

平成26年度原子力施設等防災対策等委託費(安全性
向上評価に向けた経年変化を考慮した配管の耐震性
評価手法の高度化に係る調査・研究)事業

業務成果報告書

平成 27 年 3 月

新潟工科大学

1 事業の目的

東北地方太平洋沖地震、及び新潟県中越沖地震から原子力耐震安全分野に係る多くの教訓が得られた。特に、新潟県中越沖地震では、設計用地震動の2倍以上の地震動が発生したにも関わらず、耐震クラスの高い設備の損傷はほとんど見られなかった。このことは、これまでの耐震設計や耐震評価で考えてきた設備の耐震性には相当の保守性を含むことを示すことになったが、他方では、耐震性の検討にあたり必ずしも設備の実耐力が把握されていなかったことも示すことになった。

今後、地震に係る確率論的リスク評価(地震 PRA)等の裕度評価を行うことが、規制上の要求事項となるが、事業者による地震 PRA 評価等結果について審査を行うためには、設備の耐震性の実耐力を把握する必要がある。また、設備に亀裂等の経年変化が存在すると、経年変化が生じていない設備に比べ耐震性が低下するなど、その耐震性に大きな影響を与える可能性があるため、設備の耐震性の実耐力の把握にあたり、経年変化の影響も踏まえた検討も行う必要がある。

本事業では、上記を踏まえ、特に損傷を受けることでプラントの安全性に大きな影響を与える配管系を対象に、実際に発生した地震動(観測地震動)等に対する配管系の耐震性能を把握するとともに、配管系の経年変化が耐震性の実耐力に与える影響や影響評価方法について基礎的研究を通じ把握することを目的に、地震時損傷に係る検討を行う。

2 事業の概要

本事業では、実際に発生した地震動(観測地震動)等に対する配管系の耐震性の実耐力を把握すると共に、その経年変化が耐震性の実耐力に与える影響や影響評価方法について基礎的研究を通じ把握することを目的として、地震時損傷に係る検討を行った。

そこで、実際に発生した地震動(観測地震動)等に対する配管系の耐震性の実耐力を把握するためには、次の3つの基礎的研究「サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化」、「サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化」並びに「亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化」を行い、地震時損傷に係る検討をした。また、研究課題に必要な国内外の最新知見についてある場合には収集等の調査を実施した。更に、それぞれの研究の解析方法や結果の妥当性を確認するにあたり、地震学、材料力学及び破壊力学等の研究者等からヒアリング(解析・調査の方針、解析結果の妥当性確認、検討結果の取りまとめ等)を実施した。

以下に、本事業フロー図(図2-1)と事業内容の概要とを示す。

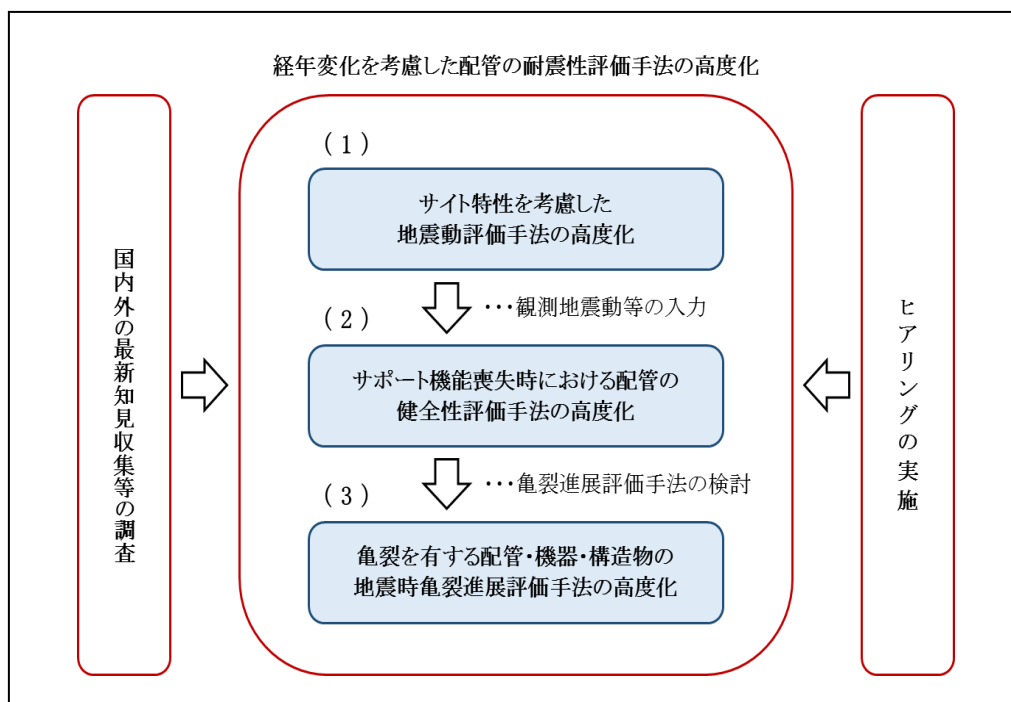


図2-1 本事業のフロー図

(1) サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化

耐震性評価の中でサポートを含む配管の応答を評価するためには、配管構造に影響を及ぼす入力地震動の評価は重要課題の一つである。そこで、地震動評価の重要な評価項目であるサイト特性に着目した検討を実施した。まず、観測地震動記録(深部地震観測記録及び水平アレー地震観測記録)を整理・分析した上で、地震データベースを作成し、地震・地震動評価のための地震動観測記録を整備した。次に、

サイト特性評価手法の適用性検討に資するために、地震動評価のための三次元地下構造モデルの精度検証を行った。

(2) サポート機能喪失時における配管の健全性評価手法の高度化

現在の地震 PRA では、配管サポートが 1 本でも破損すれば、配管本体が機能喪失するものと仮定されているが、実際に、配管サポートが損傷した場合の配管系の地震時挙動に関する知見は少ない。そこで、配管サポートの支持機能喪失を想定した配管系試験体の振動台加振試験を実施し、配管系の地震時損傷に係る検討を実施した。小型振動台を対象とした配管系試験体を作成し、観測地震動等を用いた水平加振試験を行い、計測した加速度、配管ひずみから配管の構造健全性を確認した。

(3) 亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化

原子力発電プラント機器における地震荷重に対する構造健全性評価に対して、地震荷重を受ける亀裂構造物の健全性と亀裂進展評価技術の高度化が重要となっている。しかし、米国機械学会が規定した亀裂進展則(以下、ASME 亀裂進展則と呼ぶ)に対して、米国原子力規制委員会が亀裂進展速度を過小評価する恐れがあることを指摘している。そこで、原子力配管系や原子炉圧力容器管台等で用いられるフェライト鋼を対象として、圧縮応力を含む繰り返し負荷による亀裂進展速度を評価するため、試験および調査を行い、「ASME 亀裂進展則」の妥当性を検証した。

(4) 国内外の最新知見収集等の調査

本調査は、「亀裂を有する配管・機器・構造物の地震時亀裂進展評価手法の高度化」の実施にあたり、米国機械学会(ASME)の Boiler and Pressure Vessel Code の Code Week(平成 26 年 11 月 16 日～21 日開催)に参加し、亀裂進展評価法について米国規格の最新動向を調査した。参加した委員会を以下に列挙する。

- ① Task Group(一番下位の委員会、特定の課題について集中的に議論)
- ② Evaluation Procedures for Degraded Buried Pipe(埋設配管の評価タスク)
- ③ Evaluation of Beyond Design Basis Events(設計想定超え事象評価タスク)
- ④ Crack Growth Reference Curve(亀裂進展曲線タスク)
- ⑤ Working Group(規格策定の実務を行う委員会)
- ⑥ Pipe Flaw Evaluation(配管欠陥評価 作業会)
- ⑦ Flaw Evaluation(欠陥評価 作業会)
- ⑧ Subgroup on Evaluation Standard(欠陥評価を担当する分科会)
- ⑨ BPV Committee on Nuclear Inservice Inspection(維持規格の専門委員会)

さらに、地震荷重を受ける亀裂構造物の健全性を評価するために、以下の 2 つのアプローチに関連した文献のレビューを行った。

- ① 繰り返しの荷重下での破壊靱性を用いて破壊評価を行う
- ② 地震荷重による疲労亀裂進展を考慮した後に破壊評価を行う

(5) ヒアリングの実施

研究課題(1)～(3)について、解析方法や結果の妥当性を確認するにあたり、地震学、材料力学及び破壊力学等の研究者等からヒアリング(解析・調査の方針、解析結果の妥当性確認、検討結果の取りまとめ等)を行った。各事業のヒアリング実施数は(1): 3回、(2): 2回、(3): 2回であった。

3. 経年変化を考慮した配管の耐震性評価手法の高度化

3.1 サイト特性を考慮した地震動評価手法の高度化

3.1.1 検討概要

耐震性評価の中でサポートを含む配管の地震動応答を評価するためには、配管構造に影響を及ぼす入力地震動の振動数領域の評価が重要課題の一つと考えられる。そこで、地震動評価の重要な評価項目であるサイト特性に着目し、このサイト特性が地震動に及ぼす影響を評価する。そのために、(独)原子力安全基盤機構(当時、現、原子力規制庁)の柏崎深部地震動観測プロジェクトの一環として取得した深部地震動観測記録及び水平アレー地震動観測記録を整理・分析した上で、地震データベースを作成し、地震・地震動評価のための地震動観測記録を整備した。次に、サイト特性評価手法の適用性検討に資するため、地震動評価のための三次元地下構造モデルの精度検証を行った。

実施項目は以下の3項目である。

- (1) 深部地震動観測記録の整理
- (2) 水平アレー地震動観測記録の整理
- (3) 地震動評価のための三次元地下構造モデルの精度検証

3.1.2 深部地震動観測記録の整理

(1) 概要

原子力規制庁が新潟県柏崎市内(所在地別記)に保有する 3000m 深部地震動観測孔(図 3.1-1)の深度 0m、100m、550m、1500m、3000m における地震動観測記録の整理を行い、イベント毎の地震データベースを作成した。地震動観測記録の整理を以下の手順で実施した。

- ・地震の選択
- ・地震動データの解析
- ・地震データベースの作成と登録

(2) 地震の選択

平成 24 年 6 月から平成 25 年 10 月に収録された地震記録について、気象庁一元化震源リストに基づきデータを整理した。表 3.1-1 に収集した地震の諸元を示す。図 3.1-2~4 に収集した地震の震央位置を示す。収集した地震は、波形を目視により確認し、交通ノイズなどの少ない地震を対象とした。

(3) 地震動データの解析

図 3.1-5 に No.1 の地震の観測波形ペーストアップ(加速度波形)を示す。図 3.1-6 に、No.1 の地震の観測波形ペーストアップ(速度波形)を示す。図 3.1-7 および図 3.1-8 に、No.1 の地震 NS 成分および EW 成分の S 波スペクトルを示す。S 波スペクトルは、S 波初動から 20.48 秒のデータについて計算を行った。スペクトルには、バンド幅 0.3Hz の Parzen Window を施している。図 3.1-9 に、S 波部分の H/V スペクトルを示す。S 波部分のラディアル成分と上下動成分のスペクトル比を計算した。以下では、単に H/V スペクトルと呼ぶこととする。

(4) 地震データベースの作成と登録

上記で収集した地震について、

- (a) 気象庁一元化震源に基づく諸元
- (b) 震央分布
- (c) 地震波形
- (d) 最大加速度深度分布
- (e) フーリエスペクトルおよびスペクトル比

のデータをデータベースとして登録した。図 3.1-10 にデータベースのウェブのページを示す。図 3.1-11 に鉛直アレーデータベースの表示の一例を示す。

表 3.1-1 震源の諸元

No	year	mon	day	hour	min	sec	DEP	Epicentral Dist.	Hypocentral Dist.	mj	経度	緯度	Epicenter
1	2012	6	1	17	48	8.71	43.7	186.1	191.2	5.1	139.8752	36.0277	SW IBARAKI PREF
2	2012	6	26	8	23	43.55	18.8	41.2	45.3	4	138.9615	37.5483	MID NIIGATA PREF
3	2012	6	28	14	51	50.85	63.2	233.2	241.6	5.2	141.1967	37.1677	E OFF FUKUSHIMA PREF
4	2012	7	3	11	31	2.37	88.2	284.3	297.7	5.2	139.8702	35.0005	SOUTHERN BOSO PENINSULA
5	2012	7	10	12	48	57.44	8.5	58.8	59.4	5.2	138.3883	36.8315	NORTHERN NAGANO PREF
6	2012	7	10	13	33	26.65	9.4	59.1	59.8	3.9	138.3923	36.8273	NORTHERN NAGANO PREF
7	2012	7	14	13	4	30.14	7.8	59.7	60.2	3.7	138.3673	36.8277	NORTHERN NAGANO PREF
8	2012	7	16	4	31	31.29	52.1	172.1	179.8	4.8	139.8173	36.1523	SW IBARAKI PREF
9	2012	7	26	0	16	0.76	15.8	1.9	15.9	2.2	138.5827	37.3552	MID NIIGATA PREF
10	2012	8	14	11	59	36.27	654.0	1443.2	1584.5	7.3	145.8817	49.1833	SOUTHERN SEA OF OKHOTSK
11	2012	8	20	20	42	46.1	57.2	229.6	236.7	5.2	140.4423	35.9168	SOUTHERN IBARAKI PREF
12	2012	8	30	4	5	12.23	59.9	316.7	322.4	5.6	141.9142	38.4082	E OFF MIYAGI PREF
13	2012	9	14	2	22	6.59	36.6	240.4	243.2	5.1	140.5405	35.8602	SOUTHERN IBARAKI PREF
14	2012	9	16	1	17	31.83	11.0	32.0	33.8	3.4	138.6167	37.0527	MID NIIGATA PREF
15	2012	10	2	1	12	21.09	8.2	138.2	138.4	4.2	140.0272	37.8057	SOUTHERN YAMAGATA PREF
16	2012	10	2	3	40	49.65	29.7	254.9	256.6	5.6	141.3965	36.919	E OFF FUKUSHIMA PREF
17	2012	10	2	7	21	42.63	22.5	512.2	512.7	6.3	143.5205	39.8328	FAR E OFF SANRIKU
18	2012	10	12	13	57	19.57	37.4	241.8	244.7	5.1	140.549	35.8487	NORTHERN CHIBA PREF
19	2012	10	15	0	58	9.81	13.2	2.1	13.4	2.3	138.5875	37.3557	MID NIIGATA PREF
20	2012	10	18	0	1	40.79	7.1	36.5	37.1	4.2	138.7087	37.0277	MID NIIGATA PREF
21	2012	10	18	1	16	43.66	8.0	36.2	37.1	3.3	138.7013	37.0283	MID NIIGATA PREF
22	2012	10	18	7	27	51.52	6.6	36.0	36.6	2.4	138.709	37.0325	MID NIIGATA PREF
23	2012	10	20	7	54	48.8	11.3	19.9	22.9	2.4	138.8007	37.357	MID NIIGATA PREF
24	2012	10	23	3	9	10.48	7.2	37.0	37.7	2.5	138.7098	37.0228	MID NIIGATA PREF
25	2012	10	25	19	32	26.59	47.6	307.7	311.4	5.6	141.8595	38.2893	E OFF MIYAGI PREF
26	2012	11	3	7	34	16.87	29.4	282.3	283.8	5	141.7485	37.6175	E OFF FUKUSHIMA PREF
27	2012	11	9	12	51	53.47	32.5	254.3	256.4	5.5	141.3795	36.8775	E OFF FUKUSHIMA PREF
28	2012	11	16	17	25	53.87	30.2	324.2	325.6	5.5	141.2297	35.357	E OFF BOSO PENINSULA
29	2012	11	20	1	22	48.24	16.6	30.8	35.0	3.5	138.5785	37.6165	OFF S NIIGATA PREF
30	2012	11	24	5	21	29.37	56.9	299.0	304.4	5.2	141.7883	38.2087	E OFF MIYAGI PREF
31	2012	11	24	17	59	47.28	72.2	228.7	239.8	4.8	140.018	35.638	CENTRAL CHIBA PREF
32	2012	12	5	8	2	52.5	11.3	34.1	35.9	4.1	138.944	37.2467	MID NIIGATA PREF
33	2012	12	7	17	18	30.81	49.0	473.0	475.6	7.3	143.867	38.0198	FAR E OFF MIYAGI PREF
34	2012	12	12	16	41	35.37	16.1	31.1	35.0	3.4	138.5798	37.6192	OFF S NIIGATA PREF
35	2012	12	15	13	27	1.67	59.0	245.8	252.8	5.3	141.3492	37.2973	E OFF FUKUSHIMA PREF
36	2012	12	15	14	46	10.32	32.3	241.0	243.1	5	141.209	36.8223	E OFF IBARAKI PREF
37	2012	12	21	18	52	25.56	4.6	58.6	58.8	3.7	138.6943	36.8195	MID NIIGATA PREF
38	2012	12	24	20	26	10.92	3.3	54.7	54.8	3.3	138.5712	36.8463	NORTHERN NAGANO PREF
39	2012	12	26	20	44	41.33	5.0	59.2	59.4	3.8	138.6975	36.814	MID NIIGATA PREF
40	2012	12	29	16	19	32.58	51.0	233.3	238.9	5	141.1832	37.0675	E OFF FUKUSHIMA PREF
41	2012	12	29	23	59	36.62	41.0	352.7	355.1	5.5	142.1962	38.7173	E OFF MIYAGI PREF
42	2012	12	30	8	5	19.58	35.0	253.6	256.0	5.1	141.393	36.9632	E OFF FUKUSHIMA PREF
43	2013	1	2	21	15	56.99	8.4	36.5	37.5	2.4	138.6768	37.0198	MID NIIGATA PREF
44	2013	1	8	7	42	46.63	6.2	49.7	50.1	3.2	139.0072	37.0517	MID NIIGATA PREF
45	2013	1	14	15	53	48.57	47.0	263.2	267.4	4.9	141.5378	37.1838	E OFF FUKUSHIMA PREF
46	2013	1	22	4	46	57.35	16.0	266.5	267.0	5.1	140.9368	35.8737	NEAR CHOSHI CITY
47	2013	1	28	3	41	49.53	73.7	196.1	209.5	4.8	140.5603	36.571	NORTHERN IBARAKI PREF
48	2013	1	31	23	53	41.74	8.5	193.7	193.9	4.7	140.604	36.7025	NORTHERN IBARAKI PREF
49	2013	2	1	14	49	21.19	7.5	48.7	49.2	2.9	138.8142	37.7347	NE NIIGATA PREF
50	2013	2	2	23	17	35.86	102.0	715.8	723.0	6.5	143.2275	42.702	TOKACHI REGION
51	2013	2	8	4	53	42.92	23.8	24.9	34.5	2.9	138.5105	37.557	OFF S NIIGATA PREF
52	2013	2	9	13	43	3.14	32.6	253.5	255.6	5.2	141.3597	36.8435	E OFF IBARAKI PREF
53	2013	2	12	4	58	1.2	9.5	5.8	11.2	1.4	138.5157	37.3585	MID NIIGATA PREF
54	2013	2	19	21	27	35.26	37.2	323.0	325.1	5.6	141.1988	35.3458	E OFF BOSO PENINSULA
55	2013	2	24	13	55	15.96	20.6	192.5	193.6	4.5	140.6938	36.9682	EASTERN FUKUSHIMA PREF
56	2013	2	25	16	23	53.58	2.8	90.5	90.5	6.3	139.4128	36.8737	NORTHERN TOCHIGI PREF
57	2013	2	25	16	31	59.98	3.3	88.9	89.0	4	139.4082	36.8933	NORTHERN TOCHIGI PREF
58	2013	2	25	17	33	38.61	3.1	90.0	90.0	4	139.4072	36.8747	NORTHERN TOCHIGI PREF
59	2013	2	25	18	55	13.55	3.5	86.0	86.1	4.2	139.3935	36.9225	NORTHERN TOCHIGI PREF
60	2013	2	25	23	32	16.87	2.8	89.9	90.0	3.8	139.4043	36.8727	NORTHERN TOCHIGI PREF
61	2013	3	5	15	42	1.45	1.2	59.5	59.5	3.3	138.5932	36.803	NORTHERN NAGANO PREF
62	2013	3	10	22	39	51.22	4.5	59.1	59.2	3.3	138.7148	36.8183	MID NIIGATA PREF
63	2013	3	10	23	29	22.47	3.6	58.9	59.0	3.2	138.7182	36.8207	MID NIIGATA PREF
64	2013	3	10	23	56	19.14	4.7	59.1	59.3	3.1	138.7208	36.8193	MID NIIGATA PREF
65	2013	3	14	20	8	10.24	25.4	23.9	34.9	2.2	138.4863	37.5422	OFF S NIIGATA PREF
66	2013	3	21	14	34	33.83	72.2	178.3	192.3	4.7	140.4383	36.744	NORTHERN IBARAKI PREF

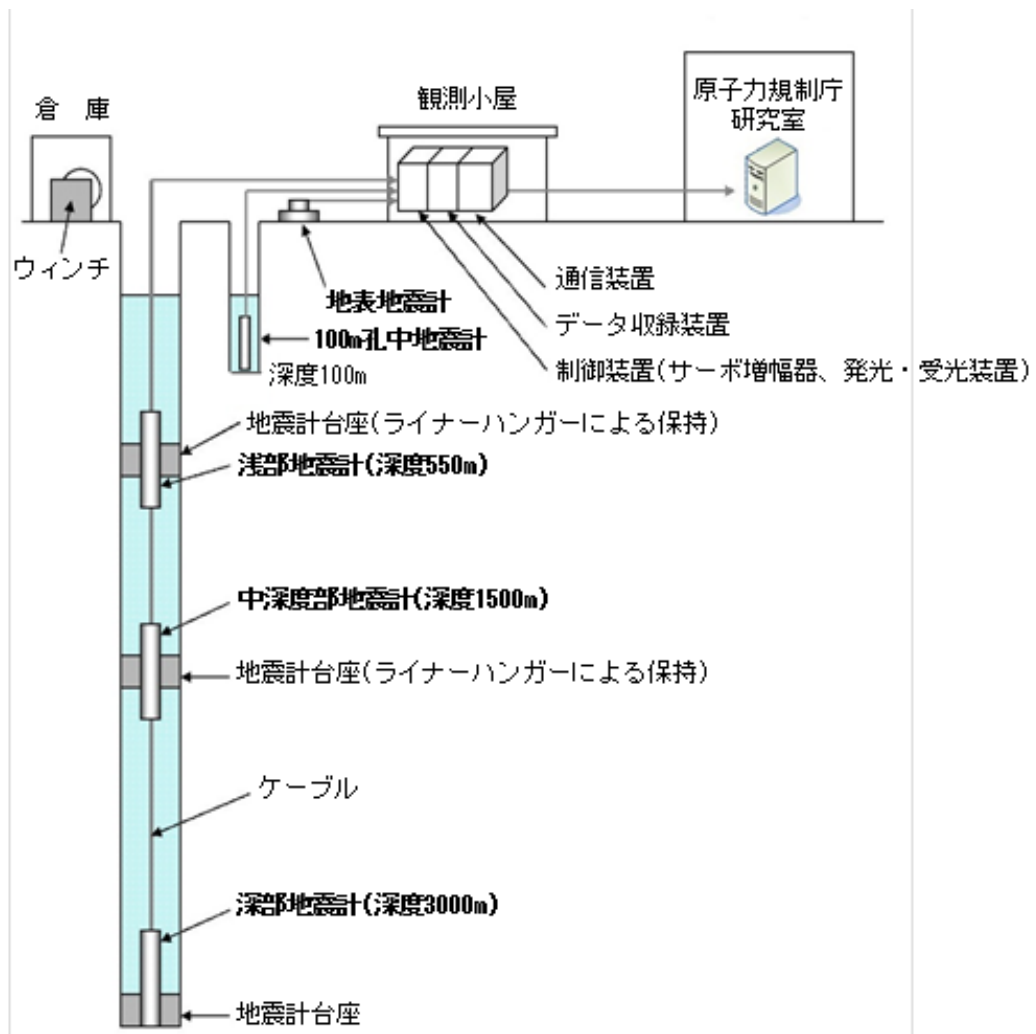


図 3.1-1 深部地震動観測システムの概要
 ((独)原子力安全基盤機構(2013))

