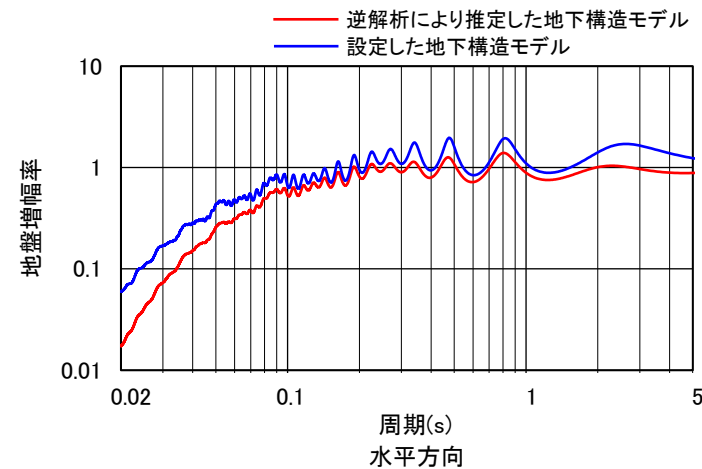
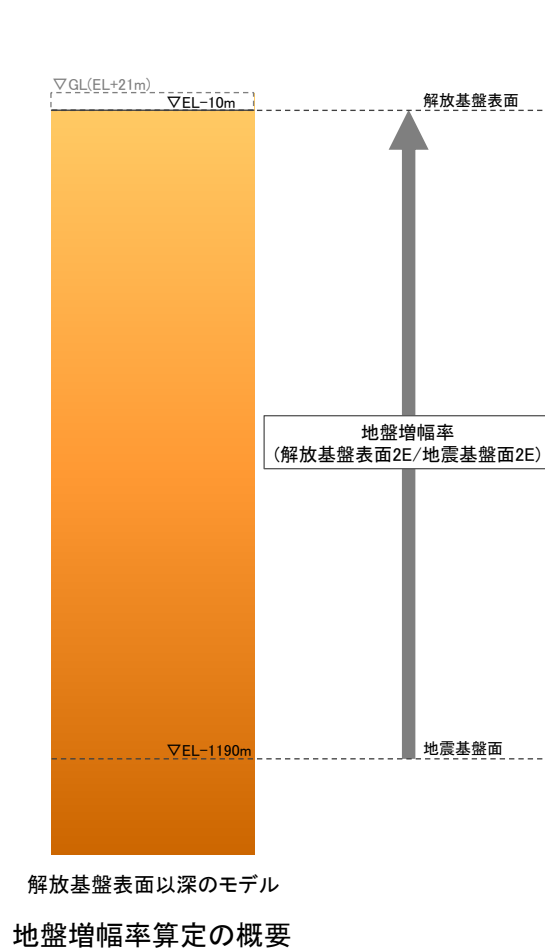
水平方向

鉛直方向

伝達関数

(5) 検討結果

- 逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地震基盤面に対する解放基盤表面の地盤増幅率を比較した結果を下図に示す。
- 設定した地下構造モデル(EL-1.19km以浅の減衰をボーリング調査結果による値に対して安全側に設定(詳細はP.149参照))の地盤増幅率は、逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率を上回る。

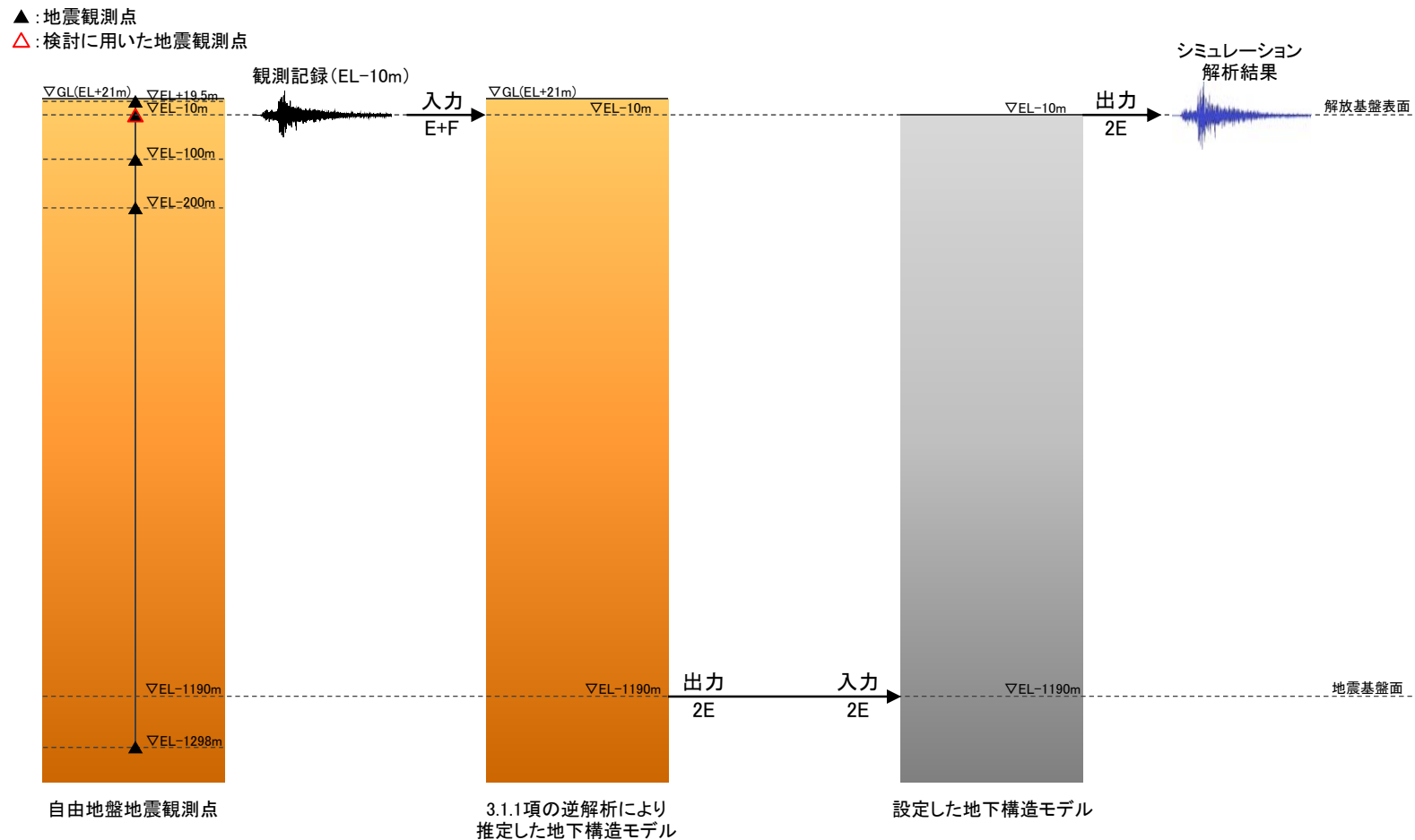


逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率と
設定した地下構造モデルの地盤増幅率の比較

- 設定した地下構造モデルの地盤増幅率は、逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率を上回ることから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

(1) 検討方法

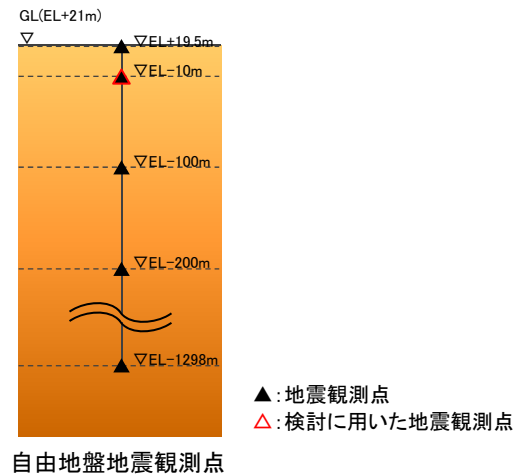
- 設定した地下構造モデルの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較した。
- 地震動シミュレーションは、EL-10mの観測記録を用いて、設定した地下構造モデルの解放基盤表面(EL-10m)における地震動を評価した。地震動シミュレーションの概要を下図に示す。また、解放基盤表面での地震動の比較を行うため、EL-10mの観測記録については、3.1.1項の逆解析により推定した地下構造モデルを用いて、EL-10mにおけるはぎとり波を評価した。



地震動シミュレーションの概要

(2) 検討の対象とした地震

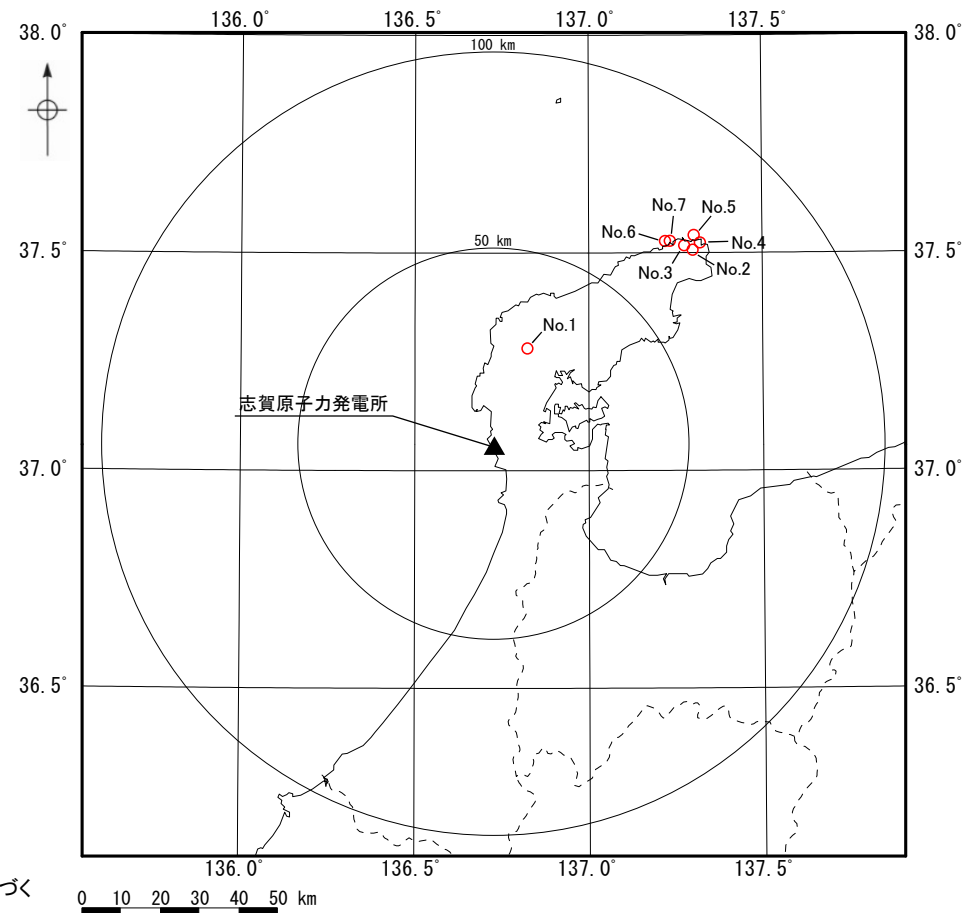
- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。
- 検討の対象は、2019年7月～2023年5月に自由地盤地震観測点におけるEL-10mで観測された地震のうち、敷地から100km以内において発生したM5以上の7地震とした。



検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
2	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
3	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
4	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
5	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
6	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
7	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

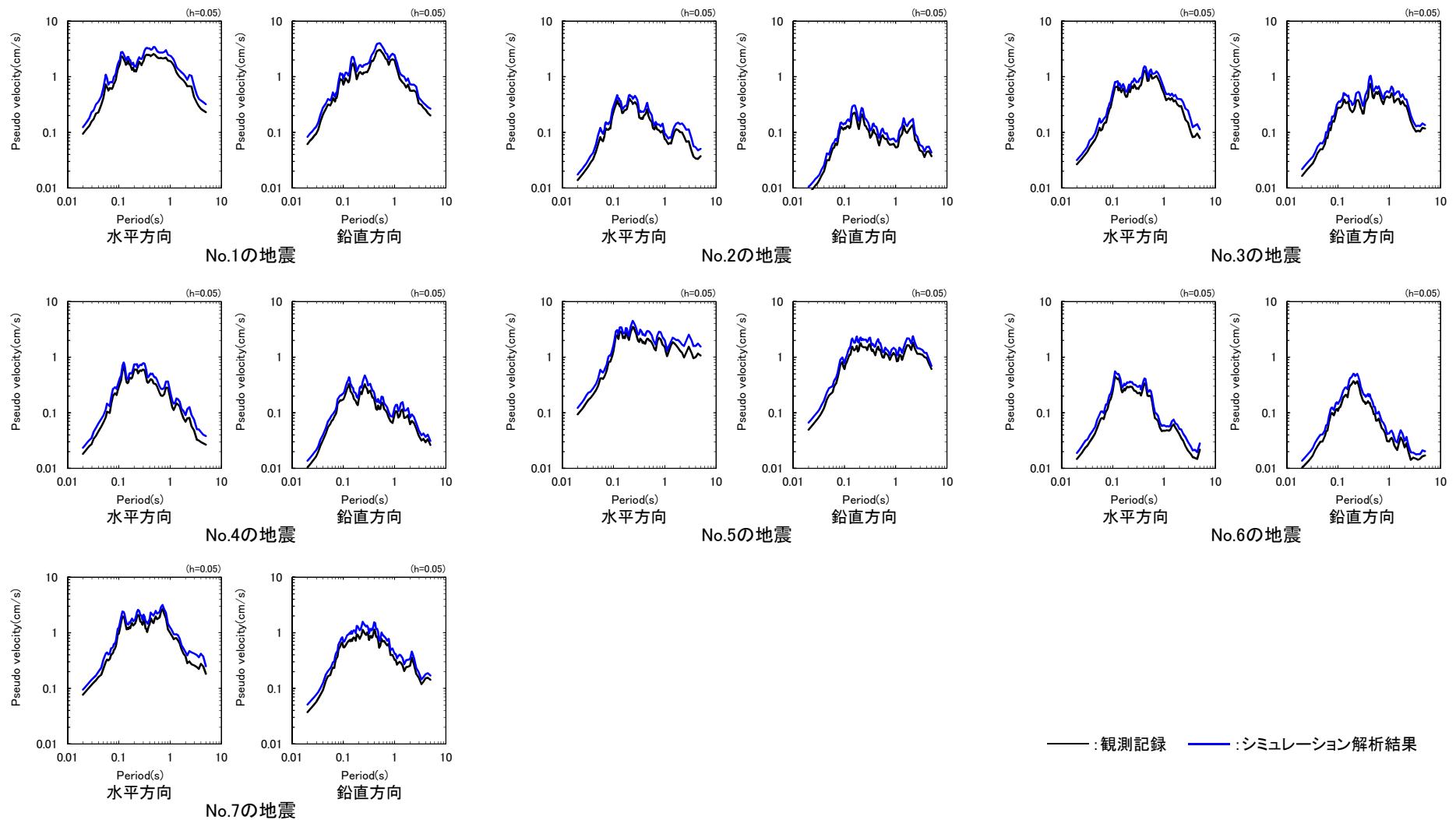
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果

- シミュレーション解析結果と観測記録を比較した結果を下図に示す。
○ いずれの地震についても、シミュレーション解析結果は観測記録を上回る。



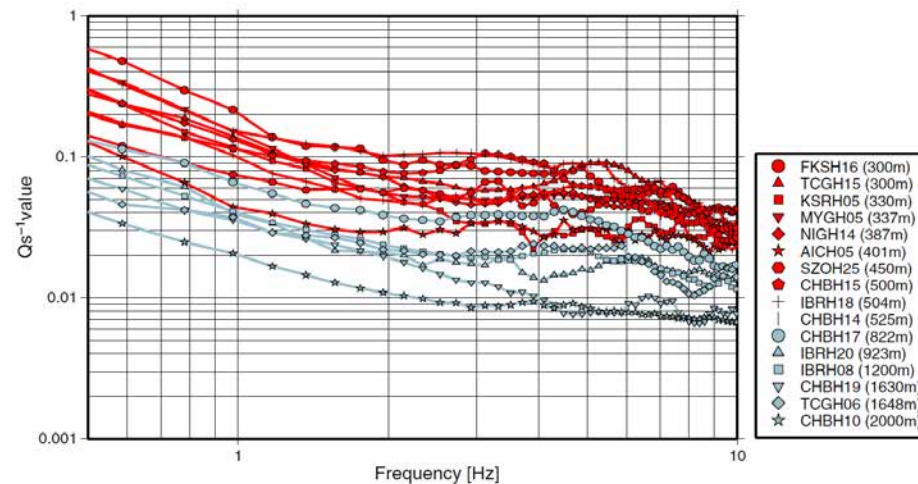
シミュレーション解析結果と観測記録の比較

➤ シミュレーション解析結果は観測記録を上回ることから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.2 減衰構造の妥当性確認

(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルのEL-10m～EL-200mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、Fukushima et al.(2016)に倣い、地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- Fukushima et al.(2016)は、地震波干渉法を用いて、鉛直アレー地震観測点における地表及び地中地震観測点間の減衰を推定する手法を提案しており、本手法をKiK-netの地震観測記録に適用することにより16観測点における Q_s^{-1} を推定し、推定された Q_s^{-1} は、周波数の増加とともに2～3Hz程度までは減少するが、それ以上の周波数ではほぼ一定になるとしている。

Fukushima et al.(2016)に示される推定された Q_s^{-1} 値

※ Fukushima et al.(2016)より抜粋

(2) 減衰の推定方法

○ 減衰の推定方法の概要を以下に示す。

1. 地表の地震観測記録に対して地中の地震観測記録をデコンボリューションすることにより入射波と反射波を分離する。デコンボリューション波形のフーリエスペクトル W_ε は下式により求める。

$$W_\varepsilon(\omega) = \frac{u_b(\omega) u_s^*(\omega)}{|u_s(\omega)|^2 + \varepsilon} \quad (1)$$

u_b : 地中記録のフーリエスペクトル
 u_s : 地表記録のフーリエスペクトル
 ε : 地表記録のパワースペクトル(平均)の1%
 ω : 角周波数
 *は共役複素数を示す。

2. 複数の地震観測記録について平均したデコンボリューション波形において分離された入射波に対する反射波の伝達関数 H を評価する。

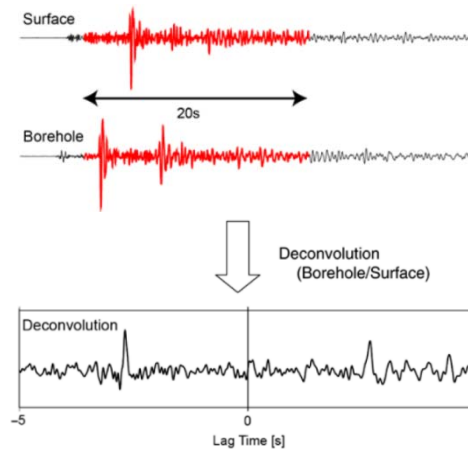
$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (2)$$

S_{xy} : 入射波と反射波のクロススペクトル
 S_{xx} : 入射波のパワースペクトル
 f : 周波数

3. 伝達関数から Q 値を推定する。

$$Q_s^{-1}(f) = -\frac{\ln[H(f)]}{\pi f \tau'} \quad (3)$$

τ' : 地震観測点間のS波往復走時



Fukushima et al.(2016)に示される地表と地中で得られた観測波形とデコンボリューション波形

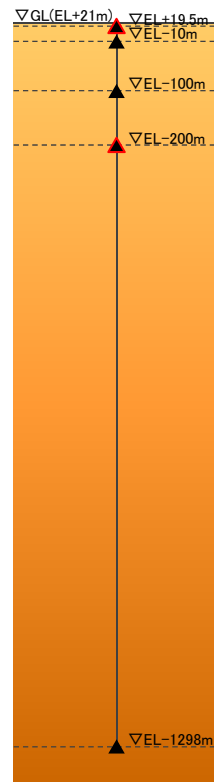
※ Fukushima et al.(2016)より抜粋

※ 推定した Q 値の有効周波数範囲は, Riga et al.(2019)を参考に検討した。

(3) 検討の対象とした地震 — 震央分布図 —

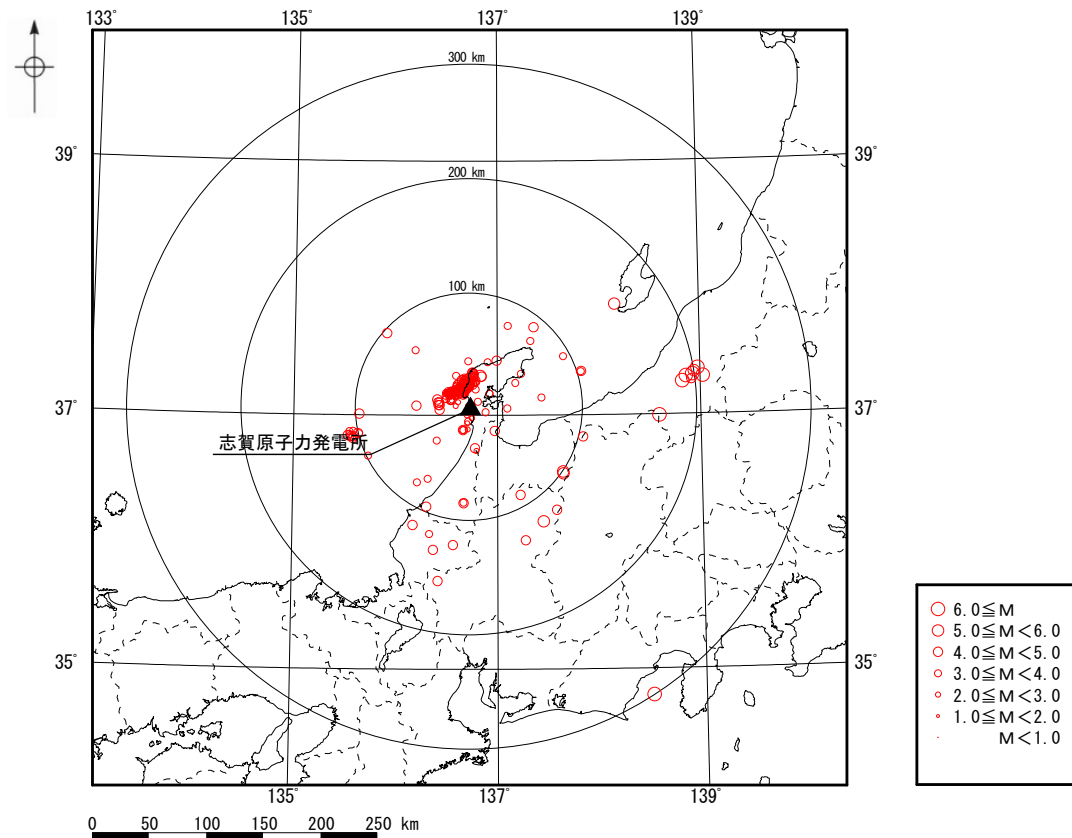
- 検討対象区間は、地震観測記録が多数得られている自由地盤地震観測点におけるEL+19.5m～EL-200mとした。
- 検討の対象とした地震の震央分布図を右下図に示す。検討の対象は、1999年9月～2018年9月に自由地盤地震観測点におけるEL+19.5mとEL-200mで同時に観測された地震のうち、EL+19.5mで最大加速度 1cm/s^2 程度以上が観測された地震を基本とし、表面波が卓越している地震等は除外した286地震とした。

▲: 地震観測点
△: 検討に用いた地震観測点



自由地盤地震観測点

検討に用いた地震観測点



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討の対象とした地震 ー地震の諸元ー (1/3)

○ 検討の対象とした地震のうち、検討に用いた地震の諸元を以下に示す※。

検討に用いた地震の諸元 * (1/3)

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」に基づく

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
1	2000/04/07	00:40	37.5058	136.2000	28.49	3.8
2	2000/04/11	18:47	37.4198	136.7212	17.76	3.7
3	2000/06/07	06:27	36.8262	135.5745	16.20	4.0
4	2000/06/07	06:36	36.8418	135.5535	11.19	3.7
5	2000/06/12	04:57	36.8630	135.5523	19.10	3.8
6	2000/06/13	06:44	36.8105	135.5895	19.69	4.3
7	2000/06/17	20:17	36.8158	135.5615	20.56	3.7
8	2000/06/22	20:36	36.8328	135.5383	17.66	4.6
9	2000/07/06	01:58	36.8667	135.5898	19.27	3.8
10	2001/01/22	09:43	37.1975	136.7928	17.69	3.7
11	2001/04/14	20:09	37.0477	137.1045	19.25	3.8
12	2001/06/13	02:51	36.8233	135.5972	20.43	4.5
13	2002/05/24	16:43	37.4560	137.6562	21.16	3.4
14	2002/08/18	09:01	36.1288	136.1772	11.46	4.7
15	2002/09/08	00:11	35.9712	136.5718	9.70	4.2
16	2002/11/15	07:29	36.3055	136.6753	7.64	3.6
17	2002/11/17	13:47	36.3020	136.6735	7.66	4.7
18	2003/02/11	18:34	36.0577	136.3402	5.64	3.9
19	2003/02/22	12:34	36.4932	136.3228	17.04	3.6
20	2003/05/14	23:13	37.2473	137.1840	12.80	3.1
21	2003/06/05	23:14	36.2742	136.3100	12.45	4.1
22	2003/08/10	17:31	36.6718	135.7408	20.89	3.8
23	2003/08/18	14:53	37.3383	137.8337	21.44	4.1
24	2003/08/18	15:10	37.3367	137.8295	20.57	3.9
25	2003/10/05	00:29	36.0073	137.2803	12.56	4.5
26	2003/10/12	15:19	36.8495	135.6380	23.72	4.7
27	2003/10/13	21:46	36.8478	135.6503	26.40	3.3
28	2004/01/26	05:16	37.2762	136.6845	9.65	3.1
29	2004/06/07	13:21	36.9698	136.7570	8.28	2.9
30	2004/09/21	08:43	37.6968	137.1100	13.82	3.6
31	2004/09/25	20:42	36.8822	136.7152	7.48	2.4
32	2004/10/05	08:33	35.9333	136.3782	12.38	4.8
33	2004/10/05	23:49	37.6390	135.9165	0.00	4.5
34	2004/10/23	17:56	37.2925	138.8672	13.08	6.8
35	2004/10/23	18:03	37.3540	138.9833	9.38	6.3
36	2004/10/23	18:11	37.2530	138.8295	11.52	6.0
37	2004/10/23	18:34	37.3063	138.9300	14.17	6.5
38	2004/10/25	06:04	37.3300	138.9468	15.20	5.8
39	2004/10/27	10:40	37.2918	139.0333	11.60	6.1
40	2004/11/06	01:27	36.7138	136.8002	13.28	2.4
41	2005/03/24	20:07	36.3667	137.2303	11.02	4.1
42	2005/03/27	05:20	37.6862	137.3667	14.99	4.1
43	2005/03/31	03:18	37.4113	136.9128	11.31	3.9
44	2006/02/16	23:10	35.6885	136.4227	13.67	4.4
45	2006/03/26	09:44	37.0180	136.8908	12.85	3.9
46	2006/05/04	10:17	37.1325	137.4412	16.30	3.9
47	2006/08/05	02:07	37.3192	137.2397	6.83	3.7
48	2006/10/03	22:42	37.0022	135.6502	30.99	4.6
49	2007/01/08	18:59	37.2668	138.9198	13.34	4.8
50	2007/02/18	09:48	36.7942	136.4107	14.38	3.4

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
51	2007/03/25	10:36	37.1972	136.6995	11.20	4.1
52	2007/03/25	10:43	37.2058	136.7212	10.53	3.0
53	2007/03/25	10:49	37.2007	136.6878	11.61	3.4
54	2007/03/25	11:02	37.2472	136.6788	6.58	3.2
55	2007/03/25	11:19	37.2670	136.7007	6.84	4.2
56	2007/03/25	11:25	37.1993	136.7040	12.02	3.3
57	2007/03/25	11:43	37.2165	136.6927	8.55	3.6
58	2007/03/25	11:51	37.2267	136.7350	11.19	3.5
59	2007/03/25	11:53	37.2383	136.6932	8.89	3.1
60	2007/03/25	11:58	37.2335	136.6178	2.78	4.2
61	2007/03/25	12:40	37.2903	136.7323	8.75	4.0
62	2007/03/25	12:55	37.1840	136.6227	8.70	2.8
63	2007/03/25	13:02	37.2082	136.7180	12.48	3.9
64	2007/03/25	13:23	37.2125	136.6260	5.70	3.4
65	2007/03/25	13:27	37.2282	136.6397	2.84	3.2
66	2007/03/25	13:28	37.1927	136.6203	6.53	3.2
67	2007/03/25	13:31	37.1697	136.5370	2.06	3.1
68	2007/03/25	13:54	37.2200	136.7163	10.82	3.4
69	2007/03/25	13:56	37.2143	136.6877	10.17	3.5
70	2007/03/25	14:03	37.1407	136.6062	8.24	2.3
71	2007/03/25	14:08	37.2065	136.7062	12.50	3.5
72	2007/03/25	14:16	37.2825	136.7627	8.37	3.7
73	2007/03/25	14:18	37.1938	136.6810	9.47	2.6
74	2007/03/25	14:41	37.2303	136.7263	10.09	3.5
75	2007/03/25	14:50	37.2177	136.6473	6.93	2.5
76	2007/03/25	15:13	37.2218	136.7192	9.63	3.2
77	2007/03/25	15:23	37.2142	136.6935	10.42	3.0
78	2007/03/25	15:25	37.1572	136.6850	11.06	3.8
79	2007/03/25	15:26	37.2065	136.6077	4.18	3.7
80	2007/03/25	15:43	37.2940	136.7718	8.90	4.5
81	2007/03/25	15:48	37.2915	136.7790	8.31	3.4
82	2007/03/25	15:57	37.2288	136.7337	11.42	3.8
83	2007/03/25	16:05	37.2145	136.7022	10.88	3.0
84	2007/03/25	16:19	37.2023	136.6110	2.88	2.7
85	2007/03/25	16:29	37.2212	136.6677	6.94	3.1
86	2007/03/25	16:39	37.1587	136.6385	10.33	3.2
87	2007/03/25	16:53	37.2203	136.6657	7.72	3.7
88	2007/03/25	17:08	37.1823	136.6767	10.31	3.4
89	2007/03/25	17:17	37.2353	136.6810	8.18	3.0
90	2007/03/25	17:54	37.2437	136.7302	9.91	3.8
91	2007/03/25	18:11	37.3043	136.8395	13.45	5.3
92	2007/03/25	18:23	37.2982	136.8520	11.91	4.2
93	2007/03/25	18:41	37.2270	136.6088	1.23	3.6
94	2007/03/25	19:02	37.1868	136.6477	10.69	3.5
95	2007/03/25	19:07	37.2012	136.6545	9.46	3.1
96	2007/03/25	19:11	37.1478	136.6377	6.88	2.3
97	2007/03/25	19:16	37.2095	136.6850	9.94	2.7
98	2007/03/25	19:53	37.1722	136.5560	7.13	3.0
99	2007/03/25	21:02	37.2350	136.6530	4.80	3.4
100	2007/03/25	21:26	37.2265	136.6990	9.68	3.4

※ 表に示す地震のうち、各地震のデコンボリューション波形が全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が低い地震(灰色箇所)は、解析の安定性を向上させるため解析の対象から除外した。

(3) 検討の対象とした地震 ー地震の諸元ー (2/3)

検討に用いた地震の諸元 * (2/3)

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」に基づく

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
101	2007/03/25	22:28	37.2453	136.7673	10.42	3.5
102	2007/03/25	22:49	37.2753	136.6982	7.51	3.8
103	2007/03/25	22:55	37.2257	136.7228	10.10	2.9
104	2007/03/25	23:49	37.2383	136.7405	10.74	3.3
105	2007/03/25	23:58	37.2273	136.7268	9.81	2.8
106	2007/03/26	00:21	37.2185	136.6508	5.58	3.6
107	2007/03/26	00:55	37.1587	136.5948	6.23	2.8
108	2007/03/26	00:58	37.2410	136.6678	5.71	2.5
109	2007/03/26	01:10	37.1723	136.6195	8.58	2.3
110	2007/03/26	01:35	37.1777	136.6550	9.97	2.6
111	2007/03/26	02:14	37.1578	136.6695	11.96	4.2
112	2007/03/26	02:25	37.1838	136.5938	6.95	3.7
113	2007/03/26	02:34	37.2102	136.7128	11.98	3.5
114	2007/03/26	03:02	37.2285	136.6845	7.98	2.6
115	2007/03/26	03:21	37.2345	136.7445	11.13	3.6
116	2007/03/26	03:32	37.2723	136.7765	11.66	3.2
117	2007/03/26	04:01	37.1457	136.5717	8.82	2.7
118	2007/03/26	04:09	37.1783	136.5787	8.16	3.0
119	2007/03/26	04:36	37.2178	136.6312	5.82	3.1
120	2007/03/26	06:00	37.2305	136.7317	10.07	2.6
121	2007/03/26	06:46	37.2975	136.7705	10.08	3.4
122	2007/03/26	07:11	37.2347	136.7413	11.27	3.3
123	2007/03/26	07:22	37.1693	136.5117	7.29	3.6
124	2007/03/26	07:49	37.1637	136.5193	5.11	3.5
125	2007/03/26	07:56	37.1672	136.5302	6.60	2.8
126	2007/03/26	08:39	37.1508	136.5330	7.28	3.2
127	2007/03/26	09:48	37.1682	136.5635	0.00	3.2
128	2007/03/26	09:52	37.2363	136.7088	8.89	3.3
129	2007/03/26	09:55	37.2313	136.6435	0.48	3.3
130	2007/03/26	11:27	37.1798	136.5400	6.64	3.1
131	2007/03/26	11:31	37.2122	136.6860	9.75	2.4
132	2007/03/26	11:58	37.2183	136.7320	13.58	3.6
133	2007/03/26	12:05	37.2410	136.6783	6.79	3.6
134	2007/03/26	12:47	37.1605	136.6862	10.25	2.6
135	2007/03/26	13:05	37.1992	136.6440	8.87	2.9
136	2007/03/26	13:47	37.2703	136.6570	4.30	4.4
137	2007/03/26	14:42	37.1712	136.5305	2.51	3.5
138	2007/03/26	15:25	37.2552	136.7163	9.24	3.4
139	2007/03/26	15:50	37.1208	136.5005	3.41	3.3
140	2007/03/26	16:41	37.2353	136.6785	8.12	3.5
141	2007/03/26	17:58	37.2325	136.7342	10.17	3.1
142	2007/03/26	18:02	37.2762	136.7007	5.91	4.6
143	2007/03/26	18:26	37.1935	136.6602	10.03	3.6
144	2007/03/26	18:35	37.1630	136.5608	8.44	3.6
145	2007/03/26	18:37	37.1607	136.5617	8.41	3.0
146	2007/03/26	19:26	37.2042	136.6857	9.71	2.8
147	2007/03/26	20:13	37.2383	136.7275	10.32	3.2
148	2007/03/26	21:04	37.1993	136.6122	6.89	3.6
149	2007/03/26	21:30	37.1863	136.6473	9.55	3.9
150	2007/03/26	21:42	37.2618	136.7047	6.96	3.9