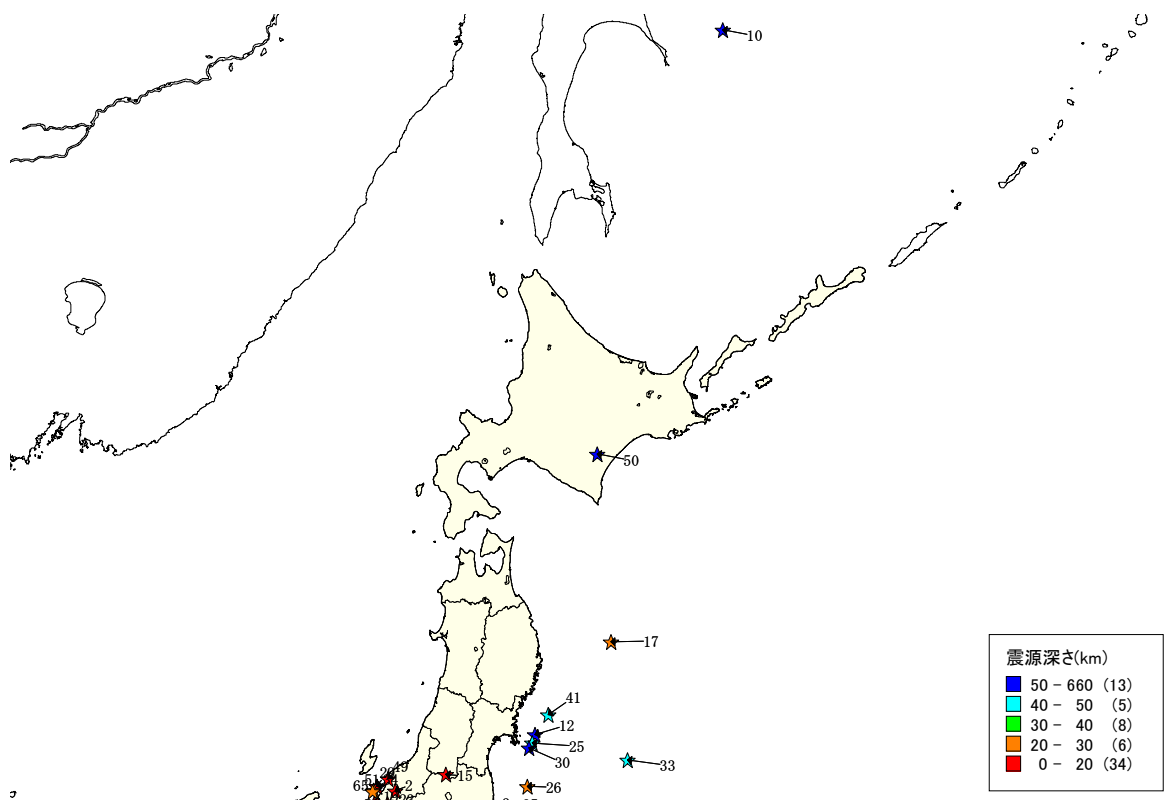


図 3.1-2 収集した地震の震央位置
 図中の地震番号は、表 3.1-1 の No.に対応

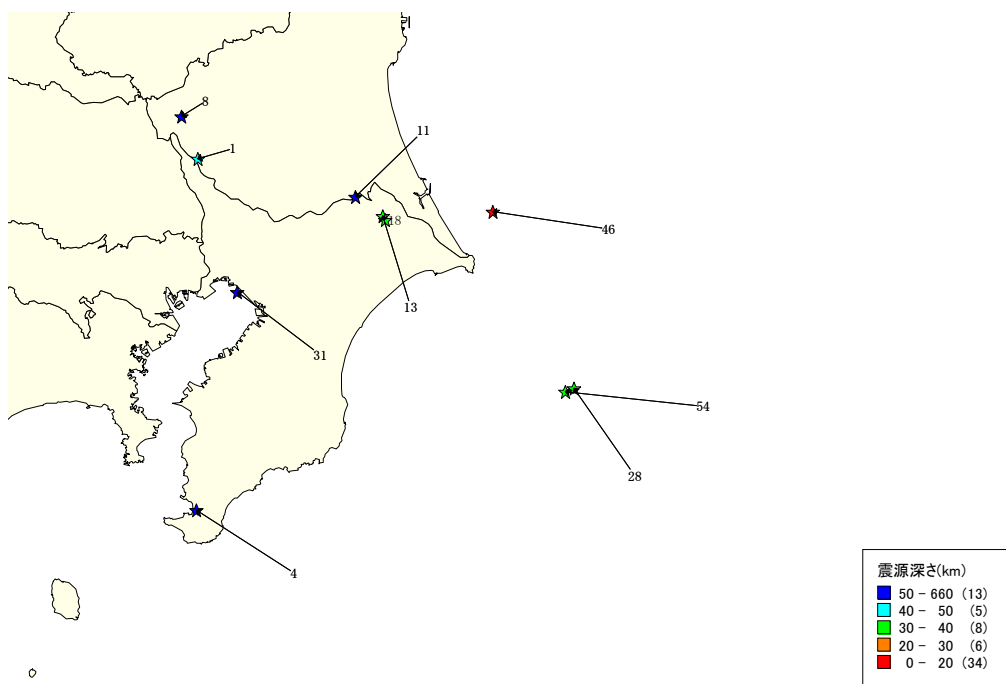
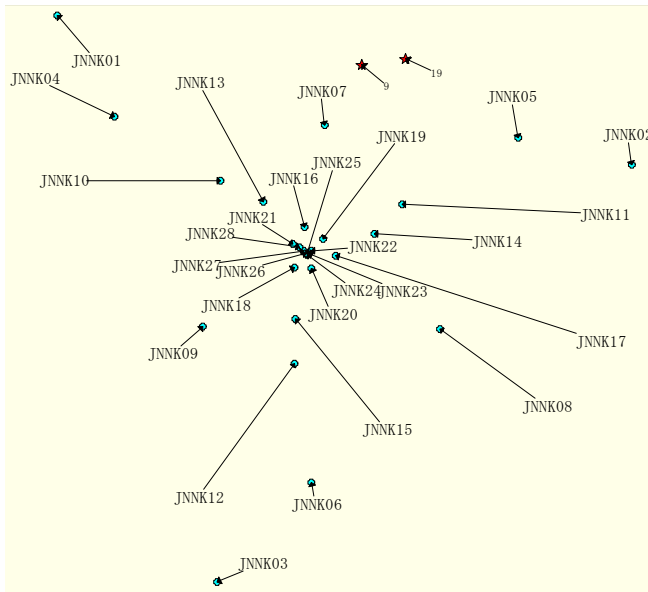


図 3.1-3 収集した地震の震央位置
 図中の地震番号は、表 3.1-1 の No.に対応



水平アレー観測用地震計の位置と記号

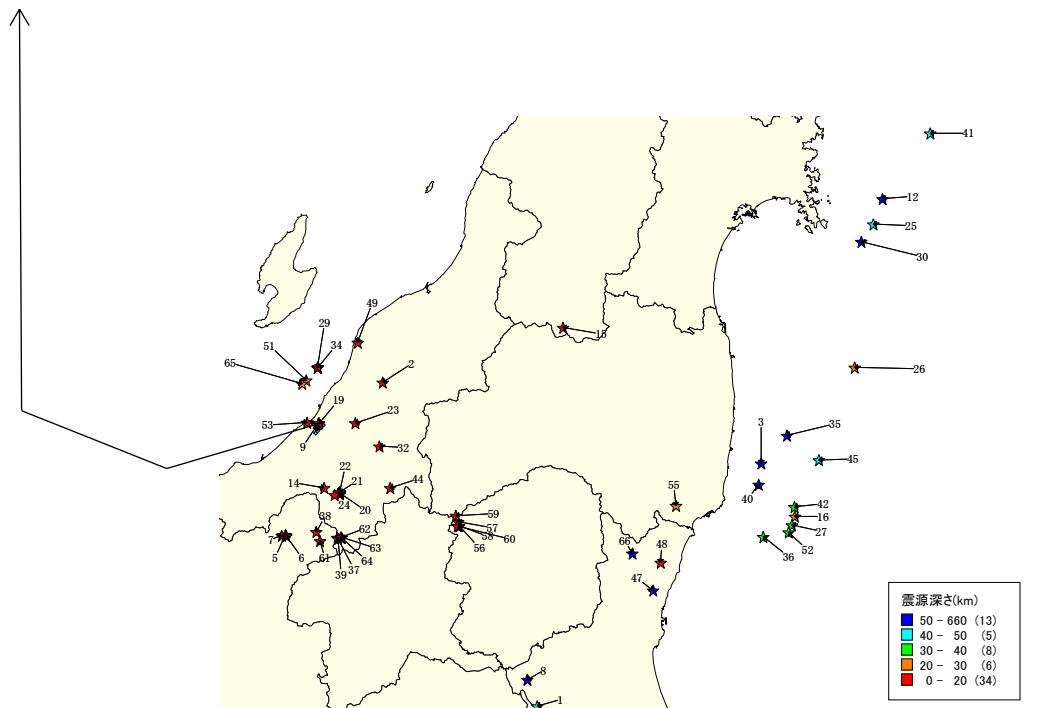


図 3.1-4 収集した地震の震央位置と観測用地震計の設置位置等
 図中の地震番号は、表 3.1-1 の No.に対応

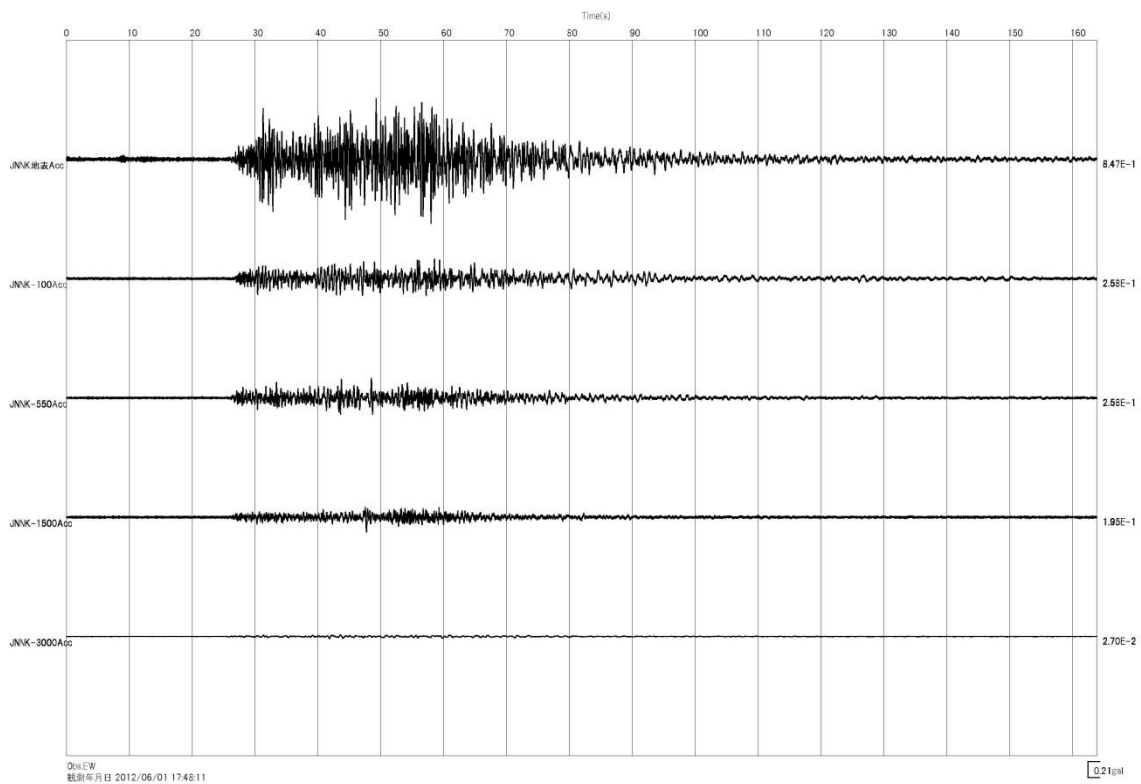
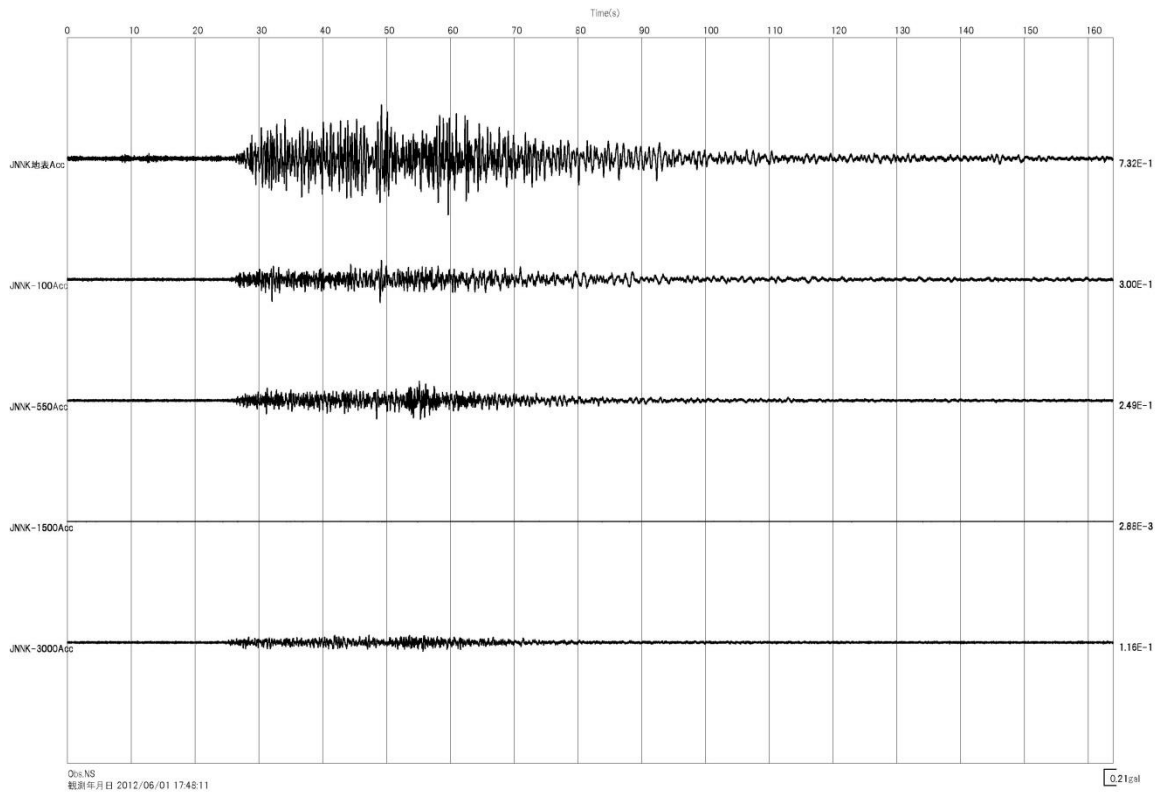


図 3.1-5 観測波形ペーストアップ(No.1) 加速度波形 上図: NS 成分、下図: EW 成分
右の値は最大加速度 単位: gal

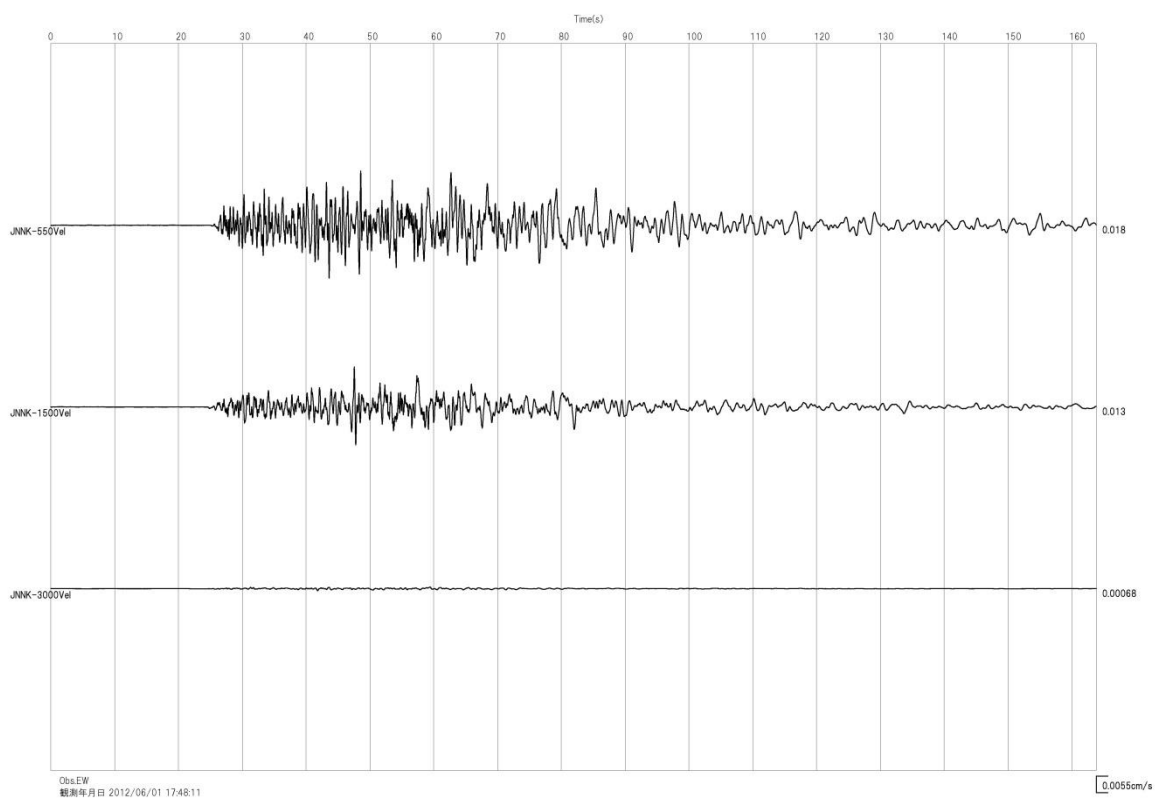
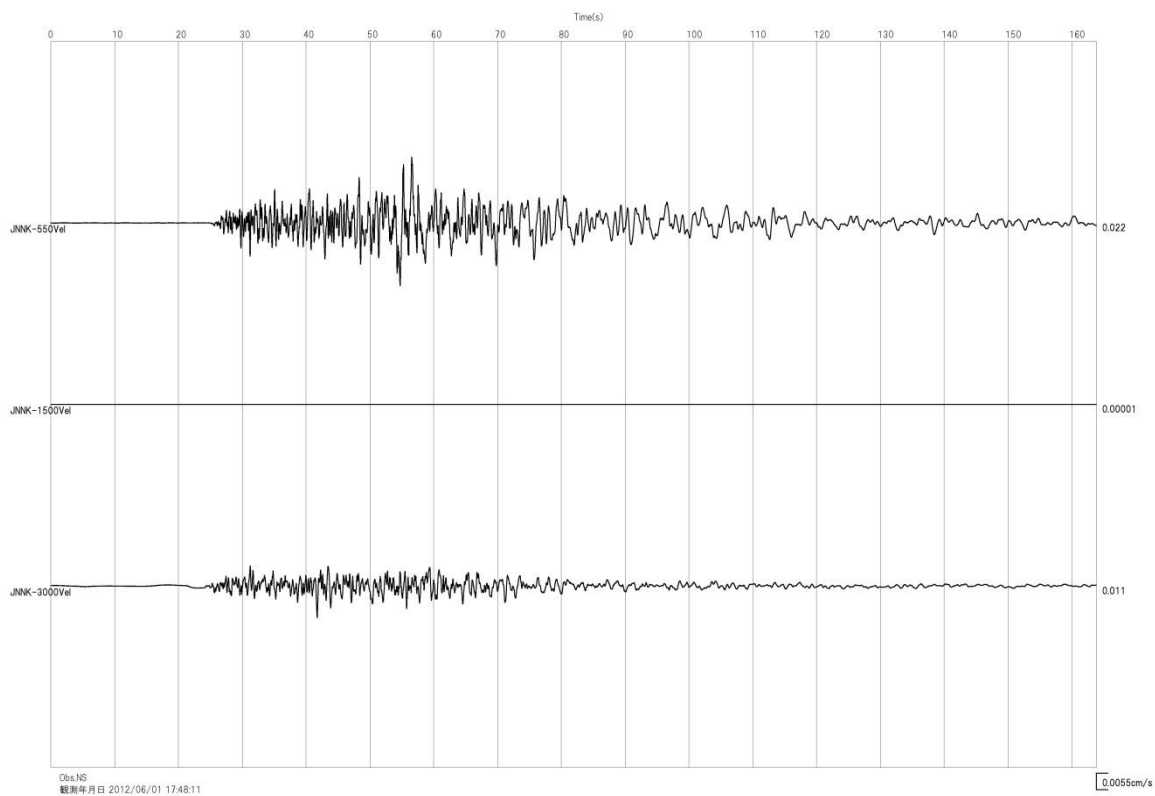


図 3.1-6 観測波形ペーストアップ(No.1) 速度波形 上図: NS 成分、下図: EW 成分
右の値は最大速度 単位: cm/s

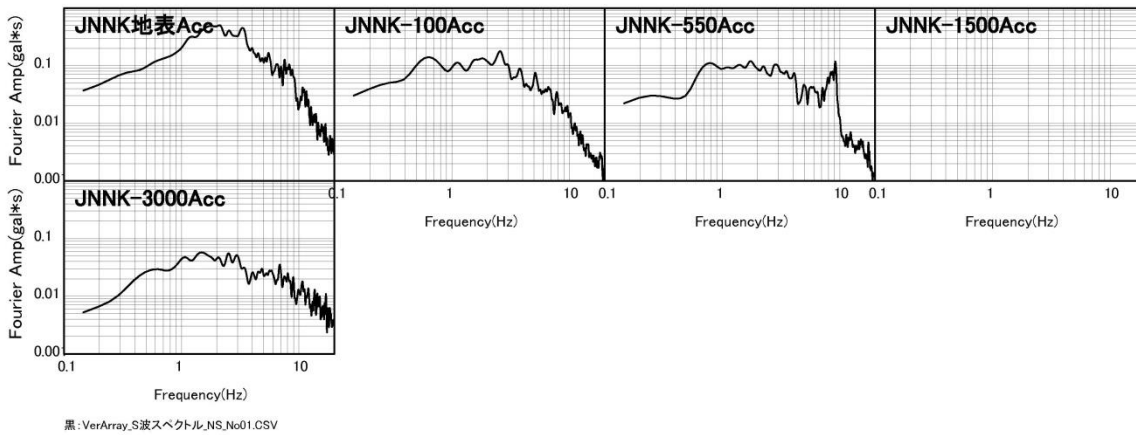


図 3.1-7 観測 S 波スペクトル(No.1) NS 成分

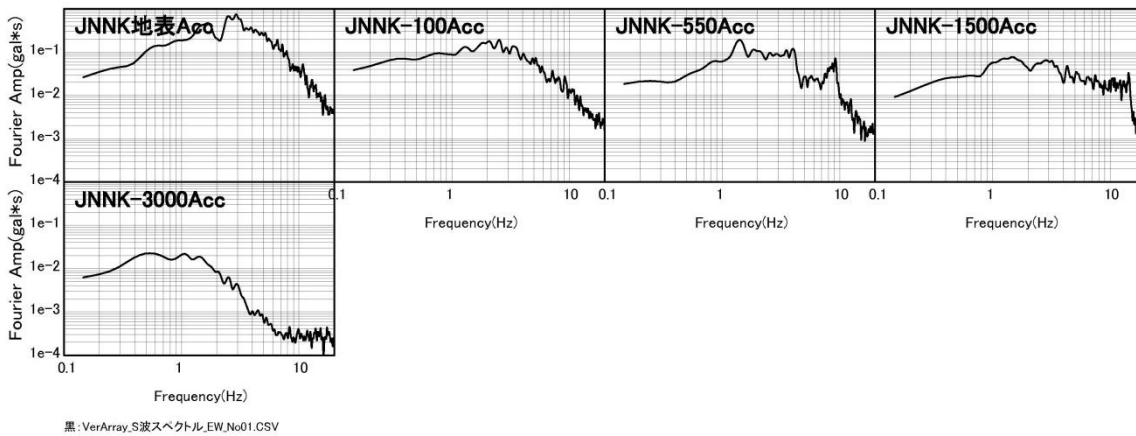


図 3.1-8 観測 S 波スペクトル(No.1) EW 成分

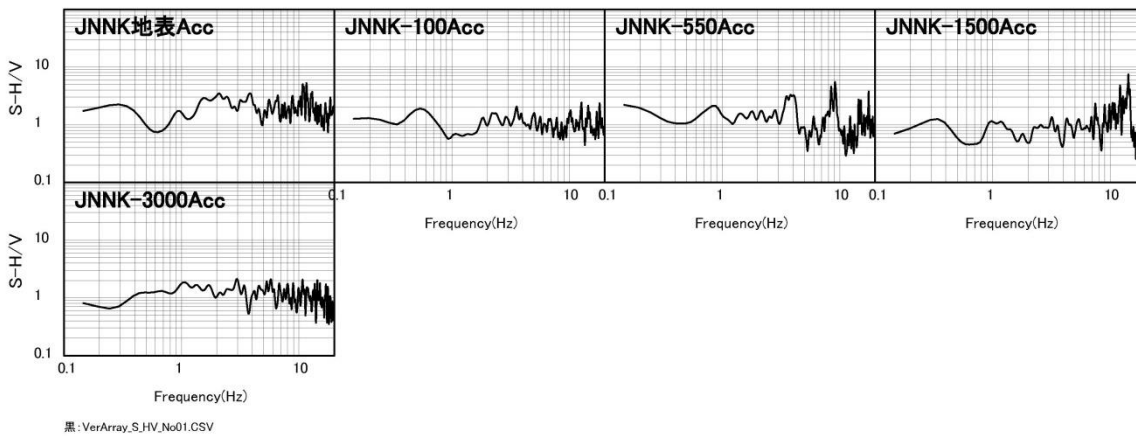


図 3.1-9 H/V スペクトル(No.1)

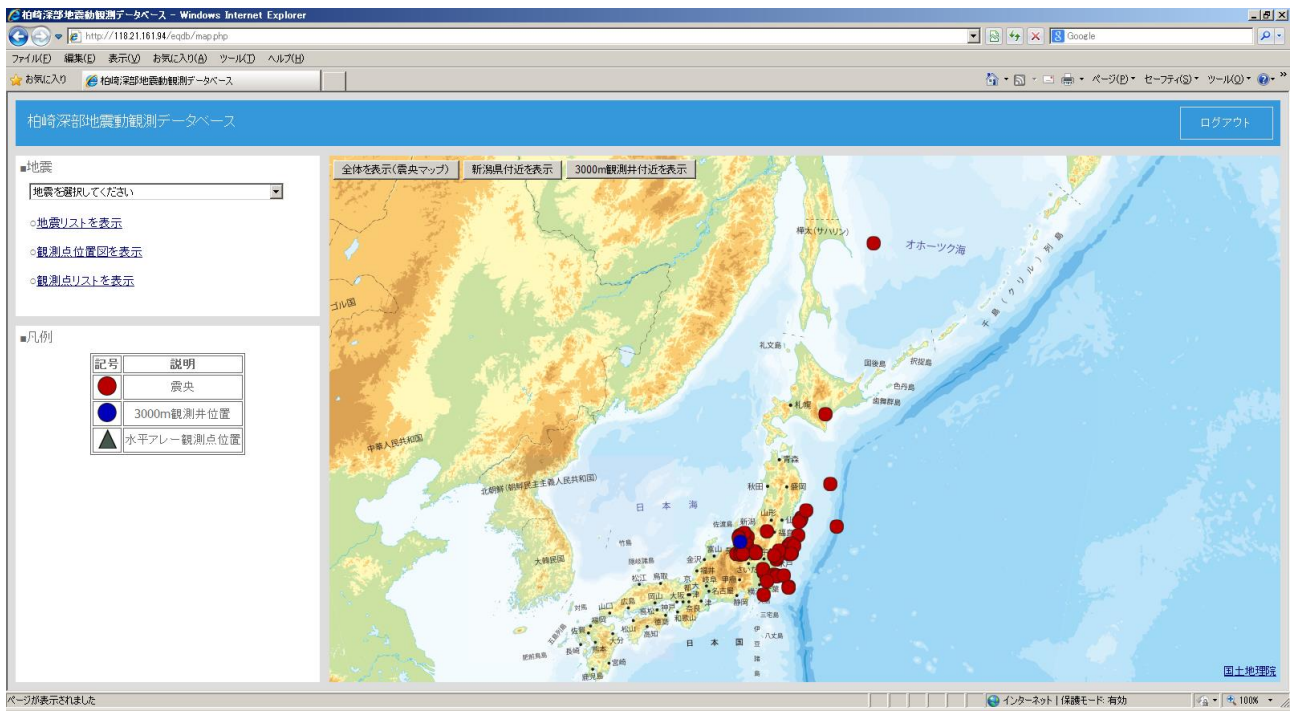


図 3.1-10 データベースのウェブページ

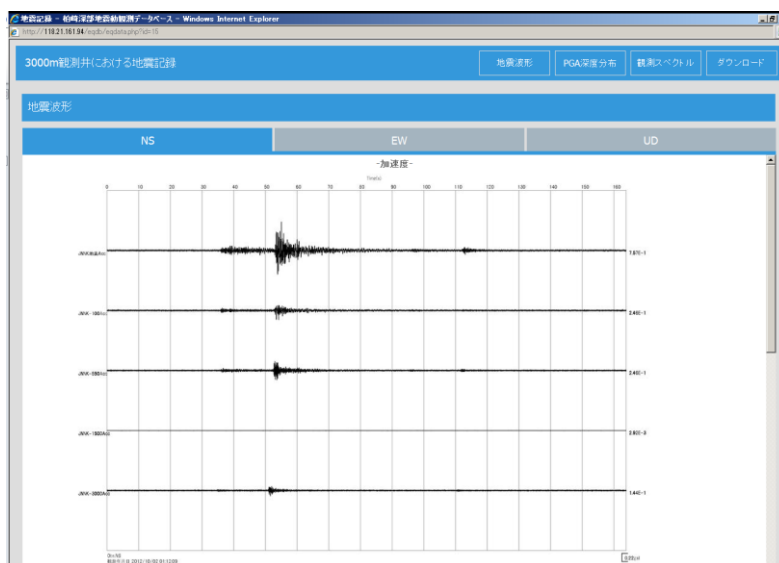
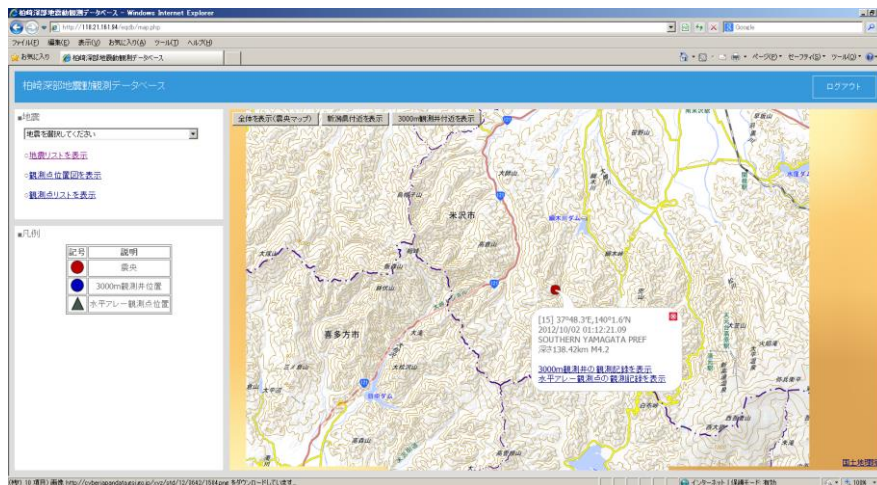


図 3.1-11 データベースの一例 鉛直アレーデータ

3.1.3 水平アレー地震動観測記録の整理

(1) 概要

前出の 3000m 深部地震動観測孔周辺に展開されている 28 箇所の水平アレー地震動観測点における地震動観測記録の整理を行い、イベント毎の地震データベースを作成した。地震データベースの詳細は深部地震観測記録に準拠した。収集した地震は深部地震観測記録で整理した地震と同じである。水平アレー地震動観測点は図 3.1-4、図 3.1-12 に示す。

(2) 地震動データの解析

図 3.1-13 に No.1 の地震の加速度波形のペーストアップを示す。また、図 3.1-14 および図 3.1-15 に観測 S 波スペクトルを示す。図 3.1-16 に H/V スペクトルを示す。図 3.1-17 に No.1 の地震における最大加速度分布(水平動)を示す。

解析では、全地震について S 波部分のフーリエスペクトルを計算し、観測孔の 3000m 地震計記録とのスペクトル比(以下、地表/孔中スペクトル比と呼ぶ)、観測孔の地表地震計記録とのスペクトル比(以下、地表/地表スペクトル比と呼ぶ)を算出した。また、H/V スペクトルについても算出した。

図 3.1-18 に地表/孔中スペクトル比を示す。観測孔 3000m 地震計記録の EW 成分が不良であったため、NS 成分の比を計算した。孔中記録の SN がよい地震のみを用いた。No.5、6、32、62、63、64 の地震である。

地表/地表スペクトル比および H/V スペクトルについては、すべてのデータについてスペクトル比を計算し、地震の到来方向別にデータを整理した。発生した地震を地域ごとに分類し、地域ごとに平均値を算出した。これは、地震波の入射方向によって地盤の応答特性がどのように異なっているかあるいは異なっていないのかを確認するためである。

図 3.1-19 に地表/孔中スペクトル比、地表/地表スペクトル比および H/V スペクトルの地域分けの図を示す。中越沖地震の余震と思われる地震が発生しているサイト北側、サイト直下の地震、長野県北部の地震の余震が発生しているサイト南部の地震、日光周辺で発生している火山性の地震、茨城県福島県県境で発生している内陸地殻内の地震、福島沖で発生しているプレート境界の地震の 6 つに分類した。サイト北側、サイト直下は第四系が厚く堆積している地域である。サイト南側は第四系の火山岩類が分布、栃木県の地震の地域には鮮新統火山岩類が分布している地域である。茨城県福島県県境の地震の地域には地震基盤相当の基盤岩類が露出している地域である。

地表/地表スペクトル比は、NS 成分と EW 成分の相乗平均とした。図 3.1-20 にサイト南側の地震、図 3.1-21 にサイト北側の地震、図 3.1-22 に栃木県の地震、図 3.1-23 にサイト直下の地震、図 3.1-24 に茨城県福島県県境の地震、図 3.1-25 に福島県沖の地震の地表/地表スペクトル比を示す。図 3.1-26 は、平均値の比較を示す。到来方向による地表/地表スペクトル比の違いはあまり顕著でなかった。観測点ごとのピーク周期について見てみると、比較的観測点間の距離に近い JNNK01 と JNNK04 で卓越周波数がそれぞれ 2Hz 付近、1Hz 付近と、観測孔に近い JNNK04 の方が卓越周波数が低くなっており、地下構造が複雑に変化していることを示している。また、JNNK02 は周波数 1Hz 程度の地表/地表スペクトル比の値が最も大きく、この地域において表層地盤が厚く堆積していることを示している。観測孔付近の JNNK22~28 において、

周波数 2Hz 程度にピークが見られる観測点もあり、観測孔周辺で浅部地盤が変化していることを示唆している。

図 3.1-27 にサイト南側の地震、図 3.1-28 にサイト北側の地震、図 3.1-29 に栃木県の地震、図 3.1-30 に観測点直下の地震、図 3.1-31 に茨城県福島県県境の地震、図 3.1-32 に福島県沖の地震の H/V スペクトルを示す。図 3.1-33 は、平均値の比較を示す。到来方向による H/V スペクトルの違いは、地表/地表スペクトル比と同様にあまり顕著でなかった。また、地表/地表スペクトル比と比べると、低周波数側のピーク周波数は両者よく一致している。

(3) 地震データベースの作成と登録

水平アレー地震観測記録についても

- (a) 気象庁一元化震源に基づく諸元
- (b) 震央分布
- (c) 地震波形
- (d) 最大加速度深度分布
- (e) フーリエスペクトルおよびスペクトル比

のデータをデータベースとして登録した。図 3.1-34 にデータベースの表示例を示す。

【3000m深部地震動観測井周辺における地震動観測】 東西約4km、南北約4kmの範囲

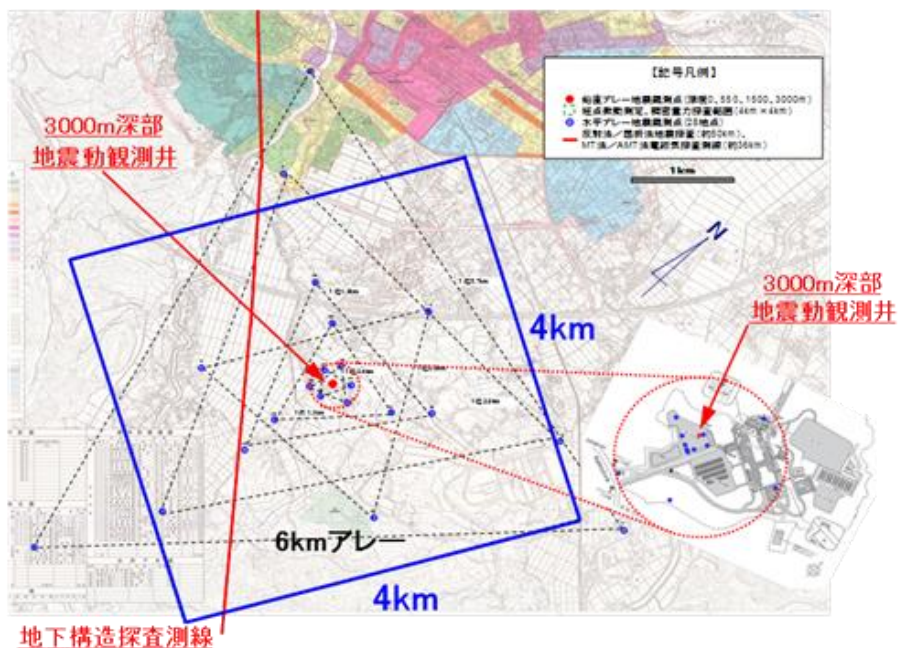


図 3.1-12 3000m 深部地震動観測井周辺の地震動観測点の位置((独)原子力安全基盤機構(2013))

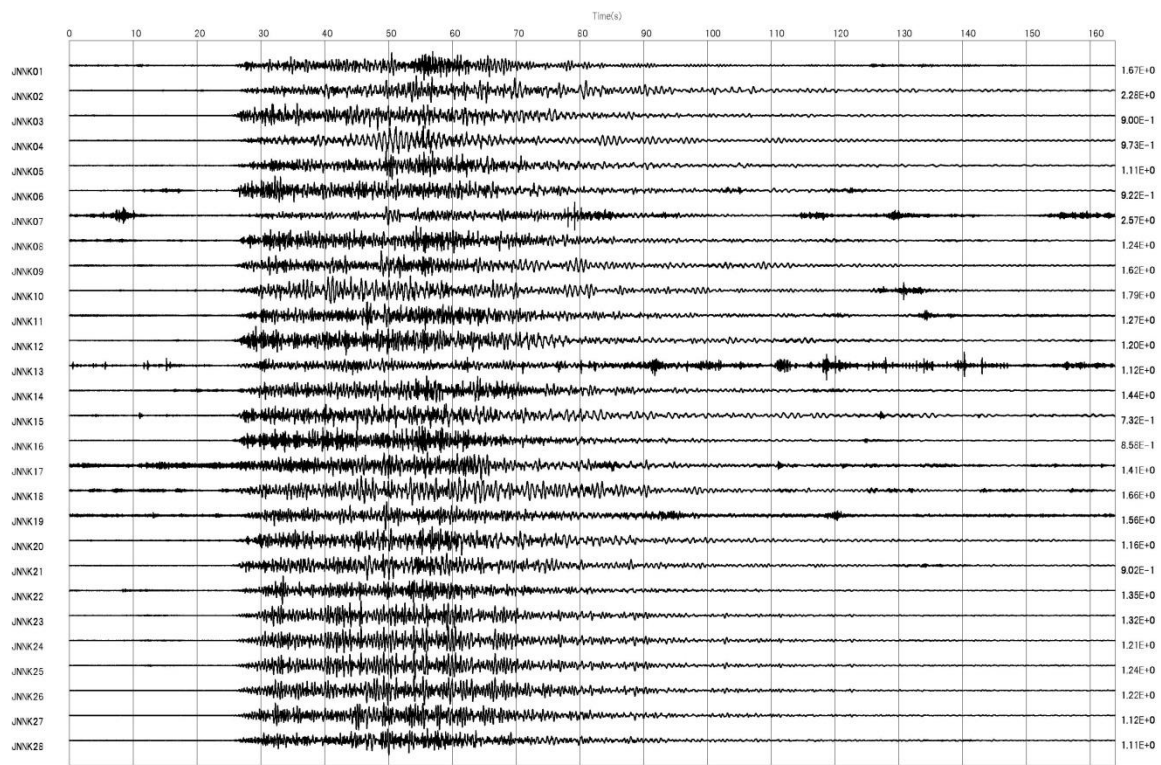
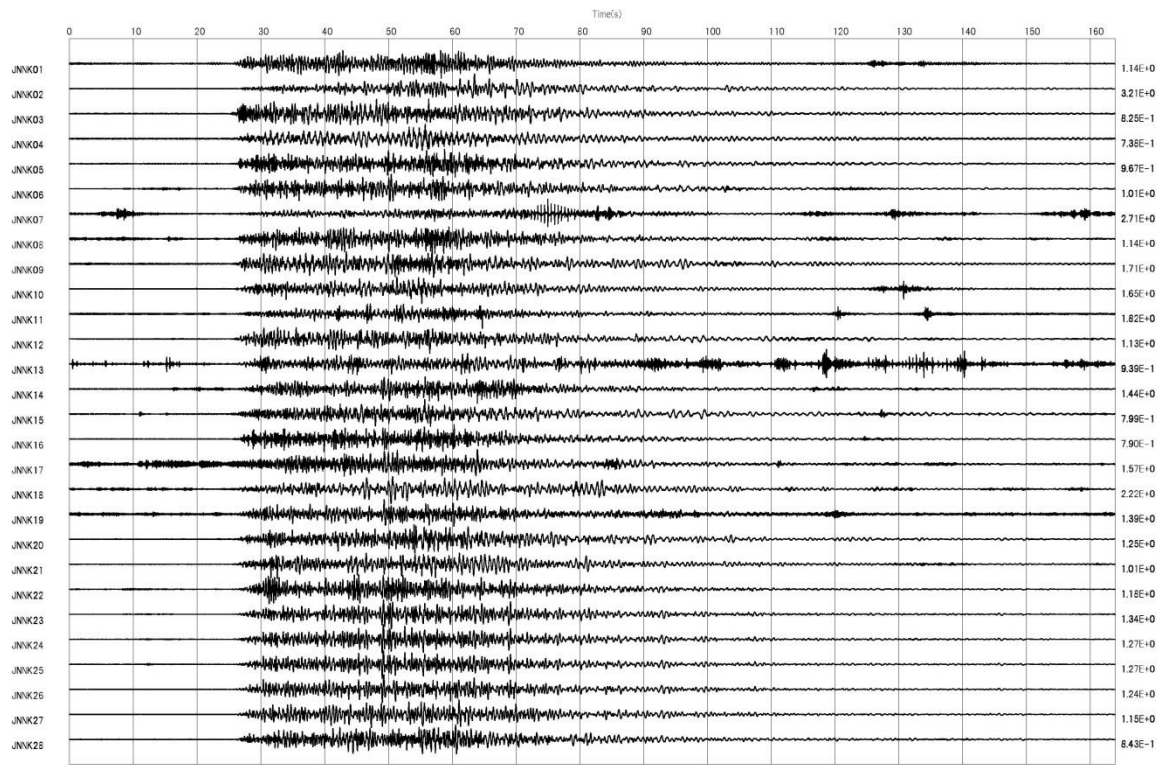
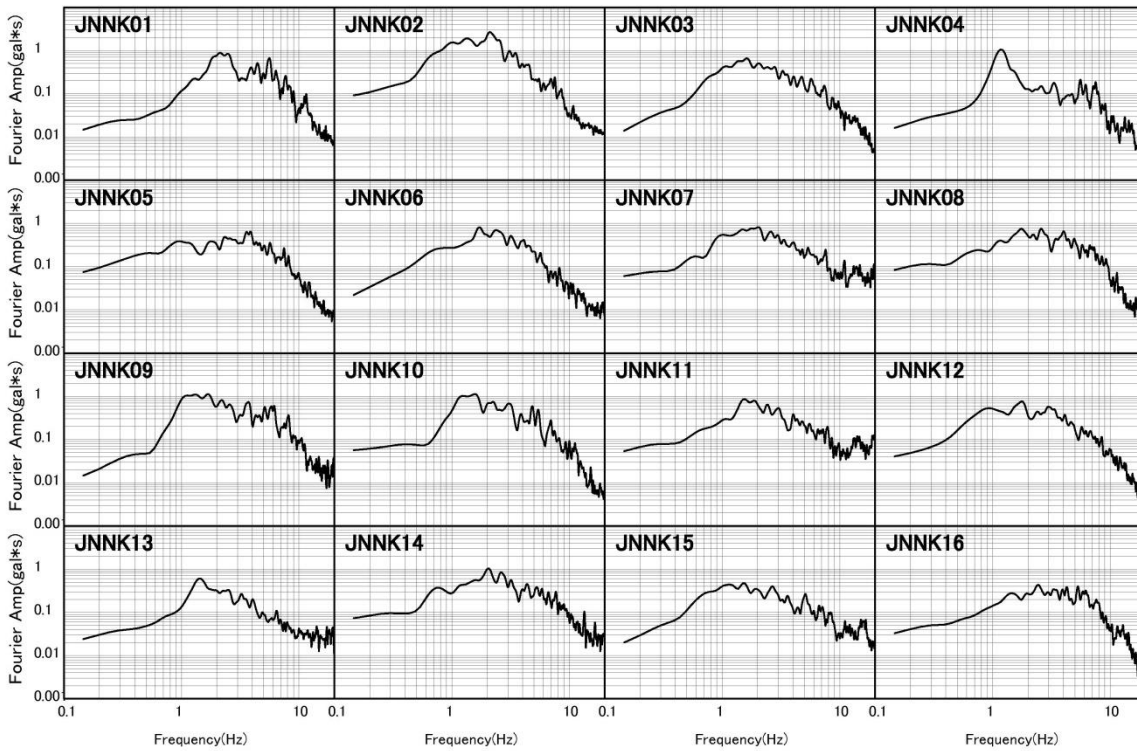
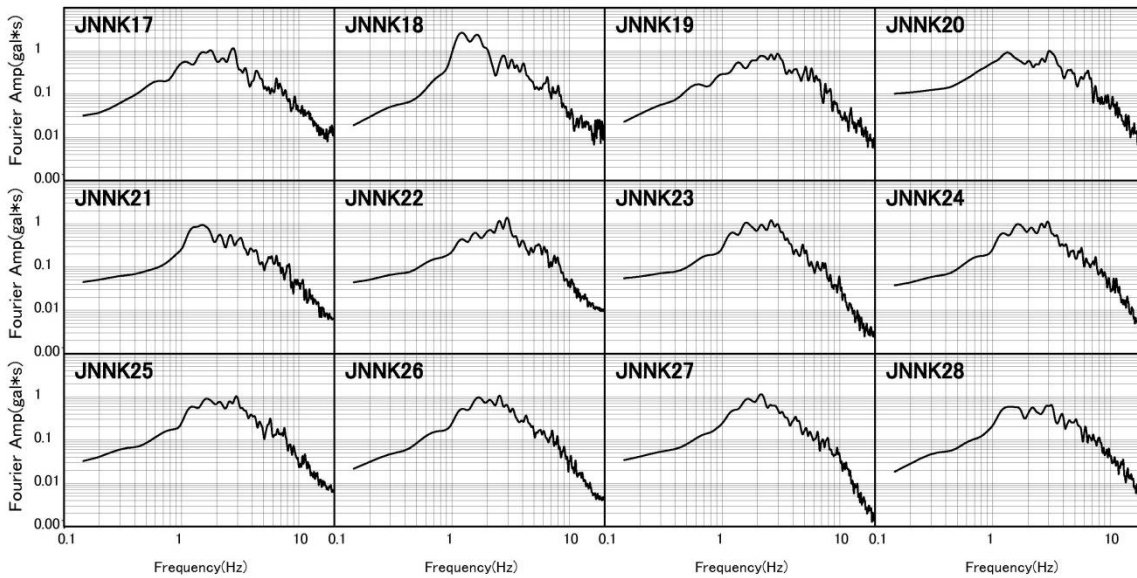