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
151	2007/03/26	22:11	37.1868	136.5630	1.65	3.0
152	2007/03/26	22:36	37.2547	136.7982	12.15	3.3
153	2007/03/26	23:05	37.1600	136.5217	9.19	3.2
154	2007/03/26	23:55	37.2388	136.6703	8.28	3.4
155	2007/03/27	01:59	37.2947	136.7658	9.03	3.9
156	2007/03/27	02:51	37.1833	136.6605	11.10	2.5
157	2007/03/27	03:09	37.1737	136.6550	11.01	2.3
158	2007/03/27	06:48	37.1802	136.5483	5.44	3.6
159	2007/03/27	07:16	37.1143	136.5472	6.82	4.1
160	2007/03/27	07:35	37.1095	136.5505	4.34	3.1
161	2007/03/27	07:58	37.1105	136.5578	0.00	2.8
162	2007/03/27	08:32	37.2013	136.7315	10.96	2.9
163	2007/03/27	09:38	37.2158	136.6868	9.03	3.1
164	2007/03/27	09:42	37.2607	136.6877	6.24	3.5
165	2007/03/27	11:27	37.2017	136.6677	11.69	2.8
166	2007/03/27	11:33	37.2267	136.6793	7.43	3.8
167	2007/03/27	12:28	37.2430	136.7492	10.63	3.8
168	2007/03/27	16:40	37.1768	136.6485	10.15	2.4
169	2007/03/27	20:11	37.2183	136.6840	10.12	3.3
170	2007/03/27	22:12	37.0967	136.6192	0.00	2.7
171	2007/03/27	23:04	37.1767	136.6183	8.11	3.5
172	2007/03/28	00:57	37.2510	136.7215	9.89	4.0
173	2007/03/28	08:08	37.2223	136.7088	13.29	4.9
174	2007/03/28	10:16	37.1887	136.6582	9.33	2.6
175	2007/03/28	11:34	37.1738	136.6177	8.82	2.5
176	2007/03/28	13:05	37.2820	136.6832	6.79	4.7
177	2007/03/28	14:36	37.2760	136.6782	6.97	3.5
178	2007/03/28	19:34	37.2303	136.7328	10.02	2.5
179	2007/03/28	21:14	37.2340	136.6855	8.59	2.9
180	2007/03/28	21:16	37.1903	136.5823	6.10	3.8
181	2007/03/28	22:11	37.1912	136.7118	11.55	2.9
182	2007/03/28	23:54	37.2477	136.6823	7.06	3.2
183	2007/03/29	00:15	37.2507	136.7848	11.51	3.3
184	2007/03/29	03:17	37.1610	136.6705	10.55	3.2
185	2007/03/29	03:39	37.2243	136.7048	9.75	2.8
186	2007/03/29	04:32	37.2457	136.7000	7.96	3.4
187	2007/03/29	09:06	37.1838	136.6515	9.57	2.3
188	2007/03/29	09:34	37.1868	136.5962	2.68	2.3
189	2007/03/29	10:46	37.2297	136.6888	8.31	3.8
190	2007/03/29	15:34	37.1782	136.6275	10.83	3.5
191	2007/03/29	19:27	37.1903	136.6463	10.83	2.7
192	2007/03/30	02:05	37.2265	136.7278	11.39	3.5
193	2007/03/30	02:48	37.2018	136.6653	9.71	2.7
194	2007/03/30	04:58	37.1112	136.5505	0.67	3.2
195	2007/03/30	14:04	37.3042	136.5998	8.31	3.7
196	2007/03/30	15:57	37.2447	136.7453	9.83	3.1
197	2007/03/31	08:09	37.2347	136.7598	13.47	4.4
198	2007/03/31	10:27	37.2195	136.6482	6.17	3.2
199	2007/03/31	13:17	37.1920	136.6612	9.98	2.7
200	2007/03/31	15:34	37.2397	136.6897	6.35	3.3

※ 表に示す地震のうち、各地震のデコンボリューション波形が全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が低い地震(灰色箇所)は、解析の安定性を向上させるため解析の対象から除外した。

(3) 検討の対象とした地震 ー地震の諸元ー (3/3)

検討に用いた地震の諸元 * (3/3)

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」に基づく

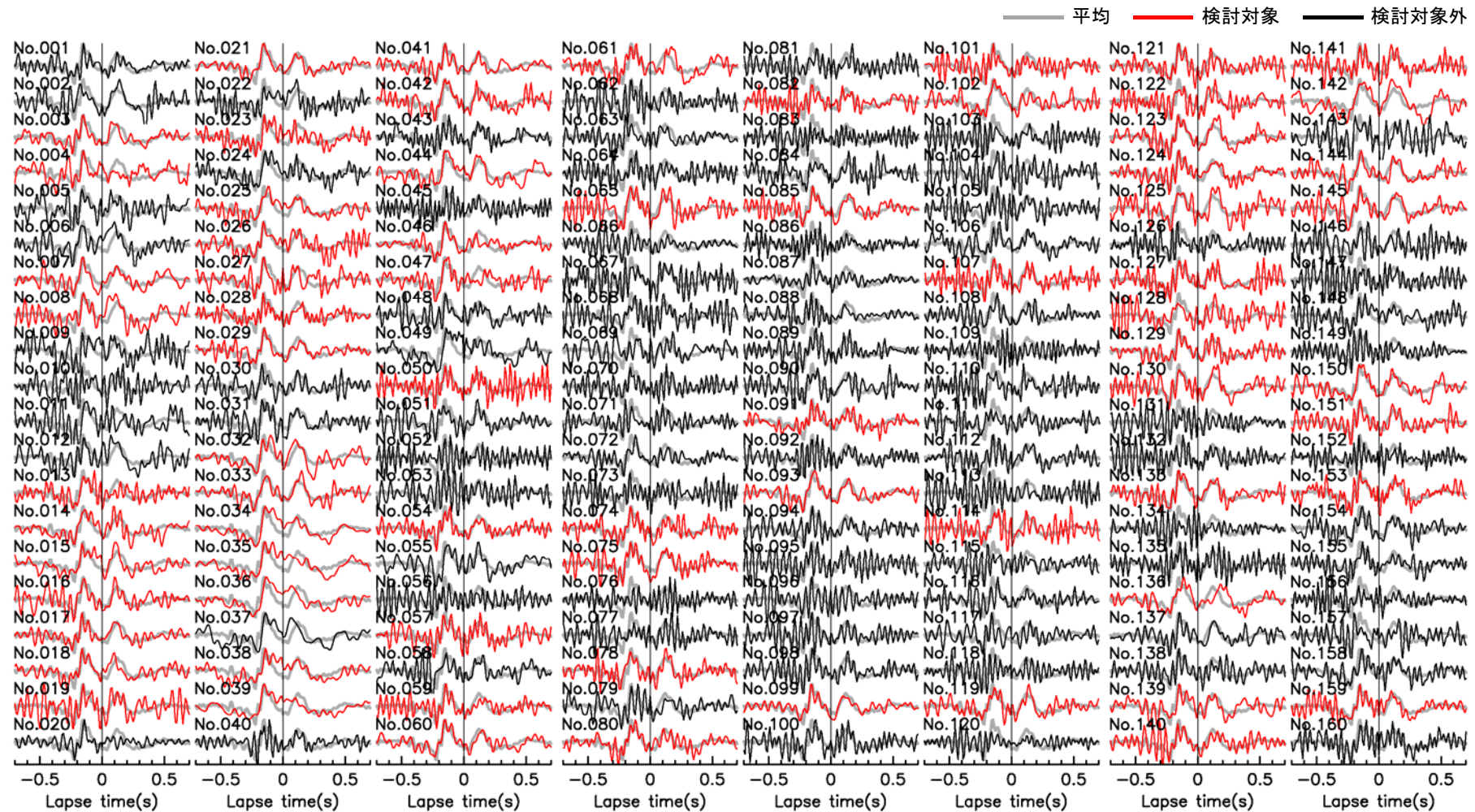
No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
201	2007/03/31	20:32	37.1905	136.5962	5.73	2.6
202	2007/03/31	22:37	37.1628	136.6873	10.19	2.3
203	2007/03/31	23:58	37.1440	136.5983	8.68	2.8
204	2007/04/01	00:03	37.1548	136.5867	7.65	2.2
205	2007/04/01	01:44	37.2382	136.6980	9.26	3.0
206	2007/04/01	10:25	37.2203	136.6010	3.20	3.4
207	2007/04/01	14:54	37.2367	136.7335	10.25	2.9
208	2007/04/02	02:51	37.2105	136.6898	12.41	4.2
209	2007/04/02	08:01	37.2073	136.6468	6.99	4.1
210	2007/04/02	14:33	37.2438	136.7423	10.30	3.0
211	2007/04/02	17:25	37.2203	136.6478	5.05	3.2
212	2007/04/02	21:28	37.2063	136.6407	8.10	2.9
213	2007/04/05	15:14	37.0735	136.4387	8.33	4.3
214	2007/04/06	15:18	37.2673	136.7902	11.68	4.3
215	2007/04/06	21:42	37.0955	136.4252	6.82	4.7
216	2007/04/06	23:55	37.0922	136.4342	6.72	4.3
217	2007/04/10	00:55	37.1673	136.5450	7.47	3.2
218	2007/04/10	21:19	37.1478	136.5823	9.20	2.9
219	2007/04/11	22:11	37.0742	136.4268	8.20	4.3
220	2007/04/12	16:24	37.2248	136.7413	10.01	3.0
221	2007/04/13	01:06	37.2300	136.6870	8.17	3.3
222	2007/04/13	09:02	37.1687	136.5165	0.00	3.7
223	2007/04/14	10:25	37.1790	136.6102	9.82	2.9
224	2007/04/14	18:19	37.1587	136.6808	11.24	3.0
225	2007/04/16	15:29	37.1802	136.5553	0.47	4.0
226	2007/04/26	11:30	37.2342	136.7443	10.90	3.9
227	2007/05/02	20:44	37.3307	136.7628	6.59	4.7
228	2007/05/04	14:08	37.1908	136.6578	10.28	3.1
229	2007/05/05	18:22	37.1608	136.6712	11.28	2.9
230	2007/05/07	02:13	37.2748	136.7637	8.95	3.4
231	2007/05/12	13:42	37.1683	136.5023	5.78	3.8
232	2007/05/13	03:01	37.1762	136.6095	10.18	2.9
233	2007/06/08	03:17	37.2245	136.6762	7.75	3.4
234	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6
235	2007/06/22	16:47	36.8777	136.6648	6.33	3.0
236	2007/06/26	20:04	36.8768	136.6748	7.84	3.4
237	2007/07/09	16:00	37.3243	136.7580	10.04	4.2
238	2007/07/17	10:58	37.1837	136.5212	0.00	3.5
239	2007/07/20	08:58	37.0372	136.4387	9.29	4.1
240	2007/07/28	06:30	37.1578	136.5498	8.19	3.3
241	2007/08/02	16:03	37.1735	136.6245	10.55	3.1
242	2007/08/16	18:52	37.0703	136.7162	2.50	0.7
243	2007/09/20	20:05	37.1485	136.4970	8.94	3.9
244	2007/12/18	02:53	37.2365	136.7477	9.22	3.9
245	2008/01/22	16:20	37.3202	136.7693	11.70	4.0
246	2008/01/22	16:22	37.3178	136.7792	11.05	3.6
247	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8
248	2008/02/05	12:52	37.1827	136.6557	10.60	2.8
249	2008/03/17	07:00	37.0693	136.2100	7.06	4.5
250	2008/03/20	00:05	37.1612	136.5595	9.94	3.3

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
251	2008/04/16	18:46	37.1178	136.4163	8.24	4.1
252	2008/04/29	06:58	37.2325	136.7308	10.91	3.8
253	2008/05/02	05:46	37.2347	136.6207	3.78	4.0
254	2008/06/28	11:36	37.1858	136.6510	10.65	3.0
255	2008/07/15	10:44	37.1452	136.5930	9.82	3.1
256	2008/07/15	14:41	37.1470	136.5913	10.35	3.9
257	2008/07/27	10:53	37.0998	136.8142	2.08	3.2
258	2009/05/23	05:15	37.1438	136.5355	10.91	3.9
259	2009/08/11	05:07	34.7862	138.4993	23.32	6.5
260	2010/10/31	06:58	36.9732	136.7580	9.21	2.3
261	2011/02/27	05:38	36.1563	137.4547	4.34	5.5
262	2011/03/12	03:59	36.9860	138.5978	8.38	6.7
263	2011/03/21	13:15	36.2480	137.5852	3.31	4.8
264	2011/10/05	18:59	36.5328	137.6502	0.68	5.4
265	2011/10/05	19:06	36.5488	137.6473	0.00	5.2
266	2011/12/08	01:12	37.5777	137.3338	9.82	3.9
267	2012/02/08	21:01	37.8653	138.1708	13.62	5.7
268	2012/05/28	15:31	37.4238	137.0007	12.85	4.0
269	2012/11/16	15:57	37.1613	136.5583	9.50	3.6
270	2013/04/04	01:58	36.7340	136.7850	12.93	4.2
271	2013/09/07	12:56	37.1630	136.6748	9.92	2.8
272	2013/10/14	05:28	36.9935	136.7050	8.87	2.3
273	2014/09/27	00:35	37.2377	136.6780	8.30	4.1
274	2014/11/16	17:37	37.2093	136.7325	10.10	3.1
275	2015/01/12	18:09	37.0672	136.5980	10.36	2.8
276	2015/04/21	05:15	36.9450	136.7195	7.58	3.1
277	2015/05/28	10:41	37.0725	136.7092	5.87	1.2
278	2016/07/01	08:04	36.8227	137.8457	0.00	4.6
279	2016/08/20	08:14	37.2592	136.6910	8.17	3.9
280	2017/04/01	19:43	37.3132	136.7688	5.11	3.6
281	2017/11/09	11:38	37.1642	136.9295	15.85	3.5
282	2017/11/09	12:23	37.1645	136.9287	15.72	3.7
283	2017/12/31	02:56	37.0820	136.7733	9.10	1.9
284	2018/01/05	11:02	36.8712	136.9803	13.65	4.0
285	2018/03/06	01:26	36.4650	136.2205	14.72	3.7
286	2018/09/29	05:22	36.9305	136.7102	5.60	2.1

※ 表に示す地震のうち、各地震のデコンボリューション波形が全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が低い地震(灰色箇所)は、解析の安定性を向上させるため解析の対象から除外した。

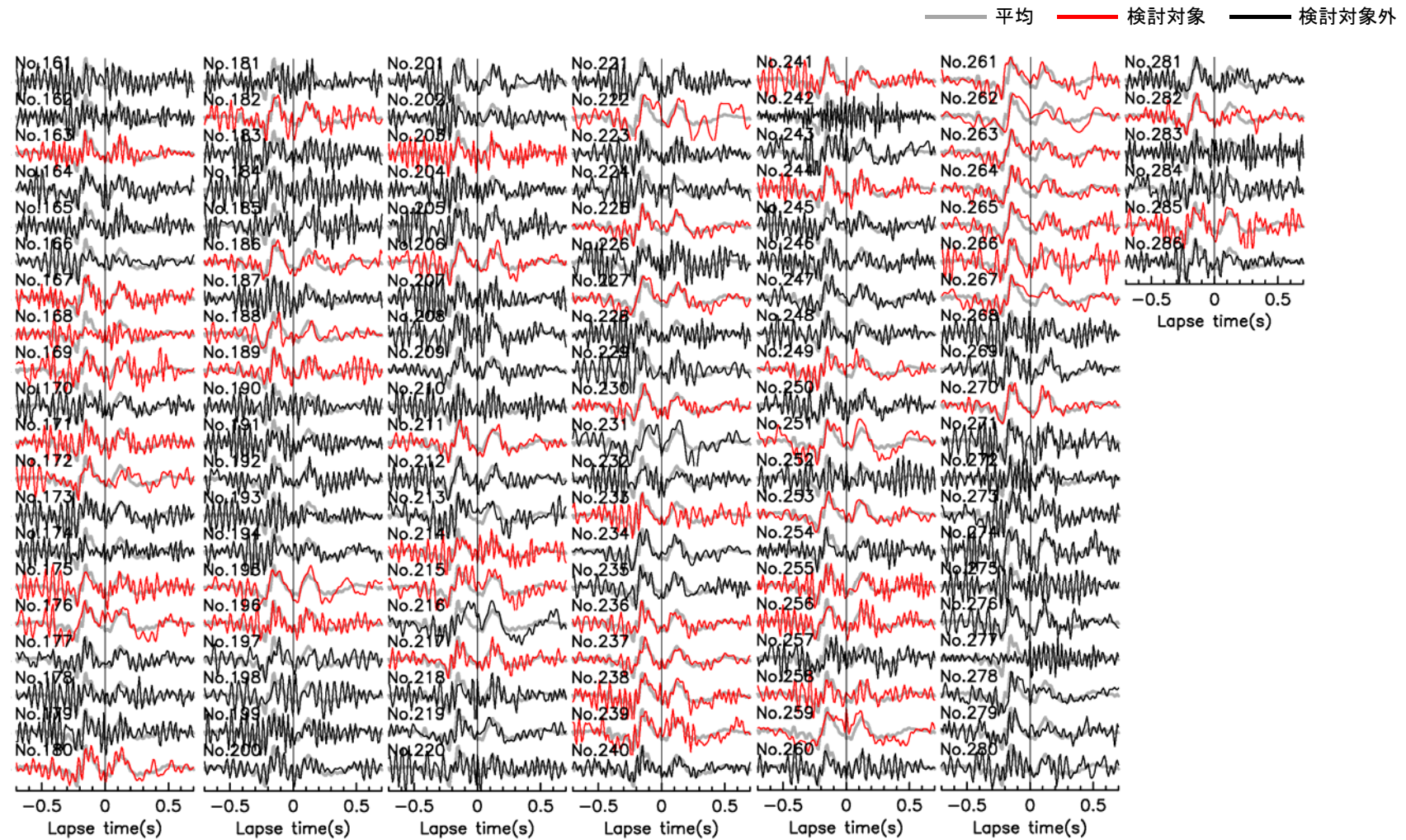
(4) デコンボリューション波形の評価結果(1/2)

- 評価したデコンボリューション波形を下図に示す。
- 減衰の推定にあたっては、解析の安定性を向上させるため、全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が高いデコンボリューション波形を用いた。



全地震のデコンボリューション波形の平均と各地震のデコンボリューション波形の相関(1/2)

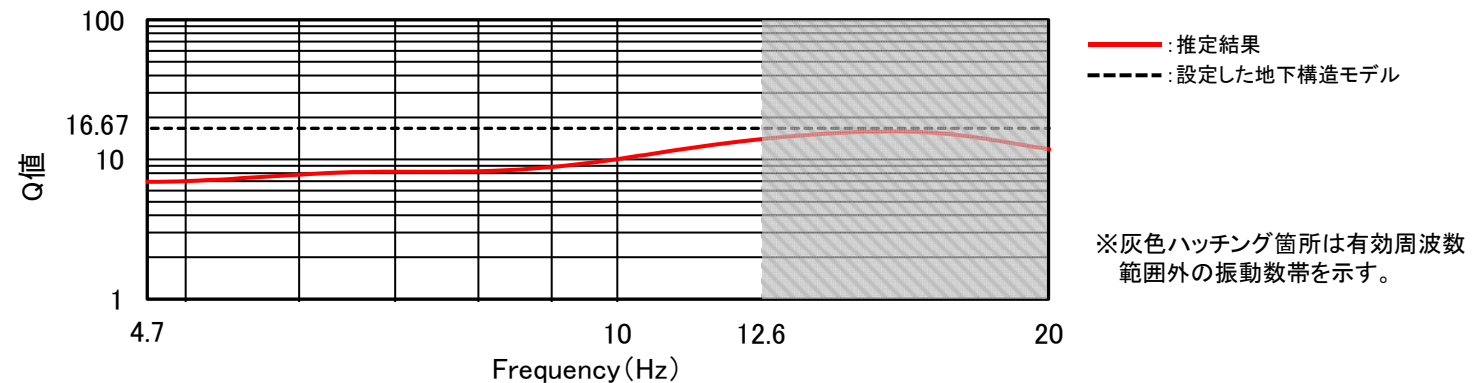
(4) デコンボリューション波形の評価結果(2/2)



全地震のデコンボリューション波形の平均と各地震のデコンボリューション波形の相関(2/2)

(5) 検討結果

- 推定したQ値は、設定した地下構造モデルのQ値を下回り、検討対象区間(EL+19.5m～EL-200m)と概ね対応する区間におけるR-9孔及びD-8.6孔のQ値測定結果(7.6～10.4)とも調和的である。なお、高振動数側でQ値がほぼ一定となる傾向は、Fukushima et al. (2016)とも調和的である。



推定したQ値と設定した地下構造モデルのQ値の比較

設定した地下構造モデル

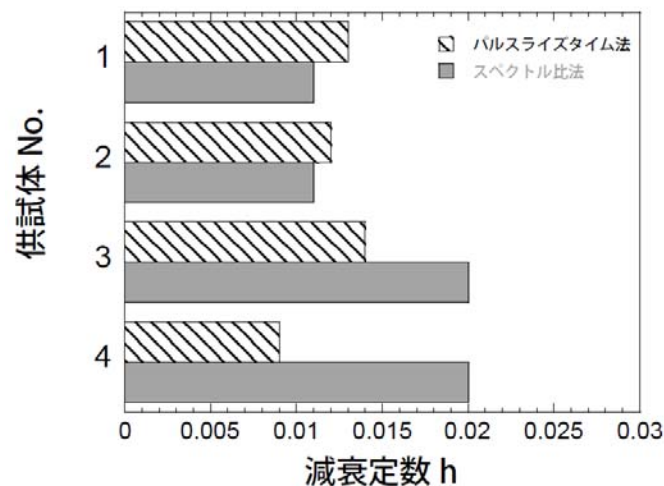
標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

 : 妥当性を確認した範囲

- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-10m～EL-200mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

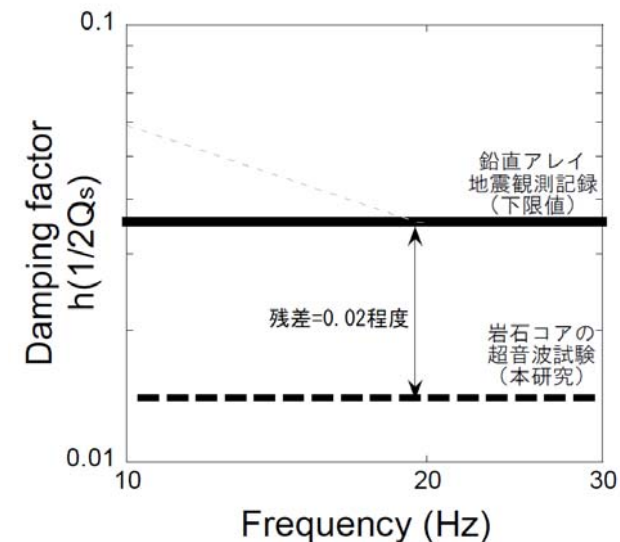
(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-990mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤・岡田(2012)に倣い、敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 佐藤・岡田(2012)は、超音波試験による岩石コアの減衰測定の実用性を検討するとともに、測定された減衰と鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰の差異について考察している。超音波試験による岩石コアの減衰測定の実用性の検討については、代表的な測定方法であるパルスライズタイム法とスペクトル比法の2つの方法について行い、ほぼ同様の評価結果が得られることを示している。また、測定された減衰と鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰の比較を行い、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰定数は、岩石コアから測定された減衰定数に対し、0.02程度大きく、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰に含まれる付加効果の存在を示している。



パルスライズタイム法とスペクトル比法による
岩石コアの減衰定数の比較

※ 佐藤・岡田(2012)より抜粋



鉛直アレー地震観測記録に基づく岩盤層の減衰定数の下限値と
岩石コアの超音波試験に基づく減衰定数(平均値)の比較

※ 佐藤・岡田(2012)より抜粋

(2) 減衰の推定方法

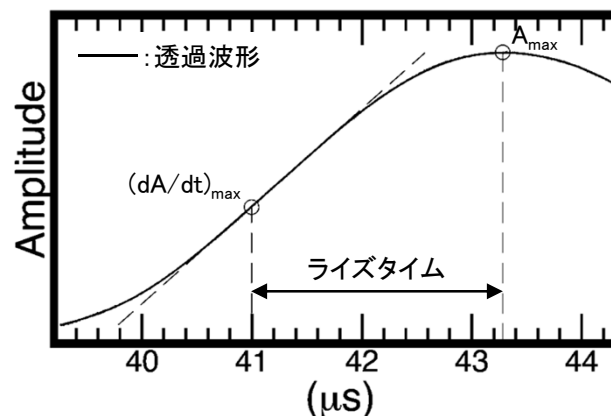
○ 本検討における減衰の推定方法は、佐藤・岡田(2012)において適用性が確認されているパルスライズタイム法を用いた。減衰の推定方法の概要を以下に示す。

- パルスライズタイム法は、減衰性媒質を透過する波動のパルス幅が透過時間及び媒質のQ値により拡大する現象に基づき、複雑な後続の波を使用しないで、透過波の初動パルスの時間幅(ライズタイム)のみを利用して減衰を推定する方法である。
- Gladwin and Stacey(1974)は、均質な岩盤とみなせるようなトンネル等での屋外実験から、透過波初動パルスのライズタイム τ とQ値について、以下のような実験式を得ている。

$$\tau = \tau_0 + c \frac{T}{Q}$$

τ_0 : 入射波初動パルスのライズタイム
 T : 伝播時間
 c : 比例係数

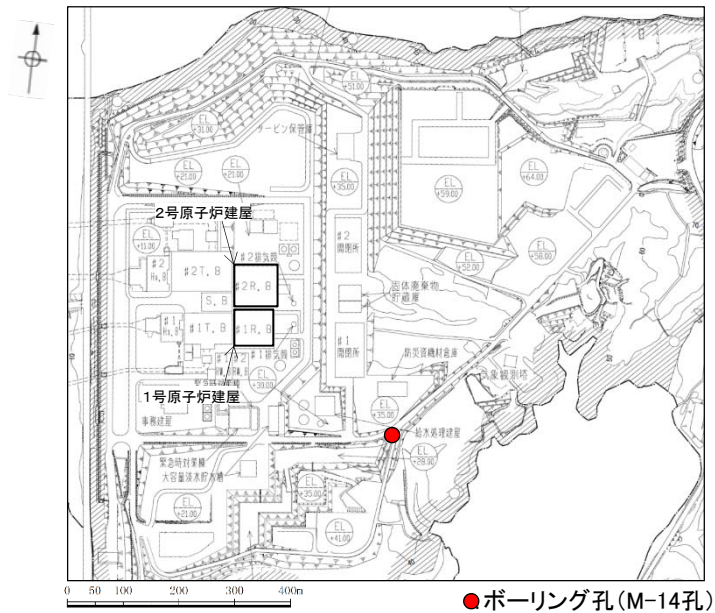
- 佐藤・岡田(2012)によると、パルスライズタイム法の適用において、比例係数Cは、実験の測定条件に応じて決定する必要があるとされていることから、今回用いる岩石コアの大きさ及び性状(S波速度及び想定されるQ値)を考慮して、佐藤・岡田(2012)と同様な数値シミュレーションにより決定した($C=0.553$)。また、上式のうち、透過波初動パルスのライズタイム τ 、入射波初動パルスのライズタイム τ_0 及び伝播時間Tは超音波試験により求め、Q値を推定した。
- なお、透過波初動パルスのライズタイム τ の評価においては、Hatherly(1986)に基づき、初動パルスの最大値の時間と最大の傾きを示す時間の差をライズタイムと定義した。また入射波初動パルスのライズタイム τ_0 は、Q値が150,000のアルミニウムを用いた超音波試験により得られた透過波初動パルスのライズタイムとした。



ライズタイムの評価例

(3) 検討に用いた岩石コア

○ ボーリング孔(M-14孔)において採取した以下の区間の岩石コアを用いた。



ボーリング孔(M-14孔)の配置図

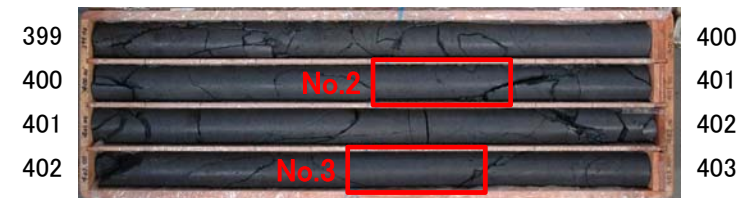
検討に用いた岩石コアの岩種及び区間

コア No.	岩種	区間	
		深度(m)	標高EL(m)
1	安山岩(均質)	284.20 ~ 284.55	-250.12 ~ -250.47
2	安山岩(均質)	400.50 ~ 400.75	-366.42 ~ -366.67
3	安山岩(均質)	402.45 ~ 402.70	-368.37 ~ -368.62
4	安山岩(角礫質)	435.73 ~ 436.00	-401.65 ~ -401.92

深度283.00m~287.00m



深度399.00m~403.00m



深度435.00m~439.00m



岩石コアの写真(M-14孔)

(4) 検討結果

- 推定したQ値(平均値)は30程度であり, 設定した地下構造モデルのQ値を下回る。
- なお, 佐藤・岡田(2012)による減衰の付加効果を踏まえると, 今回検討した範囲における実際の地盤のQ値は, 推定したQ値よりもさらに小さいものと考えられる※¹。

※¹ 本検討により推定した減衰定数(1.8%)に、仮に佐藤・岡田(2012)に示される減衰の付加効果(2%)(P.180)を踏まえると、実地盤の減衰定数は3.8%となる。設定した地下構造モデルの減衰定数(1.5%)は、本検討により推定した減衰定数(1.8%)より小さいが、減衰の付加効果を踏まえると、実地盤の減衰定数に対してさらに小さいものと考えられる。

減衰の推定結果

コア No.	岩種	区間 標高EL(m)	入射波初動パルス のライズタイム $\tau_0(\mu s)$	透過波初動パルス のライズタイム $\tau(\mu s)$	伝播時間 $T(\mu s)$	Q値	減衰定数※2 h(%)
1	安山岩(均質)	-250.12 ~ -250.47	1.774	2.257	37.30	42.7	1.2
2	安山岩(均質)	-366.42 ~ -366.67		2.531	37.82	27.6	1.8
3	安山岩(均質)	-368.37 ~ -368.62		2.595	36.24	24.4	2.0
4	安山岩(角礫質)	-401.65 ~ -401.92		2.715	41.86	24.5	2.0
平均						29.8	1.8

※² 減衰定数hは, $h=1/2Q$ の関係式より算出した。

設定した地下構造モデル

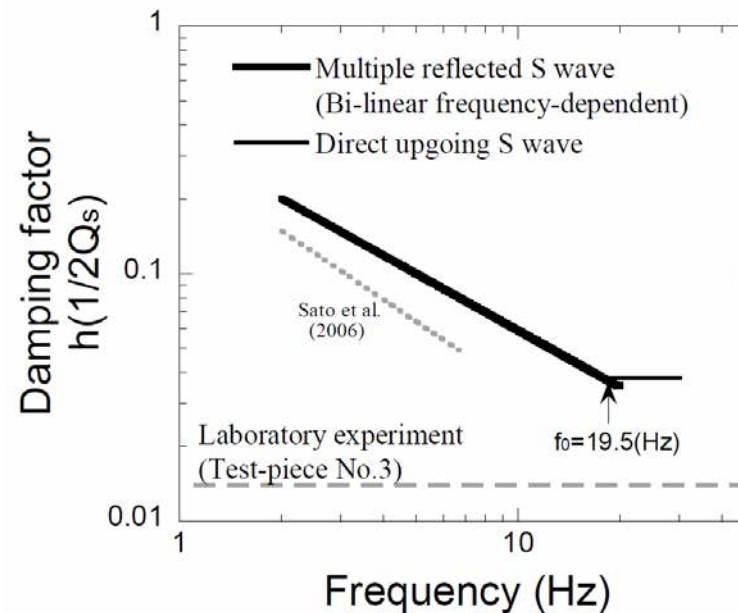
標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

1.500: 妥当性を確認した範囲

- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから, 設定した地下構造モデルのEL-200m~EL-990mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤(2012)に倣い、敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 佐藤(2012)は、地表に近い岩盤の減衰について、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰と岩石コアの超音波試験により測定された減衰を比較し、岩石コアの超音波試験により測定された減衰が相対的に小さくなる要因として、顕著な亀裂や不均質が存在しなかったことが考えられるとし、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰は亀裂や不均質によって付加的な減衰効果が発生していると推察している。また、鉛直アレー地震観測記録を用いた減衰の評価については、S波重複反射波のスペクトル比及びS波直達上昇波のスペクトル比のそれぞれを用いた方法について行われ、高周波数側で両者が対応することを示している。