図 3.1-13 観測波形ペーストアップ(No.1) 加速度波形 上図:NS 成分、下図:EW 成分

右の値は最大加速度 単位:gal



黒:HorArray_S波スペクトル_NS.No01.CSV



黒:HorArray_S波スペクトル_NS.No01.CSV

図 3.1-14 観測 S 波スペクトル(No.1) NS 成分

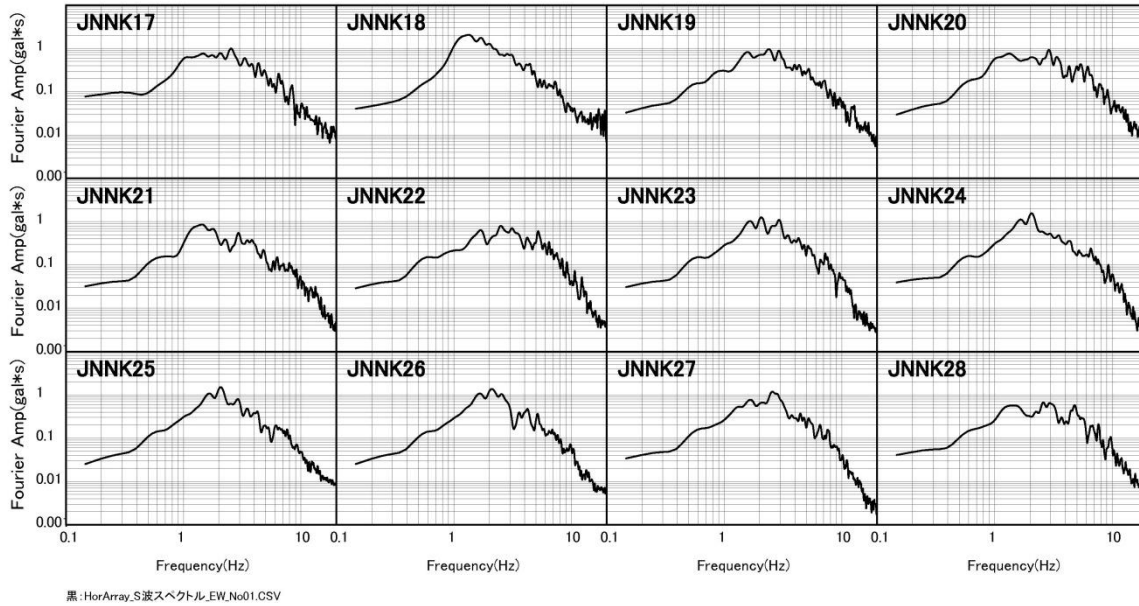
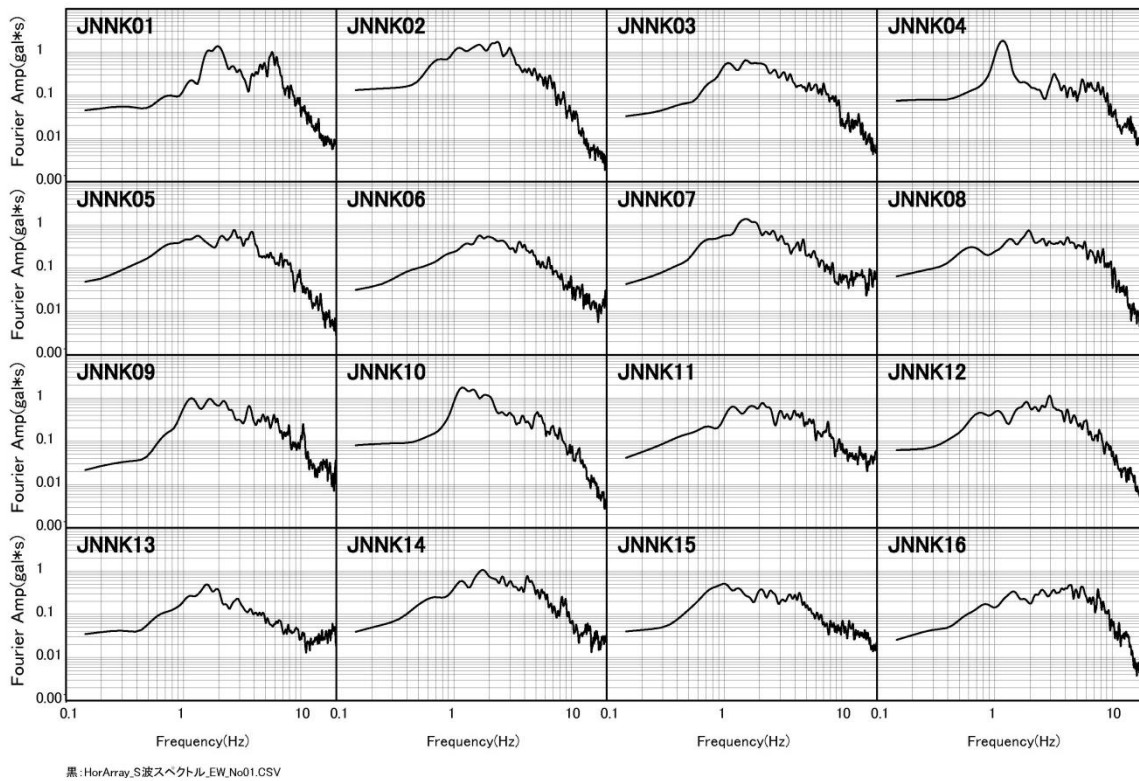
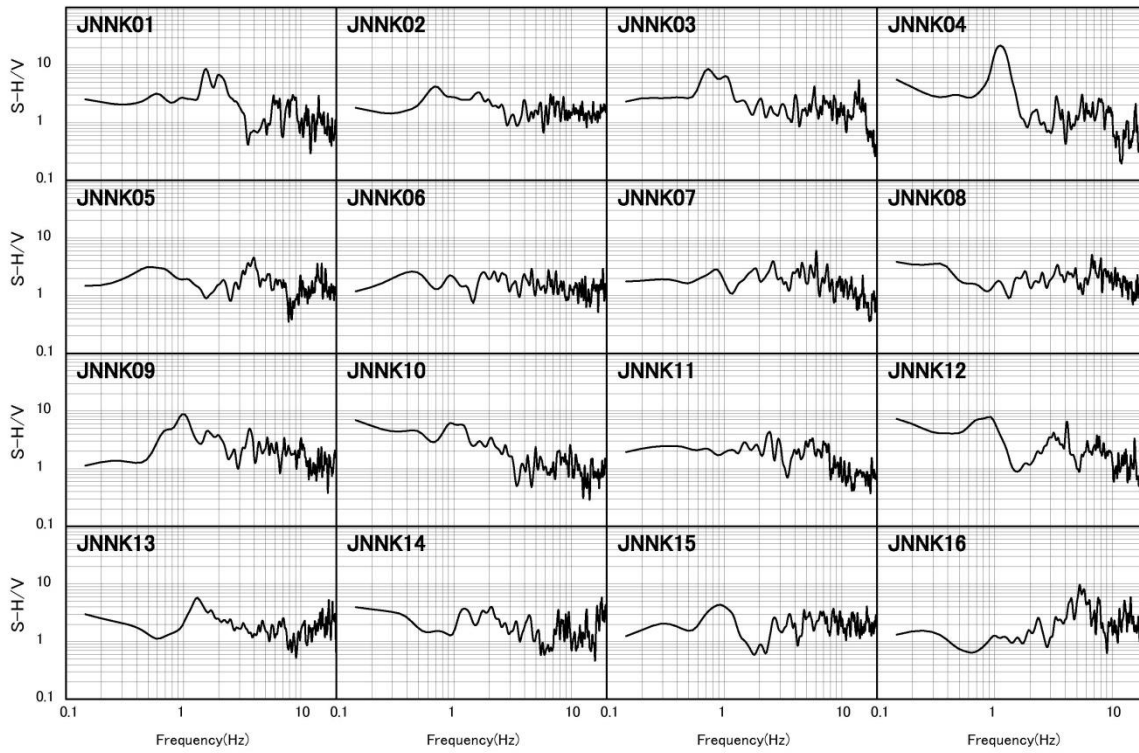
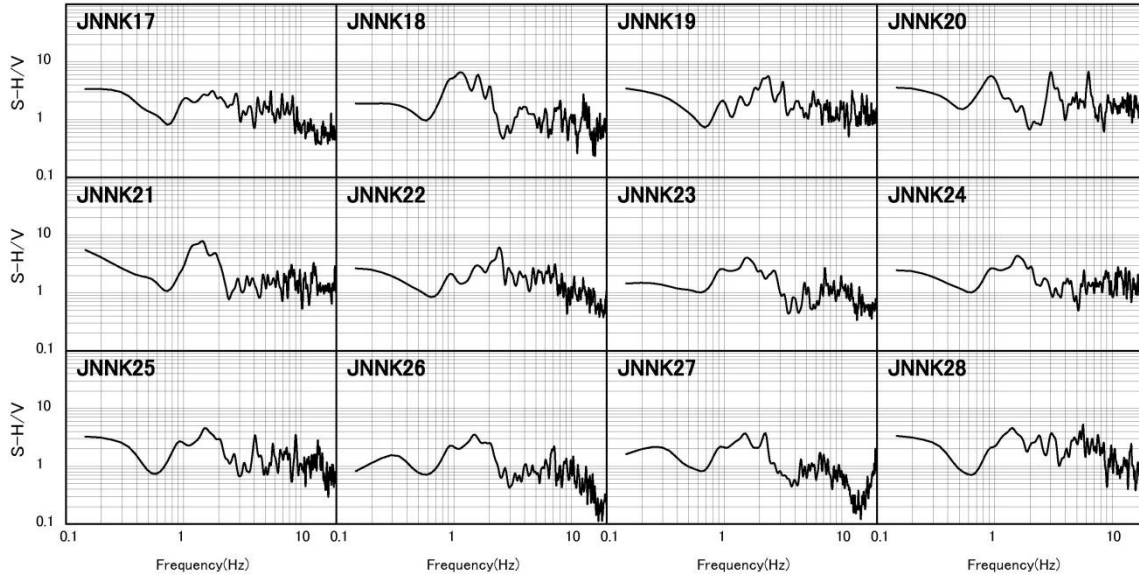


図 3.1-15 観測 S 波スペクトル(No.1) EW 成分



黒:HorArray_S_HV_No01.CSV



黒:HorArray_S_HV_No01.CSV

図 3.1-16 観測 H/V スペクトル(No.1)

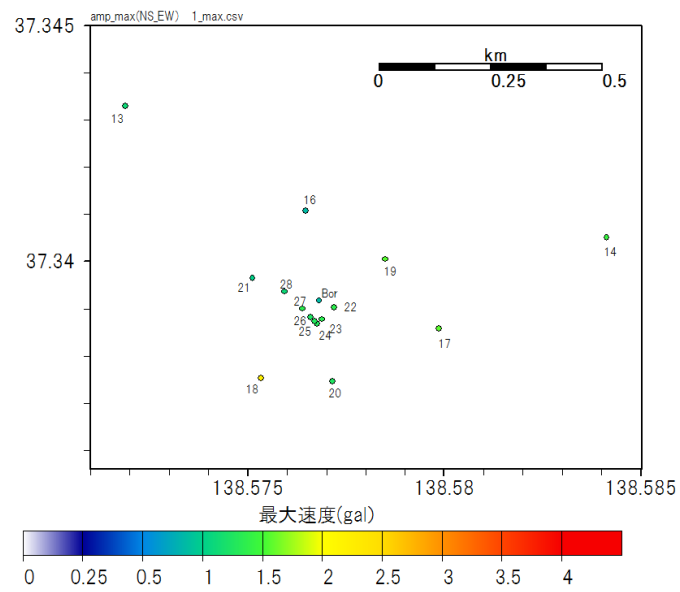
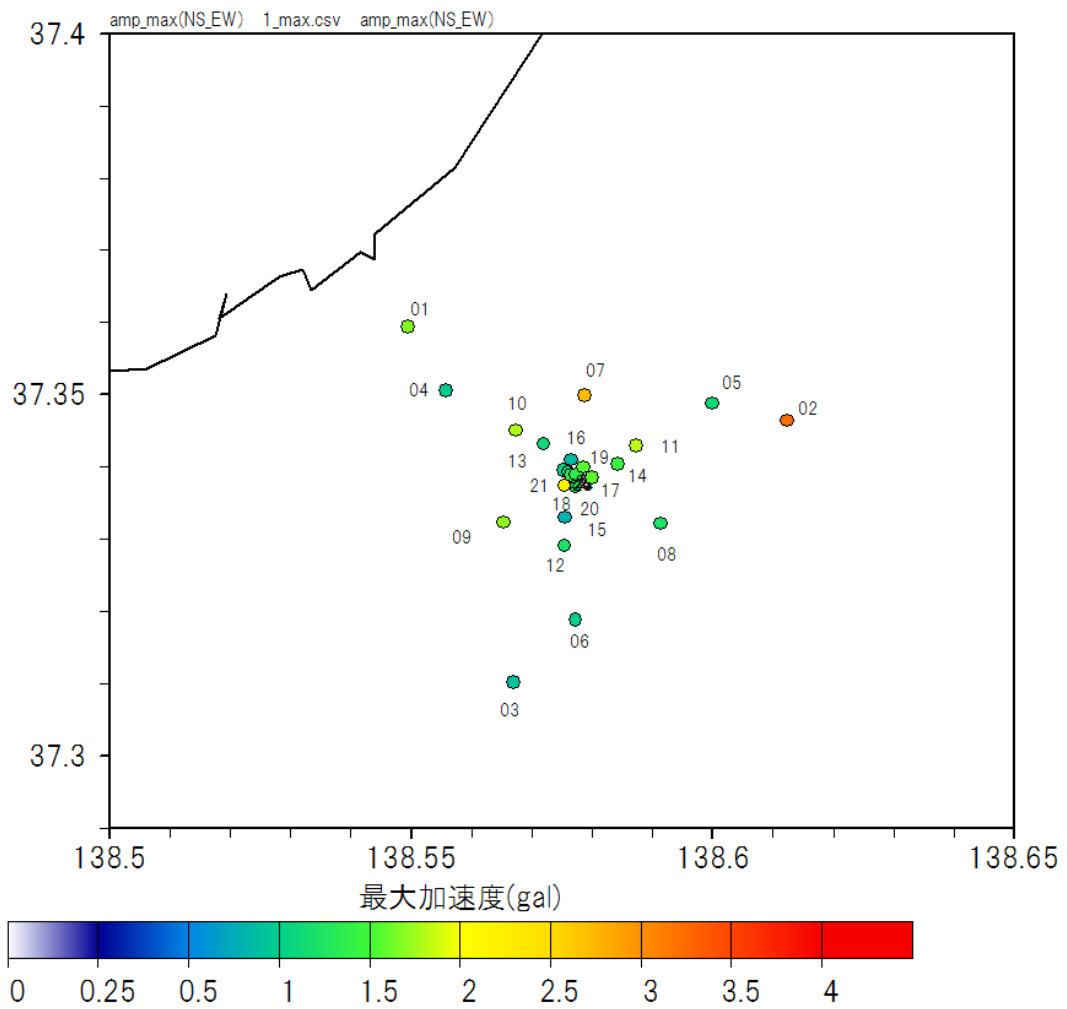
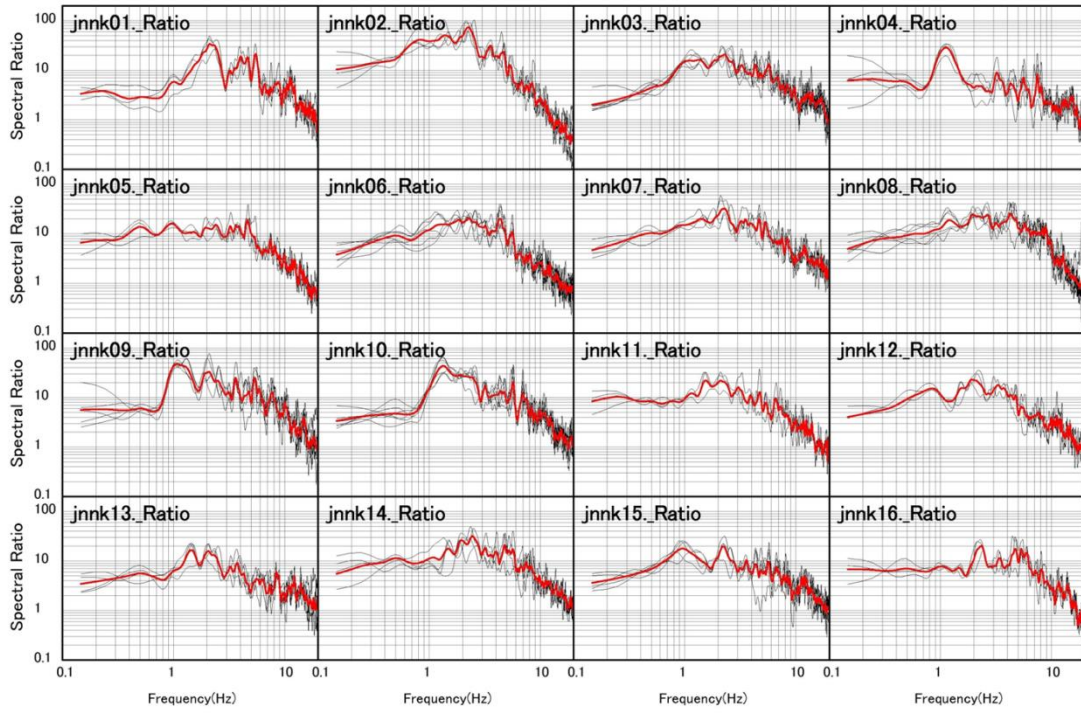


図 3.1-17 No.1 の地震における最大加速度分布(水平動)



黒: D/V規制庁VDATAV解析結果V孔中スペクトル比VRATIO基盤V

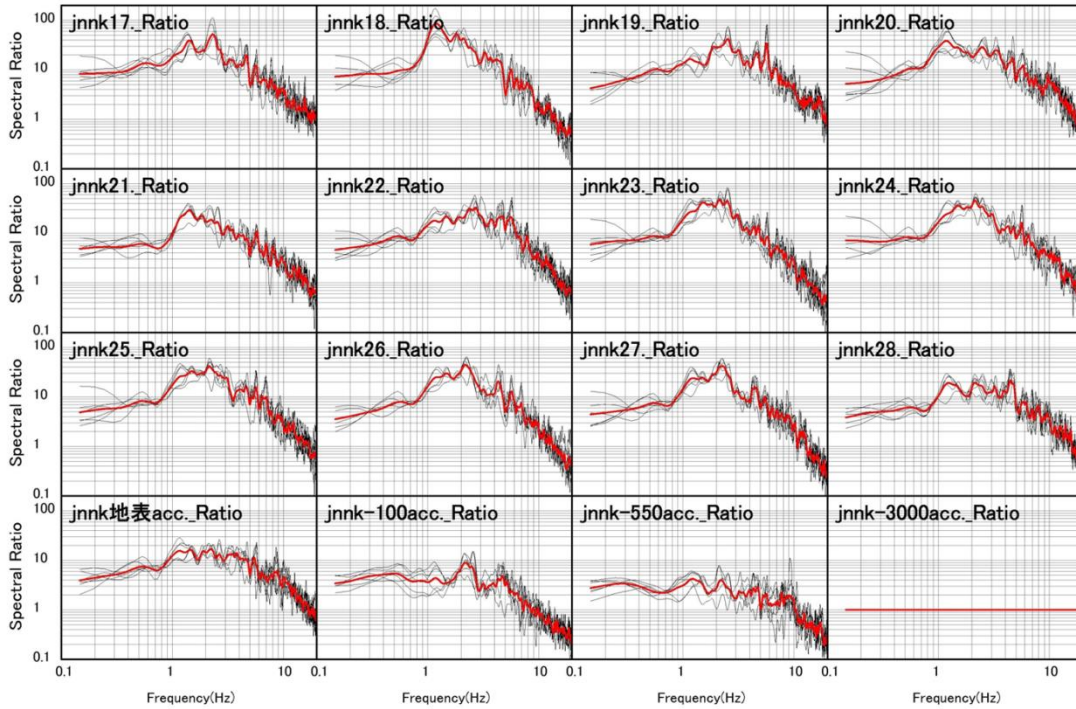


図 3.1-18 地表/孔中スペクトル比(観測孔の 3000m 地震計記録とのスペクトル比)
NS 成分

細い線は各地震の地表/孔中スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

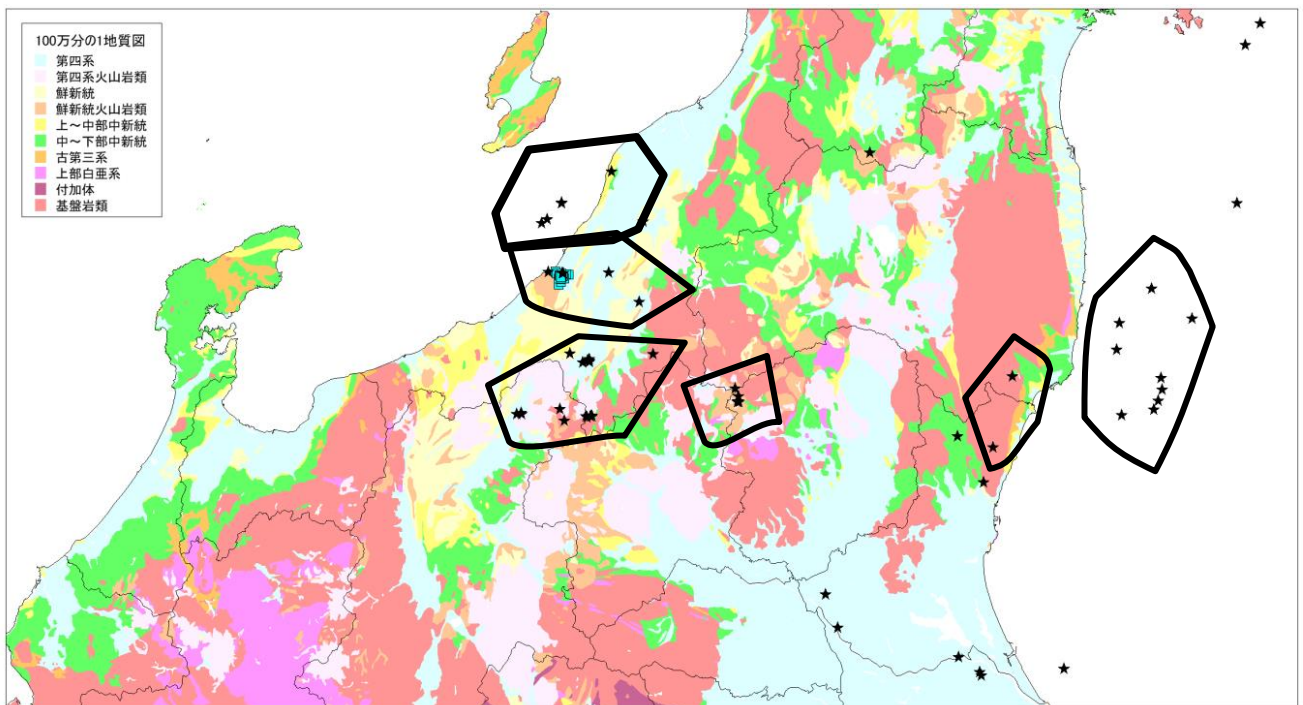
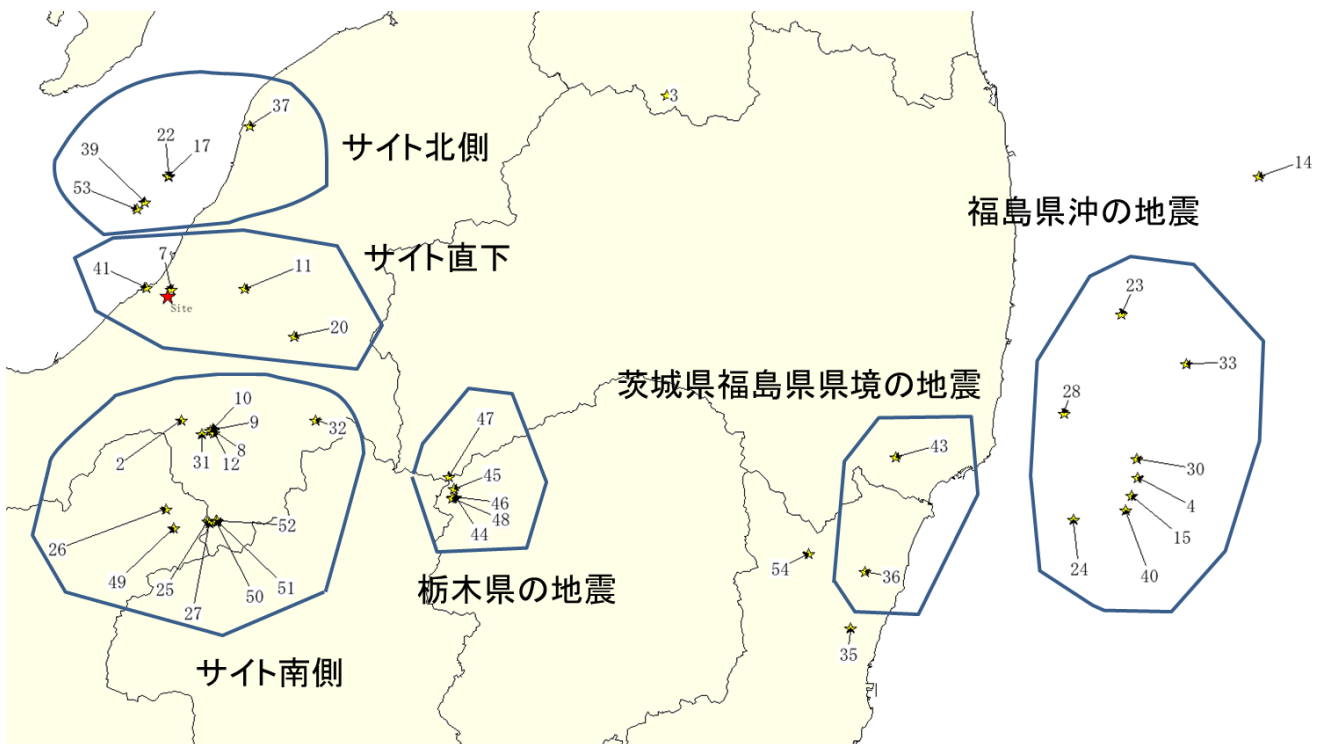
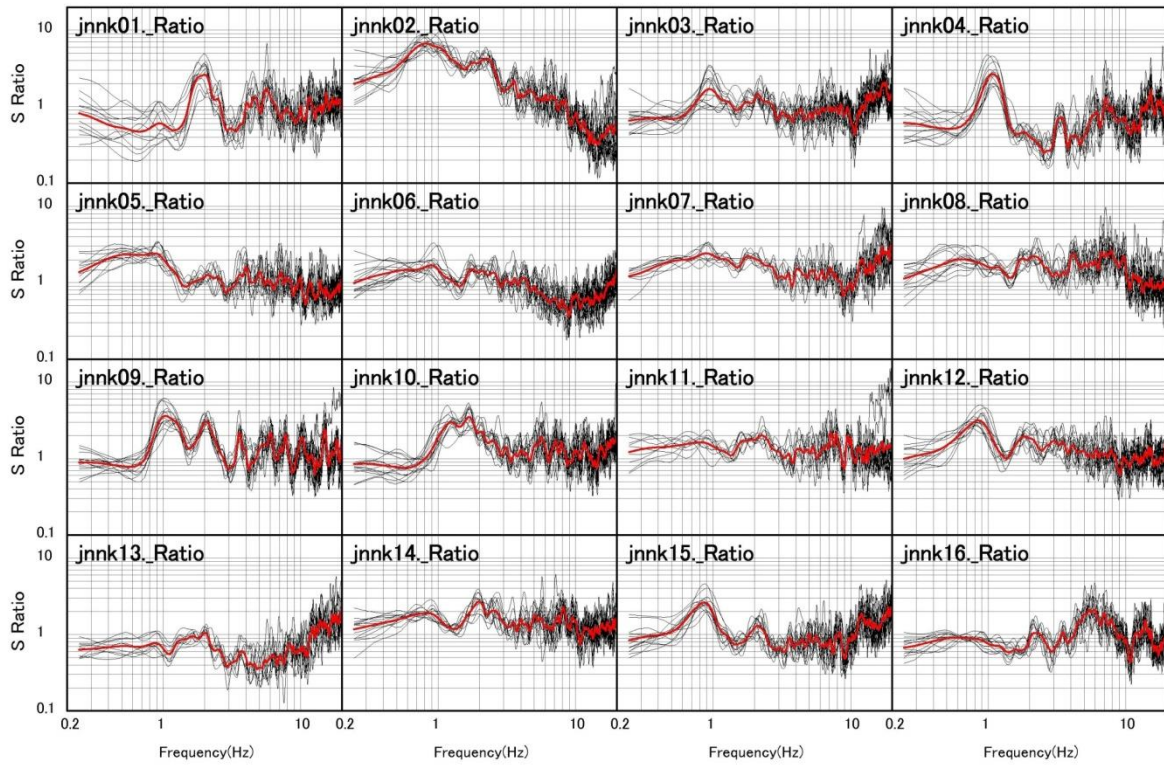
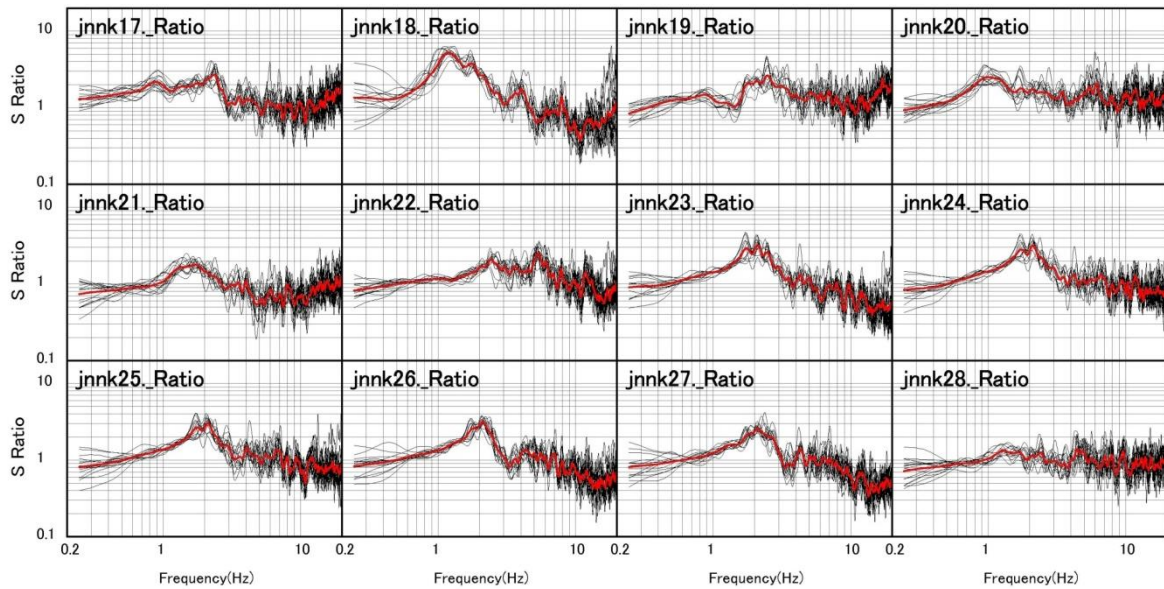


図 3.1-19 地表/地表スペクトル比及び H/V スペクトルの地域分け



黒:D:\規制庁\data\解析結果\01南側\波\ratio\



黒:D:\規制庁\data\解析結果\01南側\波\ratio\

図 3.1-20 地表/地表スペクトル比 サイト南側
 細い線は各地震の地表/地表スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

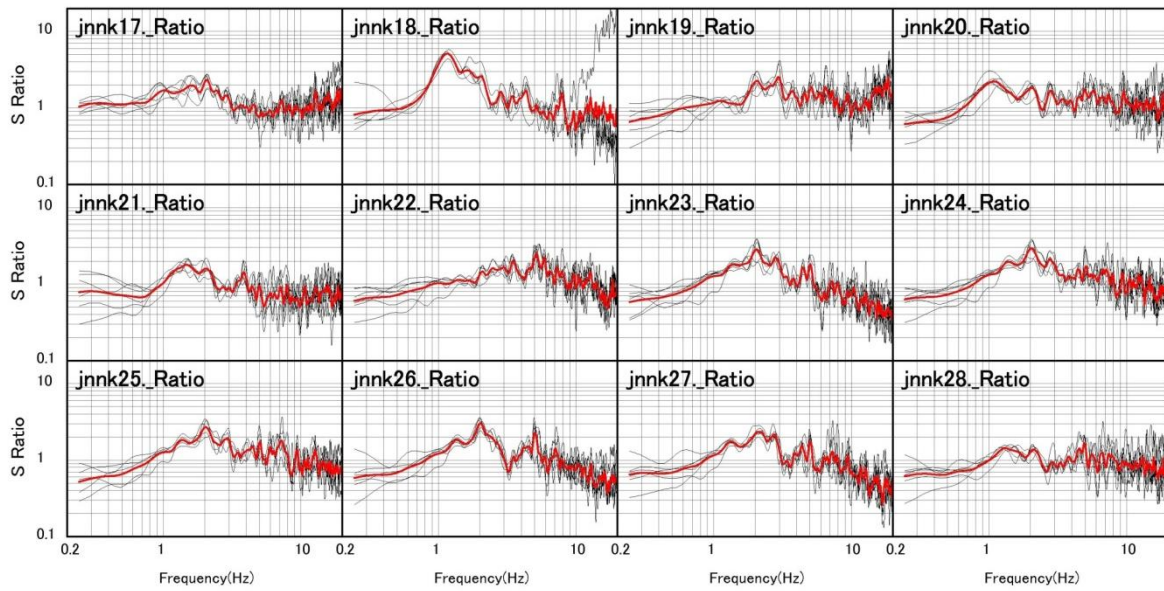
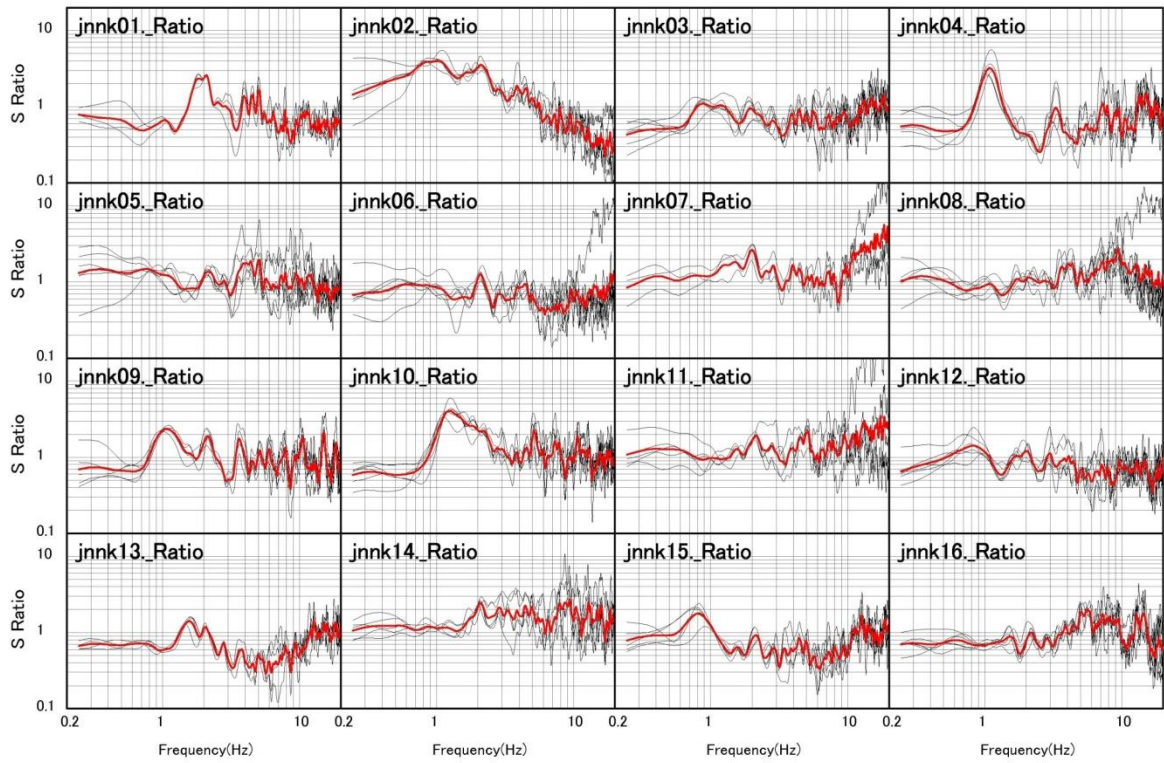
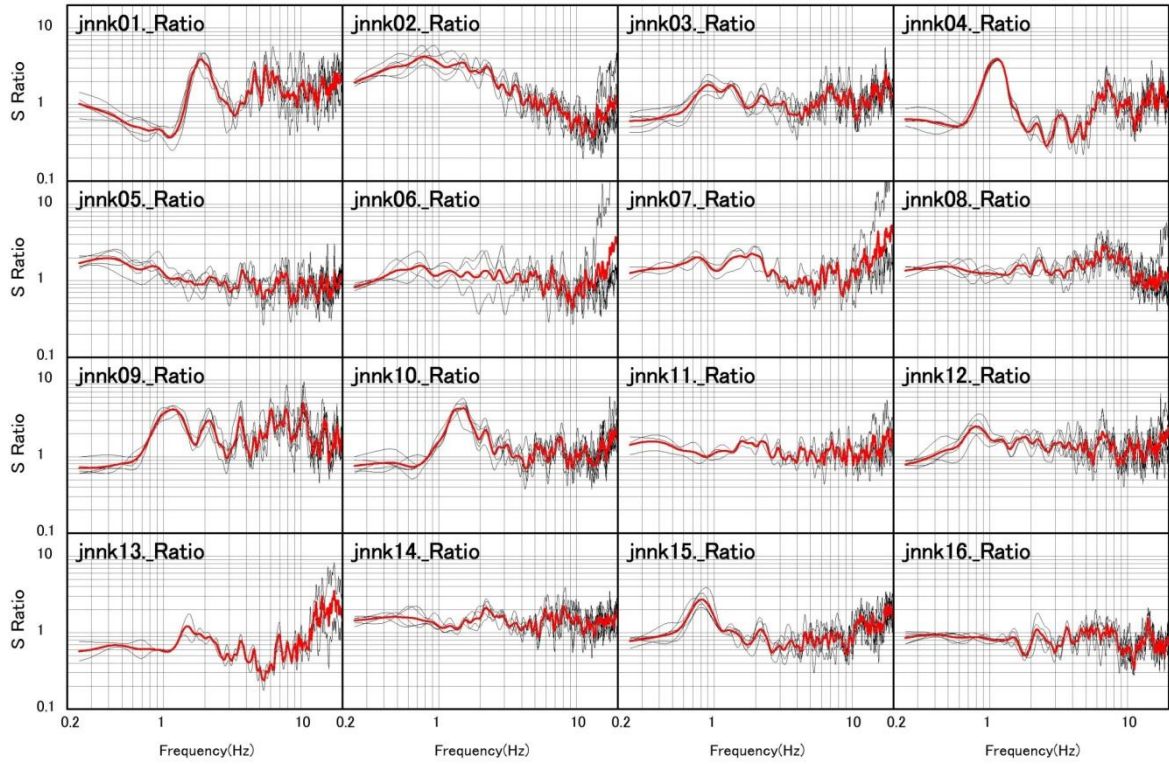
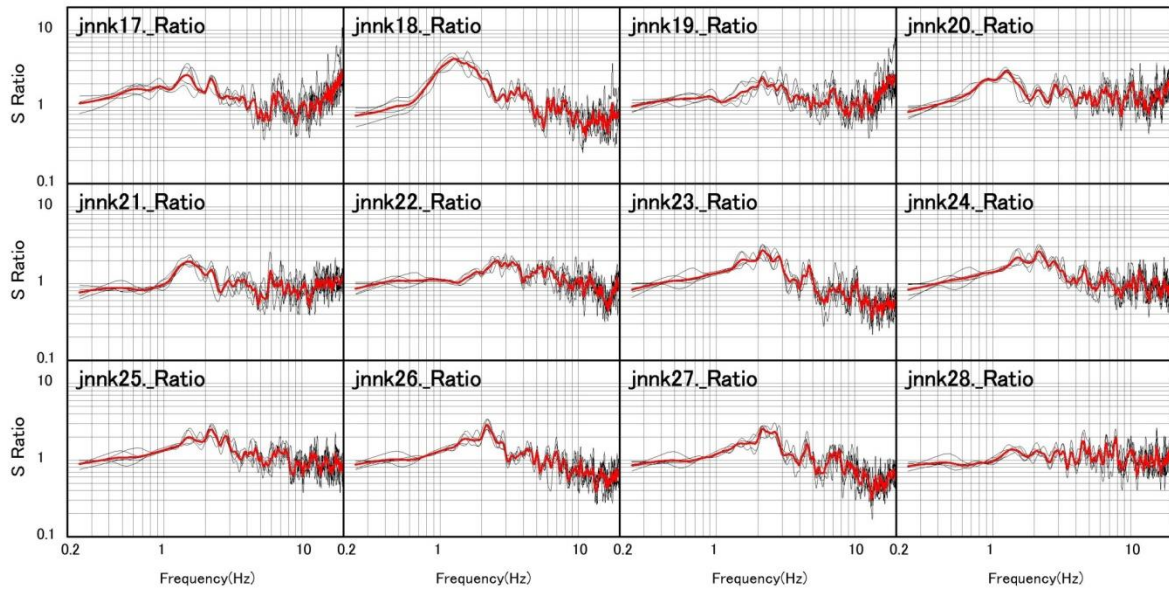


図 3.1-21 地表/地表スペクトル比 サイト北側

細い線は各地震の地表/地表スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

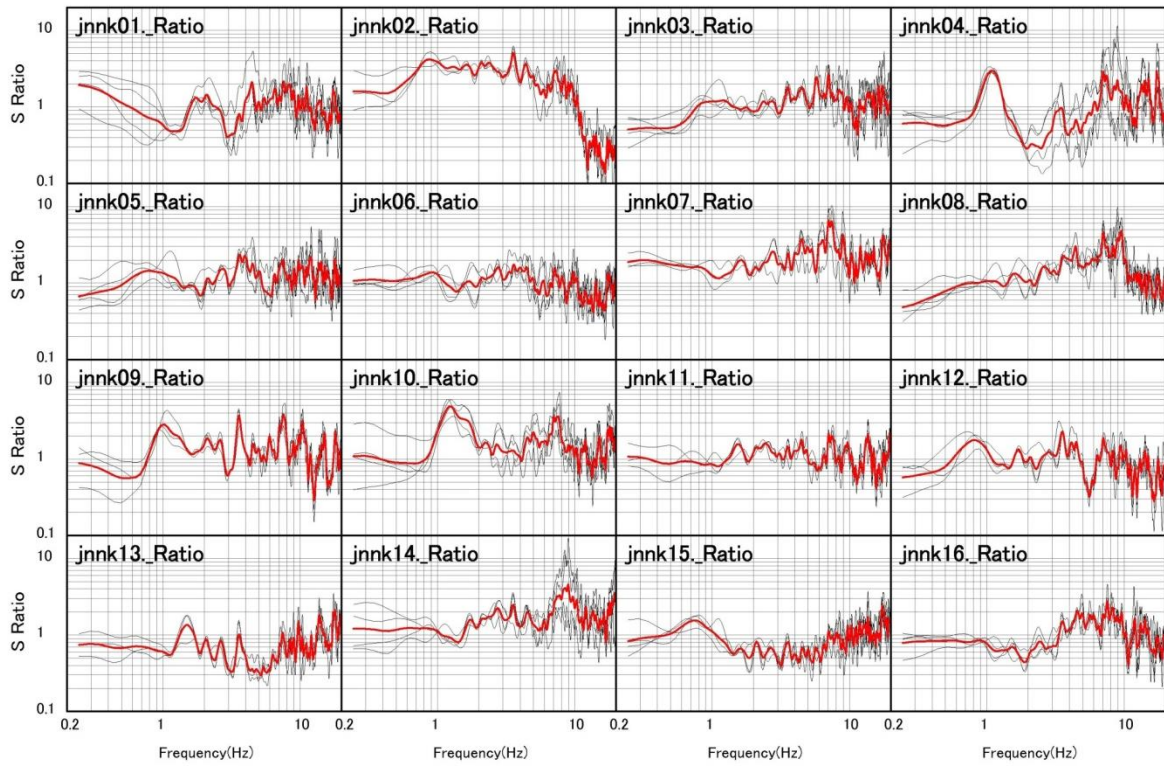


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\04栃木県\S波\Ratio\

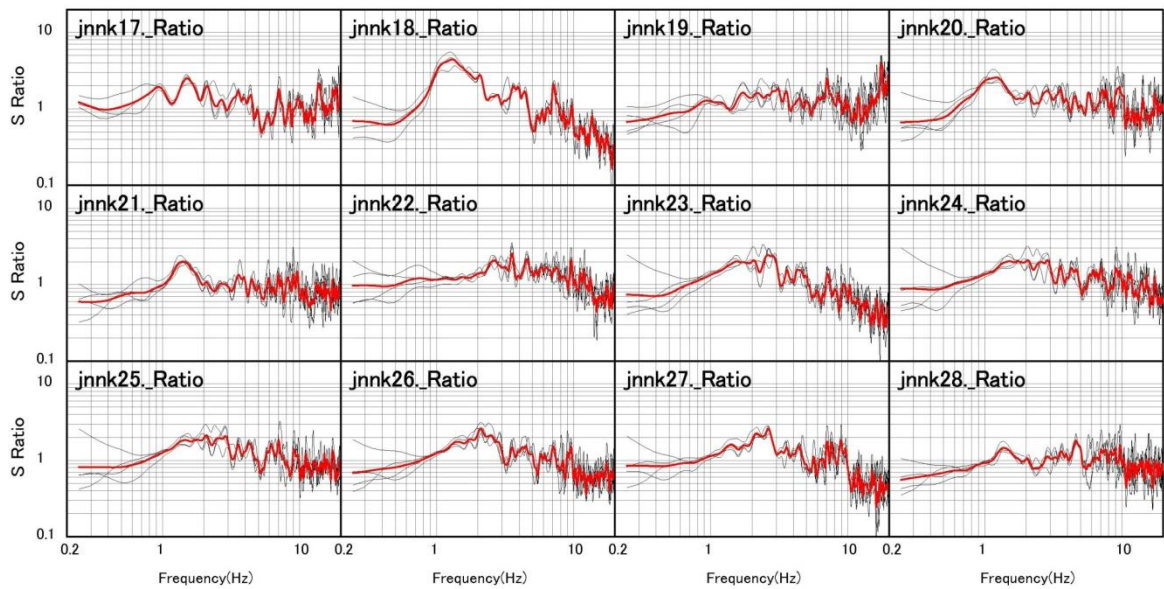


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\04栃木県\S波\Ratio\

図 3.1-22 地表/地表スペクトル比 栃木県の地震
 細い線は各地震の地表/地表スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

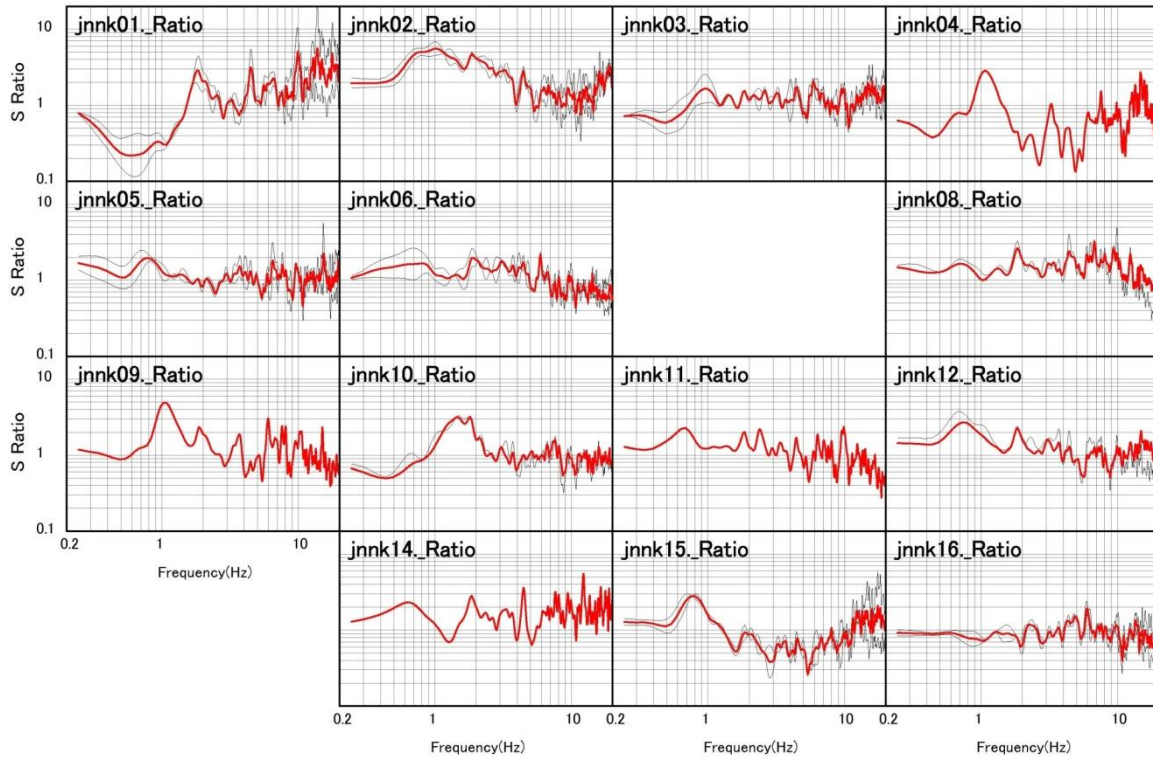


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\03直下\S波\Ratio*

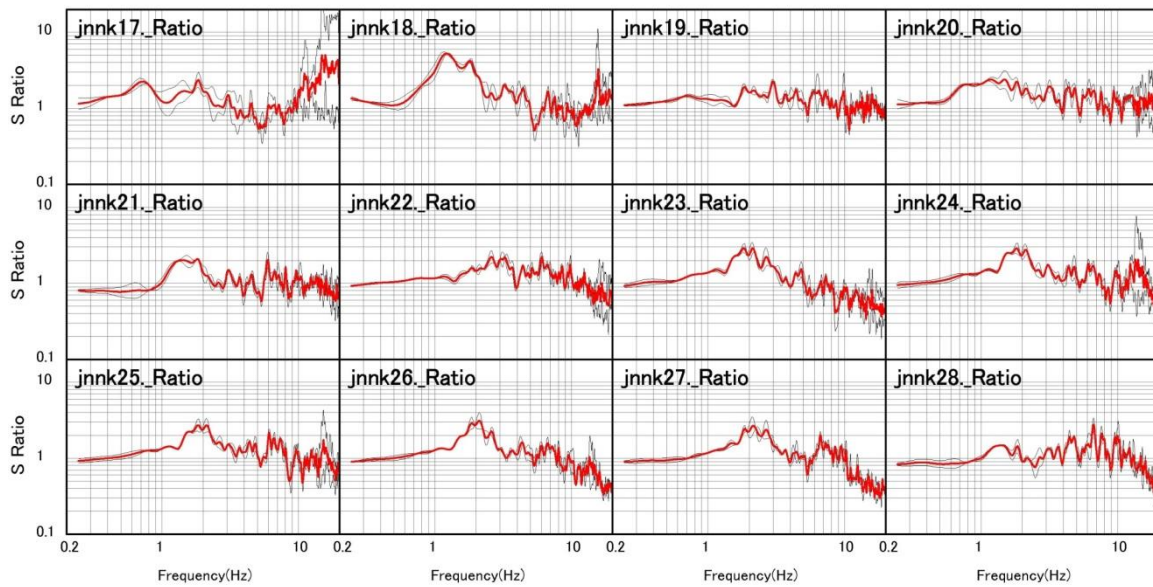


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\03直下\S波\Ratio*

図 3.1-23 地表/地表スペクトル比 サイト直下の地震
 細い線は各地震の地表/地表スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