佐藤(2012)に示される測定された減衰の比較

※ 佐藤(2012)より抜粋

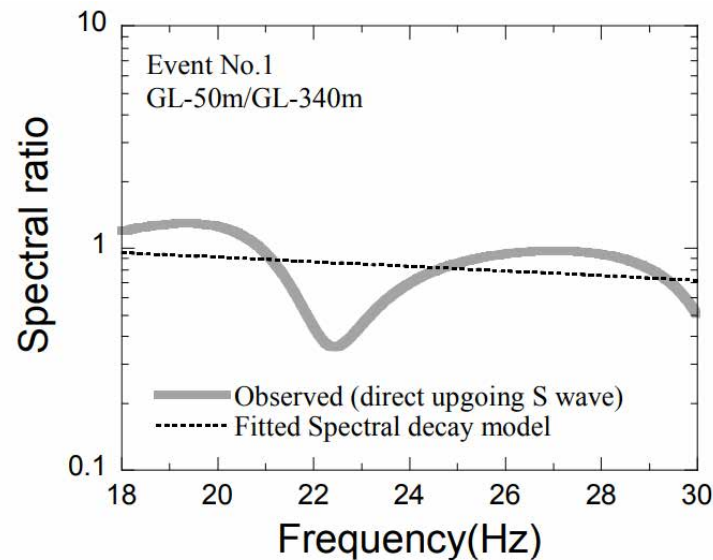
(2) 減衰の推定方法

○ 減衰の推定方法の概要を以下に示す。

- 佐藤(2012)によると, S波直達上昇波を用いた減衰の推定方法は, 地震観測点間を上昇するS波直達波のスペクトル比を用いる方法で, 反射波等の影響を受けにくい岩盤における地震観測記録を用いる場合に有効な方法であるとされている。
- 減衰の推定は, 佐藤(2012)に倣い, 鉛直アレー地震観測点における2つの観測点間のS波直達上昇波のスペクトル比 A/A_0 (A は上部地震計のフーリエスペクトル, A_0 は下部地震計のフーリエスペクトル)を算定し, 下式のスペクトル低減モデルをフィッティングすることにより行った。

$$\ln\left(\frac{A(f)}{A_0(f)}\right) = -\frac{\pi t}{Q} f + c$$

Q : Q値
 f : 周波数
 t : 地震観測点間の伝播時間
 c : 定数

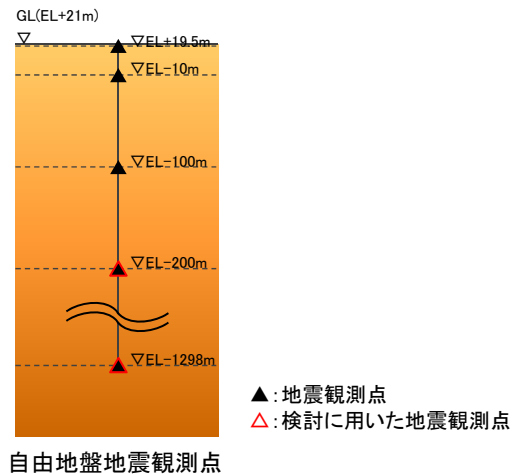


佐藤(2012)に示される観測記録に基づくS波直達上昇波のスペクトル比と
 スペクトル低減モデルによりフィッティングした結果の比較

※ 佐藤(2012)より抜粋

(3) 検討の対象とした地震

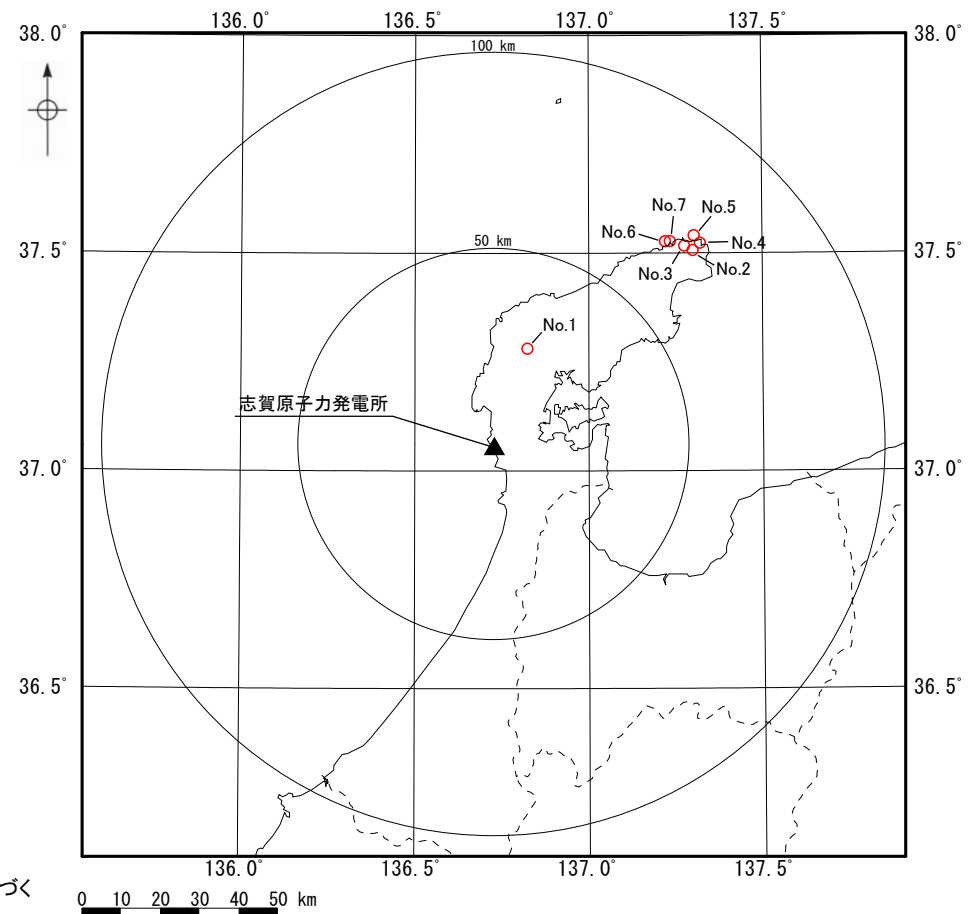
- 検討対象区間は、反射波の影響が小さい自由地盤地震観測点におけるEL-200m～EL-1298mとした。
- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。検討の対象は、2019年7月～2023年5月に自由地盤地震観測点におけるEL-1298mとEL-200mで同時に観測された地震のうち、敷地から100km以内において発生したM5以上の7地震とした。



検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
2	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
3	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
4	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
5	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
6	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
7	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

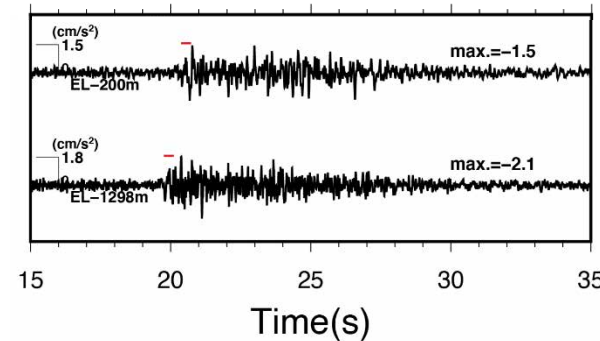
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(4) 検討結果

- 推定したQ値は26.81であり、設定した地下構造モデルのQ値を下回る。
- 推定したQ値26.81は、検討対象区間(EL-200m～EL-1298m)と概ね対応するD-8.6孔のEL-160m～EL-990mの区間のQ値測定結果27.4とも調和的である。

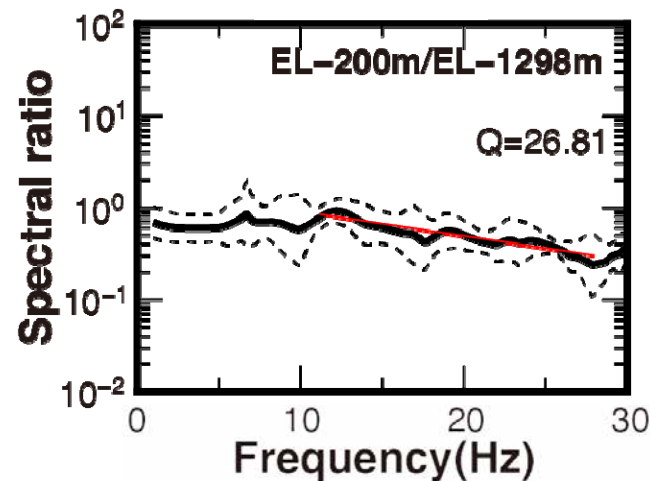


検討に用いた波形例

(赤線区間はS波直達上昇波として解析に用いた区間※)

※ S波直達上昇波として解析に用いる区間は、自由地盤地震観測点のEL+19.5mの地震観測記録で各深度の地震観測記録をデコンボリューションした波形により、入射波と反射波を分離したフェーズから確認した反射波の到達時間を踏まえて設定

- : S波直達上昇波スペクトル比(平均値)
- - - : S波直達上昇波スペクトル比($\pm \sigma$)
- : フィッティング結果



設定した地下構造モデル

標高EL	層厚(m)	S波速度Vs(km/s)	P波速度Vp(km/s)	密度 ρ (t/m³)	減衰定数h(%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

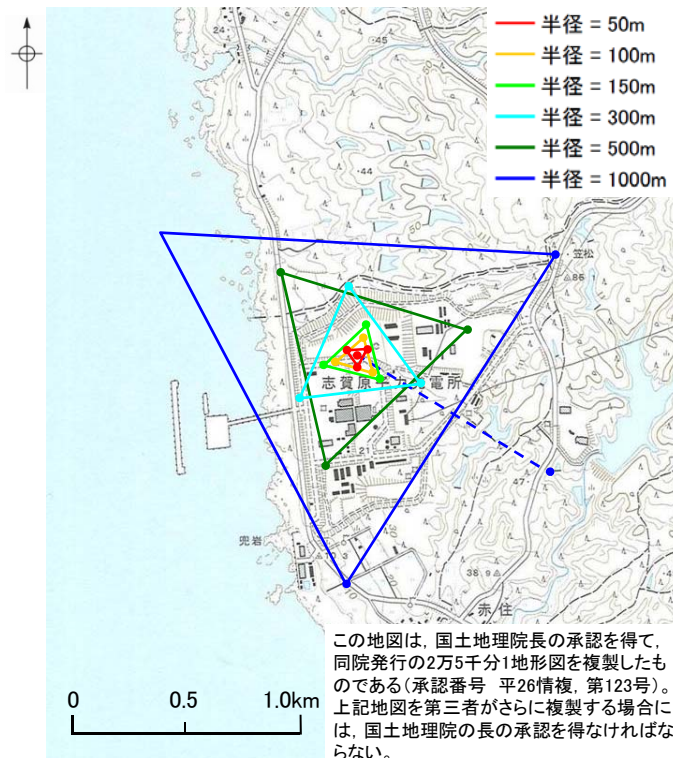
□ : 妥当性を確認した範囲

- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

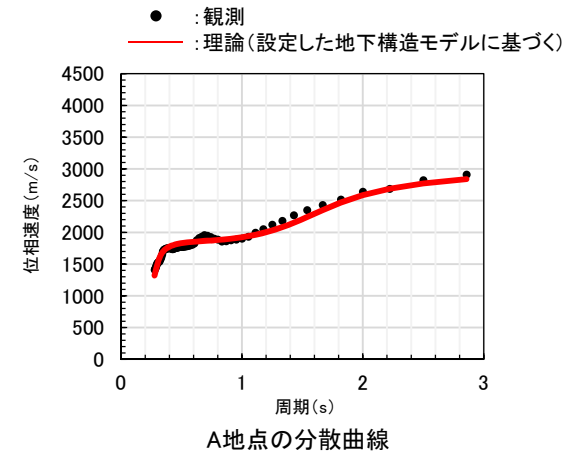
3.3 速度構造の妥当性確認

(1) 位相速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-1.19kmからEL-3kmの速度構造は敷地の微動アレー探査結果に基づき設定している(詳細はP.153～154参照)。ここでは設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルの理論位相速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論位相速度は、全周期帯において、微動アレー探査により得られた位相速度と調和的である。



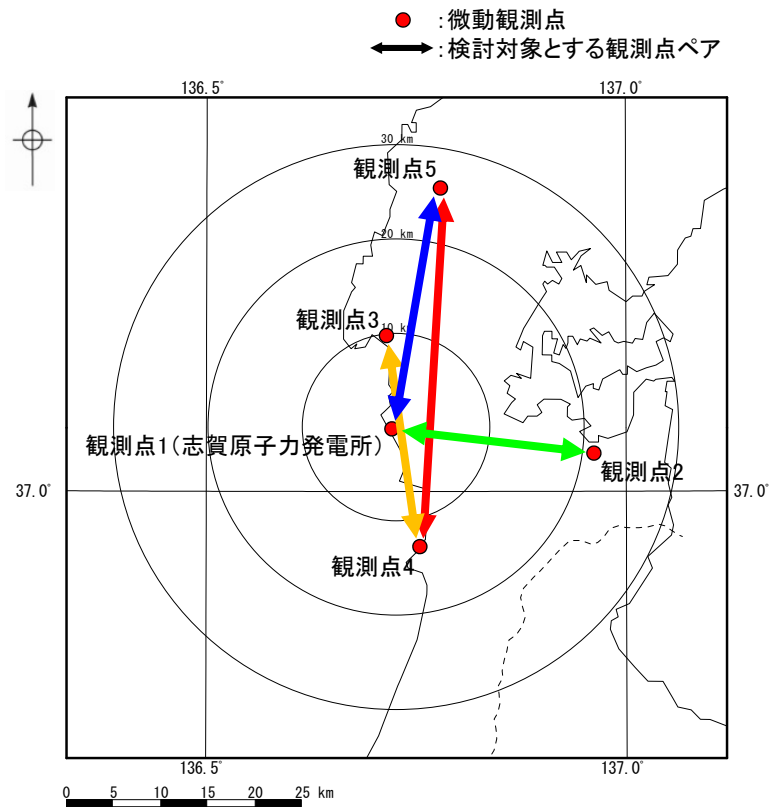
微動アレー探査地点(A地点)



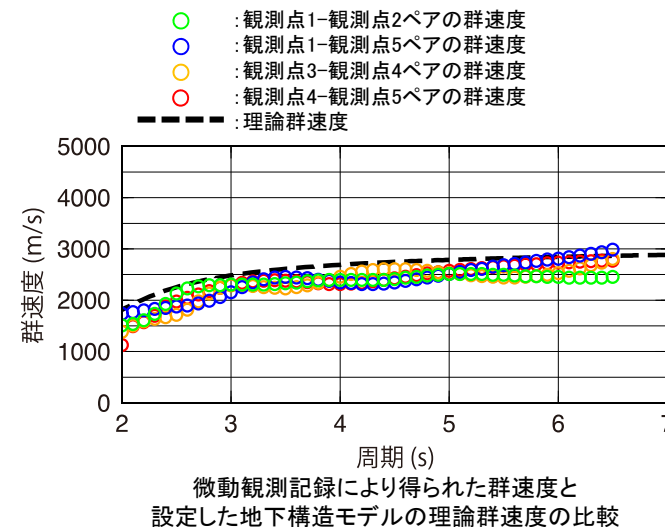
- 微動アレー探査により得られた位相速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(2) 群速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は敷地の微動アレー探査結果及び文献に基づき設定している(詳細はP.151～154参照)。ここでは設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルの理論群速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論群速度は、地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられる周期2秒程度より長周期側※において、微動観測記録により得られた群速度と調和的である。



微動観測点配置図

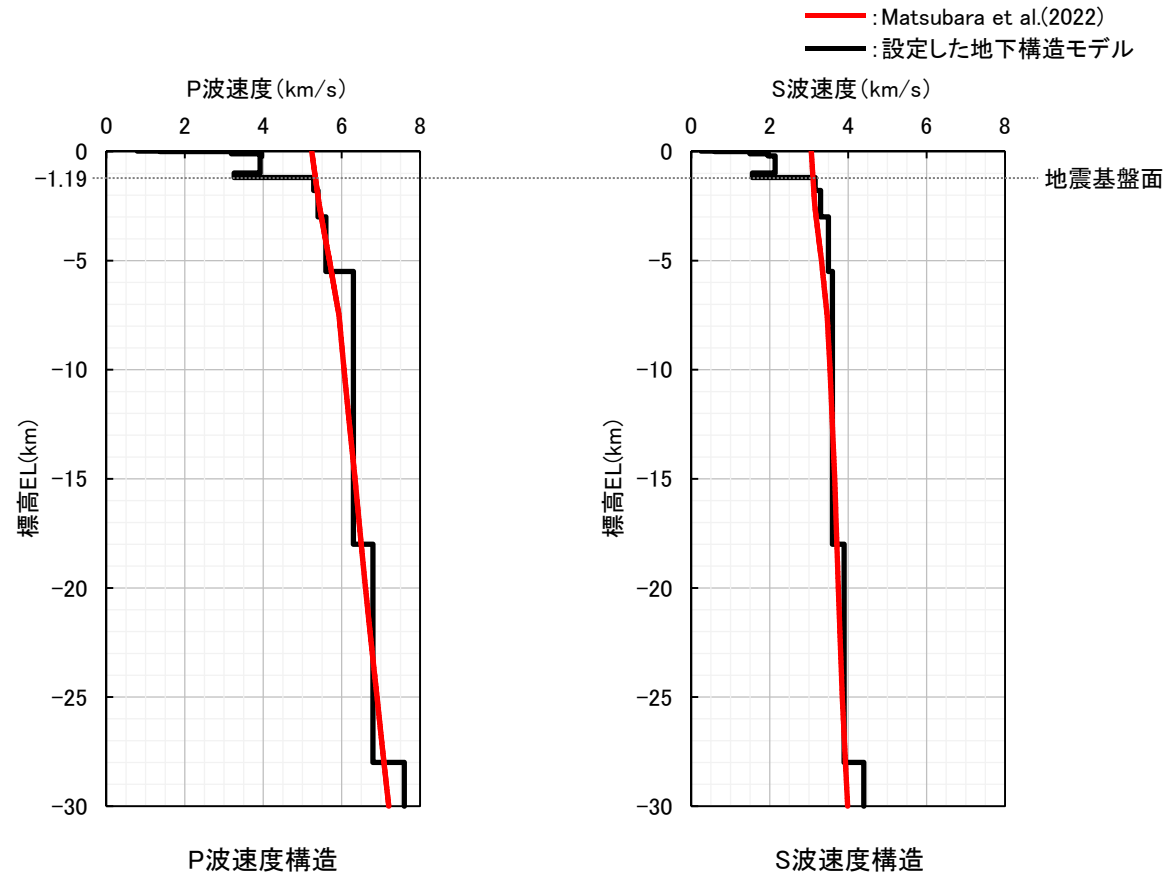


※ 群速度における周期2秒程度より長周期側が、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられることについては、P.93参照。

- 微動観測記録により得られた群速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(3) 知見を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤面より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、申請時以降に得られた知見 (Matsubara et al.(2022)(P.78~79))において評価された敷地位置における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較した。
- Matsubara et al.(2022)により評価された敷地位置における地震基盤面より深部の速度構造は、設定した地下構造モデルの地震基盤面より深部の速度構造と調和的である。



P波速度構造
S波速度構造
Matsubara et al.(2022)により評価された敷地位置における速度構造と
設定した地下構造モデルの比較

※Matsubara et al.(2022)の初期速度構造モデルは、防災科学技術研究所のHi-netルーチン処理で使用されている1次元速度構造が採用されている。

- Matsubara et al.(2022)により評価された敷地位置における地震基盤面より深部の速度構造と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤面より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

3.1 地盤増幅特性の妥当性確認

3.1.1 逆解析による地盤増幅特性の検討

- 設定した地下構造モデルの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地盤増幅率を比較した。
- 設定した地下構造モデルの地盤増幅率は、逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率を上回ることから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.1.2 地震動シミュレーションによる地盤増幅特性の検討

- 設定した地下構造モデルの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較した。
- シミュレーション解析結果は観測記録を上回ることから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.2 減衰構造の妥当性確認

3.2.1 地震波干渉法を用いた減衰の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-10m～EL-200mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、Fukushima et al.(2016)に倣い、地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-10m～EL-200mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

3.2.2 岩石コアを用いた減衰の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-990mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤・岡田(2012)に倣い、敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-990mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

3.2.3 S波直達上昇波を用いた減衰の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤(2012)に倣い、敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

3.3 速度構造の妥当性確認

(1) 位相速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルの理論位相速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論位相速度は、全周期帯において、微動アレー探査により得られた位相速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(2) 群速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルの理論群速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論群速度は、地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられる周期2秒程度より長周期側において、微動観測記録により得られた群速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(3) 知見を用いた速度構造の検討

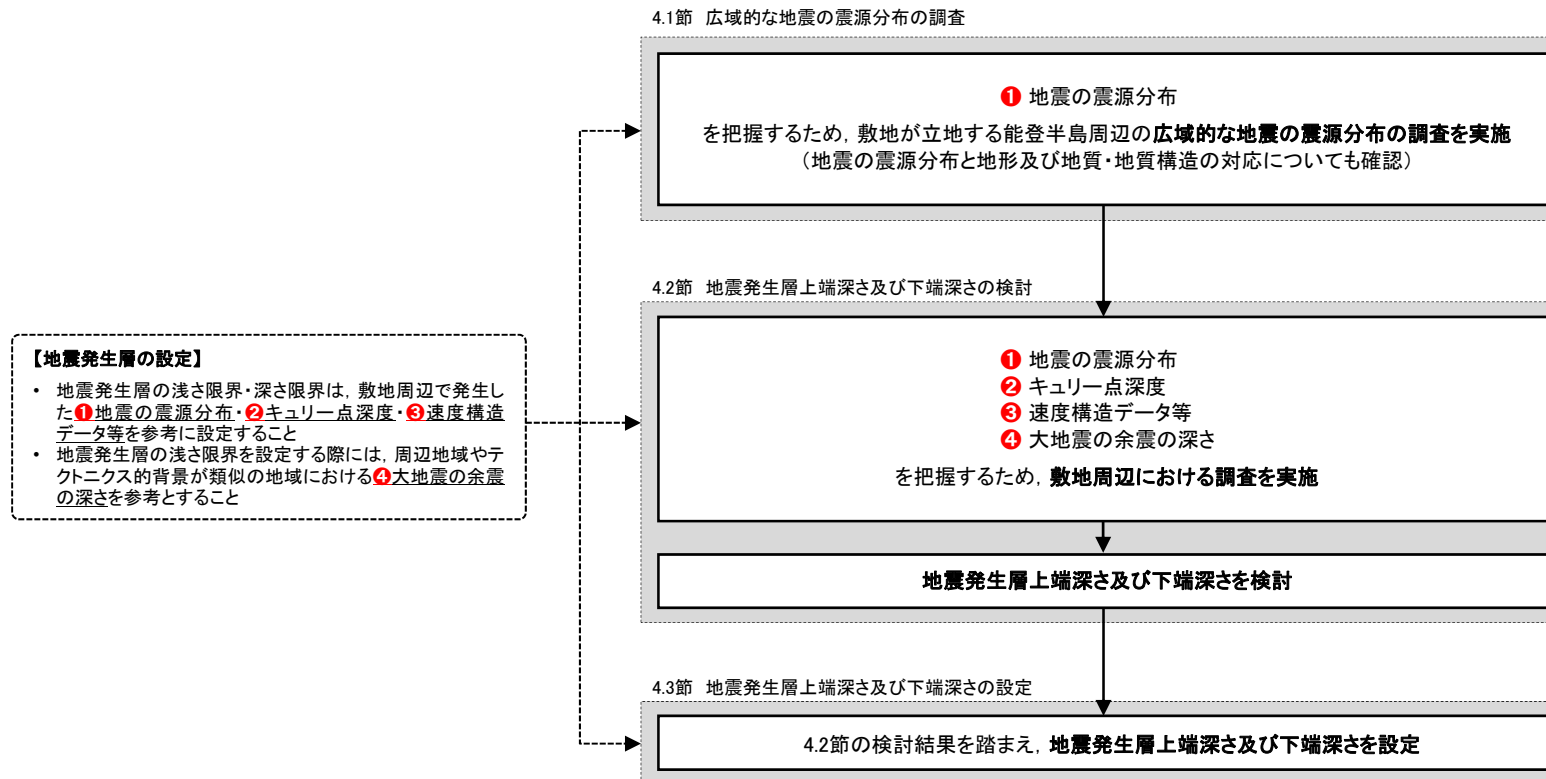
- 設定した地下構造モデルの地震基盤面より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、申請時以降に得られた知見(Matsubara et al.(2022))において評価された敷地位置における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較した。
- Matsubara et al.(2022)により評価された敷地位置における地震基盤面より深部の速度構造と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤面より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

➤ 以上により、地下構造モデルの地盤増幅特性、減衰構造及び速度構造は適切に設定されており、地下構造モデルの妥当性を確認した。

4. 地震発生層の設定

(1)地震発生層の設定の流れ(P.27の再掲)

- 地震発生層は、審査ガイドの要求事項を踏まえ、下記の流れで設定を行う。
 - ・ まず、敷地が立地する能登半島周辺の「**①地震の震源分布**」を把握するため、広域的な地震の震源分布の調査を行う。(4.1節で説明)
 - ・ つぎに、敷地周辺の「**①地震の震源分布**」,「**②キュリー点深度**」,「**③速度構造データ等**」及び「**④大地震の余震の深さ**」を把握するため、調査を実施する。また、敷地周辺の**①～④**を把握した結果を踏まえ、地震発生層上端深さ及び下端深さを検討する。(4.2節で説明)
 - ・ 最後に、上記の検討結果を踏まえ、地震発生層上端深さ及び下端深さを設定する。(4.3節で説明)
- 上記の内容を踏まえた地震発生層の設定フローを下図に示す。



4. 地震発生層の設定

(2)調査の手法等の概要

- 4.1節において実施する広域的な地震の震源分布の調査及び4.2節において実施する敷地周辺における地震発生層上端深さ及び下端深さに係る調査の目的と各調査の対象及び手法を下表に示す。また、地震発生層の具体的な設定手順を次頁に示す。

【広域的な地震の震源分布の調査の目的、対象及び手法】

調査の目的		対象		手法		詳細説明
		水平方向	深さ方向	種別	内容	
①	地震の震源分布の把握	能登半島周辺	深さ30km以浅 (内陸地殻内)	気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データに基づく検討	震源データから、地震の震源分布を確認する。 (地震の震源分布と地形及び地質・地質構造の対応についても確認する)	P.201～209

 : 次頁に示す手順②
 : 次頁に示す手順③
 : 次頁に示す手順④

【敷地周辺における地震発生層上端深さ及び下端深さに係る調査の目的と各調査の対象及び手法】

調査の目的		対象		手法		詳細説明
		水平方向	深さ方向	種別	内容	
①	地震の震源分布の把握	敷地周辺	上端深さ 下端深さ	気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データに基づく検討	D10%及びD90%を検討する。	P.213～214
				文献調査	D10%及びD90%を確認する。	P.213, P.215
②	キュリー点深度の把握		下端深さ	文献調査	キュリー点深度分布図から、D90%と相関があるキュリー点深度を確認する。	P.226～227
③	速度構造データ等の把握		上端深さ	文献調査	速度構造断面から、P波速度が5.8km/sの層の上端深さを確認する。	P.216～219
				群速度に基づく検討	敷地周辺の微動観測記録による群速度と敷地の地下構造モデルによる理論群速度を比較することで、P波速度が5.8km/sの層の上端深さを検討する。	P.216, P.220
			下端深さ	文献調査	コンラッド面深さの図から、コンラッド面深さを確認する。	P.221～225
④	大地震の余震の深さの把握	上端深さ	文献調査	敷地周辺で発生した2007年能登半島地震について、当該地震の震源域の上端深さに係る知見を整理し、当該地震の震源域の上端深さを総合的に判断する。	P.239～244	

4. 地震発生層の設定

(3)地震発生層の設定手順

【地震発生層の設定手順】

4.1節 広域的な地震の震源分布の調査

【手順①】

敷地が立地する能登半島周辺の広域的な地震の震源分布を調査。また、地震の震源分布と地形及び地質・地質構造の対応についても確認。(P.201～209)

4.2節 地震発生層上端深さ及び下端深さの検討

敷地周辺に係る検討

【手順②】

敷地周辺の地震の震源分布、速度構造、コンラッド面深さ及びキュリー点深度に基づき、敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さを検討。(P.213～227)

【手順③】

地震調査研究推進本部により評価された敷地周辺の主要活断層帯を対象に、地震調査研究推進本部の知見における地震発生層上端深さ及び下端深さの設定値を整理し、手順②の検討結果との整合性を確認。(P.228～238)

2007年能登半島地震の震源域に係る検討

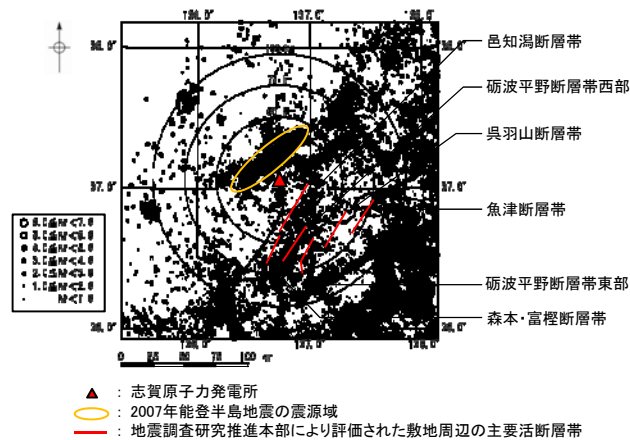
【手順④】

敷地周辺で発生した2007年能登半島地震について、当該地震の詳細なデータによる震源域の上端深さに係る知見を整理。(P.239～244)

4.3節 地震発生層上端深さ及び下端深さの設定

【手順⑤】

手順②③の検討結果に対して、敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さを安全側に設定。ただし、2007年能登半島地震の震源域の上端深さについては、手順④の当該地震の詳細なデータによる検討結果を踏まえて設定。(P.247)

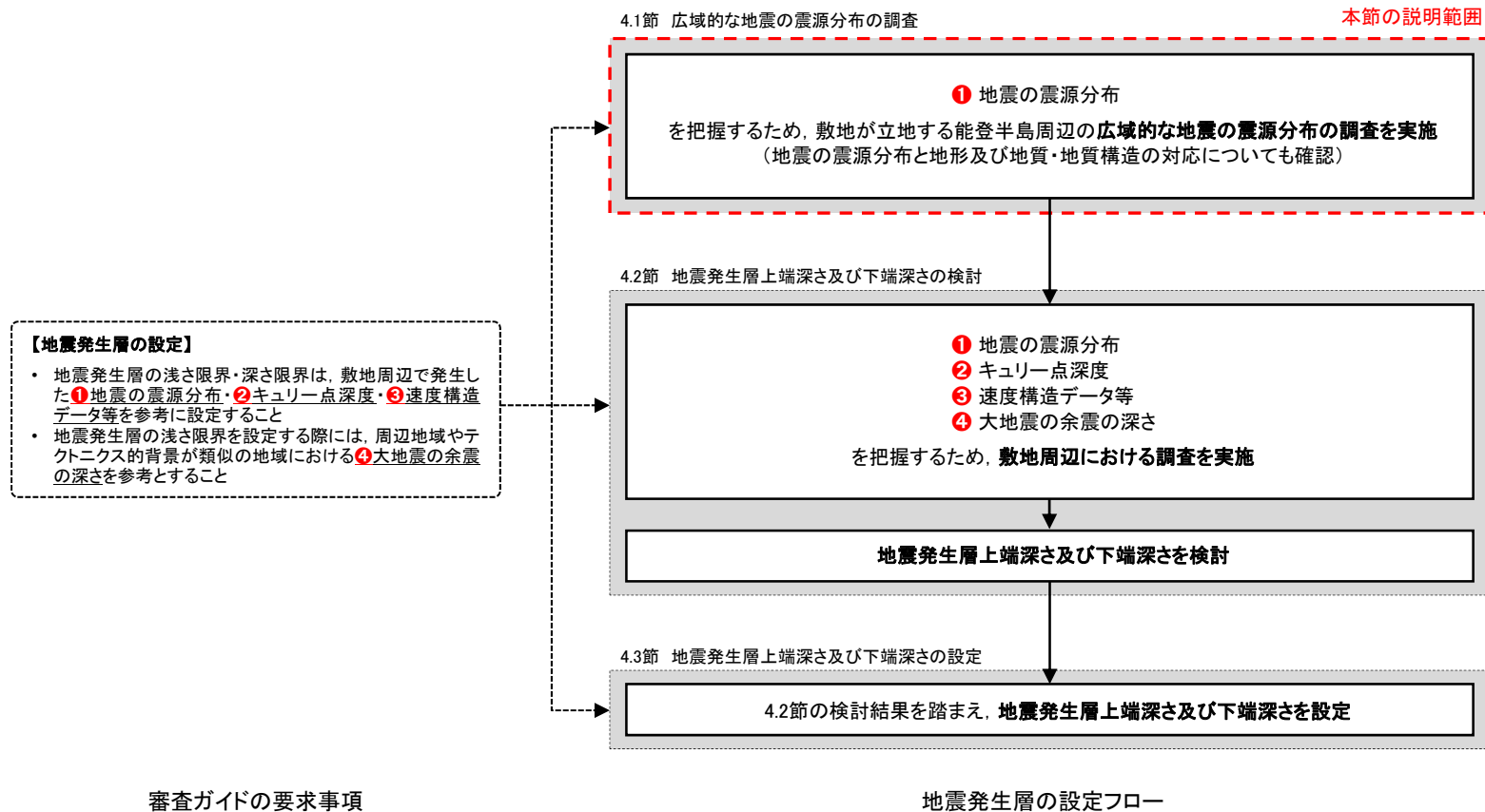


地震の震央分布図(1997年10月～2022年3月)

4.1 広域的な地震の震源分布の調査

(1)調査方法

- 4.1節では、敷地が立地する能登半島周辺の「**①地震の震源分布**」を把握するため、広域的な地震の震源分布の調査を行う。
- 広域的な地震の震源分布の調査の手法等の概要を次頁に示す。



(2)調査の手法等の概要

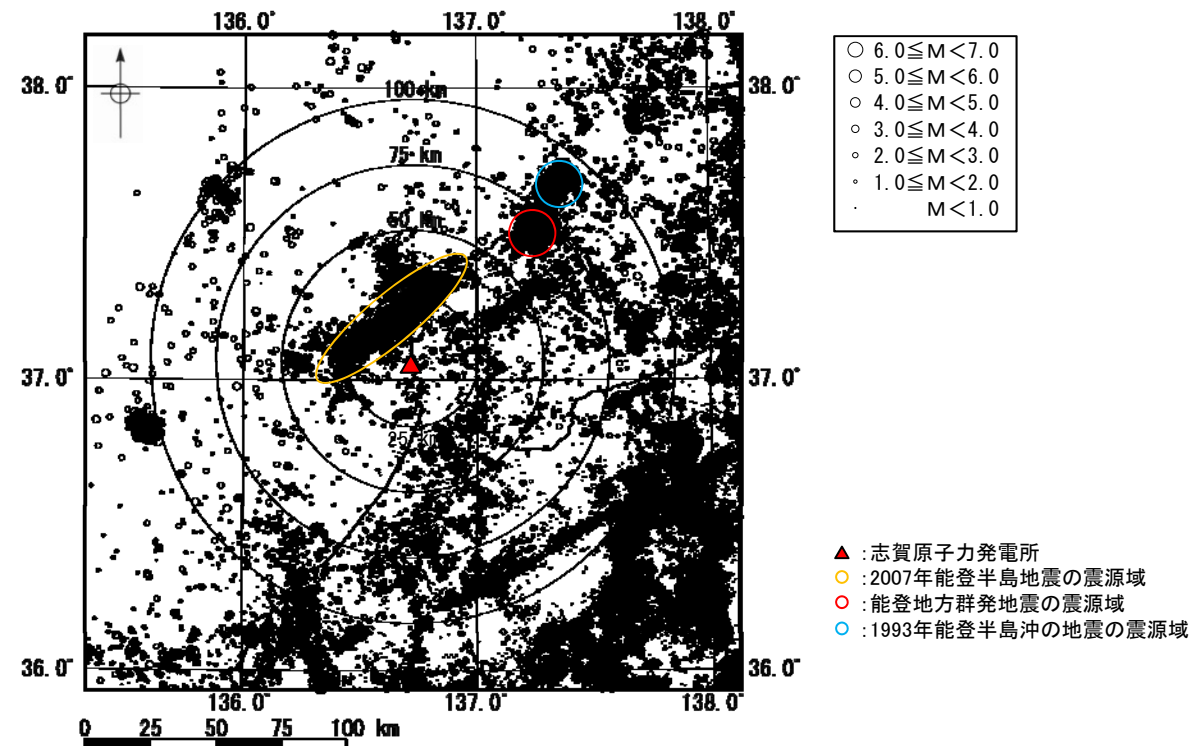
○ 広域的な地震の震源分布の調査の目的, 対象及び手法を下表に示す。

【調査の目的, 対象及び手法】

調査の目的		対象		手法		詳細説明
		水平方向	深さ方向	種別	内容	
①	地震の震源分布の把握	能登半島周辺	深さ30km以浅 (内陸地殻内)	気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データに基づく検討	震源データから, 地震の震源分布を確認する。 (地震の震源分布と地形及び地質・地質構造の対応についても確認する)	P.201～209

(3)能登半島周辺の地震の震央分布

- 1997年10月～2022年3月の気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データ(震源深さ30km以浅)を用いて、能登半島周辺の地震の震央分布を確認した。
- 敷地から半径50kmの範囲には北西方向に2007年能登半島地震、敷地から半径75kmの範囲には北東方向に2020年12月頃から活発化している石川県能登地方の一連の地震(以下、「能登地方群発地震」という)、敷地から半径100kmの範囲には北東方向に1993年能登半島沖の地震の震源域に地震の集中がみられ、これらの地震は、能登半島北岸に沿って北東-南西方向の走向に分布している。

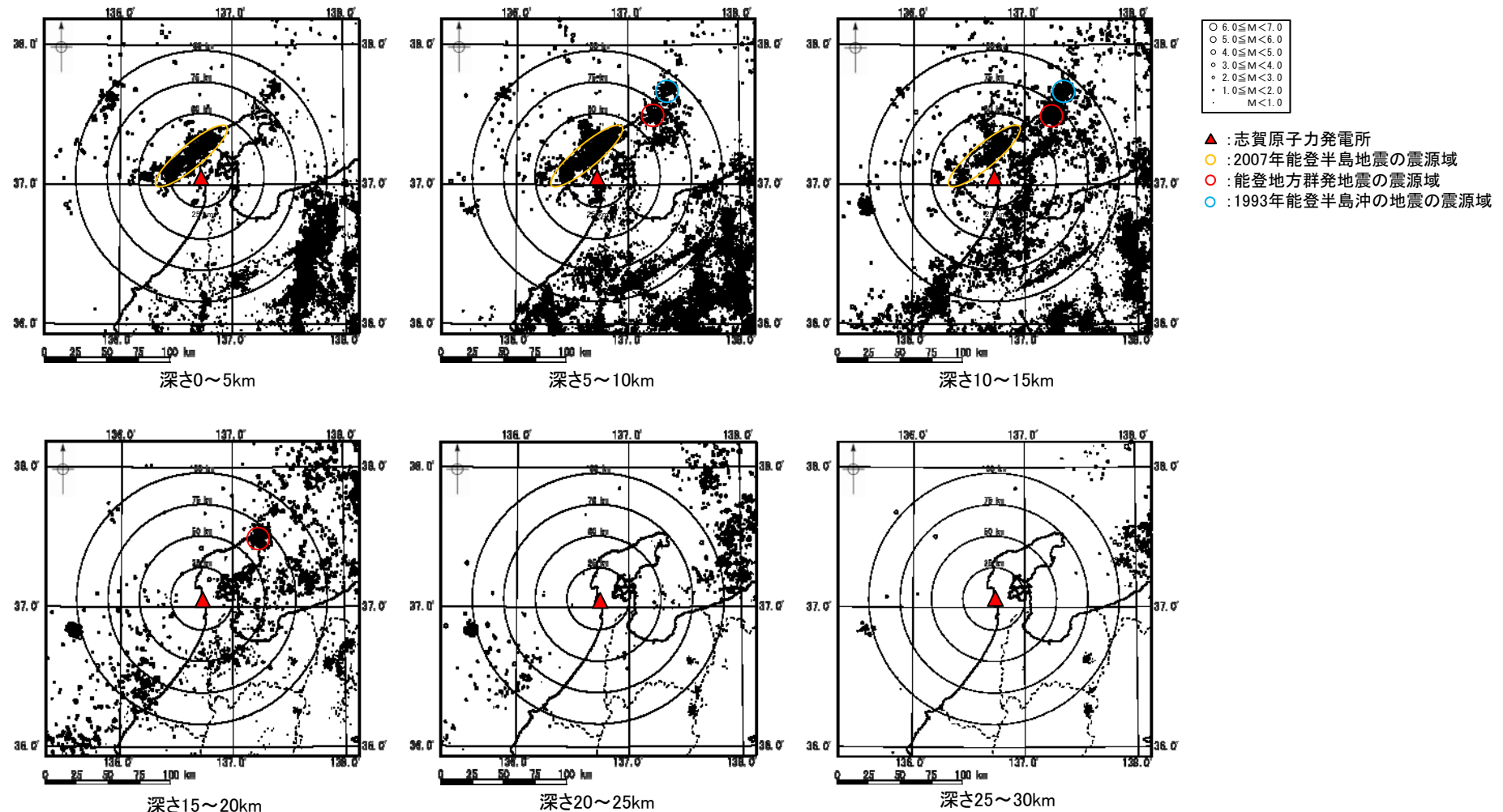


地震の震央分布図
(1997年10月～2022年3月)

- 能登半島周辺においては、2007年能登半島地震、能登地方群発地震及び1993年能登半島沖の地震の震源域に地震の集中がみられ、これらの地震は、能登半島北岸に沿って北東-南西方向の走向に分布している。

(4)能登半島周辺の深さ別の地震の震央分布

- 能登半島周辺の深さ別の地震の震央分布を確認した。
- 能登半島周辺においては、深さ20～30kmに地震はほとんどみられず、深さ15km以浅で比較的多く地震がみられる。
- 敷地周辺では、2007年能登半島地震の震源域において地震が深さ0～15kmに概ねN50° Eの走向で集中してみられる。敷地からやや離れたところでは、能登地方群発地震の震源域において地震が深さ5～20kmに、1993年能登半島沖の地震の震源域において地震が深さ5～15kmに集中してみられる。

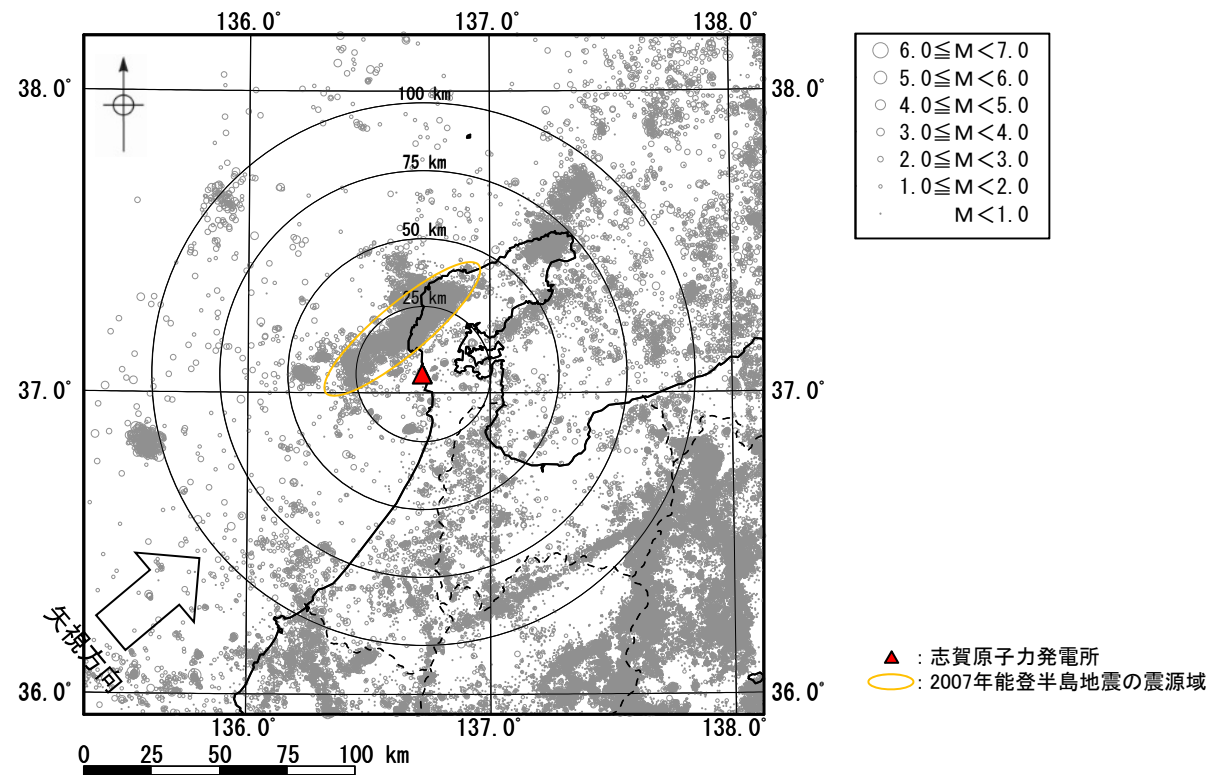


深さ別の地震の震央分布図(1997年10月～2022年3月)

➤ 敷地周辺では、2007年能登半島地震の震源域において地震が比較的浅く、概ねN50° Eの走向で集中してみられる。

(5)能登半島周辺の地震の震源深さ分布(1/3)

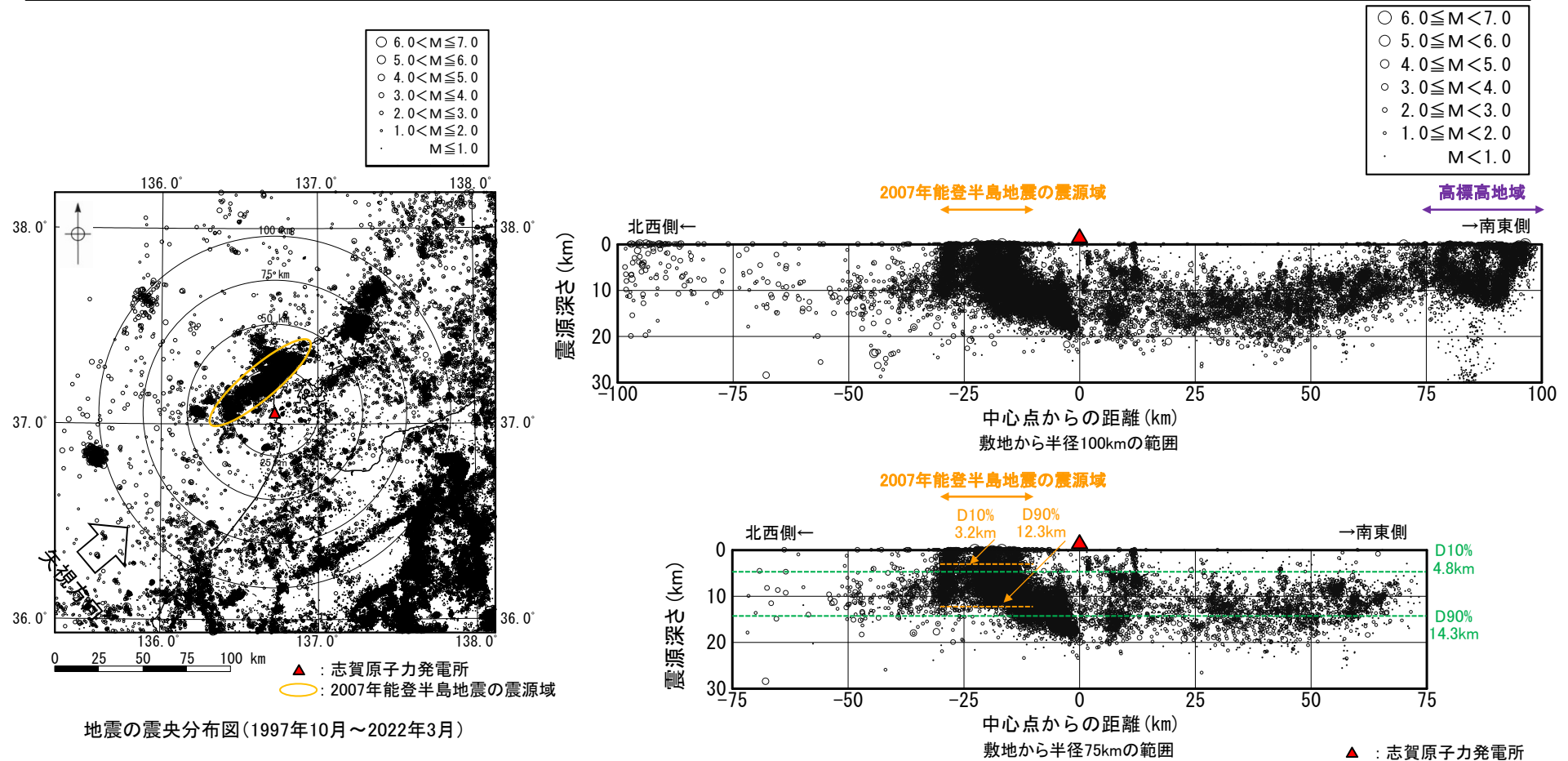
○ 能登半島周辺の深さ別の地震の震央分布より、敷地周辺では、2007年能登半島地震の震源域において地震が比較的浅く、概ねN50° Eの走向で集中してみられることから、この震源域を含む能登半島周辺について、N50° Eに直交する断面の地震の震源深さ分布を確認した。



地震の震央分布図
(1997年10月～2022年3月)

(5)能登半島周辺の地震の震源深さ分布(2/3)

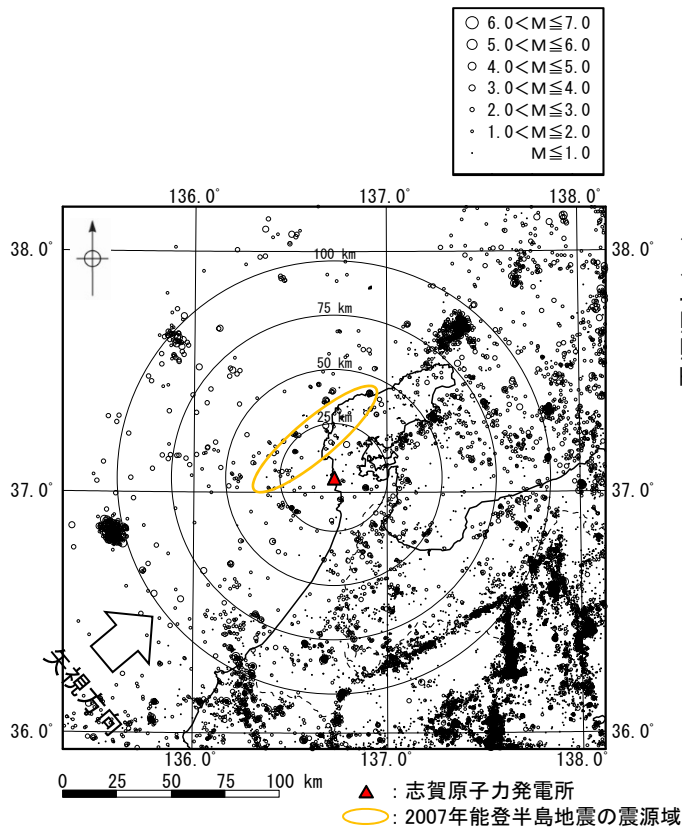
- 能登半島周辺の地震の震源深さ分布を右上図に示す。
- 中心点から北西側の-10km~-30km程度の範囲において、2007年能登半島地震の震源域に地震の集中がみられ、この震源域の震源深さは周辺に比べて浅い傾向が認められる。
- また、2007年能登半島地震の震源域の震源深さが浅いことを定量的に確認するため、この震源域及び能登半島周辺※についてD10%及びD90%を求めた。求めたD10%及びD90%を右下図に示す。
- 2007年能登半島地震の震源域のD10%及びD90%はそれぞれ3.2km及び12.3kmとなり、能登半島周辺のD10%及びD90%はそれぞれ4.8km及び14.3kmとなる。



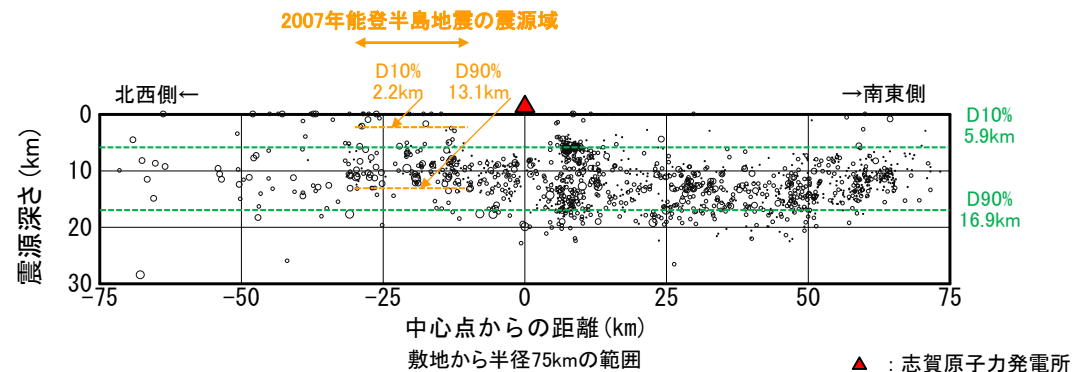
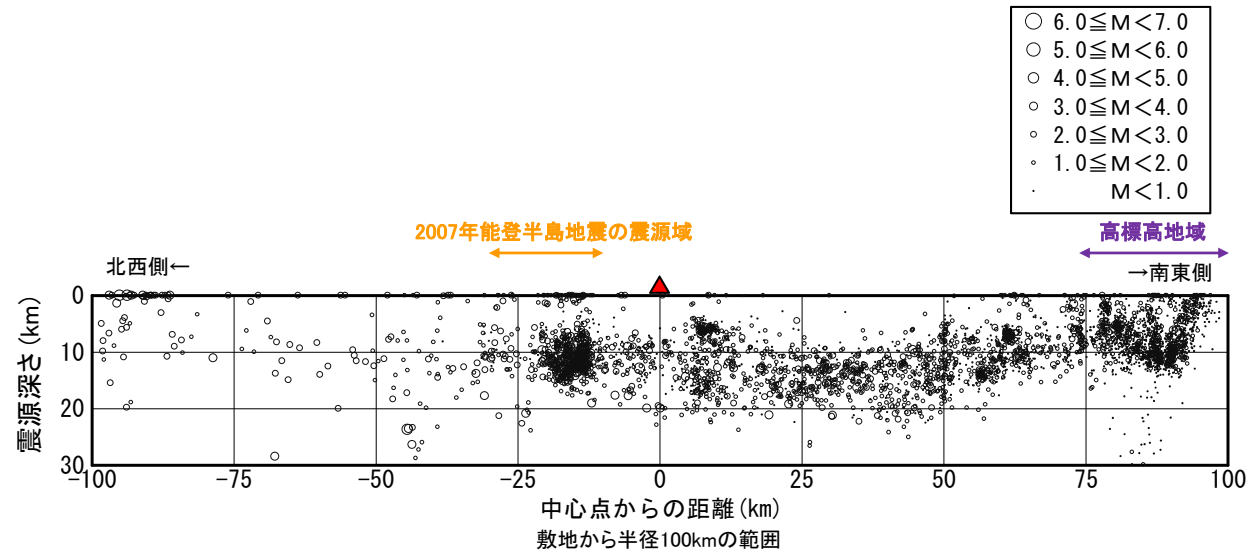
※ 能登半島周辺の地震の震源深さの傾向を適切に評価するため、能登半島周辺と標高が大きく異なる高標高地域(敷地の南東方向に存在する山岳地形)が含まれない範囲として、敷地から半径75kmの範囲とした。

(5)能登半島周辺の地震の震源深さ分布(3/3)

- 前頁で認められた震源深さ分布の傾向が、2007年能登半島地震発生日より前においても認められるか確認するため、当該地震発生日より前の地震の震源深さ分布についても同様に確認した。
- 当該地震発生日より前の地震の震源深さ分布においても、前頁で確認した傾向と概ね同様の傾向が認められる。



2007年能登半島地震発生日より前の
地震の震央分布図(1997年10月～2007年3月24日)

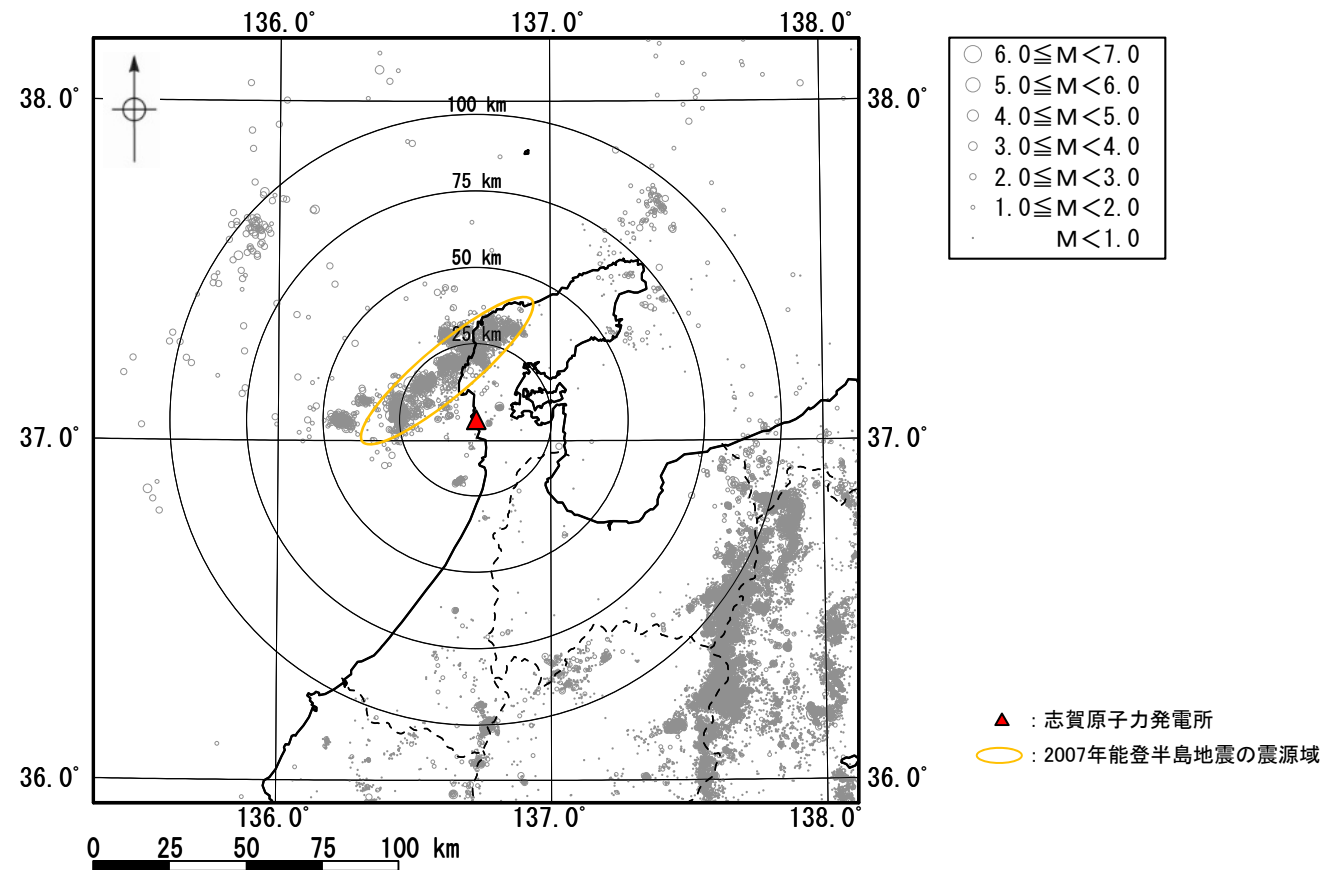


2007年能登半島地震発生日より前の
地震の震源深さ分布図(1997年10月～2007年3月24日)

➤ 能登半島周辺の地震の震源深さ分布より、2007年能登半島地震の震源域の震源深さは、周辺に比べて浅い傾向が認められる。

(6)能登半島周辺の地震の震央分布と地形及び地質・地質構造の対応(1/3)

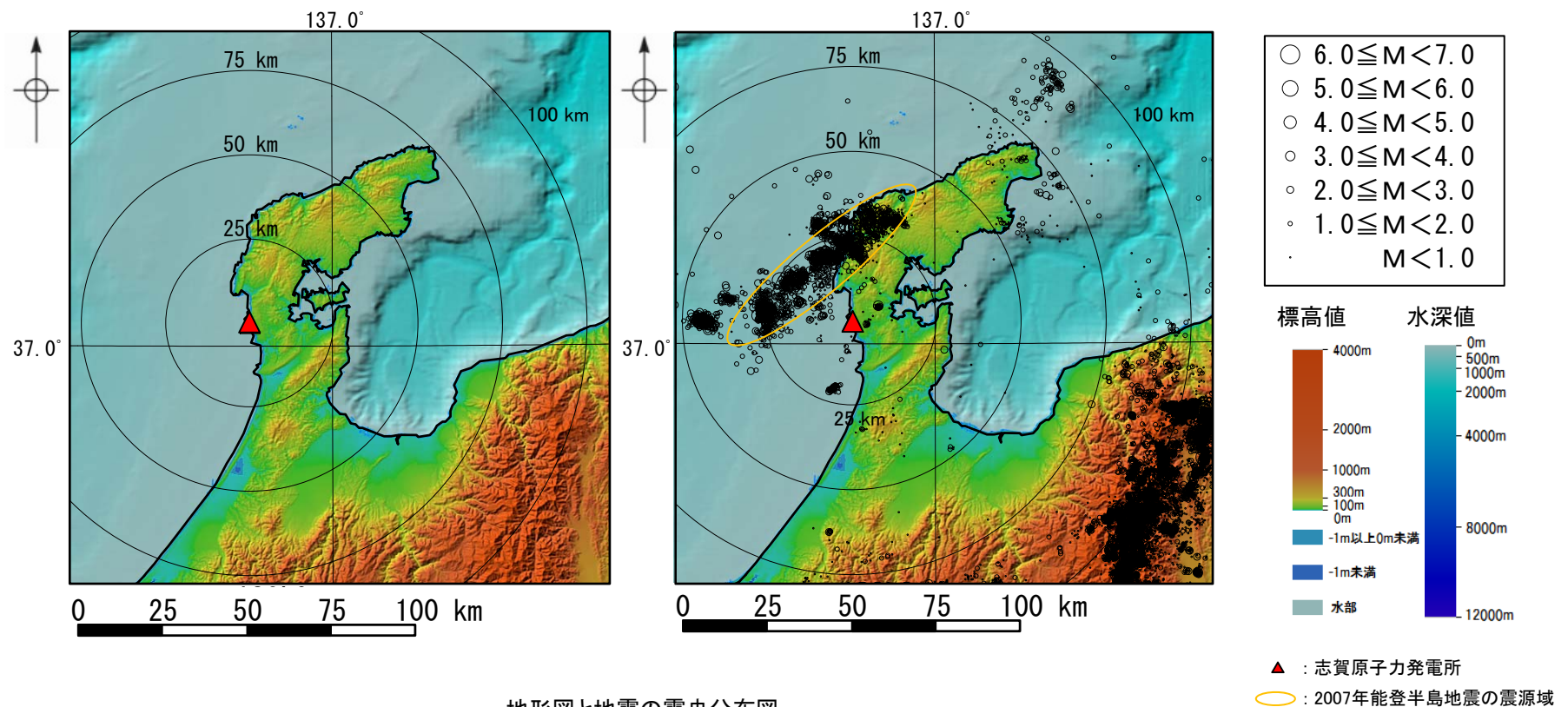
- 能登半島周辺の地震の震源深さ分布の調査においては、2007年能登半島地震の震源域の震源深さが周辺に比べて浅い傾向が認められた。
- ここでは、震源深さが浅い地震(深さ0~5kmの地震)の震央分布と地形及び地質・地質構造の対応を確認した。



深さ0~5kmの地震の震央分布図
(1997年10月~2022年3月)

(6)能登半島周辺の地震の震央分布と地形及び地質・地質構造の対応(2/3)

- 深さ0～5kmの地震の震央分布と能登半島周辺の地形の対応を下图に示す。
- 能登半島周辺の地形図によれば、能登半島北部の海岸線や低山・丘陵の稜線は北東-南西方向に延びており、低山・丘陵の稜線は北西側に偏在している。一方、敷地が位置する能登半島中部の地形は、標高200m以下の平頂丘陵となっている。2007年能登半島地震の震源域における深さ0～5kmの地震は、能登半島北部に偏在する低山・丘陵の稜線及びその延長方向の一部区間に集中してみられる。



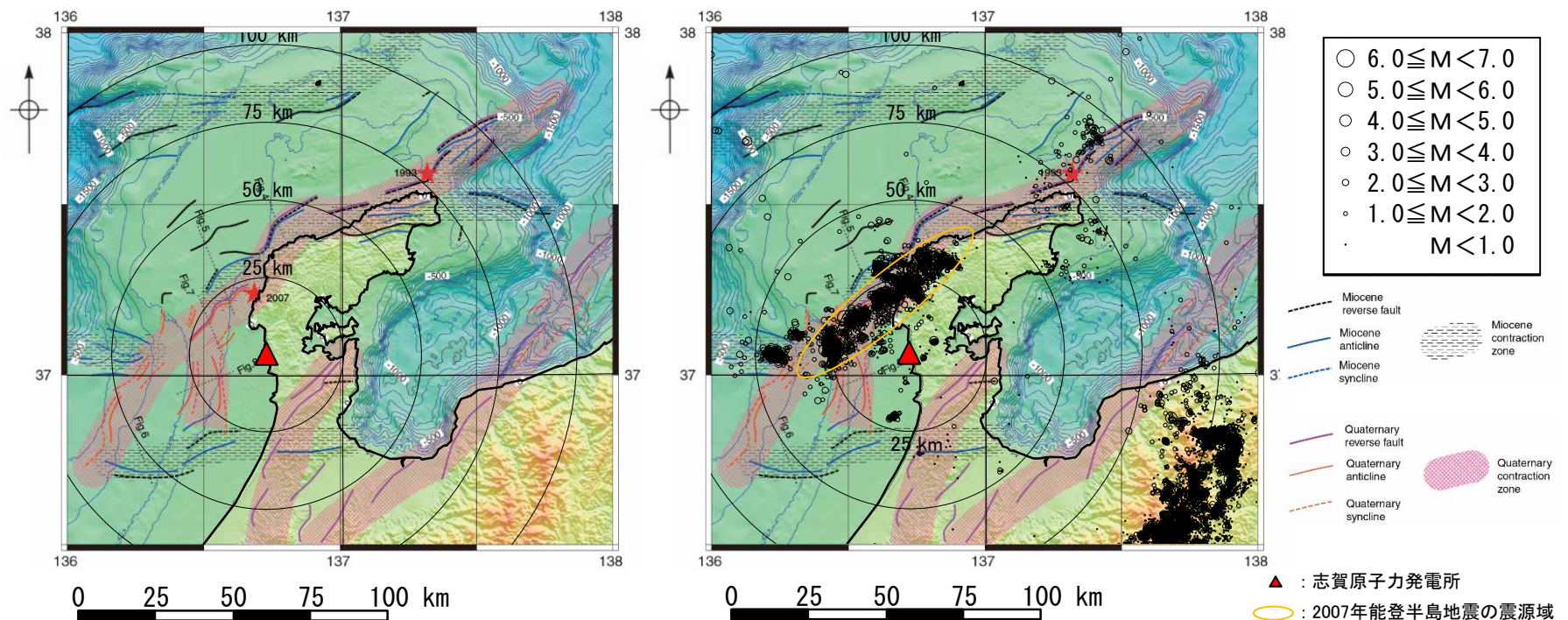
地形図と地震の震央分布図

(左図: 地形図, 右図: 地形図+深さ0～5kmの地震の震央分布図(1997年10月～2022年3月))

※国土地理院地理院地図(電子国土Web)に一部加筆

(6)能登半島周辺の地震の震央分布と地形及び地質・地質構造の対応(3/3)

- 深さ0～5kmの地震の震央分布と能登半島周辺の地質・地質構造の対応を下图に示す。
- 岡村(2007)の地質・地質構造図によれば、3列の第四紀ひずみ集中帯がみられる。2007年能登半島地震の震源域における深さ0～5kmの地震は、これら第四紀ひずみ集中帯のうち、能登半島の北東沖から南西沖まで、北東-南西方向の走向をもつ断層群が断続的に分布する全長約180kmの第四紀ひずみ集中帯の一部区間に集中してみられる。



地質・地質構造図と地震の震央分布図

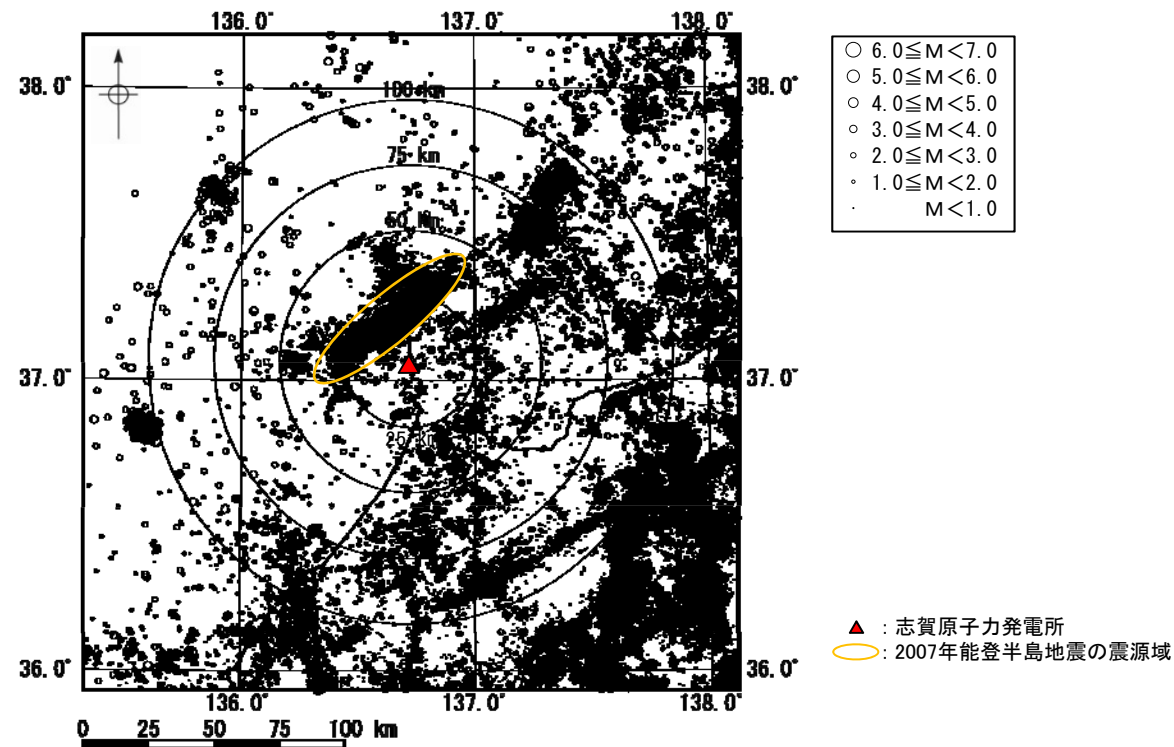
(左図:地質・地質構造図, 右図:地質・地質構造図+深さ0～5kmの地震の震央分布図(1997年10月～2022年3月))

※岡村(2007)に一部加筆

- 能登半島周辺の地震の震央分布と地形及び地質・地質構造の対応を確認した結果、2007年能登半島地震の震源域における震源深さが浅い地震の震央分布は、能登半島北部に偏在する低山・丘陵の稜線及びその延長方向、並びに能登半島の北東沖から南西沖までの第四紀ひずみ集中帯の一部区間と整合的である。

(7) 広域的な地震の震源分布の調査のまとめ

- 能登半島周辺の広域的な地震の震源分布の調査より、2007年能登半島地震の震源域の震源深さは、周辺に比べて浅い傾向が認められることを確認した。
- また、2007年能登半島地震の震源域における震源深さが浅い地震の震央分布は、能登半島北部に偏在する低山・丘陵の稜線及びその延長方向並びに能登半島の北東沖から南西沖までの第四紀ひずみ集中帯の一部区間と整合的であることを確認した。