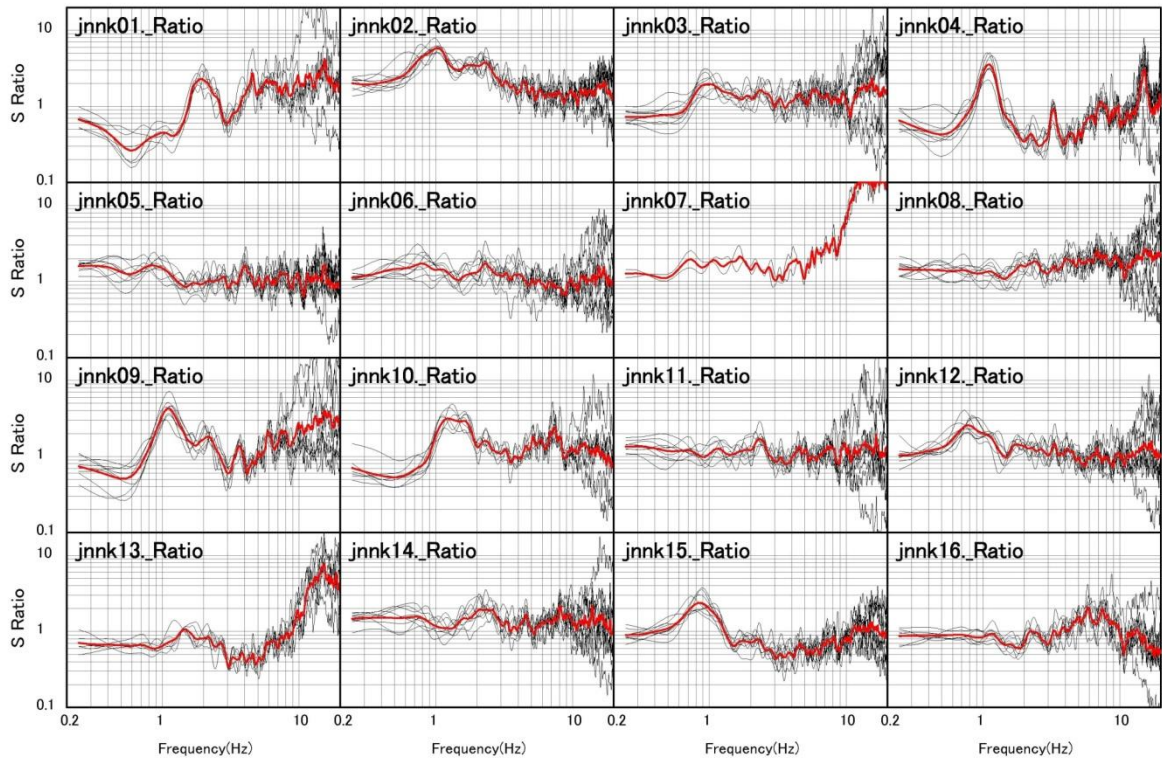


黒: D-V規制庁VDATA解析結果V05福島茨城県境V波VRatioV

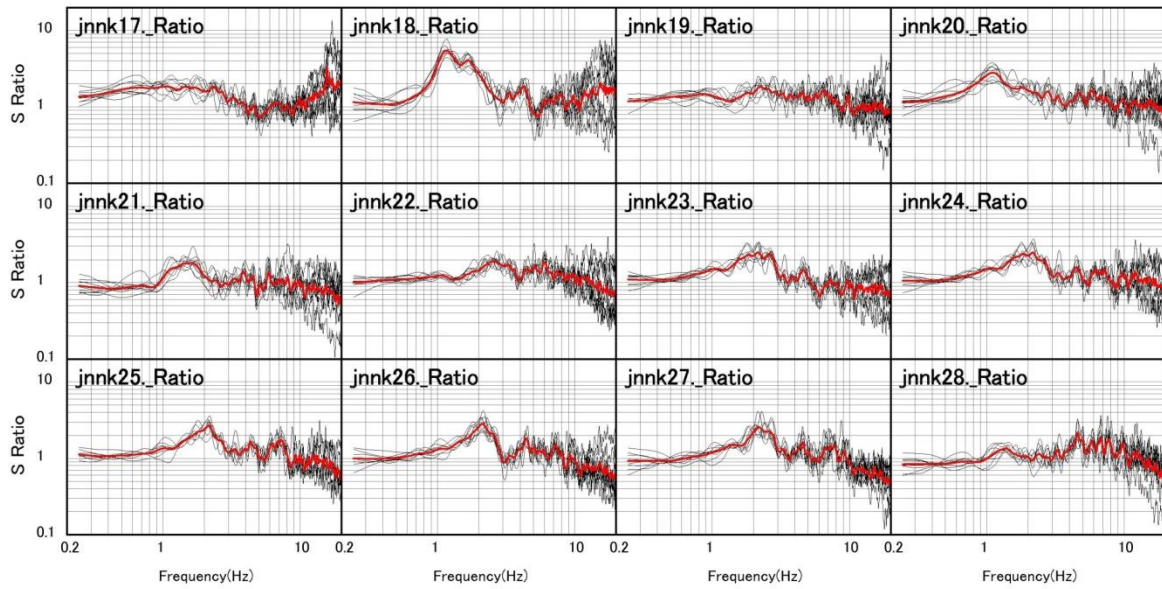


黒: D-V規制庁VDATA解析結果V05福島茨城県境V波VRatioV

図 3.1-24 地表/地表スペクトル比 茨城県福島県県境の地震
 細い線は各地震の地表/地表スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

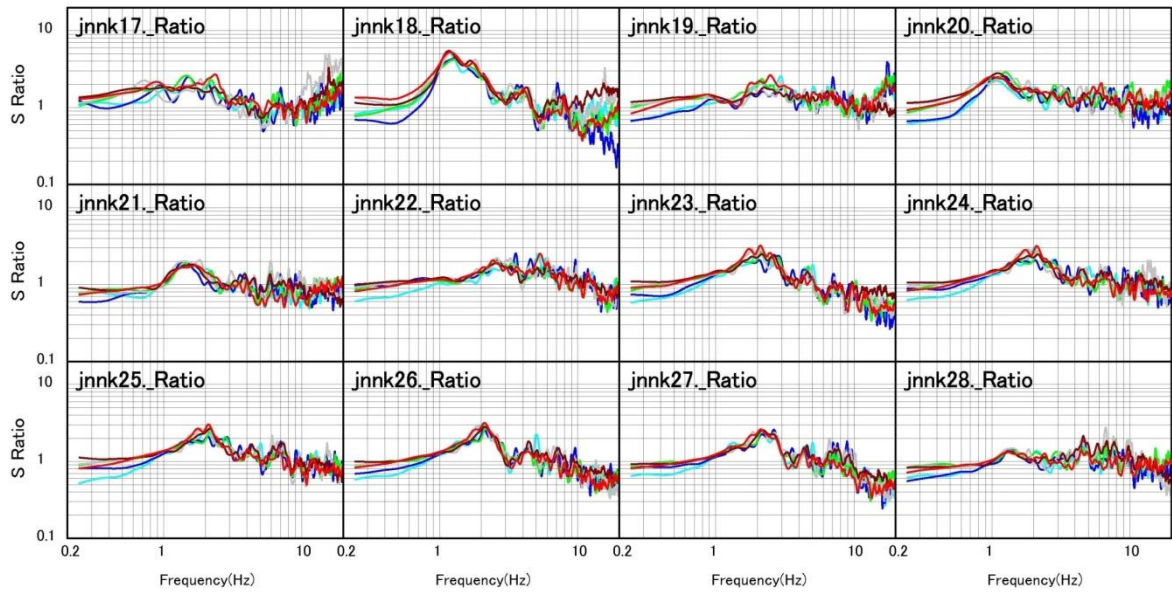
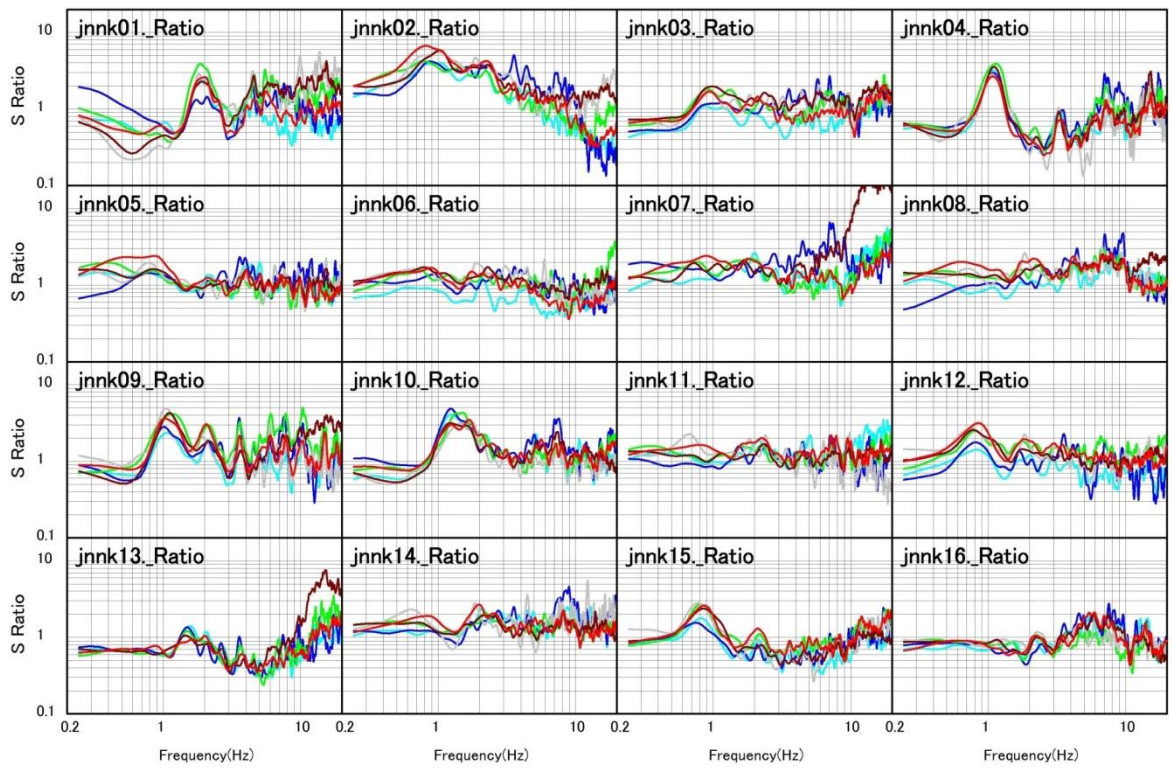


黒:D:\規制庁\data\解析結果\06福島県沖\S波\Ratio\



黒:D:\規制庁\data\解析結果\06福島県沖\S波\Ratio\

図 3.1-25 地表/地表スペクトル比 福島県沖の地震
 細い線は各地震の地表/地表スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す



黒：南側S_Ratio.csv
 青：直下S_Ratio.csv
 灰色：福島県境_S_Ratio.csv

水色：北側S_Ratio.csv
 緑：Niigata_S_Ratio.csv
 茶：福島県境_S_Ratio.csv

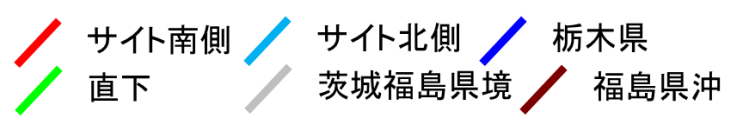
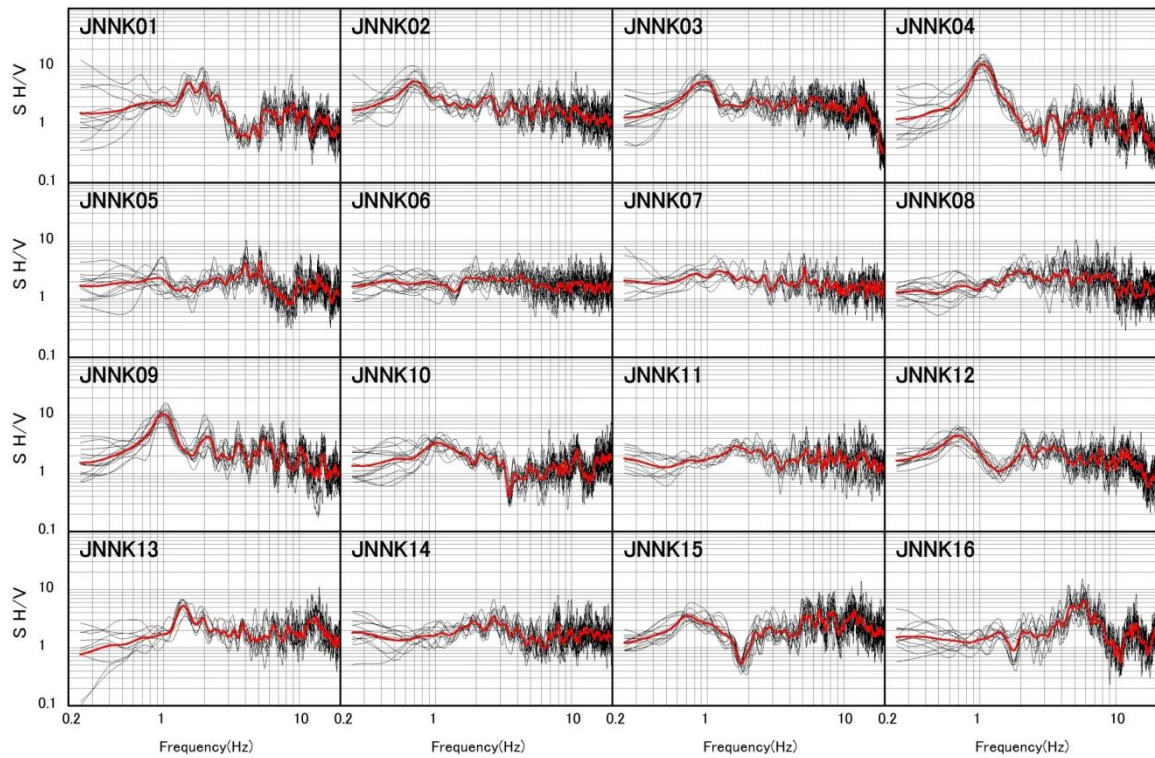
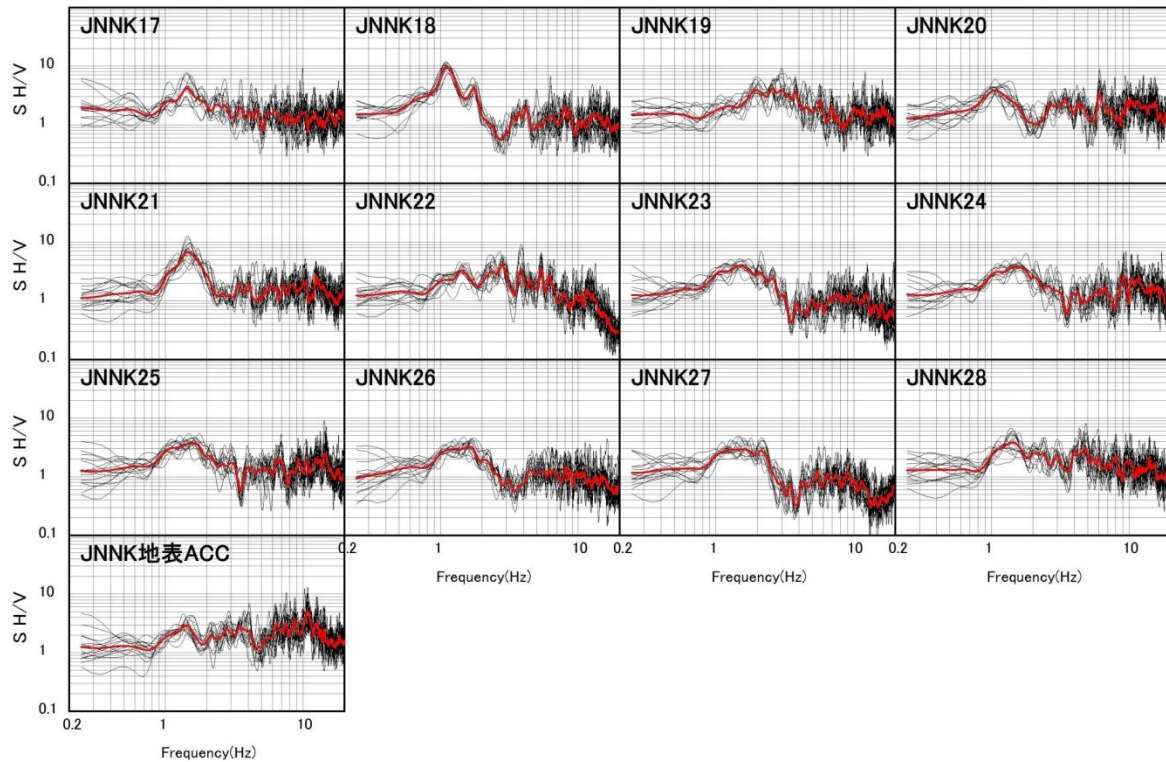


図 3.1-26 地表/地表スペクトル比の地域ごとの平均の比較
 発生した地域を色分けして表示している



黒: D:\規制庁\data\解析結果\01南側\VS_HV\



黒: D:\規制庁\data\解析結果\01南側\VS_HV\

図 3.1-27 H/V スペクトル サイト南側の地震
 細い線は各地震の H/V スペクトルを表し、赤線は平均値を表す

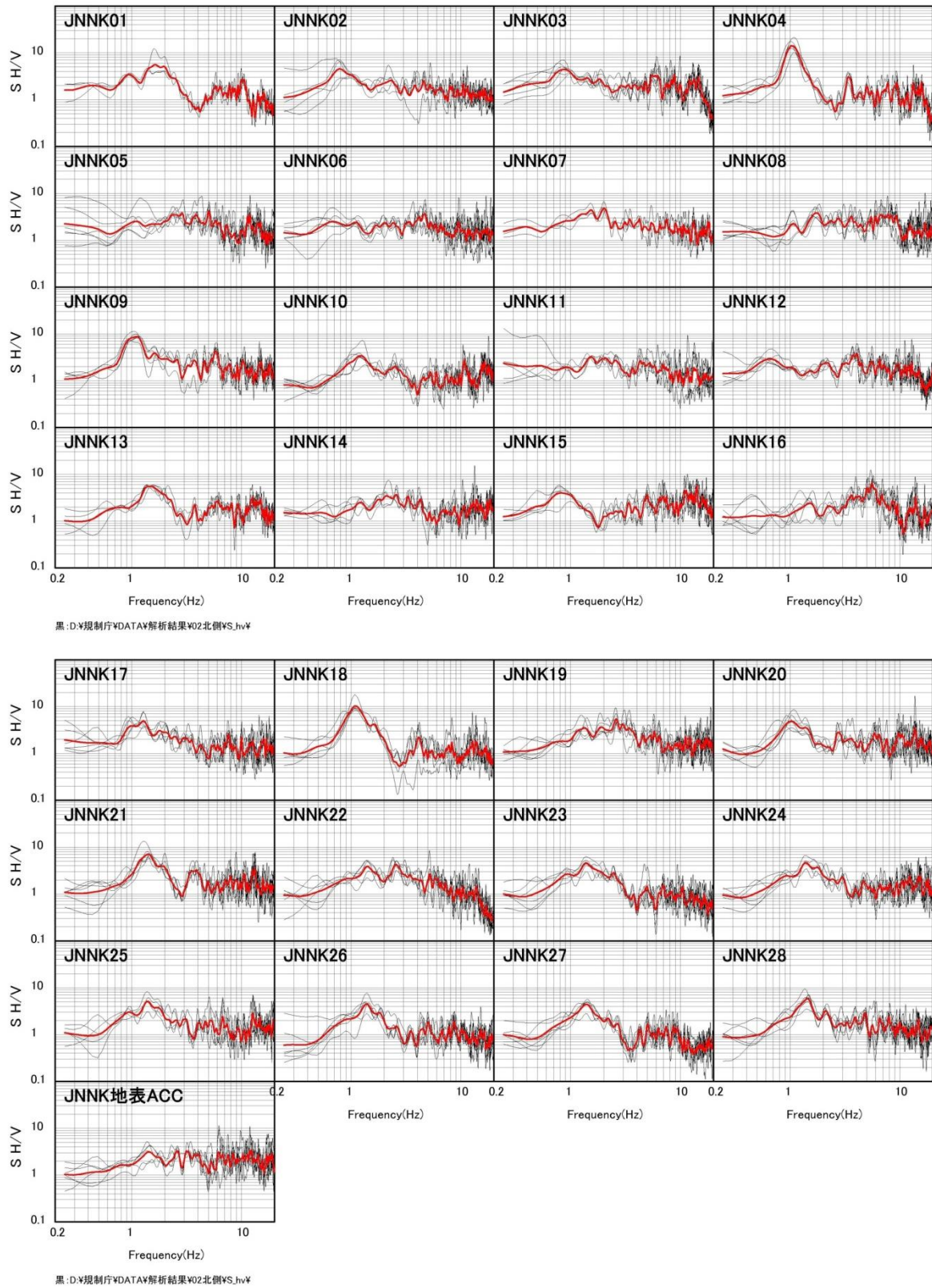
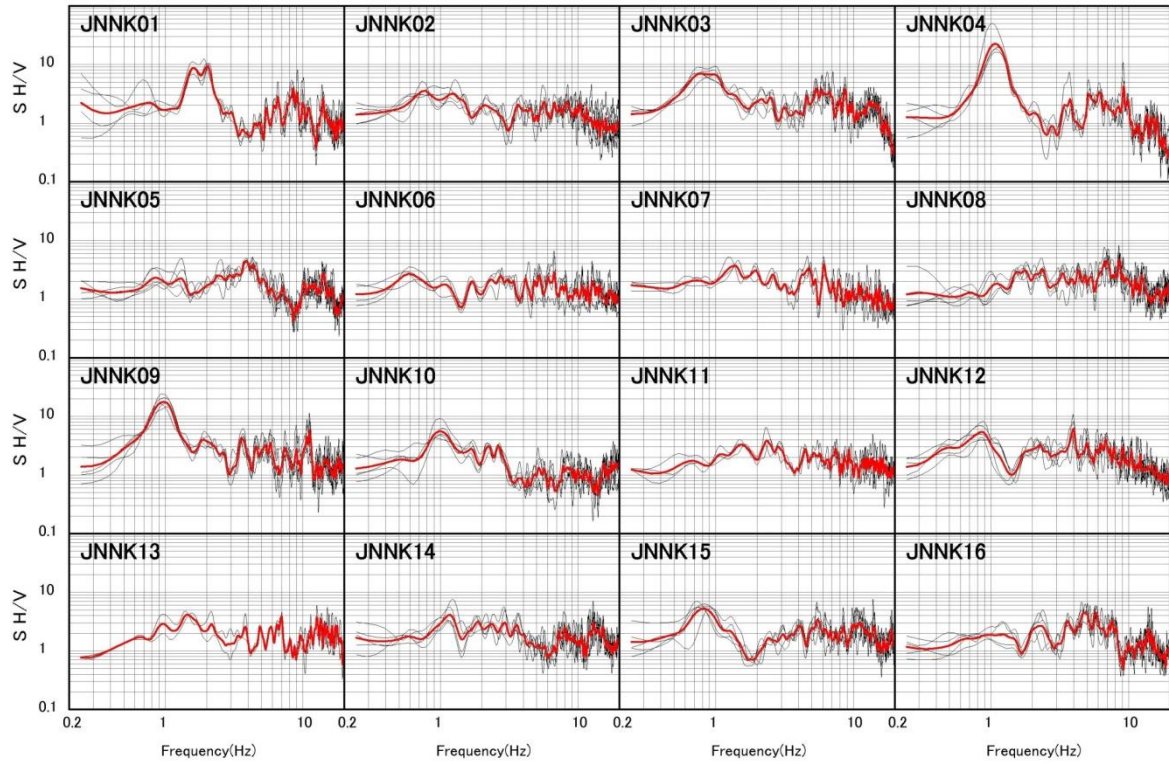
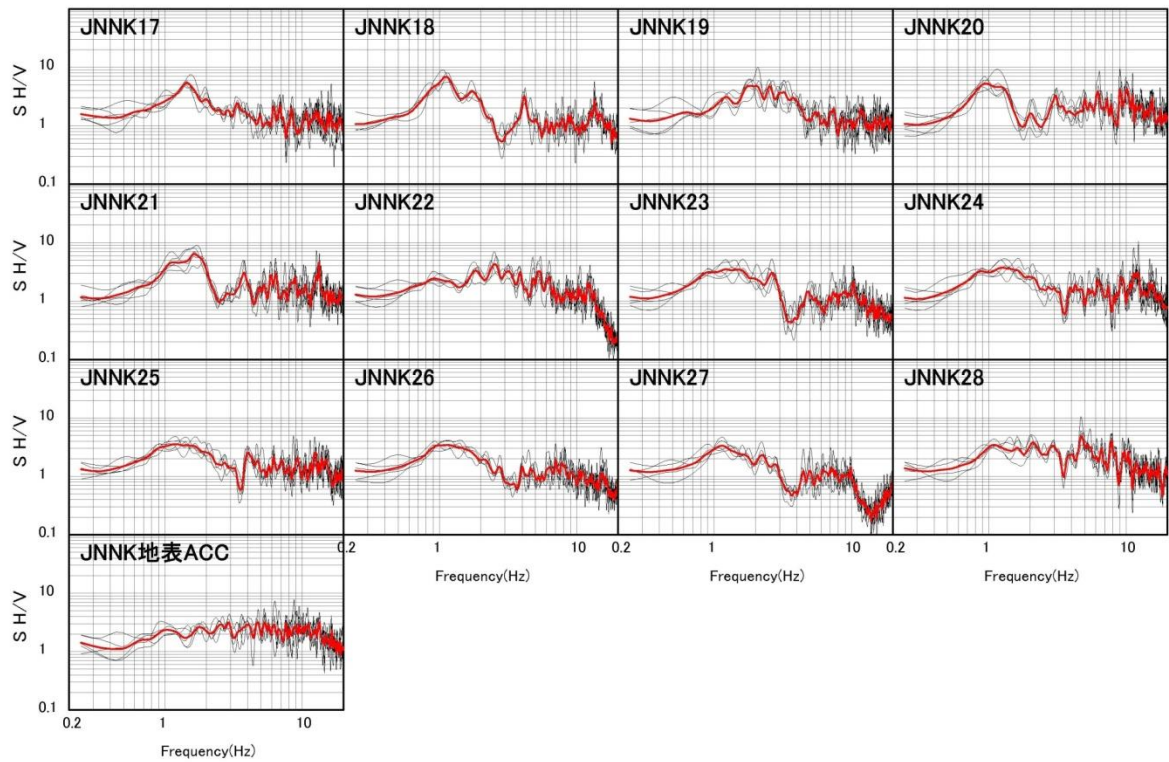