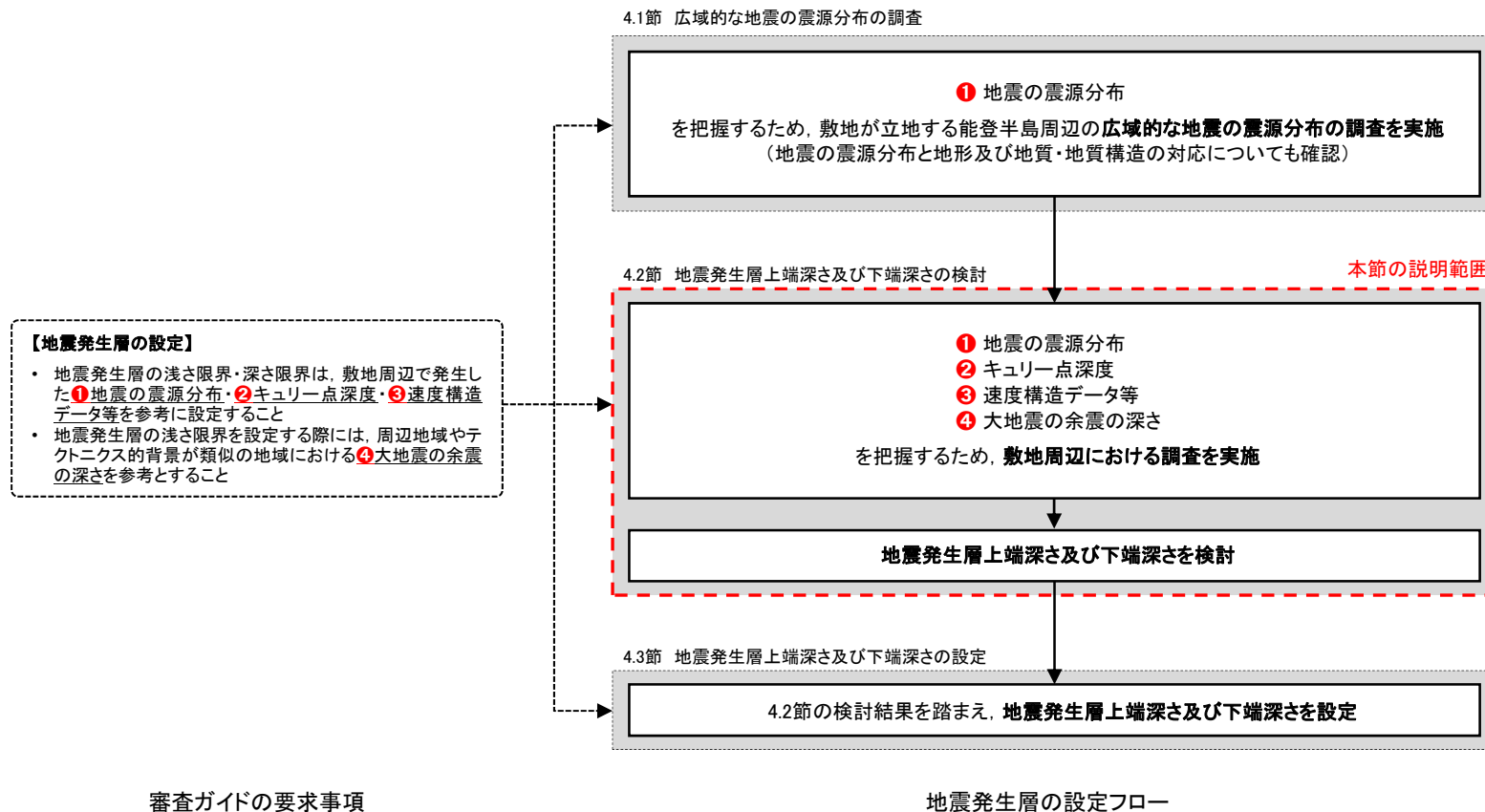
地震の震央分布図
(1997年10月～2022年3月)

- 地震発生層上端深さ及び下端深さの設定(4.3節)では、2007年能登半島地震の震源域の震源深さが周辺に比べて浅い傾向が認められることを考慮して地震発生層上端深さ及び下端深さを設定する。

4.2 地震発生層上端深さ及び下端深さの検討

(1) 検討方法

- 4.2節では、敷地周辺の「**①地震の震源分布**」、「**②キュリー点深度**」、「**③速度構造データ等**」及び「**④大地震の余震の深さ**」を把握するため、調査を実施する。また、敷地周辺の**①～④**を把握した結果を踏まえ、地震発生層上端深さ及び下端深さを検討する。
- 敷地周辺における調査の手法等の概要を次頁に示す。



(2) 調査の手法等の概要

○ 敷地周辺における調査の目的と各調査の対象及び手法を下表に示す。

【調査の目的と各調査の対象及び手法】

調査の目的		対象		手法		詳細説明
		水平方向	深さ方向	種別	内容	
①	地震の震源分布の把握	敷地周辺	上端深さ 下端深さ	気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データに基づく検討	D10%及びD90%を検討する。	P.213～214
				文献調査	D10%及びD90%を確認する。	P.213, P.215
②	キュリー点深度の把握		下端深さ	文献調査	キュリー点深度分布図から、D90%と相関があるキュリー点深度を確認する。	P.226～227
③	速度構造データ等の把握		上端深さ	文献調査	速度構造断面から、P波速度が5.8km/sの層の上端深さを確認する。	P.216～219
				群速度に基づく検討	敷地周辺の微動観測記録による群速度と敷地の地下構造モデルによる理論群速度を比較することで、P波速度が5.8km/sの層の上端深さを検討する。	P.216, P.220
			下端深さ	文献調査	コンラッド面深さの図から、コンラッド面深さを確認する。	P.221～225
④	大地震の余震の深さの把握	上端深さ	文献調査	敷地周辺で発生した2007年能登半島地震について、当該地震の震源域の上端深さに係る知見を整理し、当該地震の震源域の上端深さを総合的に判断する。	P.239～244	

(1) 検討方法

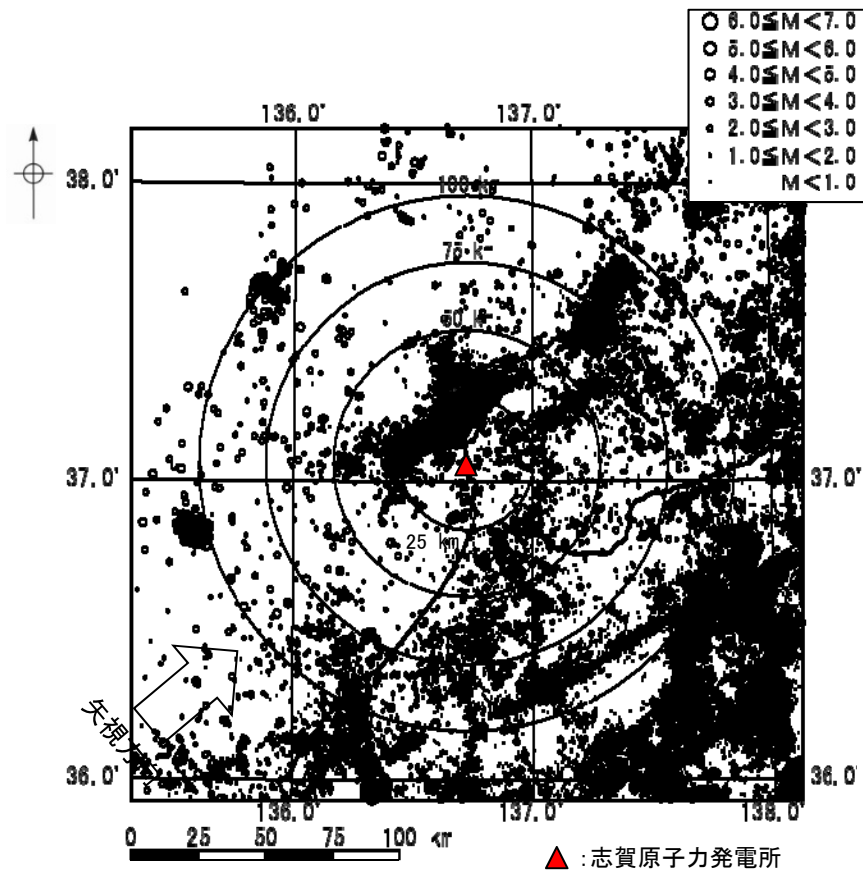
- 敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さを検討するため、地震の震源分布による検討を実施した。
- 下表に示す既往の知見によると、地震数を浅い方から積算して10%及び90%になる深さ(D10%及びD90%)は、地震発生層上端深さ及び下端深さの目安になり得る。
- 地震の震源分布による検討は、気象庁の震源データに基づく検討及び文献調査により行った。
- 気象庁の震源データに基づく検討では、敷地周辺におけるD10%及びD90%を求めた。
- 文献調査では、文献に示されている敷地周辺におけるD10%及びD90%を確認した。

地震発生層とD10%及びD90%に係る既往の知見

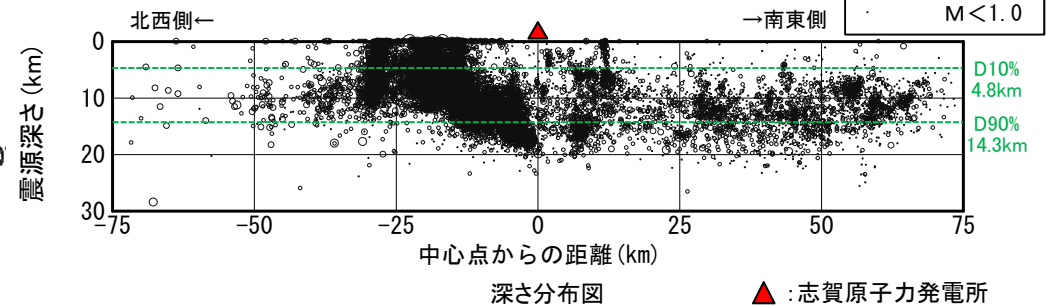
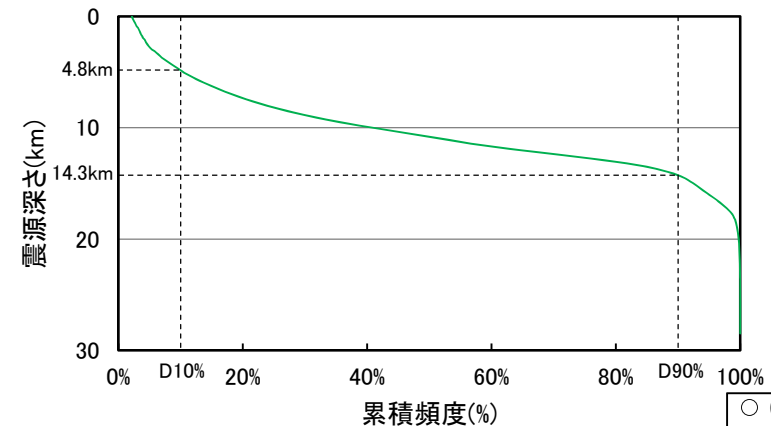
知見	知見の概要
伊藤・中村(1998)	D10%(地震数を浅い方から積算して10%になる深さ)は地震の上限ともいうべきものであるとしている。
伊藤(2002)	地震数を浅い方から積算して、10%、90%になる深さは地震の上限と下限の目安として用いることができるとしている。
原子力安全基盤機構(2004)	D10%は地震発生層上限、D90%は地震発生層下限に対応するとしている。
地震調査研究推進本部(2020)	地震発生層下限および断層モデル上端の深さは微小地震の深さ分布から決めることができるとしている。

(2) 気象庁の震源データに基づく検討

○ 1997年10月から2022年3月までの気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データ(震源深さ30km以浅)を用いた能登半島周辺※のD10%及びD90%は、それぞれ4.8km及び14.3kmとなる。



震央分布図



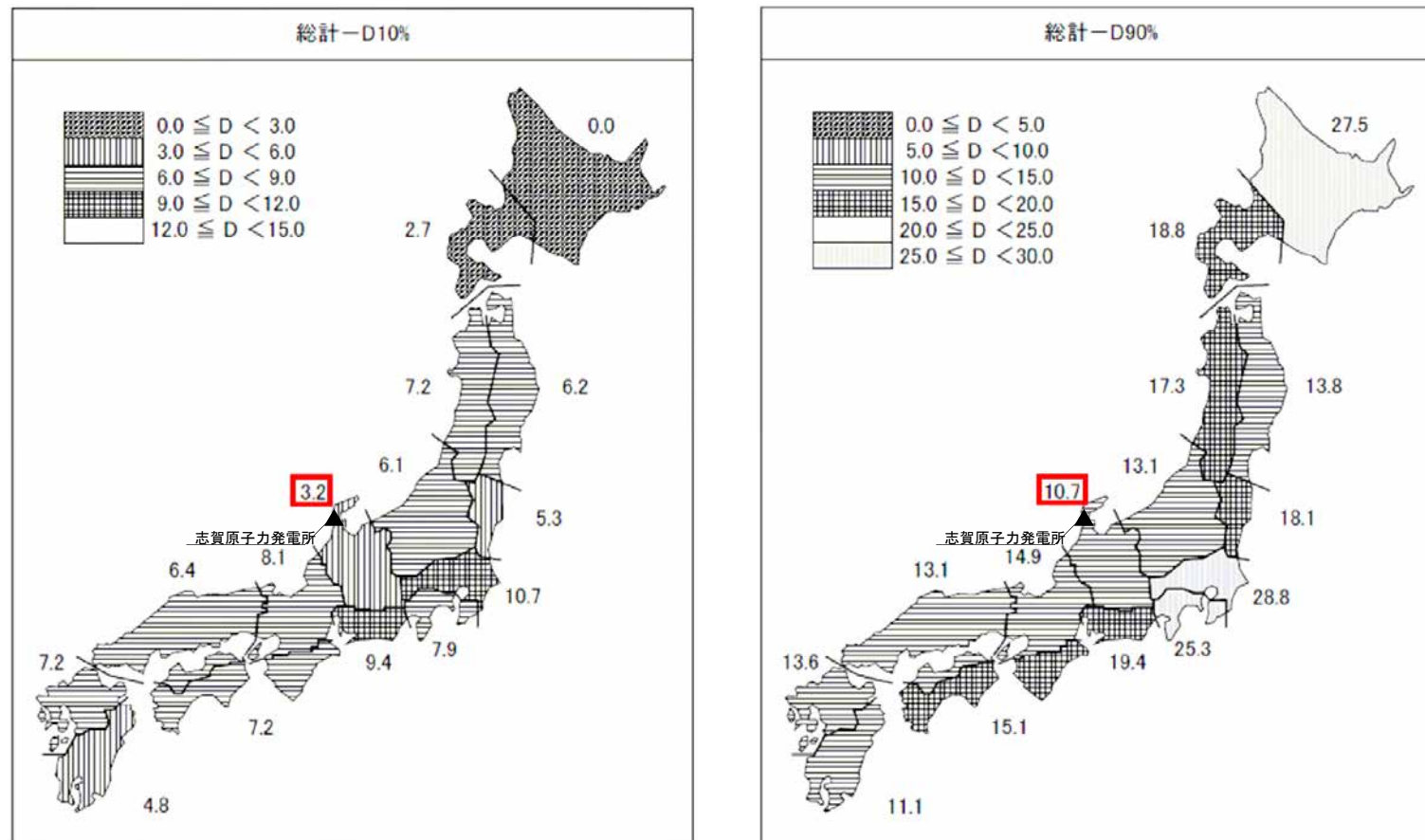
地震の分布(1997年10月～2022年3月)

※ 能登半島周辺の地震の震源深さの傾向を適切に評価するため、能登半島周辺と標高が大きく異なる高標高地域(敷地の南東方向に存在する山岳地形)が含まれない範囲として、敷地から半径75kmの範囲とした。

➤ 気象庁の震源データに基づく検討によれば、敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さは、それぞれ4.8km及び14.3kmであると考えられる。

(3) 原子力安全基盤機構(2004)に基づく検討

- 原子力安全基盤機構(2004)は、全国を15の地震域に区分し地殻内地震の地震発生層上端深さ及び下端深さの検討を行い、それぞれの地震域におけるD10%及びD90%を示している。
- これによると、敷地が位置する地震域では、D10%及びD90%はそれぞれ3.2km及び10.7kmとされている。



原子力安全基盤機構(2004)によるD10%及びD90%

※ 原子力安全基盤機構(2004)に一部加筆

- 原子力安全基盤機構(2004)に基づく検討によれば、敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さは、それぞれ3.2km及び10.7kmであると考えられる。

(1) 検討方法

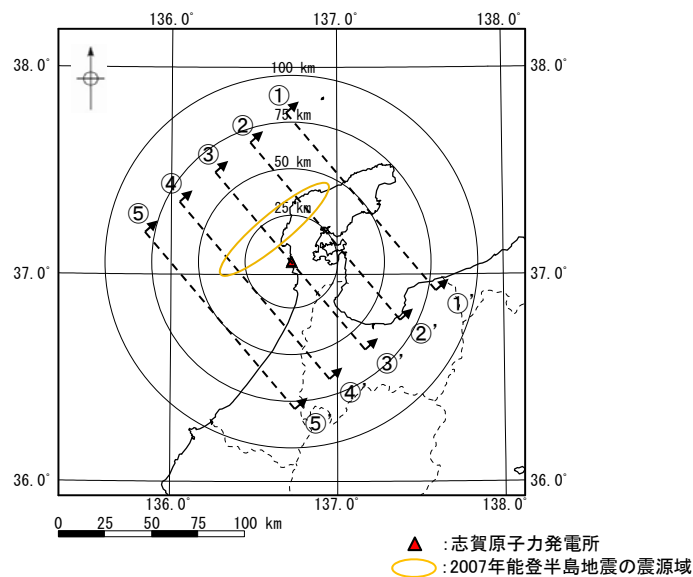
- 敷地周辺の地震発生層上端深さを検討するため、速度構造による検討を実施した。
- 下表に示す入倉・三宅(2001)及び吉井・伊藤(2001)の微小地震とP波速度構造に係る既往の知見によると、P波速度が5.8～6km/sの層の上端深さは地震発生層上端深さの目安となり得る。
- 速度構造による検討は、文献調査及び群速度に基づく検討により行った。
- 文献調査では、文献の速度構造断面から、敷地周辺のP波速度が5.8km/sの層の上端深さを確認した。
- 群速度に基づく検討では、敷地周辺の微動観測記録による群速度と敷地の地下構造モデルによる理論群速度を比較することで、敷地周辺のP波速度が5.8km/sの層の上端深さを検討した。

微小地震とP波速度構造に係る既往の知見

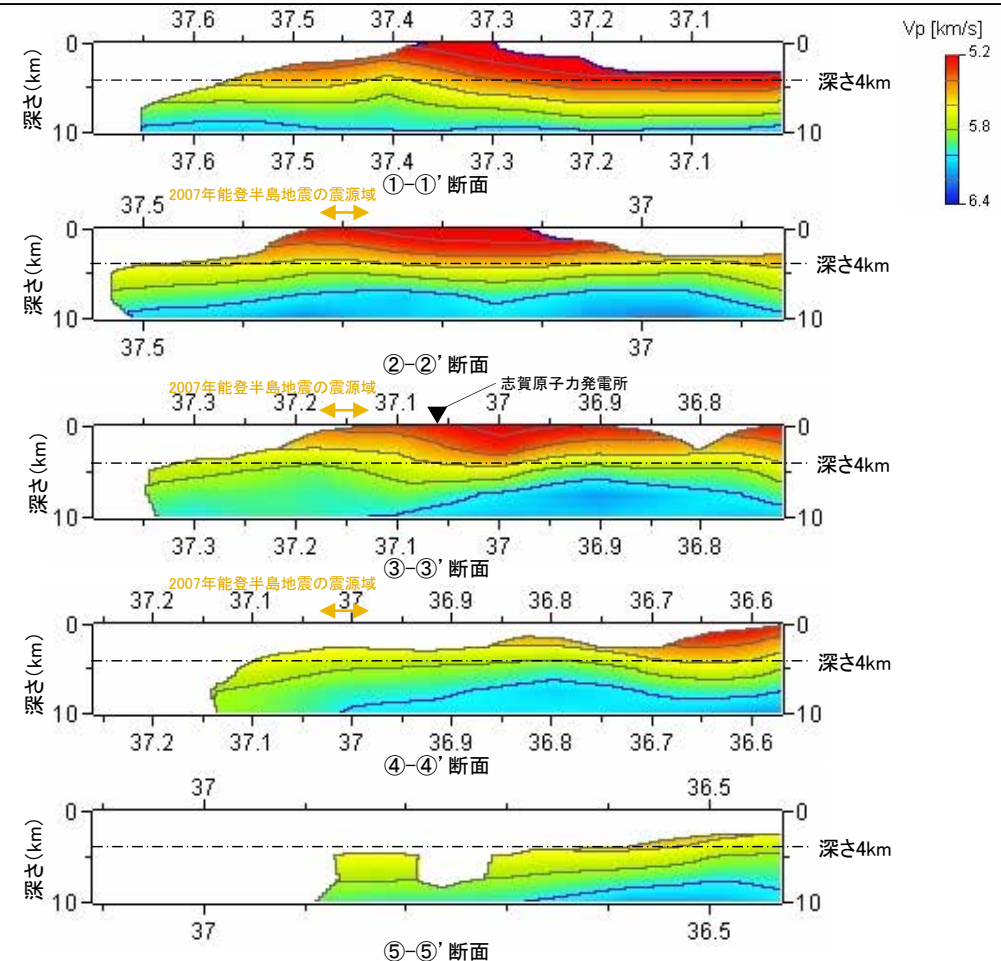
知見	知見の概要
入倉・三宅(2001)	微小地震の浅さ限界はP波速度5.8～5.9km/sの層の上限と良い相関がある。
吉井・伊藤(2001)	近畿地方北部で行われた人工地震探査のデータをもとに、波線追跡法による解析から、詳細な速度構造モデルを得ることができた。得られた速度構造モデルと、地震活動の深さ断面とを比較してみると、地震発生層の上限は速度構造が6km/sとなるところにおおむね一致していることが分かった。

(2) Matsubara et al.(2022)に基づく検討

- Matsubara et al.(2022)(P.78～79)による敷地周辺のP波速度構造断面を確認した。なお、広域的な地震の震源分布の調査(4.1節)において、敷地周辺では2007年能登半島地震の震源域において地震が比較的浅く、概ねN50° Eの走向で集中してみられることを踏まえて、N50° E に直交する断面について確認した。
- P波速度が5.8km/sの層の上端深さは、敷地周辺においては4km程度以深に位置している。また、②-②'断面及び③-③'断面において、2007年能登半島地震の震源域付近ではP波速度が5.8km/sの層の上端深さがやや浅くなる傾向がみられ、広域的な地震の震源分布の調査(4.1節)の結果と整合的である。



速度構造断面位置図



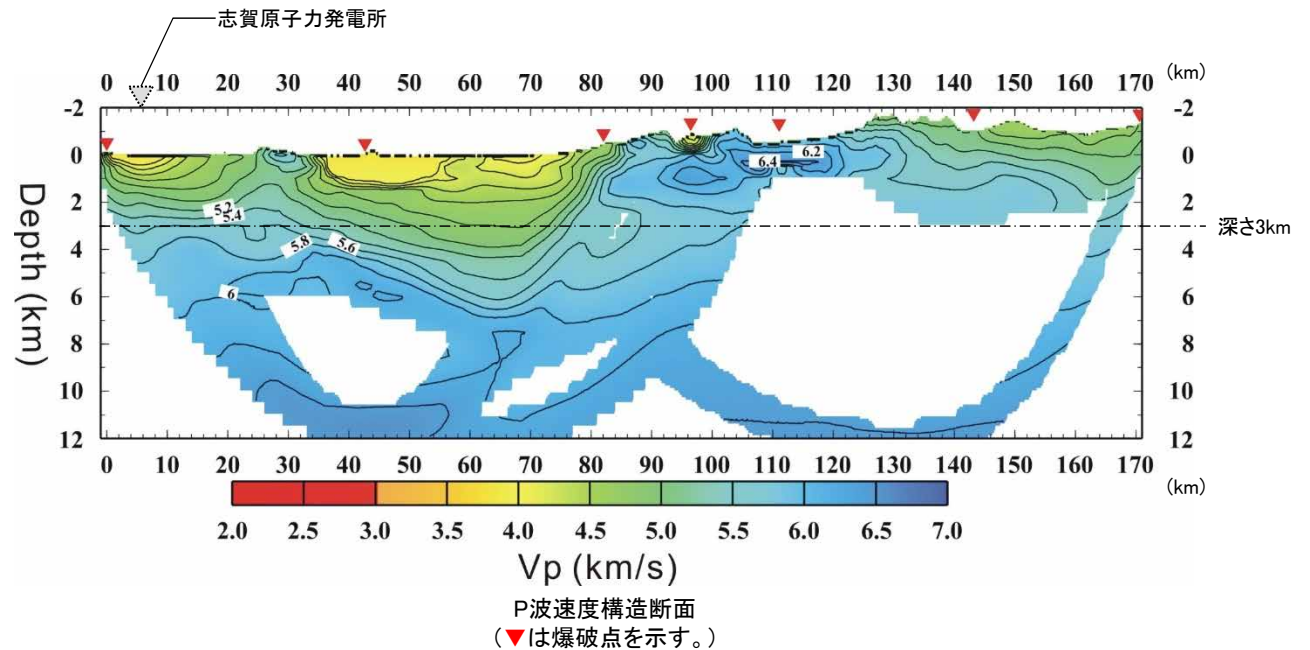
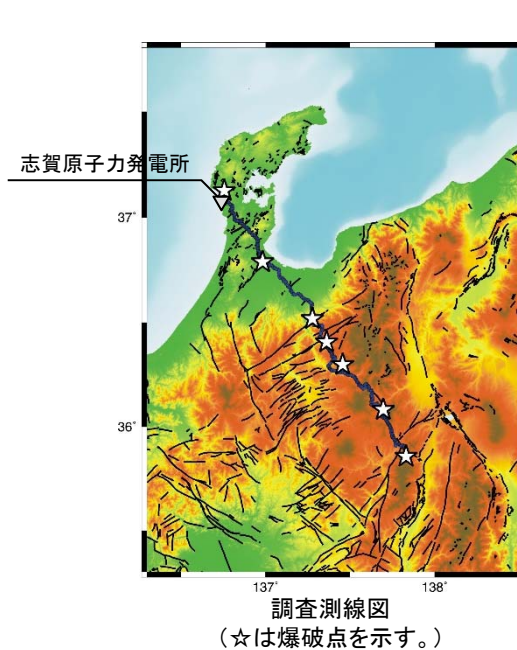
Matsubara et al.(2022)による敷地周辺のP波速度構造断面

※ 防災科学技術研究所のソフトウェアを用いて表示したものに一部加筆

➤ Matsubara et al.(2022)に基づく検討によれば、敷地周辺の地震発生層上端深さは、4km程度以深であると考えられる。

(3) Iidaka et al.(2008)に基づく検討

○ Iidaka et al.(2008) (P.82) のP波速度構造断面によると、P波速度が 5.8km/s の層の上端深さは、敷地周辺においては 3km よりも深いところにある。



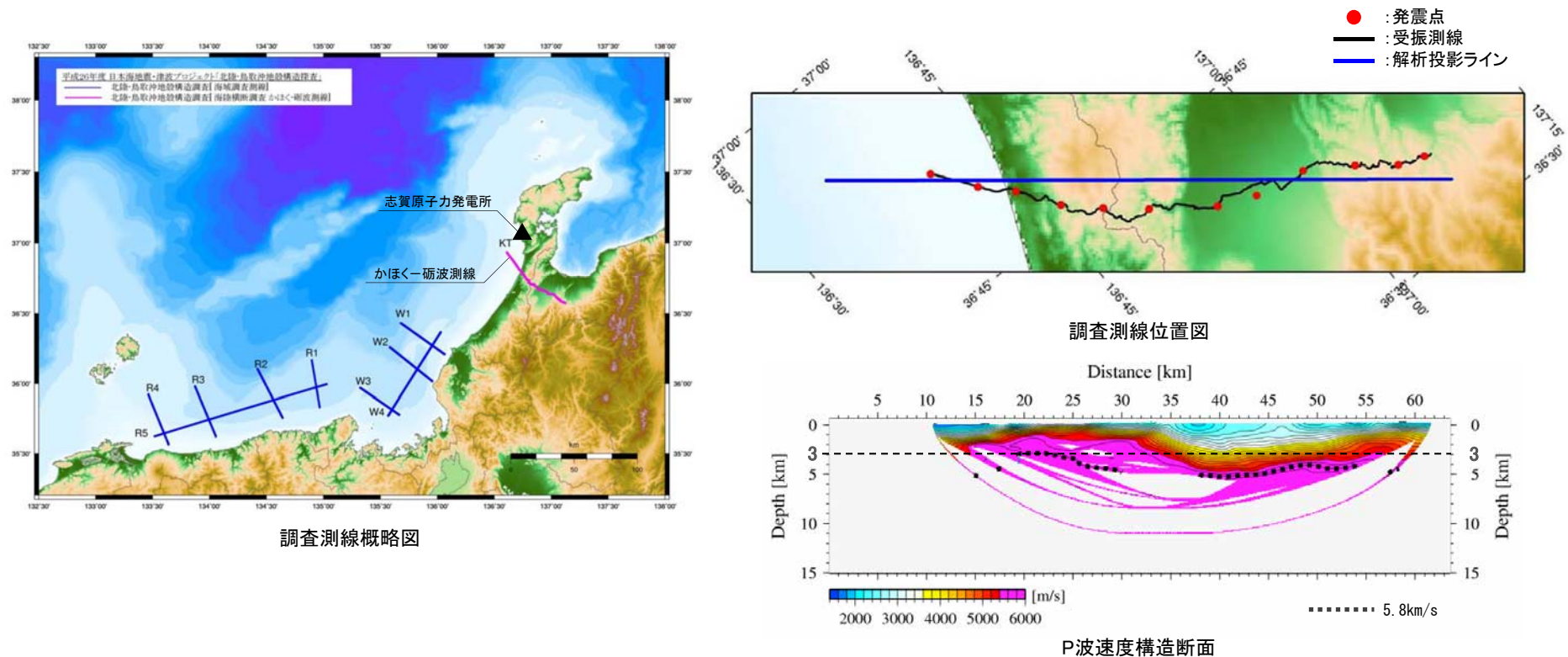
Iidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※Iidaka et al.(2008)に一部加筆

➤ Iidaka et al.(2008)に基づく検討によれば、敷地周辺の地震発生層上端深さは、 3km より深いと考えられる。

(4) 日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)に基づく検討

- 日本海地震・津波調査プロジェクトは、2013年9月から8か年に渡り、日本海の沖合から沿岸域及び陸域にかけての領域でデータを取得し、日本海の津波波源モデルや沿岸・陸域における震源断層モデルを構築するなどの検討を実施している。
- 日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)は、海域は石川県羽咋郡宝達志水町の海岸を基点として北西へ18km、陸域は同基点から富山県富山市八尾町に至る約45kmの測線(かほくー砺波測線)における海陸統合の反射法地震探査を実施している。
- かほくー砺波測線におけるP波速度構造断面によると、P波速度が5.8km/sの層の上端深さは、敷地周辺においては概ね3kmより深い。



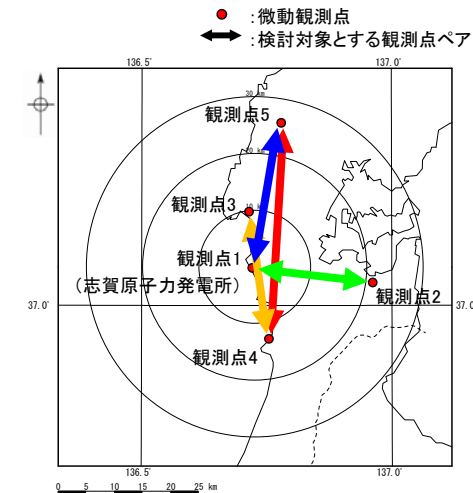
日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)に示される調査測線図及びP波速度構造断面

※日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)に一部加筆

➤ 日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)に基づく検討によれば、敷地周辺の地震発生層上端深さは、3kmより深いと考えられる。

(5) 群速度に基づく検討

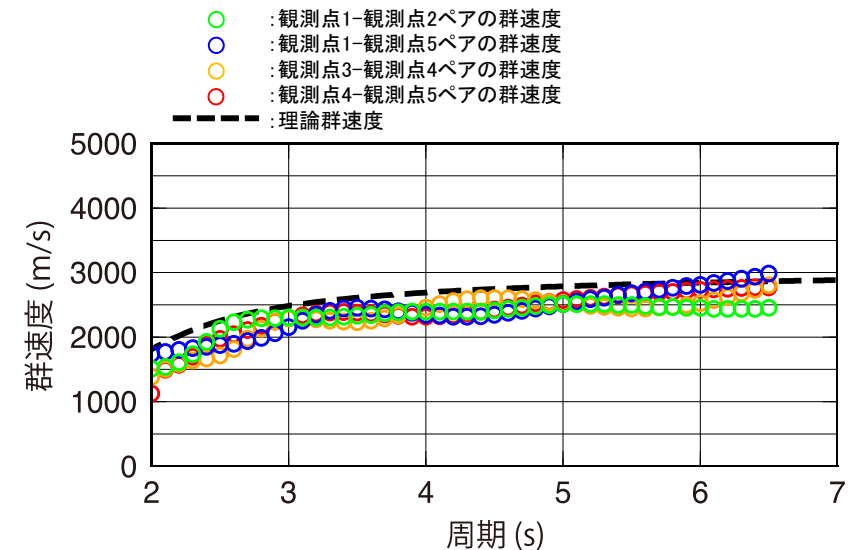
- 敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度(P.92)と敷地において設定した地下構造モデル(P.156)による理論群速度を比較し、敷地周辺におけるP波速度5.8km/sの層の上端深さを検討する。
- まず、敷地において設定した地下構造モデル(左下表)によれば、EL-3kmにP波速度5.6km/sの層の上端深さがあること、地震基盤面(EL-1.19km)以深でP波速度が徐々に増大していることを踏まえると、P波速度5.8km/sの層の上端深さは、敷地においてはEL-3kmよりも深いと考えられる。
- つぎに、群速度の比較(右下図)によれば、敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度(色丸)は、敷地において設定した地下構造モデルによる理論群速度(黒破線)に対してやや小さいものの同程度であることから、敷地周辺では同様な速度構造が広がっているものと考えられる。
- 以上により、敷地周辺におけるP波速度5.8km/sの層の上端深さは、EL-3kmより深いと考えられる。



微動観測点配置図

設定した地下構造モデル

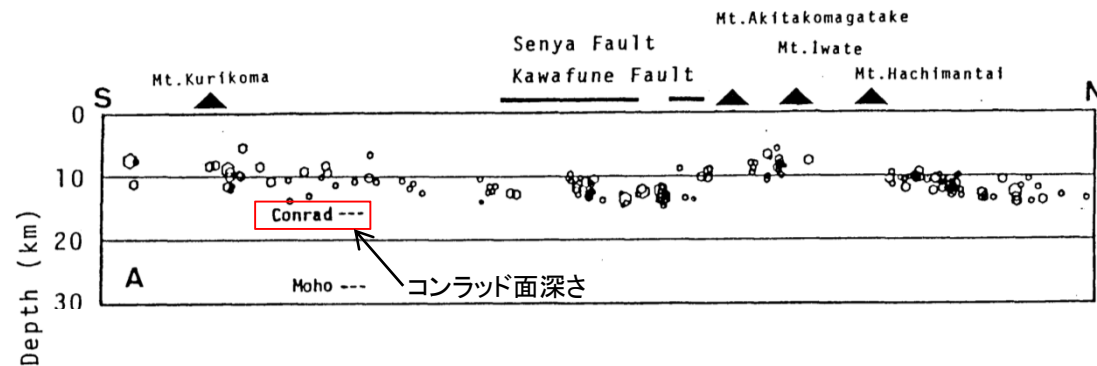
標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
解放基盤表面	-10m	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
	-108.9m	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
地震基盤面	-200m	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
	-690m	1.56	3.26	2.41	1.000	50
	-1.19km	3.16	5.29	2.67	0.250	200
	-1.79km	3.3	5.4	2.7	0.250	200
	-3km	3.5	5.6	2.7	0.250	200
	-5.5km	3.6	6.3	2.7	0.195	270
	-18km	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	-28km	4.4	7.6	3.1	0.100	500

微動観測記録により得られた群速度と
設定した地下構造モデルによる理論群速度の比較

➤ 群速度に基づく検討によれば、敷地周辺の地震発生層上端深さは、3kmより深いと考えられる。

(1) 検討方法

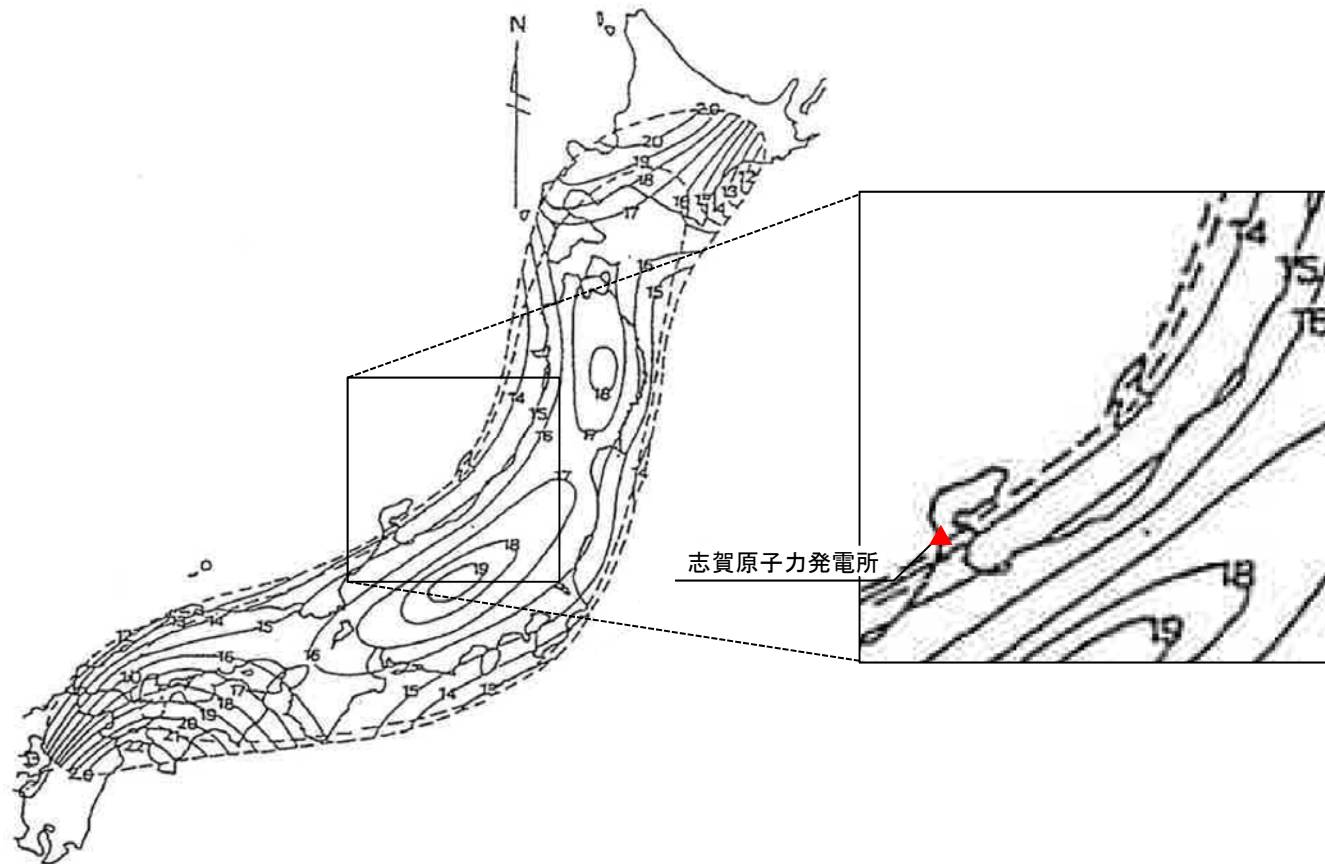
- 敷地周辺の地震発生層下端深さを検討するため、上部地殻と下部地殻の境界であるコンラッド面深さによる検討を実施した。
- 長谷川(1991)では、内陸地殻内地震は上部地殻で発生し、下部地殻ではほとんど発生しないとされていることから、コンラッド面深さは地震発生層下端深さの目安になり得る。
- コンラッド面深さによる検討では、既往の知見によるコンラッド面深さの図から、敷地周辺におけるコンラッド面深さを確認した。



長谷川(1991)に示される微小地震の震源分布とコンラッド面深さの例
※長谷川(1991)に一部加筆

(2) Zhao et al.(1994)に基づく検討

○ Zhao et al.(1994)によるコンラッド面深さによると、敷地周辺では14km程度とされている。



Zhao et al.(1994)によるコンラッド面深さ

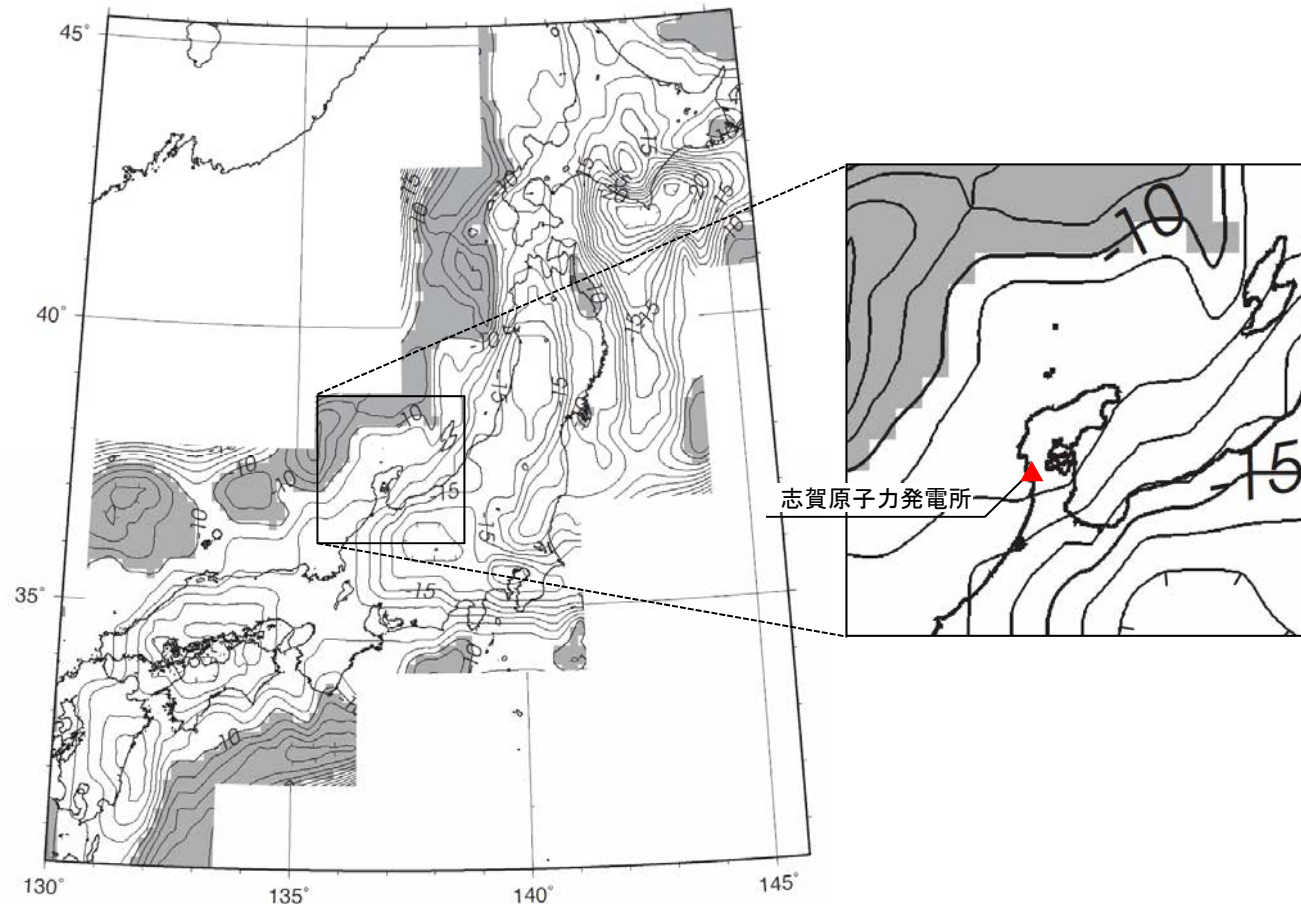
※Zhao et al.(1994)に一部加筆

※ 実線は深度コンターを、破線は推定した深度の標準誤差を示す。外側の破線は標準誤差が2km以内、内側の破線は標準誤差が1km以内の領域を囲んでいる。

➤ Zhao et al.(1994)に基づく検討によれば、地震発生層下端深さは、敷地周辺では14km程度であると考えられる。

(3) 河野ほか(2009)に基づく検討

- 河野ほか(2009)は、重力異常データを用いて日本列島周辺の三次元的地殻構造を推定している。
- 河野ほか(2009)によるコンラッド面深さによると、敷地周辺では12km程度とされている。



河野ほか(2009)によるコンラッド面深さ

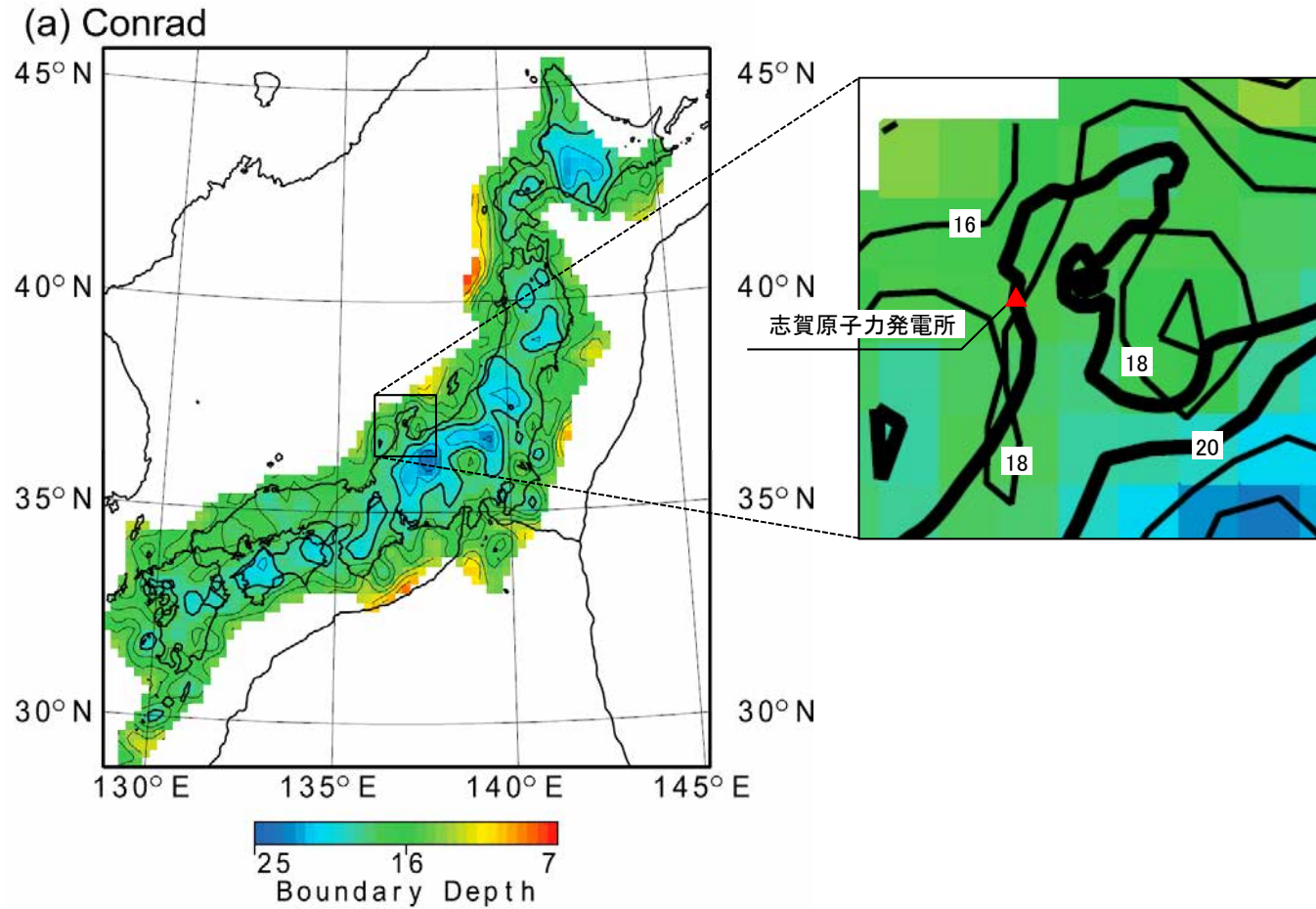
※河野ほか(2009)に一部加筆

※ 灰色箇所は10kmより浅い領域を示す。

➤ 河野ほか(2009)に基づく検討によれば、地震発生層下端深さは、敷地周辺では12km程度であると考えられる。

(4) Katsumata(2010)に基づく検討

- Katsumata(2010)は、地震波トモグラフィにより日本列島の地殻構造を推定している。
- Katsumata(2010)によるコンラッド面深さによると、敷地周辺では18km程度とされている。



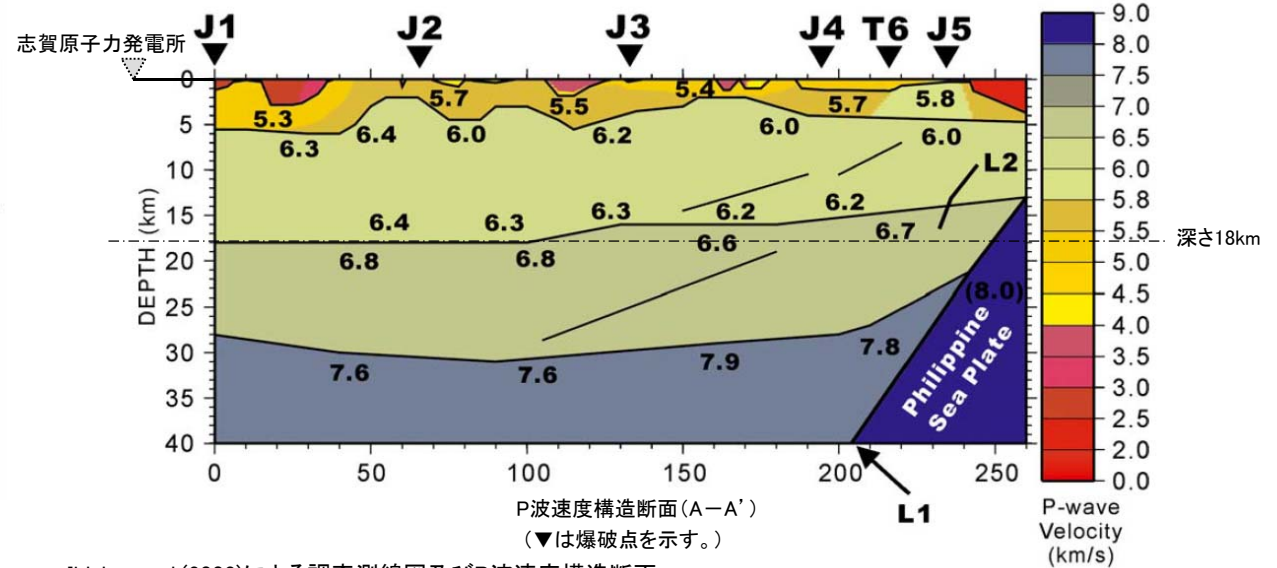
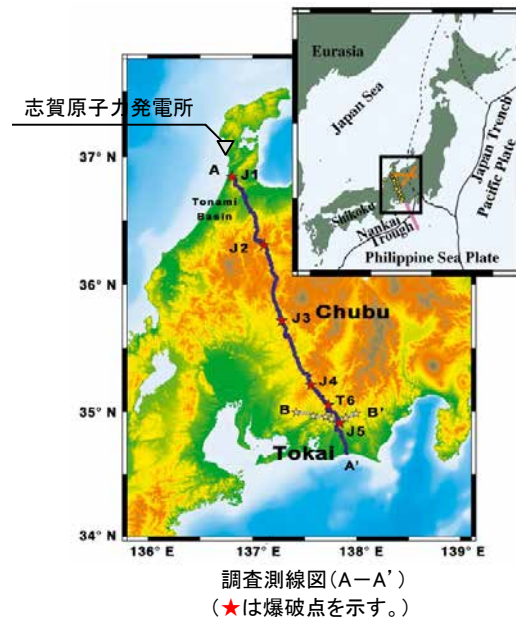
※ コンター間隔は2km, 太い等高線は深さ20kmを示す。

※Katsumata(2010)に一部加筆

➤ Katsumata(2010)に基づく検討によれば、地震発生層下端深さは、敷地周辺では18km程度であると考えられる。

(5) Iidaka et al.(2003)に基づく検討

○ Iidaka et al.(2003) (P.81)によると, 上部地殻の下部のP波速度は6.0~6.4km/s, 下部地殻のP波速度は6.6~6.8km/sとされ, 上部地殻と下部地殻の境界であるコンラッド面深さは, 敷地周辺では18km程度である。



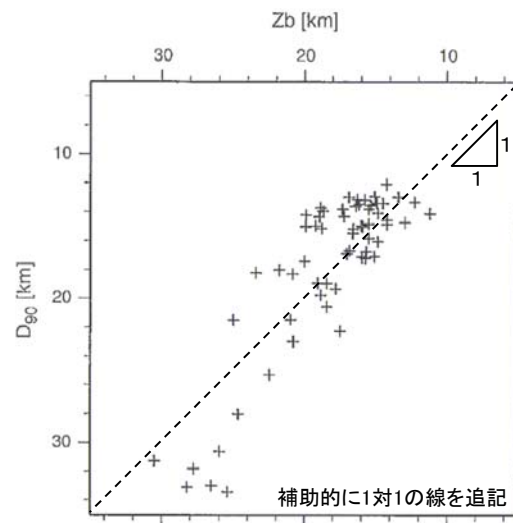
Iidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆

➤ Iidaka et al.(2003)に基づく検討によれば, 地震発生層下端深さは, 敷地周辺では18km程度であると考えられる。

(1) 検討方法

- 敷地周辺の地震発生層下端深さを検討するため、キュリー一点深度による検討を実施した。
- Tanaka and Ishikawa(2005)は、D90%とキュリー一点深度の間には相関があるとしている。また、伊藤(2002)はD90%が地震の下限の目安として用いることができるとしていること等から、キュリー一点深度は地震発生層の下端深さの目安になり得る。
- キュリー一点深度による検討では、既往の知見によるキュリー一点深度分布図から、敷地周辺におけるD90%と相関があるキュリー一点深度を確認した。

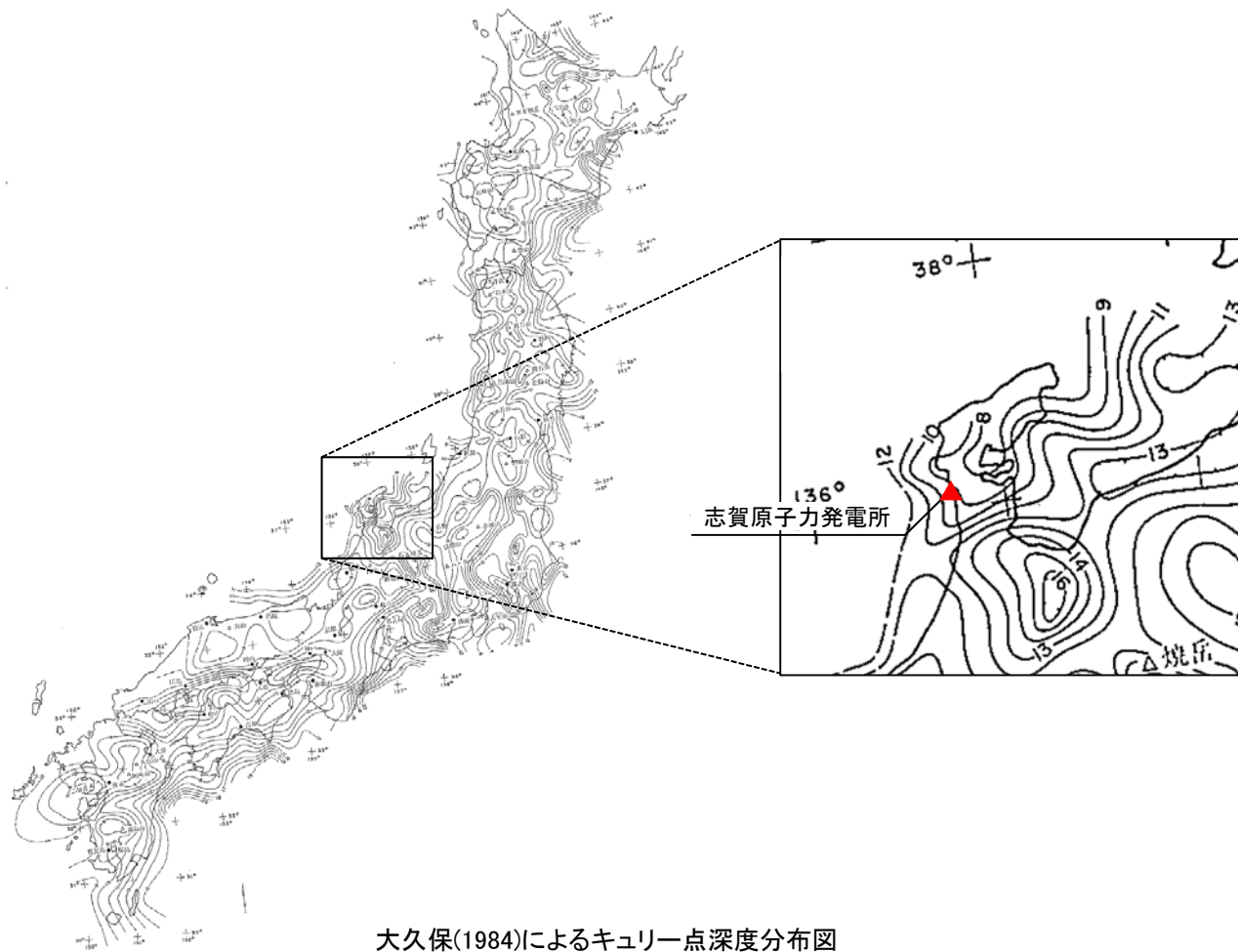


Tanaka and Ishikawa (2005)による
キュリー一点深度 (Zb) とD90%の関係

※Tanaka and Ishikawa (2005)に一部加筆

(2) 大久保(1984)に基づく検討

○ 大久保(1984)による日本列島のキュリー点深度分布図によると、敷地周辺では9～10km程度であり、D90%は9～10km程度となる。



※大久保(1984)に一部加筆

➤ 大久保(1984)に基づく検討によれば、地震発生層下端深さは、敷地周辺では9～10km程度であると考えられる。

(1) 検討方法

- 前項(4.2.1項～4.2.4項)までに検討した敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さの検討結果を左下表に示す。
- ここでは、地震調査研究推進本部により評価された敷地周辺の主要活断層帯を対象に、地震調査研究推進本部の知見における地震発生層上端深さ及び下端深さの設定値を整理し、前項までに検討した敷地周辺の上端深さ及び下端深さとの整合性を確認する。
- 整合性を確認した結果、前項までに検討した上端深さ及び下端深さの範囲から外れる場合は、断層帯周辺における最新の地震の震源分布(気象庁の震源データ)や地盤構造に係る詳細な知見についても整理し、総合的に判断する。

- 敷地周辺の主要活断層帯について、地震調査研究推進本部の知見における地震発生層上端深さ及び下端深さの設定値を右下表に示す。
- 「邑知潟断層帯」の上端深さ(2km)及び「砺波平野断層帯・呉羽山断層帯」の下端深さ(20km)は、それぞれ、前項までに検討した上端深さ(3～4.8km)及び下端深さ(9～18km)の範囲から外れることから、これら断層帯については、断層帯周辺における最新の地震の震源分布(気象庁の震源データ)や地盤構造に係る詳細な知見についても整理し、総合的に判断した。

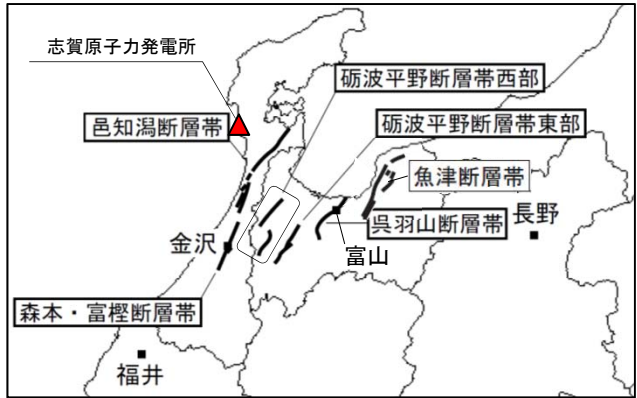
前項までに検討した
敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さの検討結果

検討項目		検討結果	
		上端深さ	下端深さ
地震の震源分布	気象庁の震源データ [D10%, D90%]	4.8km	14.3km
	原子力安全基盤機構(2004) [D10%, D90%]	3.2km	10.7km
速度構造	Matsubara et al.(2022)	4km程度以深	*
	Iidaka et al.(2008)	3kmより深い	*
	日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)	3kmより深い	*
	群速度	3kmより深い	*
コンラッド面深さ	Zhao et al.(1994)	*	14km程度
	河野ほか(2009)	*	12km程度
	Katsumata(2010)	*	18km程度
	Iidaka et al.(2003)	*	18km程度
キュリー点深度	大久保(1984)	*	9～10km程度
検討結果から推定される地震発生層		3～4.8km	9～18km

* : 検討対象外

地震調査研究推進本部の知見における
地震発生層上端深さ及び下端深さの設定値

対象断層帯	知見の概要	設定値	
		上端深さ	下端深さ
邑知潟断層帯	・全国地震動予測地図2014年版によれば、地震発生層を深さ2～18kmと設定しており、上端深さはS波速度(地震基盤深さ)を参考に設定している。	2km	18km
砺波平野断層帯 ・呉羽山断層帯	・強震動評価(2004年3月)によれば、微小地震の深さ分布及び地盤構造の評価結果から、地震発生層を深さ4～20kmと設定している。	4km	20km
森本・富樫断層帯	・強震動評価(2003年3月)によれば、微小地震分布及び地盤評価の結果から、地震発生層を深さ4～18kmと設定している。	4km	18km
魚津断層帯	・全国地震動予測地図2014年版によれば、地震発生層を深さ3～18kmと設定しており、上端深さは微小地震の発生及びS波速度(地震基盤深さ)を参考に設定している。	3km	18km



※ 地震調査研究推進本部の知見は、強震動評価の報告書とし、強震動評価が実施されていない場合は全国地震動予測地図とした。

敷地周辺の主要活断層帯
の概略位置図

※ 地震調査研究推進本部
(2007, 2008)をもとに作成

(2) 邑知潟断層帯に係る知見に基づく検討 ー地震調査研究推進本部(2014)ー

- 地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図2014年版*によれば、邑知潟断層帯の地震発生層を深さ2～18kmと設定しており、上端深さはS波速度(地震基盤深さ)を参考に設定している。

* 最新の全国地震動予測地図2020年版に示される強震動予測のための断層モデルパラメータは、2014年版提示モデルとされていることから、ここでは全国地震動予測地図2014年版を参照している。

強震動予測のための断層モデルのパラメータ

断層パラメータ	設定方法	想定邑知潟断層帯地震
断層帯原点	長期評価による	北緯36° 42′
活断層長さ L		東経136° 44′
気象庁マグニチュード M_{JMA}		44 km
地震モーメント M_0		7.6
モーメントマグニチュード M_w	$\log M_0 = 1.17 M_{JMA} + 10.72$	3.80E+19 Nm
断層モデル長さ L_{model}	$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$	7.0
断層モデル幅 W_{model}	地中の断層モデル原点位置	北緯36° 40′ 28″
断層モデル面積 S_{model}		東経136° 45′ 30″
断層モデル上端深さ	S波速度を参考に設定	2 km
断層モデル傾斜角 θ	ルールに従い設定	46 km
断層モデル傾斜角 δ	ルールに従い設定	18 km
断層モデル傾斜角 γ	ルールに従い設定	828 km ²
走向 θ	長期評価の原点を結ぶ方向	N 35.7° E
傾斜角 δ	約30° 南東傾斜(深さ200m以浅)	30°
すべり角 γ	南東側隆起の逆断層	90°
静的応力降下量 $\Delta\sigma$	$\Delta\sigma = 7 / 16 \cdot M_0 / R^3$	3.9 MPa
平均すべり量 D	$D = M_0 / (\mu S_{model})$	1.5 m
剛性率 μ	$\mu = \rho \beta^2$	3.12E+10 N/m ²
密度 ρ	震源における密度	2700.0 kg/m ³
S波速度 β	震源におけるS波速度	3.4 km/s
破壊伝播速度 V_r	$V_r = 0.72 \cdot \beta$ (Geller(1976)より)	2.4 km/s
短周期レベル	$A = 2.46 \cdot 10^{17} \cdot M_0^{1/3}$	1.78E+19 N・m/s ²

※地震調査研究推進本部(2014)に一部加筆

5.3.1 活断層で発生する地震

5.3.1.1 主要活断層帯で発生する固有地震

④断層面の諸元の設定

- v) 断層上端深さは、強震動評価用の深部地盤モデルにおける地震基盤の深さを参考に、断層下端深さは、微小地震の震源深さに基づく地震発生層の下限深さを参考にそれぞれ設定。

断層面の諸元の設定

※地震調査研究推進本部(2014)に一部加筆

地震諸元

コード	断層名称	断層面のずれの向き		M_s	断層長さ	断層面の幅	断層面の傾斜角	地震発生層の深さ
5501	邑知潟断層帯	南東側隆起の逆断層	長期評価	7.6程度	約44km	不明	約30度 南東傾斜 (200m以浅)	下限 約20km
			モデル化	M_w 7.0	46km	18km	南東傾斜 30度	2~18km

※地震調査研究推進本部(2014)に一部加筆

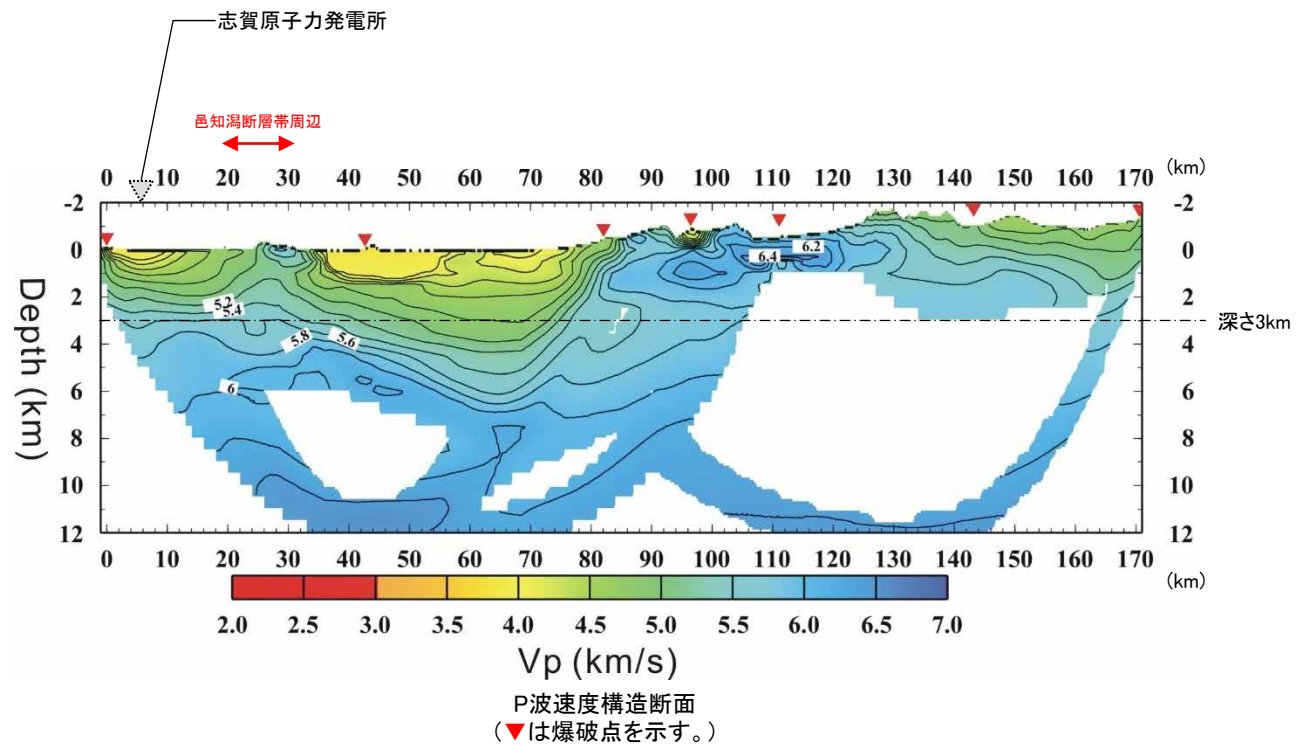
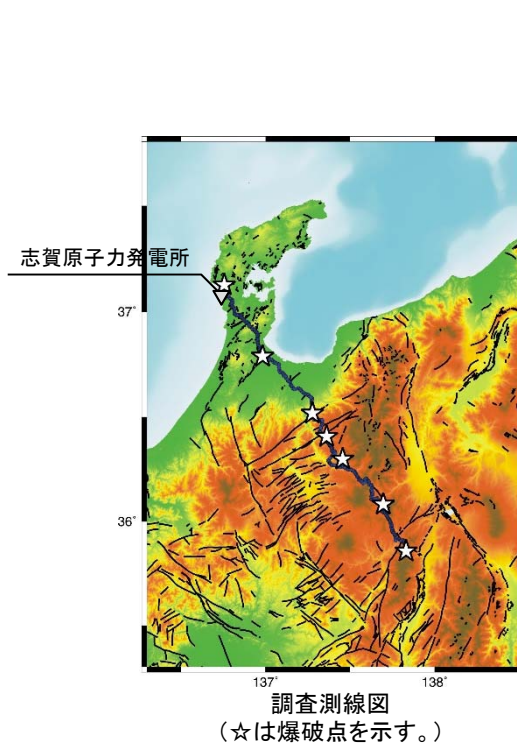
邑知潟断層帯の上端深さ(2km)は、前項までに検討した敷地周辺の上端深さ(3～4.8km)の範囲から外れることから、邑知潟断層帯周辺における最新の地震の震源分布(気象庁の震源データ)及び地盤構造に係る詳細な知見(Iidaka et al.(2008))についても整理する(P.230～231)。