図 3.1-28 H/V スペクトル サイト北側の地震
 細い線は各地震の H/V スペクトルを表し、赤線は平均値を表す

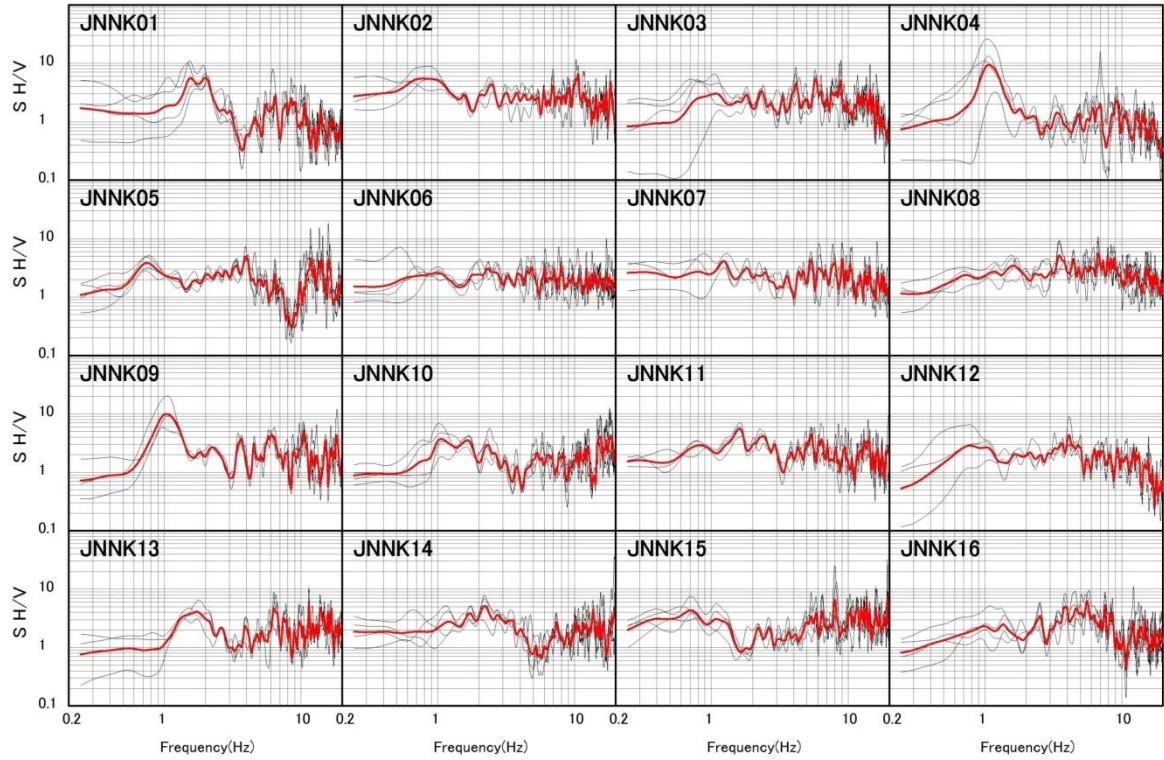


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\04栃木県\%S_hv\

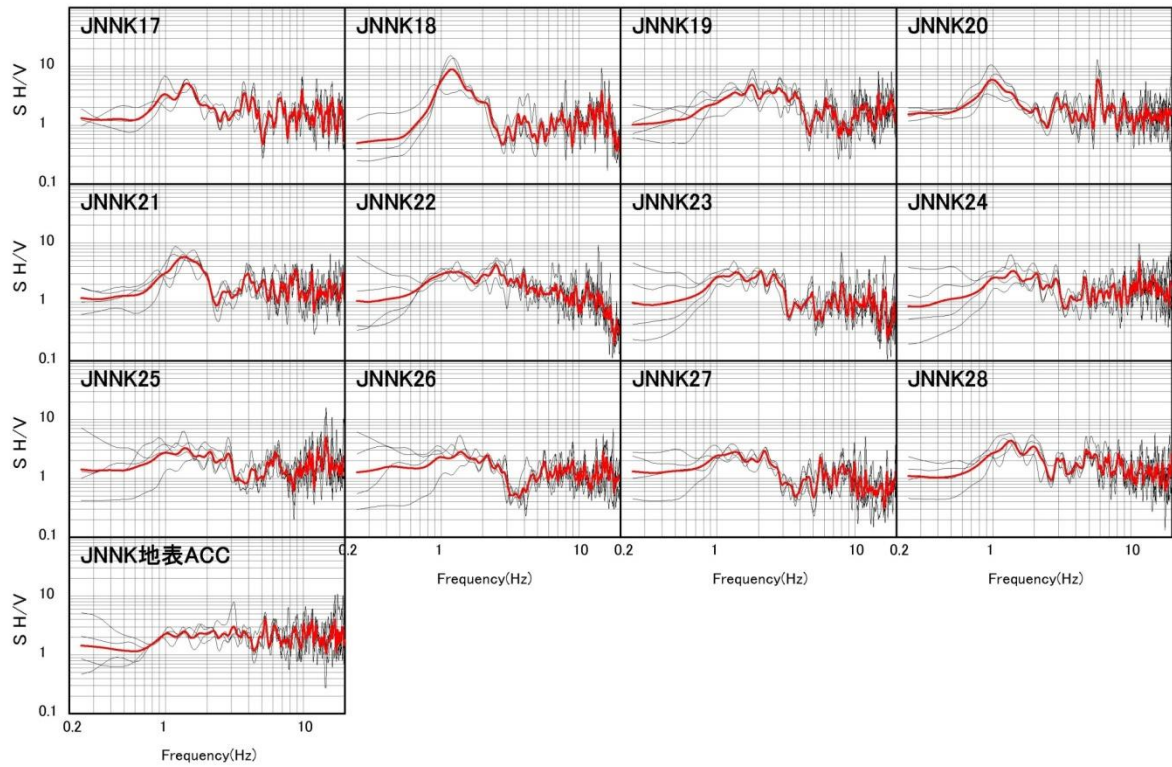


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\04栃木県\%S_hv\

図 3.1-29 H/V スペクトル 栃木県の地震
 細い線は各地震の H/V スペクトルを表し、赤線は平均値を表す

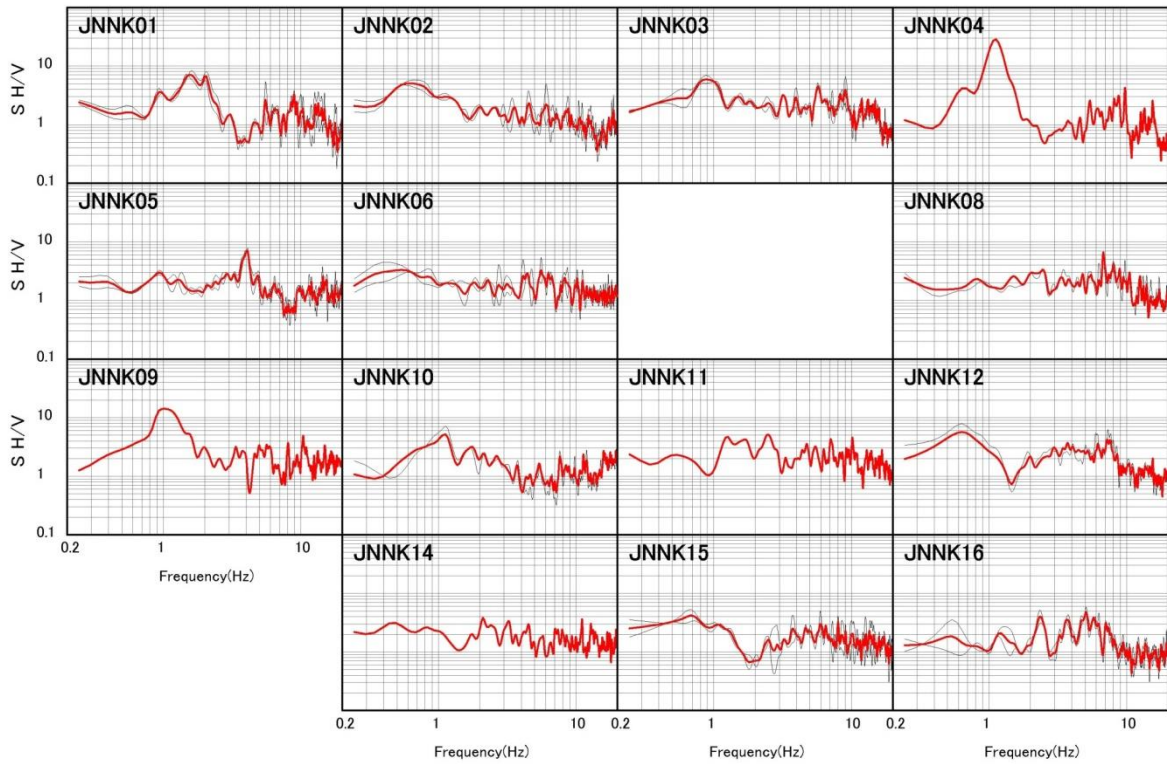


黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\03直下\YS_hv*



黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\03直下\YS_hv*

図 3.1-30 H/V スペクトル サイト直下の地震
 細い線は各地震の H/V スペクトルを表し、赤線は平均値を表す



黒: D:\規制庁\DATA\解析結果\05福島茨城県境\YS_hv\

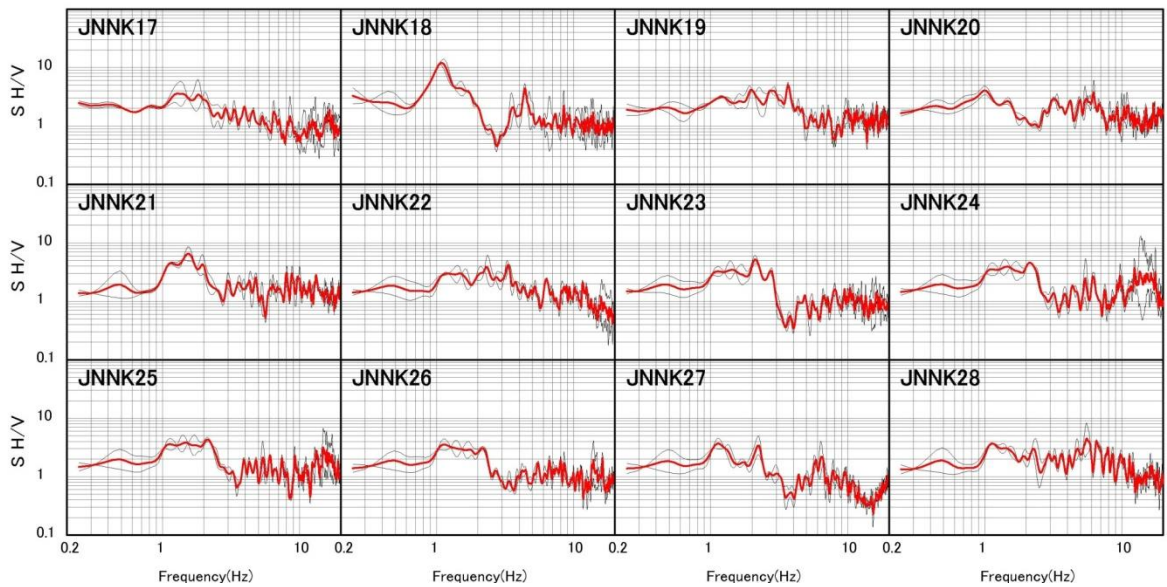
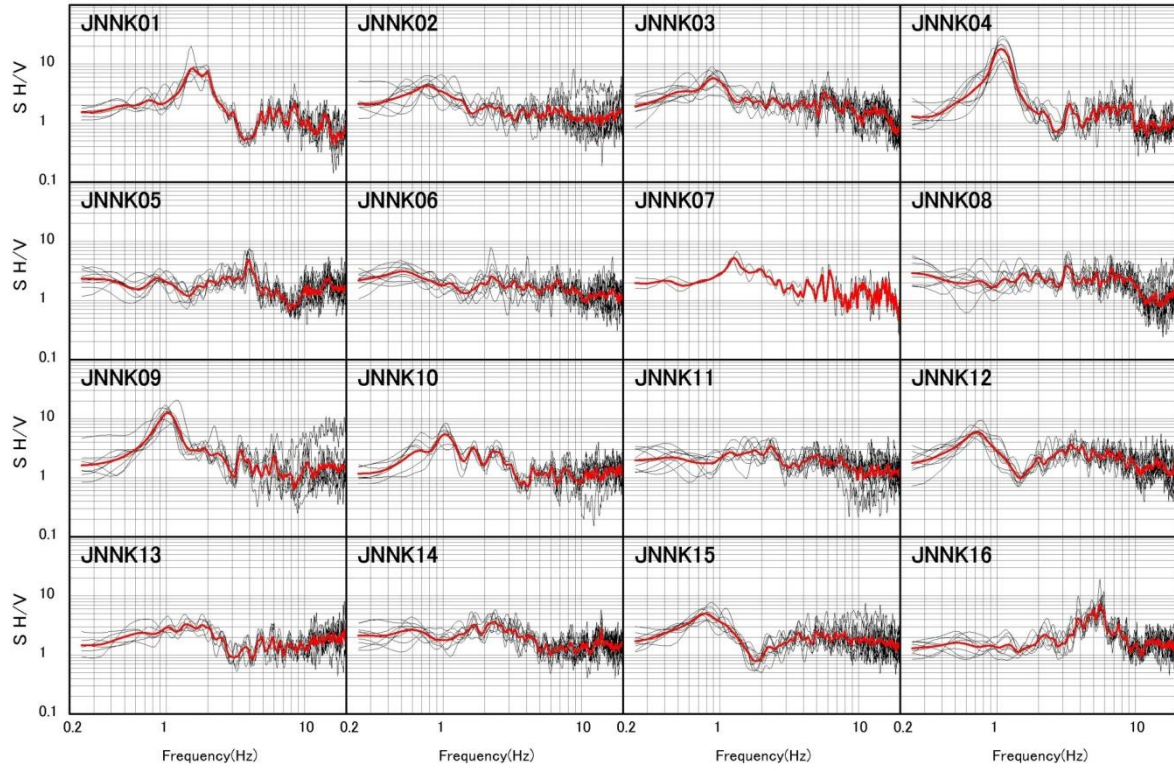
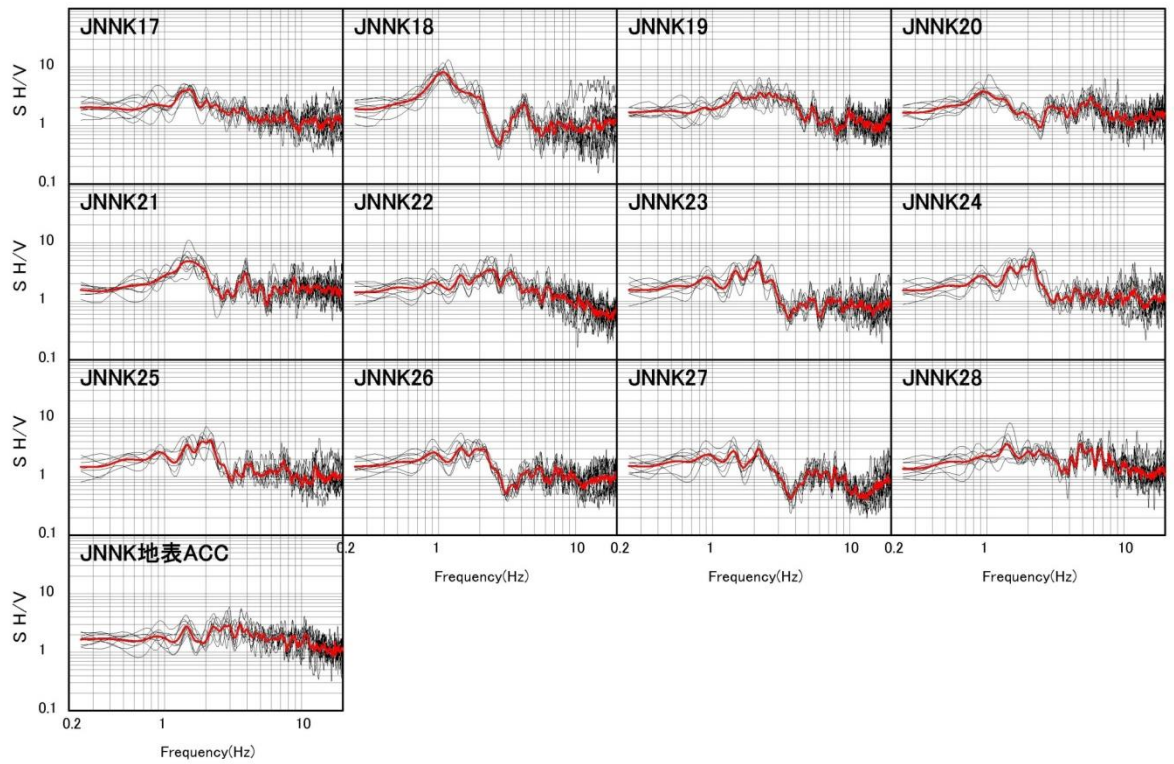


図 3.1-31 H/V スペクトル 茨城県福島県県境の地震
 細い線は各地震の H/V スペクトルを表し、赤線は平均値を表す



黒: D:\規制庁\data\解析結果\06福島県沖\VS_hv\



黒: D:\規制庁\data\解析結果\06福島県沖\VS_hv\

図 3.1-32 H/V スペクトル 福島沖の地震
 細い線は各地震の H/V スペクトルを表し、赤線は平均値を表す

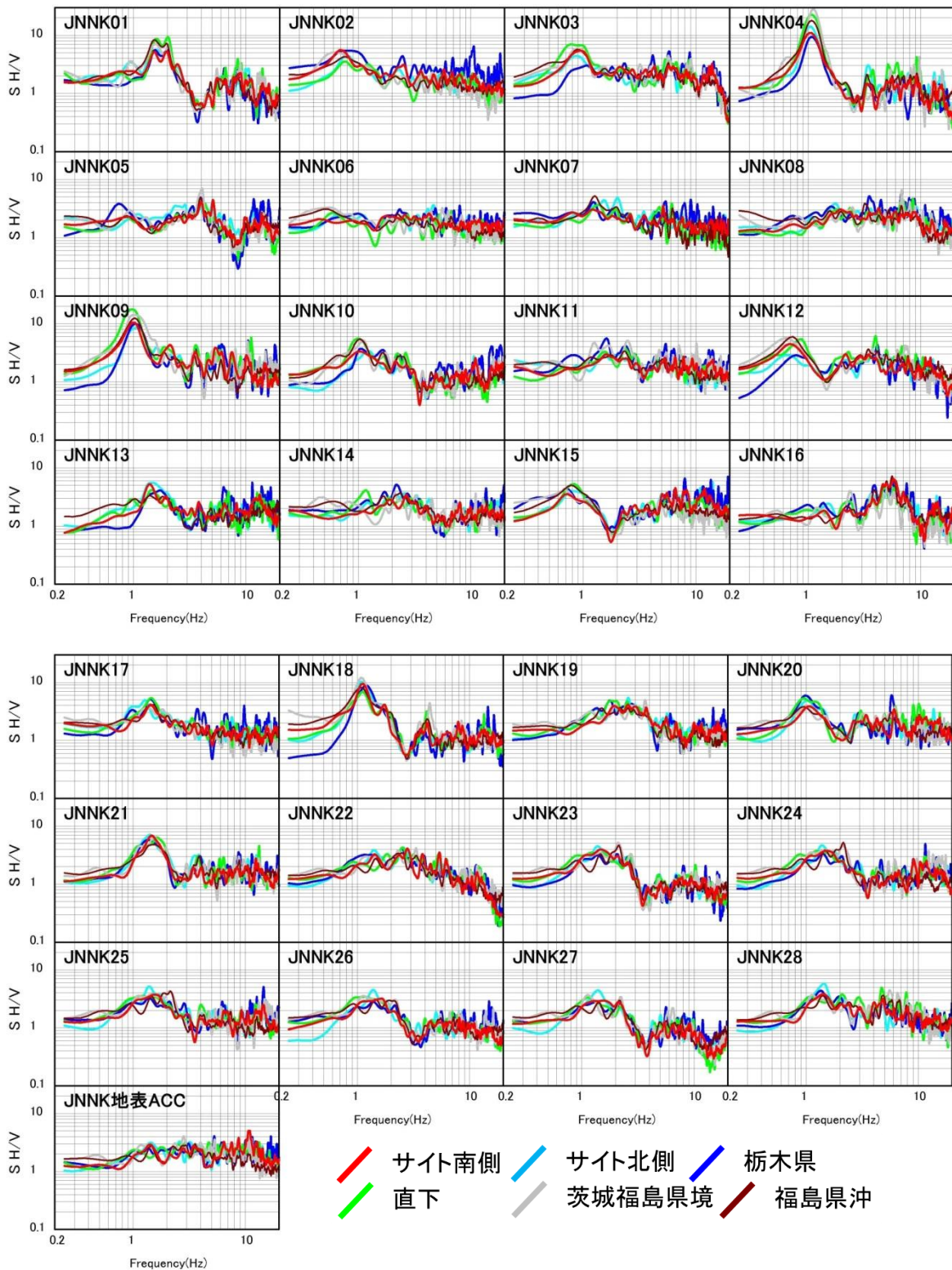


図 3.1-33 H/V スペクトルの地域ごとの平均の比較
発生した地域を色分けして表示している

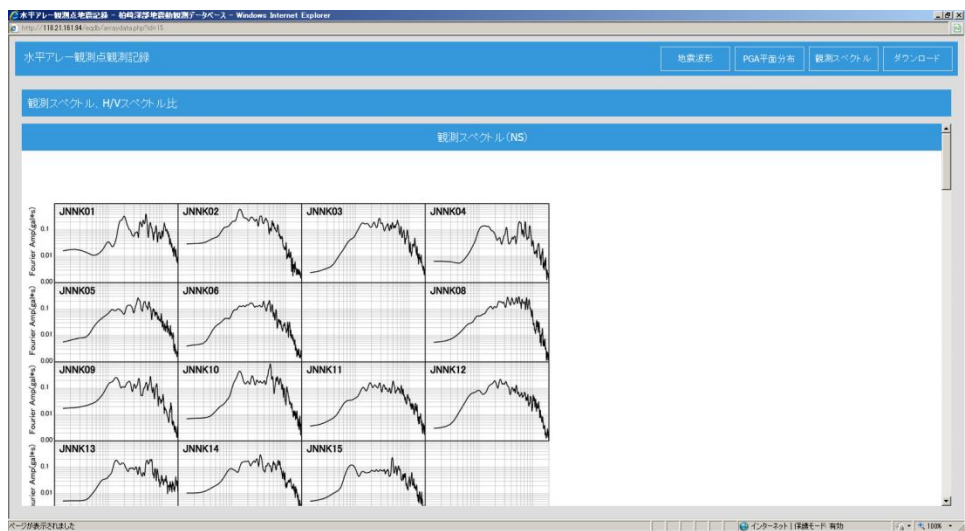
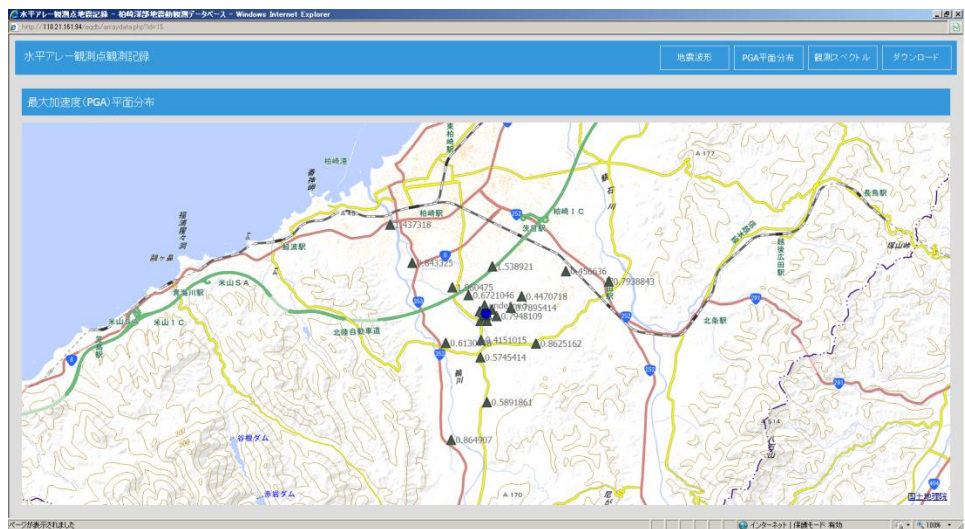
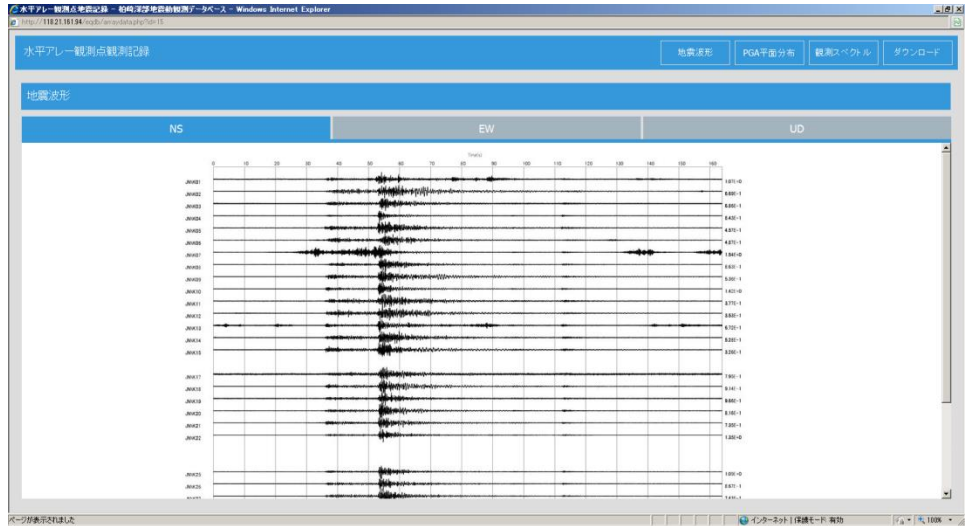


図 3.1-34 データベースの一例 水平アレーデータ

3.1.4 地震動評価のための三次元地下構造モデルの精度検証

3.1.4.1 概要

(1) 概要

柏崎深部地震動観測プロジェクトで取得した各種の地下構造データを統合して得られた詳細速度構造モデル(ジョイントインバージョン解析モデル((独)原子力安全基盤機構(2013))の精度検証を行った。モデルの精度を地震動シミュレーションにより確認するとともに、既往の JNES2007 モデル((独)原子力安全基盤機構(2013))と比較検討して、三次元深部地下構造モデルの精度が地震動評価へ与える影響等の諸種の適用性を検討した。地下構造モデルは図 3.1-35 に示す。