-

※ D10%及びD90%の検討範囲は、地震調査研究推進本部による森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価における微小地震分布の検討範囲(P.235左上図)を参考に設定した。

(2) 邑知潟断層帯に係る知見に基づく検討 —Iidaka et al.(2008)—

- Iidaka et al.(2008) (P.82)のP波速度構造断面によると、邑知潟断層帯周辺の地表付近においてP波速度が周辺に比べて大きい傾向が認められるものの、P波速度が5.8km/sの層の上端深さは3kmよりも深いところに位置している。



Iidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※Iidaka et al.(2008)に一部加筆

(3) 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯に係る知見に基づく検討 ー地震調査研究推進本部(2004)ー

- 地震調査研究推進本部の砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震を想定した強震動評価(2004年3月)によれば、微小地震の深さ分布及び地盤構造の評価結果から、地震発生層を深さ4～20kmと設定している。

震源パラメーター一覧

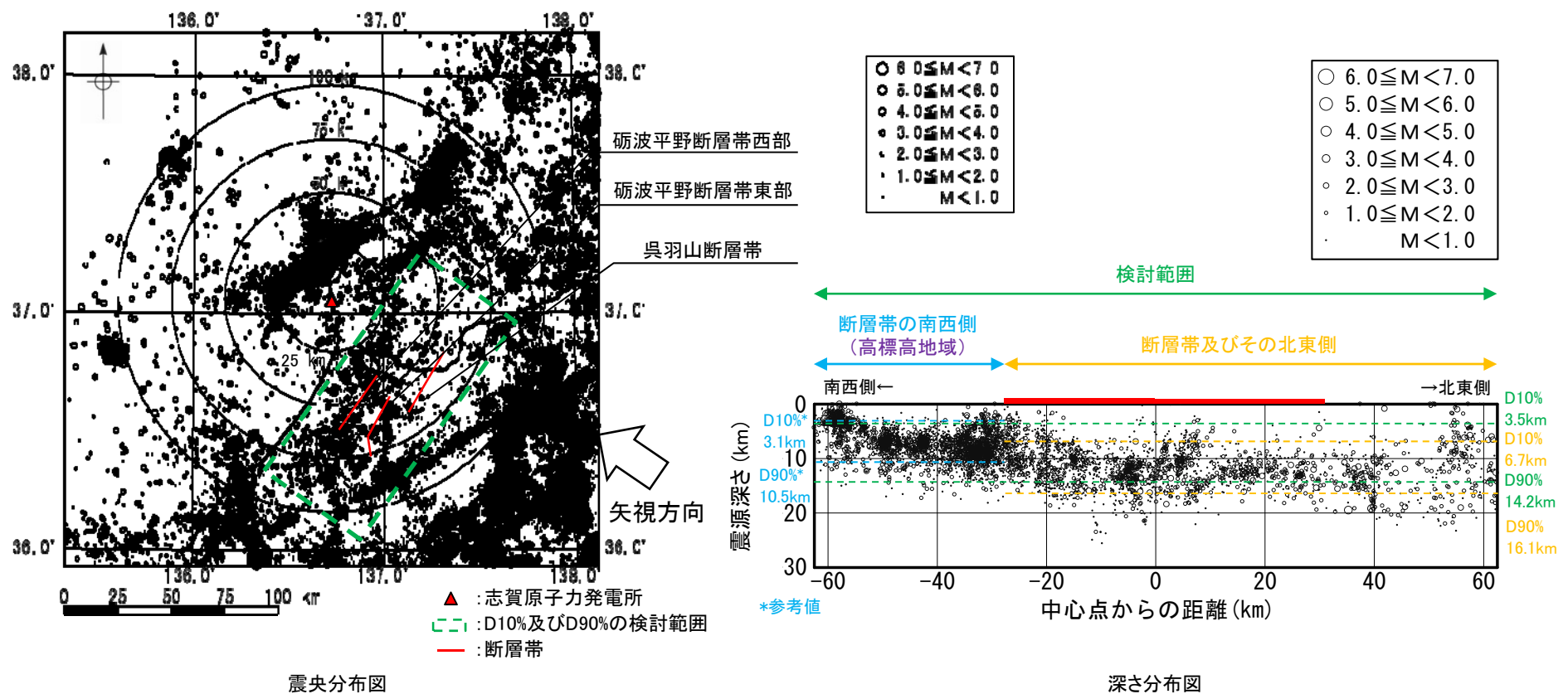
巨視的震源特性	断層帯 (ケース)	砺波平野断層帯東部		砺波平野断層帯西部	呉羽山断層帯	単位		
		アスベリティ1つ	アスベリティ2つ					
	断層総面積	S	552	572	660	[km ²]		
	地震モーメント	M0	1.7E+19	1.8E+19	2.4E+19	[Nm]		
	地震規模	Mw	6.8	6.8	6.9			
	短周期レベル	A	1.4E+19	1.4E+19	1.5E+19	[Nm/s ²]		
	基準点の位置		(北端)～(屈曲点)～(南端)	(北端)～(南端)	(延長北端)～(南端)			
	基準点の北緯		36° 39' ～36° 29' ～36° 24'	36° 45' ～36° 31'	36° 50' ～36° 35'			
	基準点の東経		137° 02' ～136° 55' ～136° 56'	136° 57' ～136° 50'	137° 19' ～137° 08'			
	走向	strike	(主) 高清水断層N30° E: (副) 城端ー上梨断層N20° W		N22° W	N30° E		
傾斜角	dip	(主) 45° E		45° W	45° W			
平均滑り量	D	95		98	114	[cm]		
滑り方向		東側隆起の逆断層		西側隆起の逆断層	西側隆起の逆断層			
地震発生層深さ	dep	4～20		4～20	4～20	[km]		
断層面の長さ	L	地表30km (高清水断層22km: 城端ー上梨断層8km)		地表約26km	地表約30km	[km]		
断層面の幅	W	22.6		22.6	22.6	[km]		
断層面積	S	552		572	660	[km ²]		
微視的震源特性	アスベリティ1	地震モーメント	M0a	7.4E+18	4.9E+18	8.1E+18	1.2E+19	[Nm]
		面積	Sa	120	80	127	162	[km ²]
		平均滑り量	Da	190	190	197	227	[cm]
		静的応力降下量	Δσa	15	15	15	14	[MPa]
		短周期レベル	A	1.4E+19	1.4E+19	1.4E+19	1.5E+19	[Nm/s ²]
	アスベリティ2	地震モーメント	M0a	-	2.5E+18	-	-	[Nm]
		面積	Sa	-	40	-	-	[km ²]
		平均滑り量	Da	-	190	-	-	[cm]
		静的応力降下量	Δσa	-	15	-	-	[MPa]
		短周期レベル	A	-	1.4E+19	-	-	[Nm/s ²]
背景領域	地震モーメント	M0b	9.6E+18	9.6E+18	1.0E+19	1.2E+19	[Nm]	
	面積	Sb	432	432	445	498	[km ²]	
	平均滑り量	Db	69	69	70	77	[cm]	
	実効応力	Σσb	2.6	2.6	2.7	2.8	[MPa]	
	アスベリティ位置		南		南	南		
その他の震源特性	アスベリティ深さ		中		中	中		
	破壊開始点の深さ		中下		中下	中下		
	破壊様式		同心円上					
	破壊伝播速度		2.5 (β=3.46の72%)				[km/s]	
	Fmax		6				[Hz]	
	震源時間関数		中村・宮武(2000)による					

※地震調査研究推進本部(2004)に一部加筆

・ 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の下端深さ(20km)は、前項までに検討した敷地周辺の下端深さ(9～18km)の範囲から外れることから、砺波平野断層帯・呉羽山断層帯周辺における最新の地震の震源分布(気象庁の震源データ)及び地盤構造に係る詳細な知見(Iidaka et al.(2003))についても整理する(P.233～234)。

(3) 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯に係る知見に基づく検討 ― 当社による気象庁の震源データに基づく検討 ―

- 1997年10月から2022年3月までの気象庁「地震月報(カタログ編)」の震源データ(震源深さ30km以浅)を用いて、砺波平野断層帯・呉羽山断層帯周辺の地震の震源分布を確認した。
- 地震の深さ分布図によると、地震の震源は概ね深さ0~20kmに分布しており、検討範囲※のD10%及びD90%は、それぞれ3.5km及び14.2kmとなる。
- しかし、検討範囲のD10%及びD90%は、当該断層帯の分布域と標高が大きく異なる高標高地域(「断層帯の南西側」)に存在する山岳地形)を含むことから、当該断層帯の震源深さの傾向を適切に評価していないと考えられる。
- したがって、当該断層帯の震源深さの傾向を適切に評価するため、検討範囲のうち「断層帯の南西側」を除いた「断層帯及びその北東側」の範囲におけるD10%及びD90%についても確認した。この結果、「断層帯及びその北東側」のD10%及びD90%はそれぞれ6.7km及び16.1kmとなる。

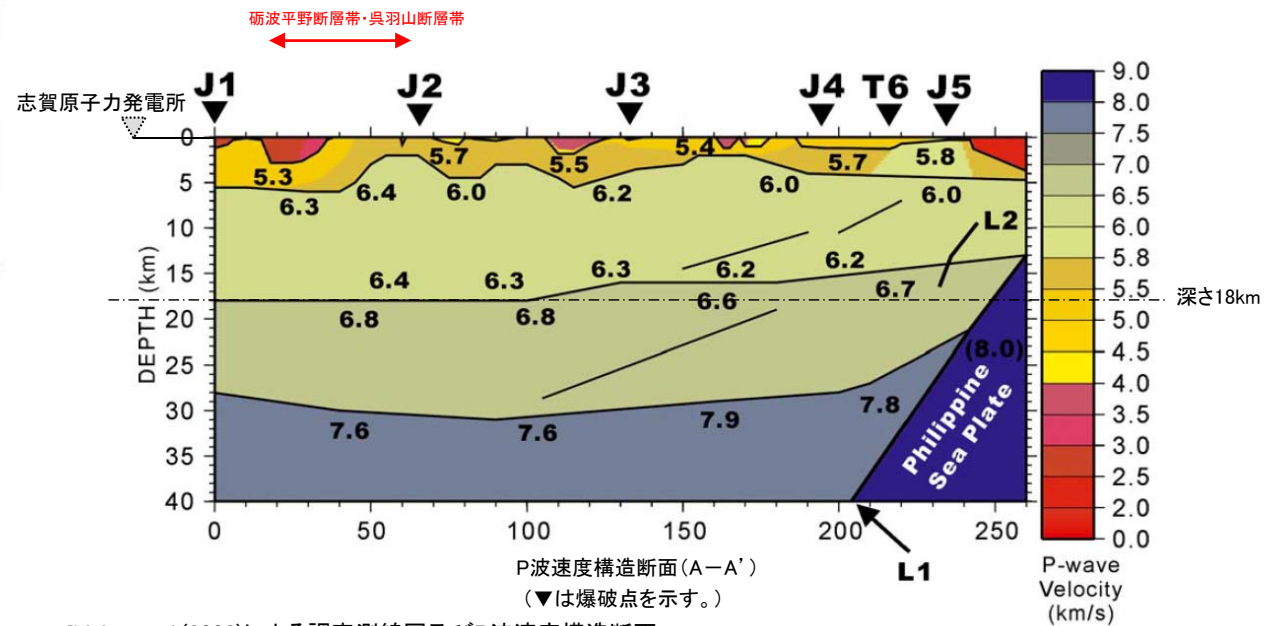
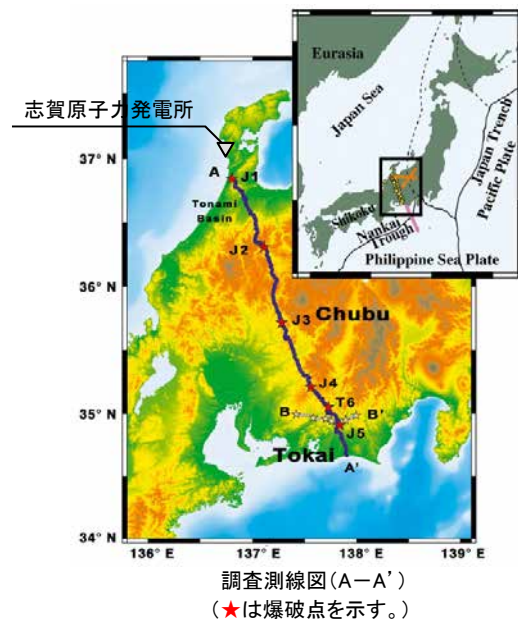


地震の分布(1997年10月~2022年3月)

※ D10%及びD90%の検討範囲は、地震調査研究推進本部による森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価における微小地震分布の検討範囲(P.235左上図)を参考に設定した。

(3) 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯に係る知見に基づく検討 —Iidaka et al.(2003)—

○ Iidaka et al.(2003) (P.81)によると、上部地殻の下部のP波速度は6.0～6.4km/s、下部地殻のP波速度は6.6～6.8km/sとされ、上部地殻と下部地殻の境界であるコンラッド面深さは、砺波平野断層帯・呉羽山断層帯周辺では18km程度である。

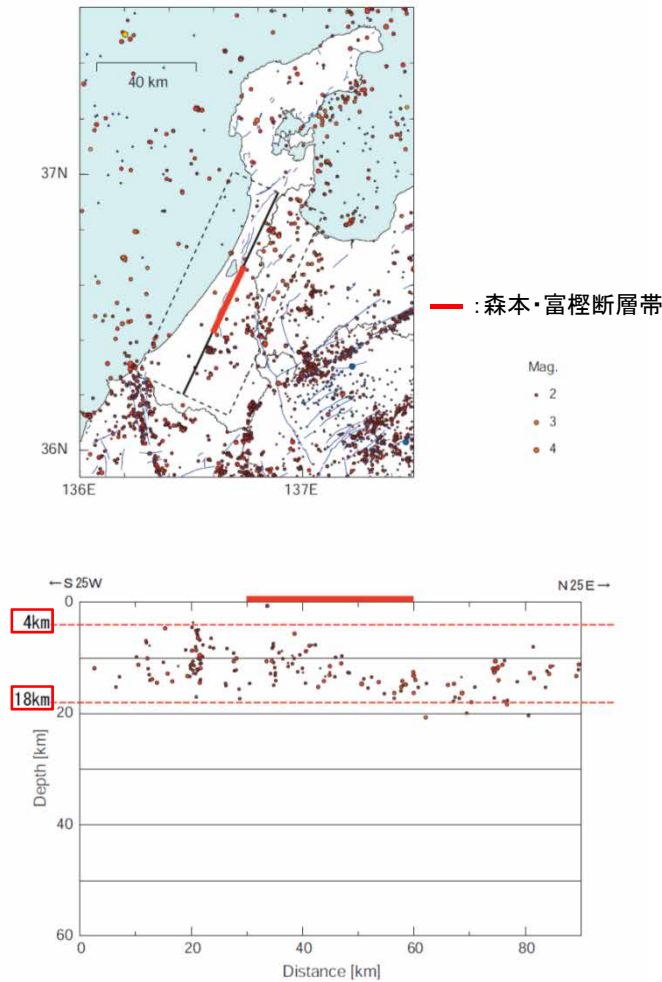


Iidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆

(4) 森本・富樫断層帯に係る知見に基づく検討 ー地震調査研究推進本部(2003)ー

○ 地震調査研究推進本部の森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価(2003年3月)によれば、微小地震分布及び地盤評価の結果から、地震発生層を深さ4~18kmと設定している。



1997/10/01~2002/06/30の期間に発生した地震を表示

微小地震発生分布

※地震調査研究推進本部(2003)に一部加筆

森本・富樫断層帯を想定した地震の震源パラメータ

巨視的震源特性	ケース		1 a	1 b	1 c	1 d	2	3	
		断層総面積	S	513			420	676	[km ²]
		地震モーメント	Mo	1.1 E+19			0.82 E+19	1.7 E+19	[Nm]
		地震規模	Mw	6.6			6.5	6.8	
		短周期レベル	A	1.2 E+19			1.1 E+19	1.4 E+19	[N m/s ²]
		基準点の位置		(北端) ~ (南端)					
		基準点の北緯		36° 40' ~ 36° 28'					
		基準点の東経		136° 44' ~ 136° 37'					
		走向		N25.7° E					
		傾斜角		45° E			60° E	30° E	
		平均滑り量	D	66			60	76	[cm]
		滑り方向		東側隆起の逆断層					
		地震発生層深さ		4~18					[km]
		断層面の長さ	L	26					[km]
微視的震源特性	アスペリティ	地震モーメント	MOa	3.2 E+18			2.3 E+18	4.7 E+18	[Nm]
		面積	Sa	73			60	96	[km ²]
		平均滑り量	Da	130			120	150	[cm]
		静的応力降下量	Δσa	16			16	16	[MPa]
		短周期レベル	A	1.2 E+19			1.1 E+19	1.4 E+19	[N m/s ²]
	背景領域	地震モーメント	MOb	7.9 E+18			5.9 E+18	1.2 E+19	[Nm]
		面積	Sb	440			360	580	[km ²]
		平均滑り量	Db	55			50	64	[cm]
		実効応力	Σσb	2.9			3.2	2.6	[MPa]
その他の震源特性	アスペリティ位置	南端	中央			南端	南端		
		中央	中央	上端	下端	中央	中央		
	破壊開始点	南端	中央			南端			
	破壊開始点の深さ		アスペリティ下端					[km]	
	破壊様式		同心円上						
	破壊伝播速度		2.5 (β=3.46の72%)					[km/s]	
	Fmax		6					[Hz]	
	震源時間関数		中村・宮武(2000)による						

※地震調査研究推進本部(2003)に一部加筆

(5) 魚津断層帯に係る知見に基づく検討 ー地震調査研究推進本部(2014)ー

- 地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図2014年版*によれば、魚津断層帯の地震発生層を深さ3～18kmと設定しており、上端深さは微小地震の発生及びS波速度(地震基盤深さ)を参考に設定している。

* 最新の全国地震動予測地図2020年版に示される強震動予測のための断層モデルパラメータは、2014年版提示モデルとされていることから、ここでは全国地震動予測地図2014年版を参照している。

5.3.1 活断層で発生する地震

5.3.1.1 主要活断層帯で発生する固有地震

④断層面の諸元の設定

- v) 断層上端深さは、強震動評価用の深部地盤モデルにおける地震基盤の深さを参考に、断層下端深さは、微小地震の震源深さに基づく地震発生層の下限深さを参考にそれぞれ設定。

断層面の諸元の設定

※地震調査研究推進本部(2014)に一部加筆

地震諸元

コード	断層名称	断層面のずれの向き		M_f	断層長さ	断層面の幅	断層面の傾斜角	地震発生層の深さ
10501	魚津断層帯	南東側隆起の逆断層(右横ずれ成分を伴う)	長期評価	7.2程度	約32km	不明	南東傾斜	下限15km程度
			モデル化	M_w 6.8	24km 7.9km	18km 18km	南東傾斜43度 南東傾斜43度	3-18km

※地震調査研究推進本部(2014)に一部加筆

強震動予測のための断層モデルのパラメータ

断層パラメータ	設定方法	想定魚津断層帯地震	
		魚津断層	不動堂断層
断層帯原点	長期評価による南西端(予測震度分布公表時に地図より読み取った)	北緯36° 41' 37"	
活断層長さL		東経137° 20' 37"	
気象庁マグニチュード M_{JMA}		32 km	
地震モーメント M_0		7.3	
モーメントマグニチュード M_w	$\log M_0 = 1.17 M_{JMA} + 10.72$ $M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$	2.04E+19 Nm	
断層モデル原点	地中の断層モデル原点位置(屈曲点とした位置。不動堂断層の南西端)	北緯36° 52' 38.8"	
断層モデル上端深さ	微小地震の発生及びS波速度を参考に設定	3 km	3 km
断層モデル長さ L_{model}	断層形状に従い設定した地表トレース	24 km	10 km
断層モデル幅 W_{model}	ルールに従い設定	18 km	18 km
断層モデル面積 S_{model}	ルールに従い設定	432 km ²	180 km ²
走向 θ	長期評価の原点と屈曲点を結ぶ方向	N 205° E	N 68° E
傾斜角 δ	南東傾斜(不動堂断層を三角形の断層面にするため43°)	137°	43°
すべり角 γ	南東側隆起の逆断層(北東端付近では右横ずれ成分を伴う)	90°	90°
静的応力降下量 $\Delta\sigma$	$\Delta\sigma = 7 / 16 \cdot M_0 / R^3$	3.3 MPa	
平均すべり量D	$D = M_0 / (\mu S_{model})$	1.1 m	
剛性率 μ	$\mu = \rho \beta^2$	3.12E+10 N/m ²	
密度 ρ	震源における密度	2700.0 kg/m ³	
S波速度 β	震源におけるS波速度	3.4 km/s	
破壊伝播速度 V_r	$V_r = 0.72 \cdot \beta$ (Geller(1976)より)	2.4 km/s	
短周期レベル	$A = 2.46 \cdot 10^{17} \cdot M_0^{1/3}$	1.45E+19 N・m/s ²	

※地震調査研究推進本部(2014)に一部加筆

(6) 検討結果(1/2)

- 邑知潟断層帯の地震発生層上端深さ及び砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震発生層下端深さに係る知見，評価に用いたデータ及び検討結果を下表に示す。

邑知潟断層帯の地震発生層上端深さに係る知見に基づく検討結果

対象断層帯	知見	知見の概要	上端深さ	評価に用いたデータ	
				地盤構造データ	震源データ
邑知潟断層帯	地震調査研究推進本部(2014)	・全国地震動予測地図によれば、地震発生層を深さ2～18kmと設定しており、上端深さはS波速度(地震基盤深さ)を参考に設定している。	2km	○ [地震基盤深さを参考としている※]	—
	当社による気象庁の震源データに基づく検討	・1997年10月から2022年3月までの気象庁の震源データによる邑知潟断層帯周辺のD10%は、4.4kmとなる。	4.4km	—	○ [1997年10月～2022年3月の最新の震源データにより評価している]
	Iidaka et al.(2008)	・中部日本を横断する測線において、屈折法地震探査を実施し、邑知潟断層帯周辺のP波速度構造断面を評価している。 ・P波速度構造断面によると、P波速度が5.8km/sの層の上端深さは3kmよりも深い。	3kmより深い	○ [断層帯周辺における詳細なP波速度構造断面を評価している]	—
邑知潟断層帯の地震発生層上端深さ			3～4.4km	※ 地震発生層上端深さの目安となる速度層は、微小地震とP波速度構造に係る既往の知見によると、 Vp=6km/s程度の層とされており(P.216)、地殻構造の平均的なVs-Vp関係によれば、Vs=3.5km/s程度の層となる。全国地震動予測地図2014年版による地震発生層上端深さは、地震基盤(Vs=3km/s程度の層)を参考としているため、設定値が浅くなっている。	
➤ 邑知潟断層帯の地震発生層上端深さに係る知見を整理した結果、全国地震動予測地図2014年版では地震基盤深さを参考に設定しているため、設定値が2kmと浅くなっているが、当社による気象庁の最新の震源データ(1997年10月～2022年3月)に基づく検討結果及びIidaka et al.(2008)による断層帯周辺における詳細なP波速度構造断面に基づく検討結果を重視し、邑知潟断層帯の地震発生層上端深さは3～4.4kmと判断する。					

砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震発生層下端深さに係る知見に基づく検討結果

対象断層帯	知見	知見の概要	下端深さ	評価に用いたデータ	
				地盤構造データ	震源データ
砺波平野断層帯・呉羽山断層帯	地震調査研究推進本部(2004)	・強震動評価によれば、 <u>微小地震の深さ分布及び地盤構造の評価結果から、地震発生層を深さ4～20kmと設定している。</u>	20km	○	○ [2004年以前の震源データを使用している]
	当社による気象庁の震源データに基づく検討	・1997年10月から2022年3月までの気象庁の震源データによる砺波平野断層帯・呉羽山断層帯周辺のD90%は、 <u>16.1km</u> となる。	16.1km	—	○ [1997年10月～2022年3月の最新の震源データにより評価している]
	Iidaka et al.(2003)	・中部日本を横断する測線において、 <u>屈折法地震探査を実施し、砺波平野断層帯・呉羽山断層帯周辺のP波速度構造断面を評価している。</u> ・P波速度構造断面によると、 <u>コンラッド面深さは18km程度</u> である。	18km程度	○ [断層帯周辺における詳細なP波速度構造断面を評価している]	—
砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震発生層下端深さ			16.1～18km		
➤ 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震発生層下端深さに係る知見を整理した結果、強震動評価において2004年以前の微小地震の深さ分布及び地盤構造の評価結果から20kmと設定されているが、当社による気象庁の最新の震源データ(1997年10月～2022年3月)に基づく検討結果及びIidaka et al.(2003)による断層帯周辺における詳細なP波速度構造断面に基づく検討結果を重視し、 <u>砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震発生層下端深さは16.1～18kmと判断する。</u>					

23

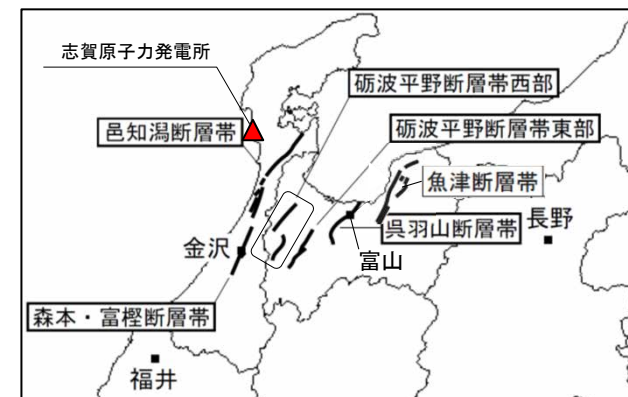
(6) 検討結果(2/2)

○ 地震調査研究推進本部の主要活断層帯に係る知見による地震発生層上端深さ及び下端深さの検討結果を下表に示す。

地震調査研究推進本部の主要活断層帯に係る知見による
地震発生層上端深さ及び下端深さの検討結果

検討項目		検討結果	
		上端深さ	下端深さ
邑知潟断層帯	地震調査研究推進本部(2014)	2km	18km
	気象庁の震源データ[D10%]	4.4km	*1
	Iidaka et al.(2008)	3kmより深い	*1
砺波平野断層帯・呉羽山断層帯	地震調査研究推進本部(2004)	4km	20km
	気象庁の震源データ[D90%]	*1	16.1km
	Iidaka et al.(2003)	*1	18km程度
森本・富樫断層帯	地震調査研究推進本部(2003)	4km	18km
魚津断層帯	地震調査研究推進本部(2014)	3km	18km
上記の主要活断層帯の地震発生層		<u>3～4.4km</u>	<u>16.1～18km</u>

*1: 検討対象外 *2: 当社が総合的に判断した値



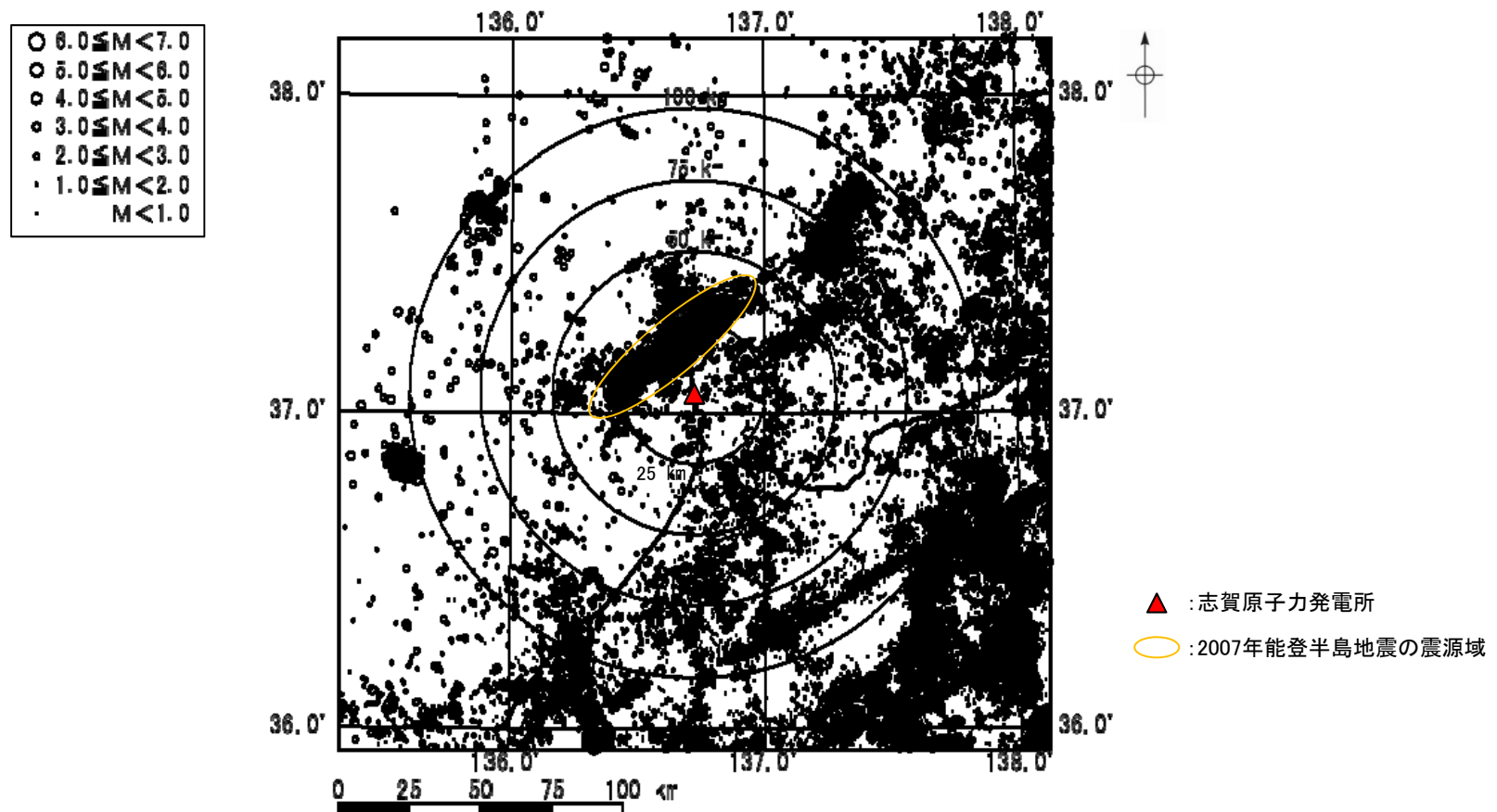
敷地周辺の主要活断層帯の概略位置図

※ 地震調査研究推進本部(2007, 2008)をもとに作成

- 地震調査研究推進本部の主要活断層帯に係る知見による検討結果によれば、地震発生層上端深さ及び下端深さは、それぞれ3～4.4km及び16.1～18kmである。
- この検討結果は、前項までに検討した敷地周辺の地震発生層上端深さ(3～4.8km)及び下端深さ(9～18km) (P.228左下表)と整合的である。

(1) 検討方法

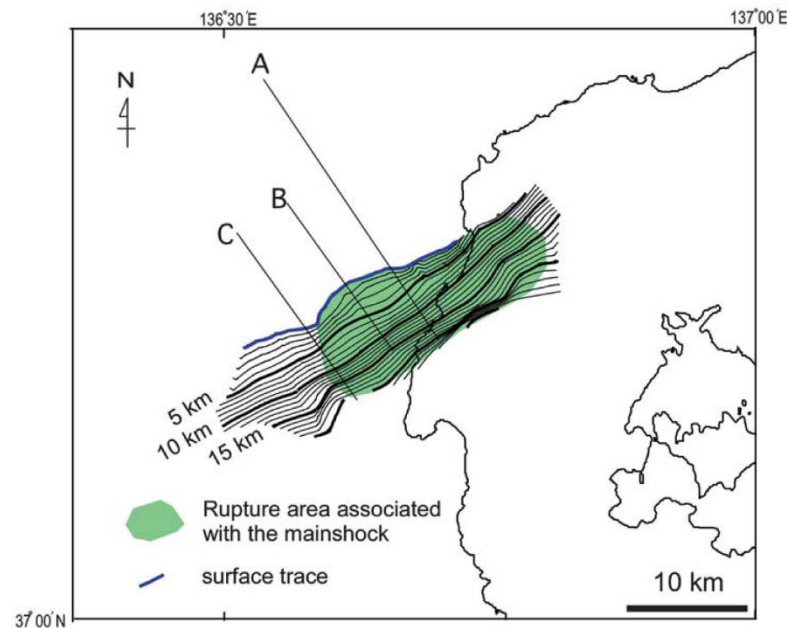
- 敷地周辺で発生した2007年能登半島地震について、当該地震の震源域の上端深さを詳細に検討するため、当該地震に係る知見を確認した。
- 確認する知見は、震源域周辺における臨時地震観測等の調査データに基づく震源域の上端深さに係る知見(佐藤ほか(2007a, 2007b), Sakai et al.(2008), Yamada et al.(2008), 地域地盤環境研究所(2011))とした。
- 当該地震の震源域の上端深さは、各知見について震源域の上端深さ及び評価に用いたデータを整理し、総合的に判断した。



地震の震央分布図
(1997年10月～2022年3月)

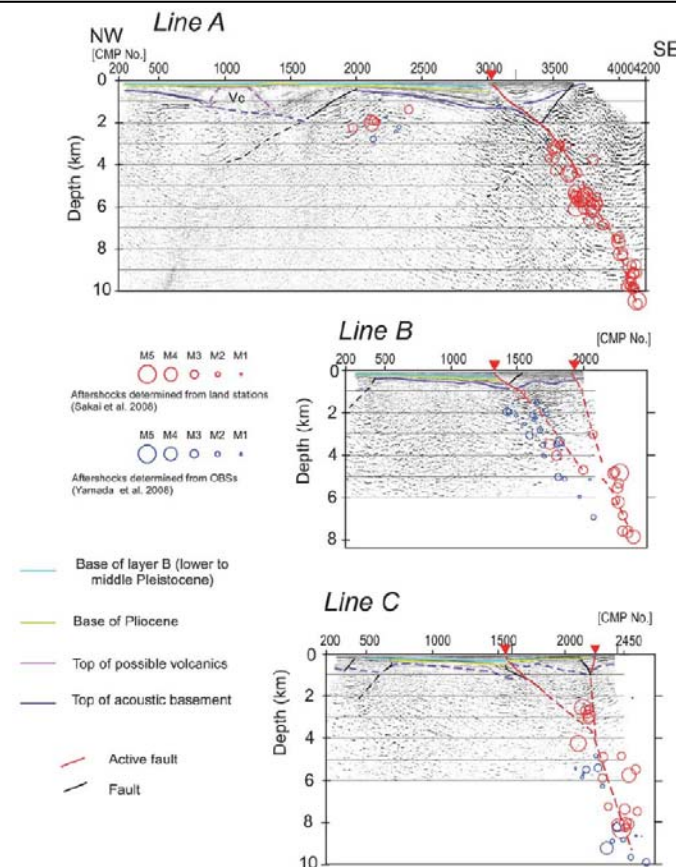
(2) 佐藤ほか(2007a, 2007b)に基づく検討

- 佐藤ほか(2007a)は、2007年能登半島地震の震源域において二船式の交互発震による反射法地震探査を実施し、測線Aにおいて深さ4～6km程度まで震源断層をイメージングすることに成功している。また、反射法地震探査から求めた震源断層と陸域及び海域の臨時地震観測網による余震分布(Sakai et al.(2008)(P.241参照)及びYamada et al.(2008)(P.242参照))を対応させることで、深さ2～10km程度まで断層傾斜角が 60° であるとしている。
- 佐藤ほか(2007b)は、臨時地震観測網による余震分布、反射法地震探査を組み合わせ、統合的に2007年能登半島地震の震源断層の形状を求めるとともに、地質構造との対応から中新世に正断層として形成された既存の南傾斜の高角(約 60°)断層が右横ずれ成分を持った逆断層運動を行うことによって発生したとしている。



余震分布と反射法地震探査から推定される震源断層の形状
(等高線間隔は深さ方向に1km)

※佐藤ほか(2007b)より抜粋



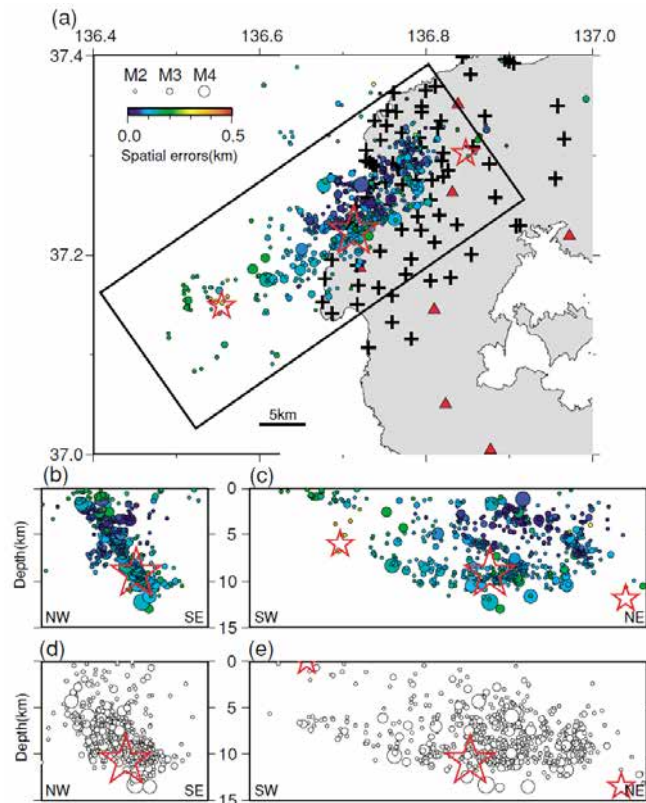
震源断層を横断する反射断面

(測線から幅1km以内の震源をプロット。余震分布はSakai et al.(2008)とYamada et al.(2008), 反射断面は佐藤ほか(2007a)に基づく。また三角形は井上ほか(2007)に基づく活断層の痕跡を示す。)

※佐藤ほか(2007b)より抜粋

(3) Sakai et al.(2008)に基づく検討

- Sakai et al.(2008)は、2007年能登半島地震の正確な余震分布を決定するため、地震発生の半日後から震源域周辺の陸域において高密度な臨時地震観測(88箇所)を実施し、余震分布を決定している。
- 本震周辺の余震は、高角(60°)で南東方向に傾斜し、深さ2~13kmの範囲に分布しているとしている。

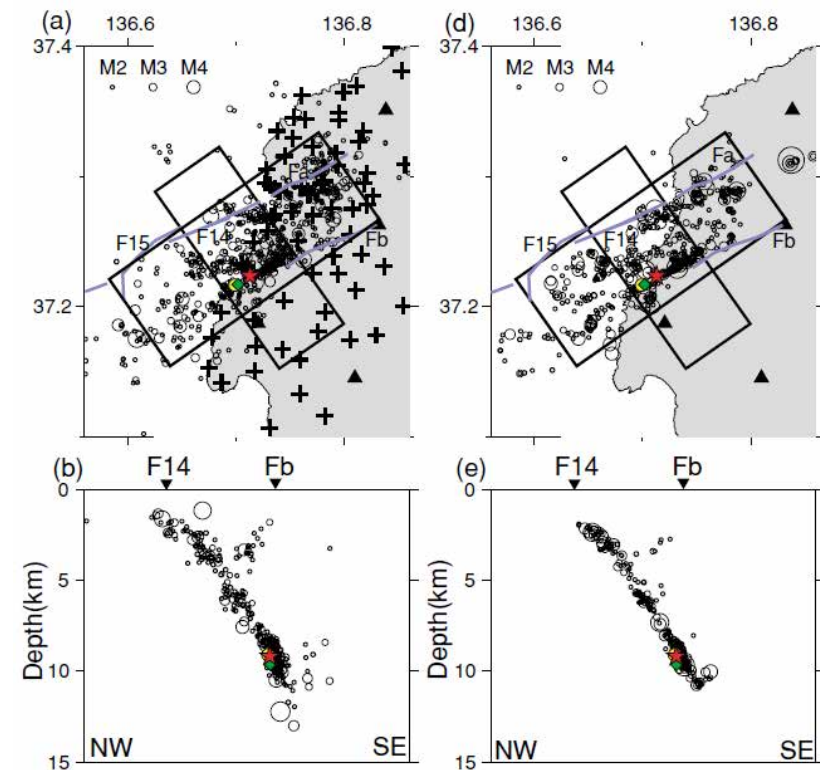


3月25日~4月18日の陸域の地震記録を用いて決定された余震分布

- (a): 臨時地震観測以後(3月25日~4月18日)の陸域の地震記録を用いて決定された余震分布,
 (b): (a)の長方形内を南西からみた鉛直断面,
 (c): (a)の長方形内を南東からみた鉛直断面,
 (d): 気象庁一元化震源カタログによる余震を南西からみた鉛直断面,
 (e): 気象庁一元化震源カタログによる余震を南東からみた鉛直断面,

☆: 本震, ☆: 最大余震, +: 臨時地震観測点, ▲: 常設地震観測点
 震源決定の精度は震源の色で示されている。

※Sakai et al.(2008)より抜粋



臨時地震観測以後と以前の余震分布

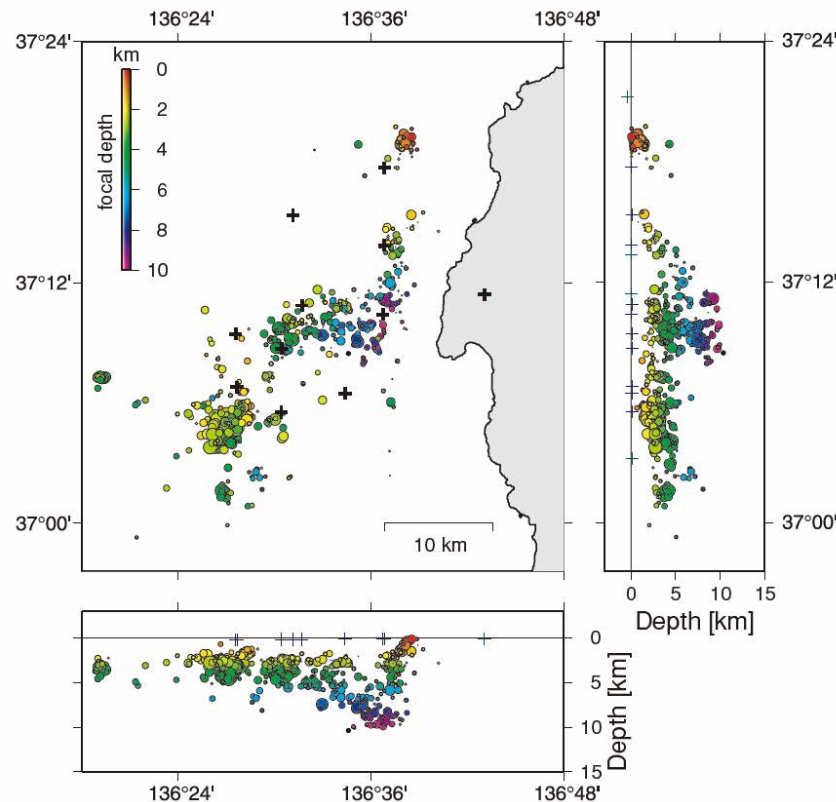
- (a): 臨時地震観測以後(3月25日~4月18日)の陸域の地震記録を用いて決定された余震分布,
 (b): (a)の北東-南西方向に長辺をもつ長方形内を南西からみた鉛直断面,
 (d): 臨時地震観測以前(3月25日9~17時)に発生した地震を再決定した余震分布,
 (e): (d)の北東-南西方向に長辺をもつ長方形内を南西からみた鉛直断面,

☆: 本震, ◆: 前兆現象, ●: 前震, +: 臨時地震観測点, ▲: 常設地震観測点,
 F14・F15: 活断層(片川ほか(2005)), Fa・Fb: 地質断層(北陸地方土木地質図編纂委員会(1990))

※Sakai et al.(2008)より抜粋

(4) Yamada et al.(2008)に基づく検討

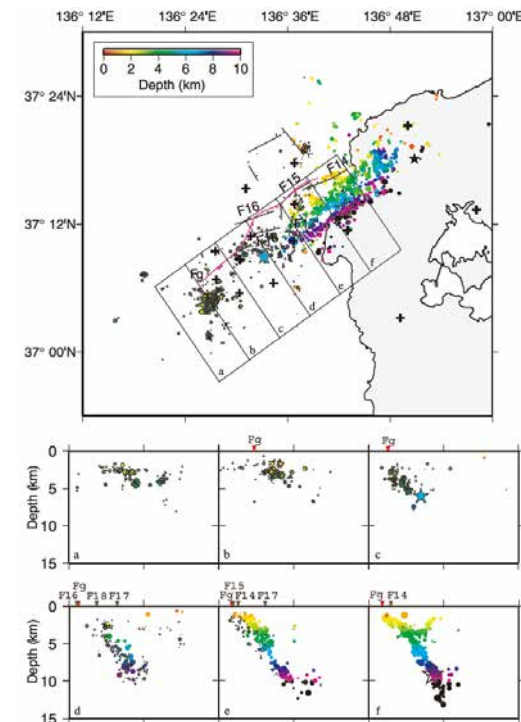
- Yamada et al.(2008)は、2007年能登半島地震の震源域周辺の海域における余震活動を調査するため、2007年4月6日から5月8日まで海底地震計による臨時地震観測(10箇所)を実施し、海域における余震分布を決定している(陸域における地震観測(4箇所)の記録も使用)。余震は主に本震の南西側で発生し、その震源深さについて、東側は2~10km程度であり、西側は2~5kmに限定されているとしている。また、海域における臨時地震観測の範囲においては、北側のクラスターを除き、深さ2kmより浅い余震はほとんどなく、また深さ15kmより深い余震はみられなかったとしている。
- また、地震観測網の空間的な範囲の観点から、海域と陸域の臨時地震観測網はそれぞれ海域と陸域の震源分布に対してよりよく決定できるとし、海域の臨時地震観測網により決定した震源分布と陸域の臨時地震観測網により決定された震源分布(Sakai et al.(2008))を統合し、海域の最大余震より北東側における震源深さの範囲は2~13kmとし、高角(約60°)で南東方向に傾斜しているとしている。



4月6日~5月8日の陸域及び海域の地震記録を用いて決定された震源分布
(円の大きさはマグニチュードに対応)

✦は地震観測点

※Yamada et al.(2008)より抜粋



陸域における臨時地震観測網により決定された震源分布と統合した震源分布

(上段:震源分布, 下段:上段の図中矩形内の深さ分布(円の大きさはマグニチュードに対応))

✦は地震観測点, F14~F16:活断層(片川ほか(2005)), Fg:活断層(岡村(2008)),

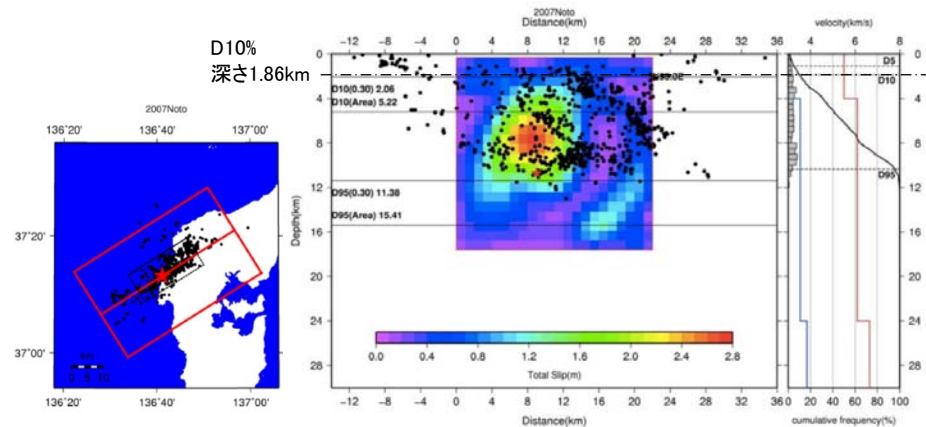
☆:本震, ★:陸域の最大余震, ★:海域の最大余震,

▼:海底の活断層位置(片川ほか(2005)), ▼:海底の活断層位置(岡村(2008))

※Yamada et al.(2008)より抜粋

(5) 地域地盤環境研究所(2011)に基づく検討

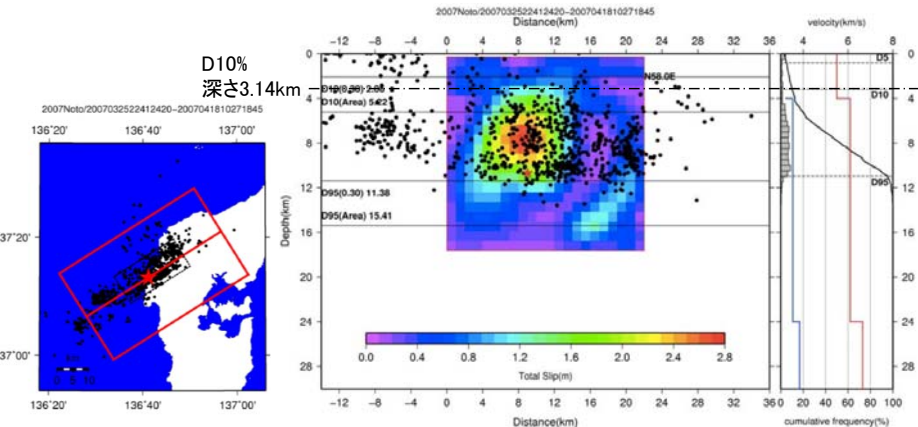
- 地域地盤環境研究所(2011)は、近年発生した被害地震を対象に、臨時地震観測網で高精度に決定された余震分布や臨時地震観測網と同時期・同一領域の気象庁一元化震源の余震分布からD10%を求めている。
- この検討結果より、2007年能登半島地震の震源域について、臨時地震観測網によるD10%は深さ1.86km、気象庁一元化震源によるD10%は3.14kmとされ、気象庁一元化震源による余震分布は、臨時地震観測網における余震分布よりも深くなる傾向であることが示された。



2007 年能登半島地震の臨時地震観測網による震源分布

左: 2007年能登半島地震の断層モデル(Horikawa(2008))と臨時地震観測網による余震分布,
右: 臨時地震観測網による余震分布のヒストグラムとHorikawa(2008)によるP波速度(赤線)・S波速度(青線)

※地域地盤環境研究所(2011)に一部加筆



2007 年能登半島地震の気象庁一元化震源データによる震源分布

左: 2007年能登半島地震の断層モデル(Horikawa(2008))と気象庁一元化震源データによる余震分布,
右: 気象庁一元化震源データによる余震分布のヒストグラムとHorikawa(2008)によるP波速度(赤線)・S波速度(青線)

※地域地盤環境研究所(2011)に一部加筆

※ 臨時地震観測網による余震分布と気象庁一元化震源データによる余震分布のデータ期間は同じ(余震分布のデータ期間: 2007年3月25日22時41分～4月18日10時27分)。
※ 図中の赤星は震源を示す。

【本知見に対する当社の分析】

【本知見において用いられた余震データ】

- ・ データの期間及び余震分布の形状から陸域の臨時地震観測網による余震分布(Sakai et al.(2008))と考えられる。

【余震分布の精度】

- ・ Sakai et al.(2008)に示される余震分布(P.241の左図)によれば、海の最大余震以西において震源が浅くなる傾向が認められるが、海の最大余震以東における本震周辺の震源と比較して震源決定精度は低い。
- ・ Yamada et al.(2008)は、陸域の臨時地震観測網は陸域の震源分布に対して、海域の臨時地震観測網は海域の震源分布に対してよりよく決定できるとしている。また、海域の臨時地震観測網により決定した最大余震以西の海域においては深さ2kmより浅い余震はほとんどないとしている(P.242)。

【分析結果】

- ・ 本知見に示されるD10%は、海の最大余震以西における震源決定精度の低いデータの影響により、2kmより浅くなっているものと考えられる。

(6) 検討結果

○ 2007年能登半島地震の震源域の上端深さに係る知見，評価に用いたデータ及び検討結果を下表に示す。

2007年能登半島地震の震源域の上端深さに係る知見による検討結果

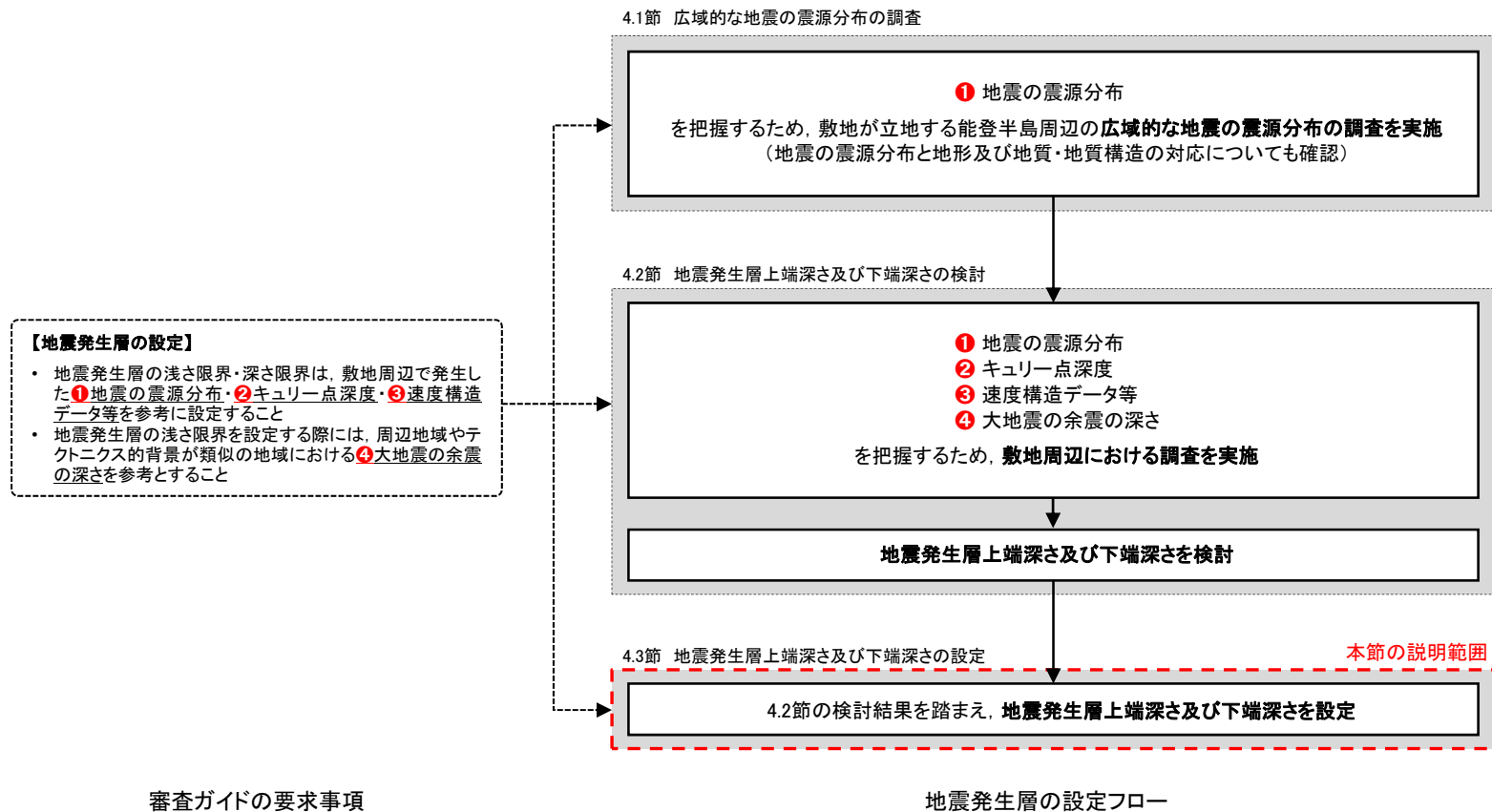
知見	知見の概要	震源域の上端深さ	評価に用いたデータ		
			余震データ		反射法地震探査データ
			陸域の臨時地震観測網	海域の臨時地震観測網	
佐藤ほか(2007a,2007b)	・反射法地震探査により深さ4～6km程度まで震源断層をイメージングしており、陸域及び海域の臨時地震観測網による余震分布(Sakai et al.(2008)及びYamada et al.(2008))を対応させることで、深さ2～10km程度まで断層傾斜角が60°であるとしている。 ・また、余震分布や反射法地震探査、地質構造との対応から既存の高角(約60°)断層が右横ずれ成分を持った逆断層運動を行うことによって発生したとしている。	2km [知見の記載内容から当社が読み取り]	○ (2007年3月25日～4月18日) ※Sakai et al.(2008)	○ (2007年4月6日～5月8日) ※Yamada et al.(2008)	○
Sakai et al.(2008)	・震源域周辺の陸域において高密度な臨時地震観測(88箇所)を実施し、余震分布を決定している。	2km	○ (2007年3月25日～4月18日)	—	—
Yamada et al.(2008)	・震源域周辺の海域において海底地震計による臨時地震観測(10箇所)を実施し、海域における余震分布を決定している(陸域における地震観測(4箇所)の記録も使用)。 ・また、決定した震源分布と陸域の臨時地震観測網により決定された震源分布(Sakai et al.(2008))を統合している。	2km	○ (2007年3月25日～4月18日) ※Sakai et al.(2008)	○ (2007年4月6日～5月8日)	—
地域地盤環境研究所(2011)	・臨時地震観測網による余震分布からD10%を求めている。	1.86km	○ (2007年3月25日～4月18日)	—	—
2007年能登半島地震の震源域の上端深さ		2km			

➤ 2007年能登半島地震の震源域の上端深さに係る知見を整理した結果，佐藤ほか(2007a, 2007b)は，陸域・海域の余震データ及び反射法地震探査データを組み合わせて震源断層の形状を求めており，最も重視すべき知見と考え，**2007年能登半島地震の震源域の上端深さを2kmと判断する。**

4.3 地震発生層上端深さ及び下端深さの設定

(1) 設定方法

○ 4.3節では、4.2節の検討結果を踏まえ、地震発生層上端深さ及び下端深さを設定する。



(2) 地震発生層上端深さ及び下端深さの設定

- 地震発生層上端深さ及び下端深さは、4.2節の検討結果から推定される地震発生層上端深さ及び下端深さを踏まえ設定した。

敷地周辺に係る検討

敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さの検討結果(4.2.1項～4.2.4項)

検討項目		上端深さ	下端深さ
地震の震源分布	気象庁の震源データ [D10%, D90%]	4.8km	14.3km
	原子力安全基盤機構(2004) [D10%, D90%]	3.2km	10.7km
速度構造	Matsubara et al.(2022)	4km程度以深	*1
	Iidaka et al. (2008)	3kmより深い	*1
	日本海地震・津波調査プロジェクト(2015)	3kmより深い	*1
	群速度	3kmより深い	*1
コンラッド面深さ	Zhao et al. (1994)	*1	14km程度
	河野ほか(2009)	*1	12km程度
	Katsumata (2010)	*1	18km程度
	Iidaka et al. (2003)	*1	18km程度
キュリー点深度	大久保(1984)	*1	9～10km程度
検討結果から推定される地震発生層		③ 3～4.8km	④ 9～18km

地震調査研究推進本部の主要活断層帯に係る知見による地震発生層上端深さ及び下端深さの検討結果(4.2.5項)

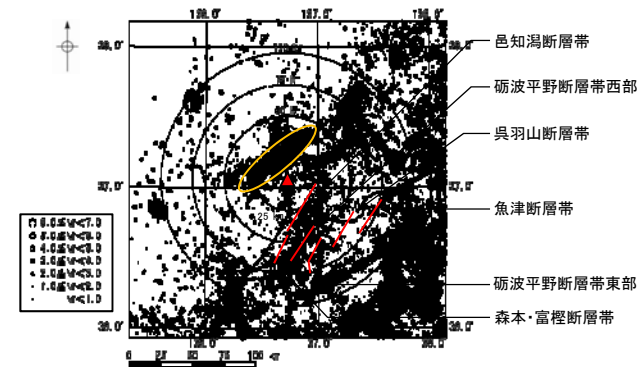
検討項目		上端深さ	下端深さ
邑知潟断層帯	地震調査研究推進本部(2014)	2km	18km
	気象庁の震源データ [D10%]	4.4km	*1
	Iidaka et al. (2008)	3kmより深い	*1
砺波平野断層帯・呉羽山断層帯	地震調査研究推進本部(2004)	4km	20km
	気象庁の震源データ [D90%]	*1	16.1km
	Iidaka et al. (2003)	*1	18km程度
森本・富樫断層帯	地震調査研究推進本部(2003)	4km	18km
魚津断層帯	地震調査研究推進本部(2014)	3km	18km
上記の主要活断層帯の地震発生層		③ 3～4.4km	④ 16.1～18km

設定した敷地周辺の地震発生層上端深さ及び下端深さ

(安全側に、上端深さは③・④で最も浅い値、下端深さは③・④で最も深い値を採用)

3km

18km



- ▲ : 志賀原子力発電所
 ○ : 2007年能登半島地震の震源域
 — : 地震調査研究推進本部により評価された敷地周辺の主要活断層帯

地震の震央分布図(1997年10月～2022年3月)

2007年能登半島地震の震源域に係る検討

2007年能登半島地震の震源域の上端深さの検討結果(4.2.6項)

検討項目		上端深さ
2007年能登半島地震に係る知見	佐藤ほか(2007a, 2007b) [反射法地震探査、余震分布]	2km
	Sakai et al. (2008) [余震分布]	2km
	Yamada et al. (2008) [余震分布]	2km
	地域地盤環境研究所(2011) [D10%]	1.86km
検討結果から推定される地震発生層		2km

設定した2007年能登半島地震の震源域の上端深さ

2km

*1: 検討対象外 *2: 当社が総合的に判断した値

- 敷地周辺の地震発生層上端深さは、地震の震源分布及び速度構造による検討結果によれば3～4.8kmとなり、地震調査研究推進本部の主要活断層帯に係る知見による検討結果3～4.4kmと整合的であることを確認し、これらを踏まえ安全側に3kmと設定した。
- 敷地周辺の地震発生層下端深さは、地震の震源分布、コンラッド面深さ及びキュリー点深度による検討結果によれば9～18kmとなり、地震調査研究推進本部の主要活断層帯に係る知見による検討結果16.1～18kmと整合的であることを確認し、これらを踏まえ安全側に18kmと設定した。
- ただし、2007年能登半島地震の震源域の上端深さについては、震源域周辺において実施された臨時地震観測や反射法地震探査等の詳細なデータに基づく知見を踏まえ、2kmと設定した。

参考文献

【和文】

- ・ 石川県(1997): 1:33,000漁場環境図「富来・志賀・羽咋海域」, 石川県
- ・ 石田聡史・宮本慎也・吉田進(2018): 志賀原子力発電所前面海域における海底重力探査の概要, 電力土木2018年11月号, 398, 110-114
- ・ 伊藤潔(2002): 地殻内地震発生層, 月刊地球, 号外No.38, 114-121
- ・ 伊藤潔・中村修一(1998): 西南日本内帯における地震発生層の厚さ変化と内陸大地震, 京都大学防災研究所年報, 第41号, B-1, P.27-35
- ・ 入倉孝次郎・三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110(6), 849-875
- ・ 岩田知孝・関口春子(2002): 2000年鳥取県西部地震の震源過程と震源域強震動, 月刊地球/号外, No.38, 182-188
- ・ 大久保泰邦(1984): 全国のキュリー点解析結果, 地質ニュース, 362号, 12-17
- ・ 岡村行信(2007): 能登半島及びその周辺海域の地質構造発達史と活構造, 活断層・古地震研究報告, No.7, P.197-207
- ・ 鮎野義夫(1993): 石川県地質誌新版・石川県地質図(10万分の1)説明書, 石川県・北陸地質研究所
- ・ 原子力安全基盤機構(2004): 地震記録データベースSANDELのデータ整備と地震発生上下限層深さの評価に関する報告書, JNES/SAE04-017
- ・ 河野芳輝・島谷理香・寺島秀樹(2009): 重力異常から推定される日本列島周辺の三次元地殻構造, 地震第2輯, 第61巻特集号, S247-S254
- ・ 国土地理院(2006): <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/gravity/grv_serach/gravity.pl> (参照2006-12-21)
- ・ 国土地理院地理院地図(電子国土Web): <<https://maps.gsi.go.jp/>> (参照2023-7-14)
- ・ 佐藤浩章(2012): 地震動評価のための地表に近い岩盤における減衰の測定とそのモデル化, 物理探査, 第65巻, 1&2号, 37-51
- ・ 佐藤浩章・岡田哲実(2012): 地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その5) —実岩盤における減衰付加効果の解明のための岩石コア減衰測定—, 電力中央研究所報告

-
- ・ 佐藤比呂志・阿部進・斉藤秀雄・加藤直子・伊藤谷生・川中卓(2007a): 二船式による2007年能登半島地震震源域の反射法地震探査, 東京大学地震研究所彙報, 第82号, 275-299
 - ・ 佐藤比呂志・岩崎貴哉・金沢敏彦・宮崎真一・加藤直子・酒井慎一・山田知朗・宮内崇裕・伊藤谷生・平田直(2007b): 反射法地震探査・余震観測・地殻変動から見た2007年能登半島地震の特徴について, 東京大学地震研究所彙報, 第82号, 369-379
 - ・ 澤田明宏・平松良浩・小林航・浜田昌明(2021): 重力異常解析による眉丈山第2断層の断層構造の推定, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS10-P05
 - ・ 産業技術総合研究所地質調査総合センター(2013): 日本重力データベースDVD版, 数値地質図P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター
 - ・ 地震調査研究推進本部(2003): 森本・富樫断層帯の地震を想定した強震動評価
 - ・ 地震調査研究推進本部(2004): 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の地震を想定した強震動評価
 - ・ 地震調査研究推進本部(2007): 魚津断層帯の評価
 - ・ 地震調査研究推進本部(2008): 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の評価(一部改訂)
 - ・ 地震調査研究推進本部(2014): 全国地震動予測地図2014年版 別冊 震源断層を特定した地震動予測地図
 - ・ 地震調査研究推進本部(2020): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)
 - ・ 地域地盤環境研究所(2011): 震源を特定せず策定する地震動に関する計算業務 報告書
 - ・ 日本海地震・津波調査プロジェクト(2015): 平成26年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書
 - ・ 長谷川昭(1991): 微小地震活動の時空特性, 地震第2輯, 第44巻特集号, 329-340
 - ・ 本多亮・澤田明宏・古瀬慶博・工藤健・田中俊行・平松良浩(2012): 金沢大学重力データベースの公表, 測地学会誌, 58, 4, 153-160
 - ・ 吉井弘治・伊藤潔(2001): 近畿地方北部の地震波速度構造と地震発生層, 地球惑星科学連合学会2001年合同大会, Sz-P006

【英文】

- Fukushima, R., H. Nakahara, and T. Nishimura (2016) : Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, 552–559
- Gladwin M. T. and F. D. Stacey (1974) : Anelastic Degradation of Acoustic Pulses in Rock, Phys. Earth Planet. Int., 8, 332–336
- Hatherly, P. J. (1986) : Attenuation measurements on shallow seismic refraction data, Geophysics, 51, 250–254
- Hiramatsu, Y., Sawada, A., Kobayashi, W., Ishida, S., Hamada, M. (2019) : Gravity gradient tensor analysis to an active fault: a case study at the Togi-gawa Nangan fault, Noto Peninsula, central Japan. Earth, Planets and Space, 71:107,8
- Horikawa, H. (2008) : Characterization of the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake, Earth Planets Space, 60, 1017–1022
- Iidaka, T., T. Iwasaki, E. Kurashimo, A. Kato, F. Yamazaki, H. Katao, and The Research Group for the 2007 Atotsugawa Fault Seismic Expedition (2008) : Fine seismic structure around the Atotsugawa fault revealed by seismic refraction and reflection experiments, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and The 2008 Fall meeting of Seismological Society of Japan, B41–05
- Iidaka, T., T. Iwasaki, T. Takeda, T. Moriya, I. Kumakawa, E. Kurashimo, T. Kawamura, F. Yamazaki, K. Koike, and G. Aoki (2003) : Configuration of subducting Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 30, NO. 5, 23–1–23–4
- Katsumata, A. (2010) : Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by traveltimes analysis, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, B04303
- Matsubara, M., T. Ishiyama, T. No, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, and S. Kamiya (2022) : Seismic velocity structure along the Sea of Japan with large events derived from seismic tomography for whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, Earth, Planets and Space, 74, 171

-
- Riga, E., F. Hollender, Z. Roumelioti, P.-Y. Bard, and K. Pitilakis (2019) : Assessing the Applicability of Deconvolution of Borehole Records for Determining Near-Surface Shear-Wave Attenuation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 2, 621–635
 - Sakai, S., A. Kato, T. Iidaka, T. Iwasaki, E. Kurashimo, T. Igarashi, N. Hirata, T. Kanazawa, and the group for the joint aftershock observation of the 2007 Noto Hanto Earthquake (2008) : Highly resolved distribution of aftershocks of the 2007 Noto Hanto Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, 60, 83–88
 - Shapiro, N. M. and M. Campillo (2004) : Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL.31, L07614
 - Tanaka, A. and Y. Ishikawa (2005) : Crustal thermal regime inferred from magnetic anomaly data and its relationship to seismogenic layer thickness : The Japanese islands case study, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 152, 257–266
 - The Gravity Research Group in Southwest Japan (2001) : Gravity measurements and database in southwest Japan, *Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM)*, Bull. Nagoya University Museum, Special Rep., No.9
 - Wapenaar, K. (2004) : Retrieving the Elastodynamic Green's Function of an Arbitrary Inhomogeneous Medium by Cross Correlation, *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 93, 254301
 - Yamada, T., K. Mochizuki, M. Shinohara, T. Kanazawa, A. Kuwano, K. Nakahigashi, R. Hino, K. Uehira, T. Yagi, N. Takeda, and S. Hashimoto (2008) : Aftershock observation of the NotoHanto earthquake in 2007 using ocean bottom seismometers, *Earth Planets Space*, 60, 1005–1010
 - Yamamoto, A., Shichi, R., Kudo, T. (2011) : Gravity database of Japan (CD-ROM), *Earth Watch Safety Net Research Center, Chubu Univ., Special Publication*, No.1
 - Zhao, D., A. Hasegawa, and H. Kanamori (1994) : Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events, *Journal of Geophysical Research*, Vol.99, No.B11, 22313–22329