JNES2007 モデルとの比較検討により詳細速度構造モデルの適用性(三次元深部地下構造モデルの精度が地震動評価へ与える影響、より短周期側(数 Hz 程度)の地震動評価の可能性)を整理した。併せて、地下構造調査・探査が実施可能な範囲で、地震動評価のための詳細速度構造モデル作成に必要な調査・探査の項目や配置ならびに取得されたデータの信頼性や精度、解析手法の信頼性等に関する基礎事項を抽出した。

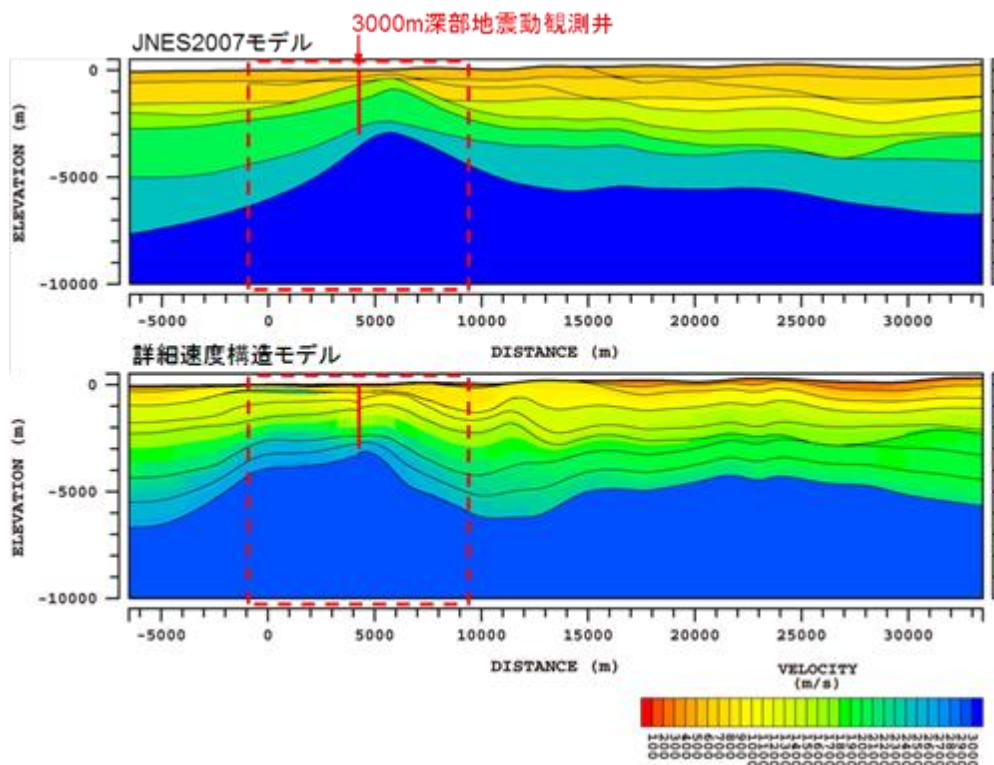


図 2.1-35 JNES2007 モデル及び詳細速度構造モデルの例((独)原子力安全基盤機構(2013))
(破線四角枠: 対象とする解析領域で深部地震動観測井を中心とする水平10km 四方及び鉛直10km)

(2) 検証方針

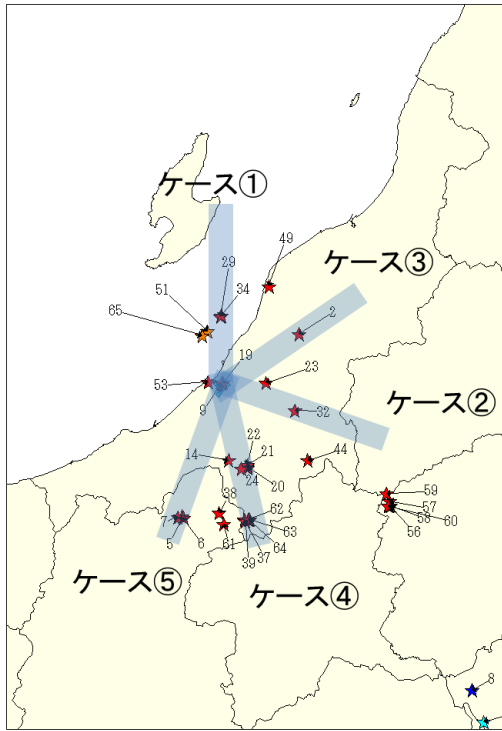
三次元地下構造モデルの精度検証は、詳細速度構造モデルを用いて、三次元有限差分法により実施した。図 3.1-36 にシミュレーションの方法を示す。5 つの方向で発生した地震を対象としてシミュレーションを実施した。それぞれのケースについて、鉛直下方入射、鉛直下方より 30 度の入射角を持たせた場合の検討を行った。地震の方向と地震の方向から時計回りに+90 度、+180 度、+270 度の方向から到来した場合についても計算を行った。これは、地震波の入射方向によって地盤の応答特性がどのように異なっているかあるいは異なっていないのかを確認するためである。

図 3.1-37 に S 波速度構造断面図を示す。矢印の地点が新潟工科大学であり、南東—北西方向に基盤の深度が急激に変化していることがわかる。図 3.1-38 に基盤および米山層上面深度を示す。基盤は南東方向に深くなっており、米山層は南西方向に米山層が露出している地域が広がっている。

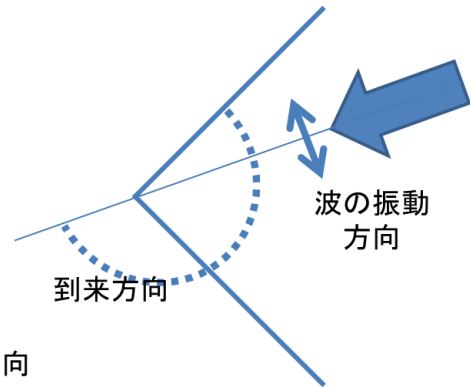
差分法の計算の基本となる差分スキームは、速度—応力スタッガード・グリッド (Virieux, 1986) であり、時間方向に 2 次、空間方向に 4 次の精度 (Levander, 1988) で計算を行っている。速度—応力スタッガード・グリッドに対する震源の導入には、モーメント・テンソルを等価な体積力として表現する方法 (Graves, 1996) を用い、震源時間関数は中心周波数 3Hz のベル型関数とした。表 3.1-2 に差分法の諸元を示す。また、図 3.1-39 に Q 値の周波数依存曲線を示す。この Q 値は、長周期地震動予測地図 (地震調査委員会, 2012) を参考に Q 値を設定したものであるが、検層による周波数 15Hz の Q 値は、13~45 であり、今回計算に用いた Q 値とは異なっている。

地盤モデルの 300 m/s 以下の層をそのまま地表まで 300m/s で計算した。最小グリッドサイズは 10m であり、計算可能周期は 6Hz である。

図 3.1-40~44 に各層の上面深度分布を示す。

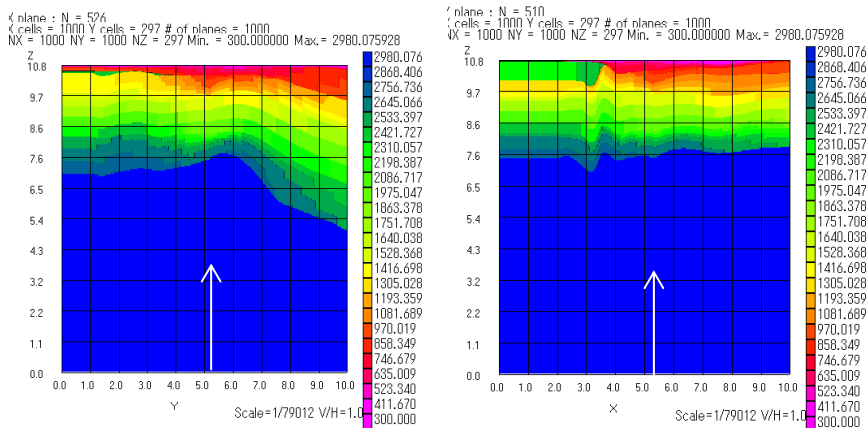


差分法計算 のケース名	シミュレー ションする 地震	到来方向					鉛直入射
ケース①	29	135	225	315	45	鉛直入射 135	
	34						
ケース②	32	242	332	62	152	鉛直入射 242	
ケース③	2	191	281	371	101	鉛直入射 191	
ケース④	62	308	38	128	218	鉛直入射 308	
	63						
	64						
ケース⑤	5	331	61	157 (151が発散)	241	鉛直入射 381	
	6						
	7						
入射角		30			0		



震央分布とシミュレーションを行った地震の到来方向

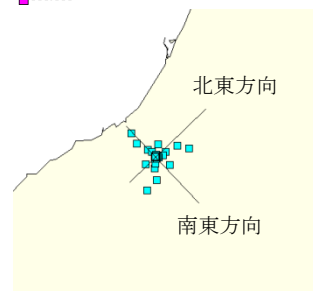
図 3.1-36 シミュレーションの方法



南東方向断面

北東方向断面

図 3.1-37 S波速度構造断面図 矢印が新潟工科大学



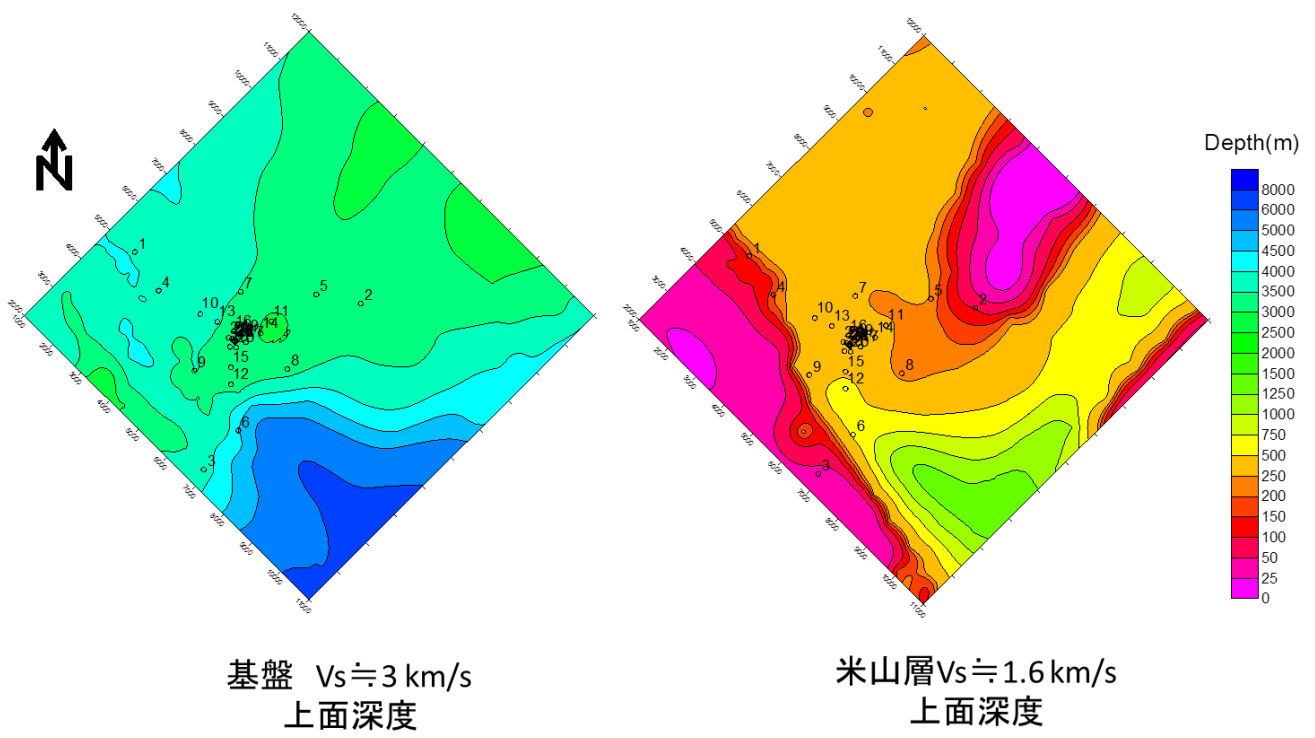


図 3.1-38 基盤および米山層上面深度

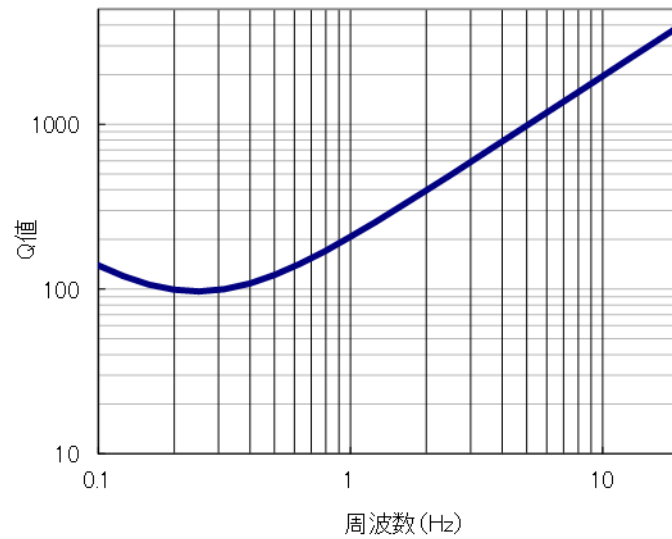


図 3.1-39 Q 値の周波数依存特性

$Q_0=100$ の場合 Q_0 は S 波速度(m/s)の 5 分の 1 とした

表 3.1-2 差分法の緒元

グリッドサイズ(m)	10	
経度方向距離(km)	10	グリッド数1000
緯度方向距離(km)	10	グリッド数1000
深度方向 グリッドサイズ(m)	10	深さ0 km~0.05 km
	20	深さ0.05km~0.49 km
	30	深さ0.49km~1.99 km
	40	深さ1.99km~9.99 km
計算間隔(秒)	0.0008	
ステップ数	20,000	16Sec
左下隅の座標	直交座標系 X:-1000m Y:-2000m	
右上隅の座標	直交座標系 X:9000m Y:8000m	
最小Vs: 300m/s 計算周期: 6Hz		

格子配置	応力-速度スタッガードグリッド Virieux(1986)
計算精度	時間 2 次 空間 4 次 Levander (1988)
震源の導入	モーメントテンソルを等価な体積力として表現する 方法 Graves (1996)
震源時間関数	ベル型 中心周波数 3Hz
吸収境界条件	Cerjan (1985) による。厚さ 20 格子
粘弾性条件	メモリバリアブルによる Robertsson (1994) 基準周期 4 秒

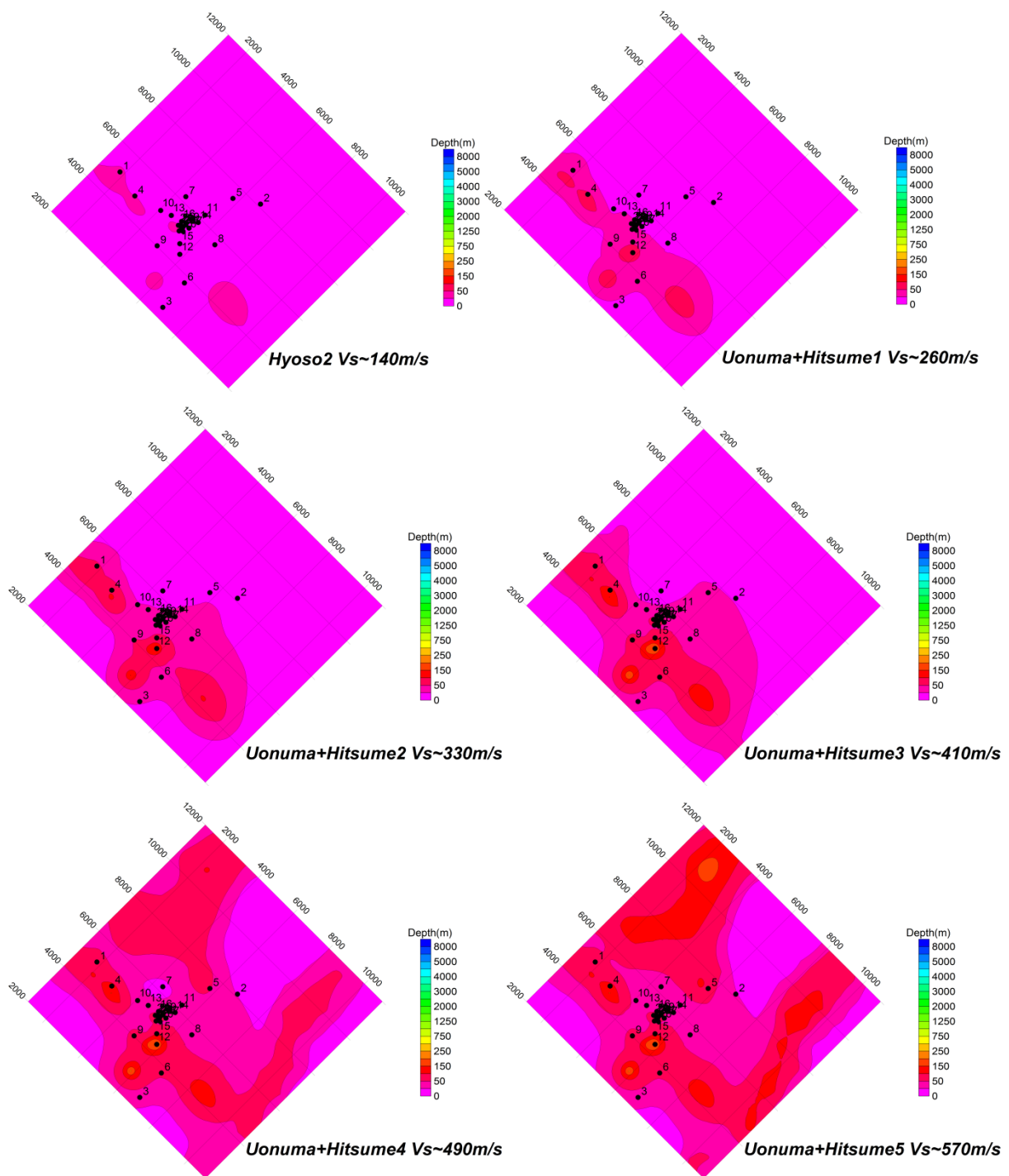


図 3.1-40 各層の上面深度分布

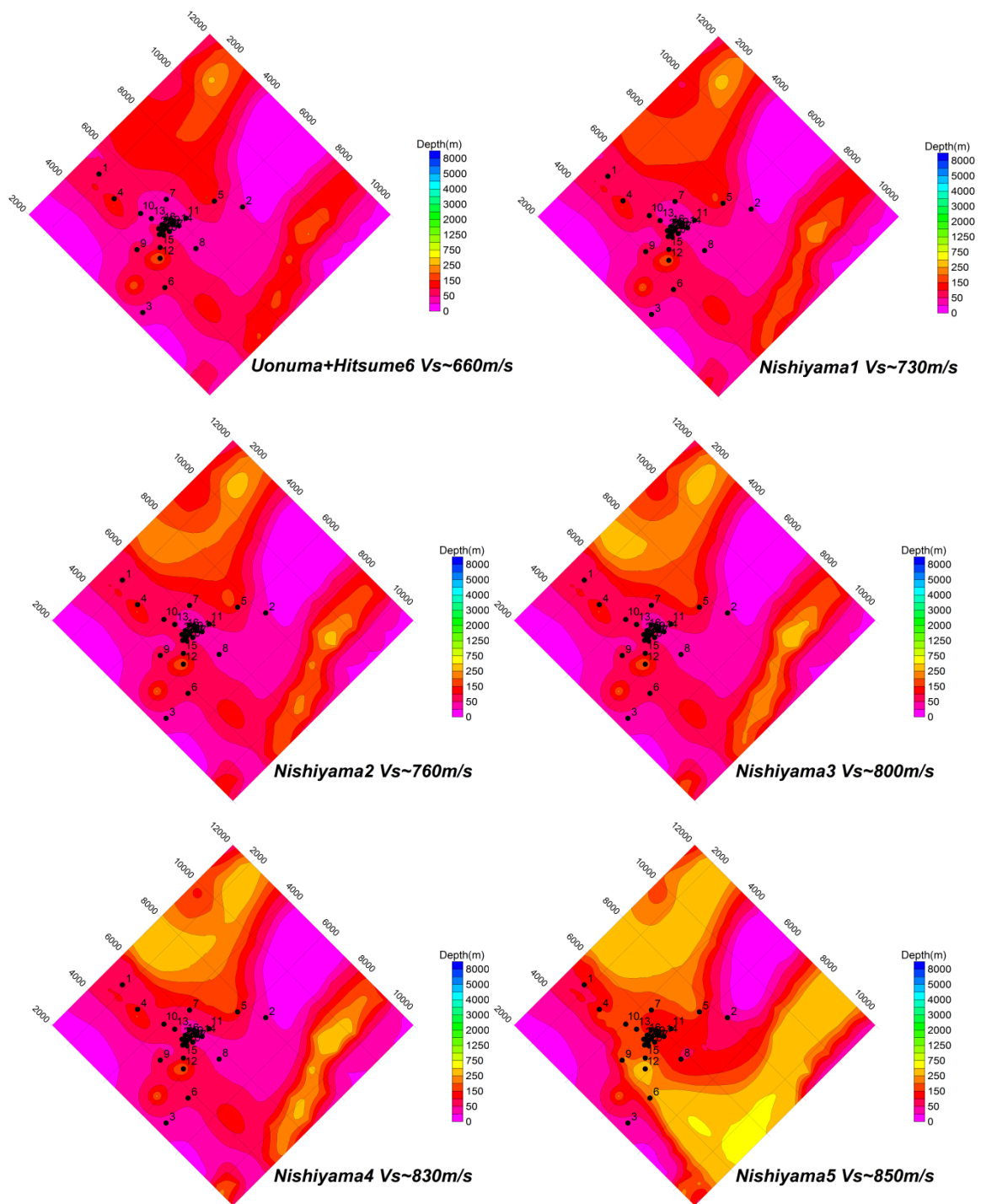


図 3.1-41 各層の上面深度分布

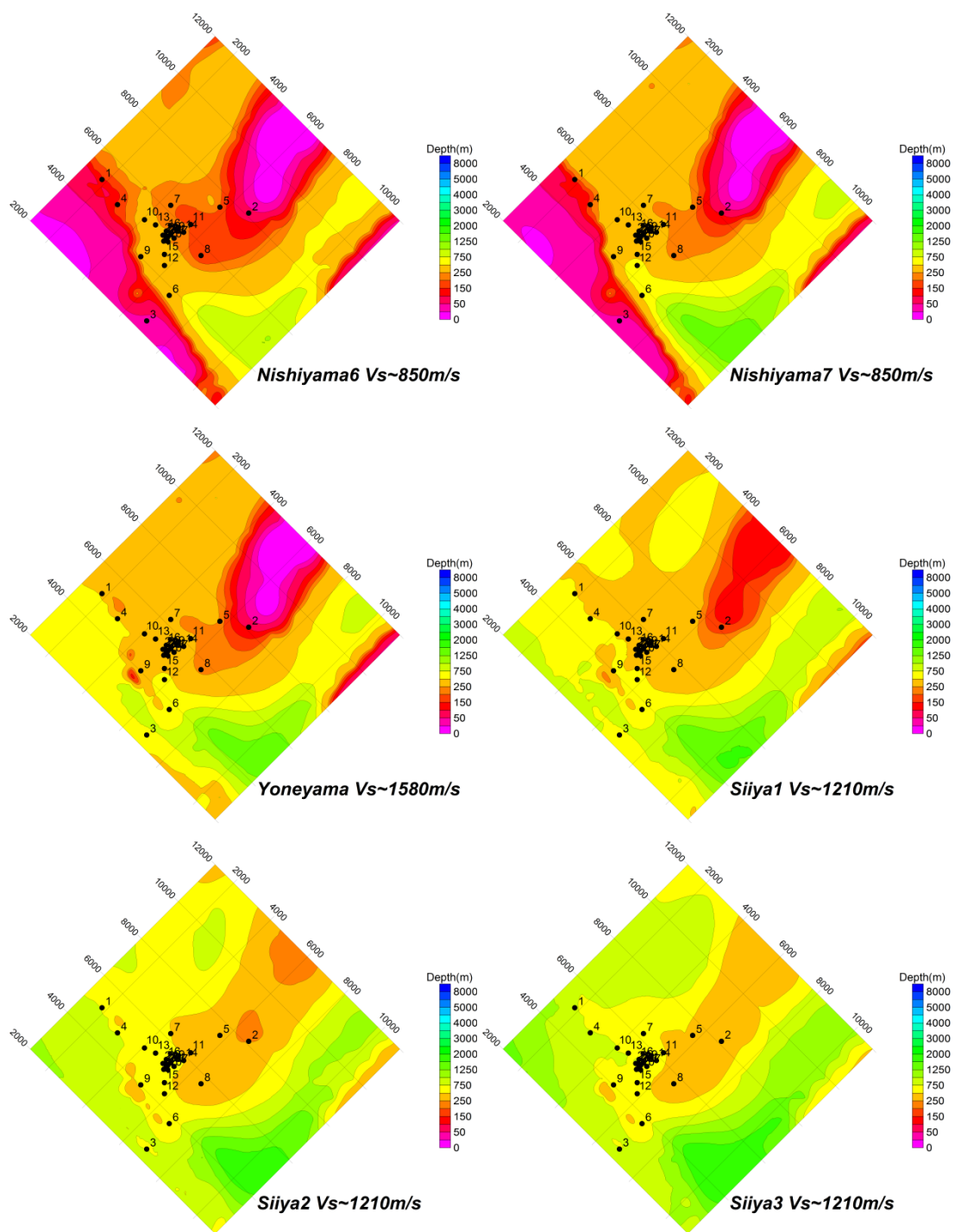


図 3.1-42 各層の上面深度分布

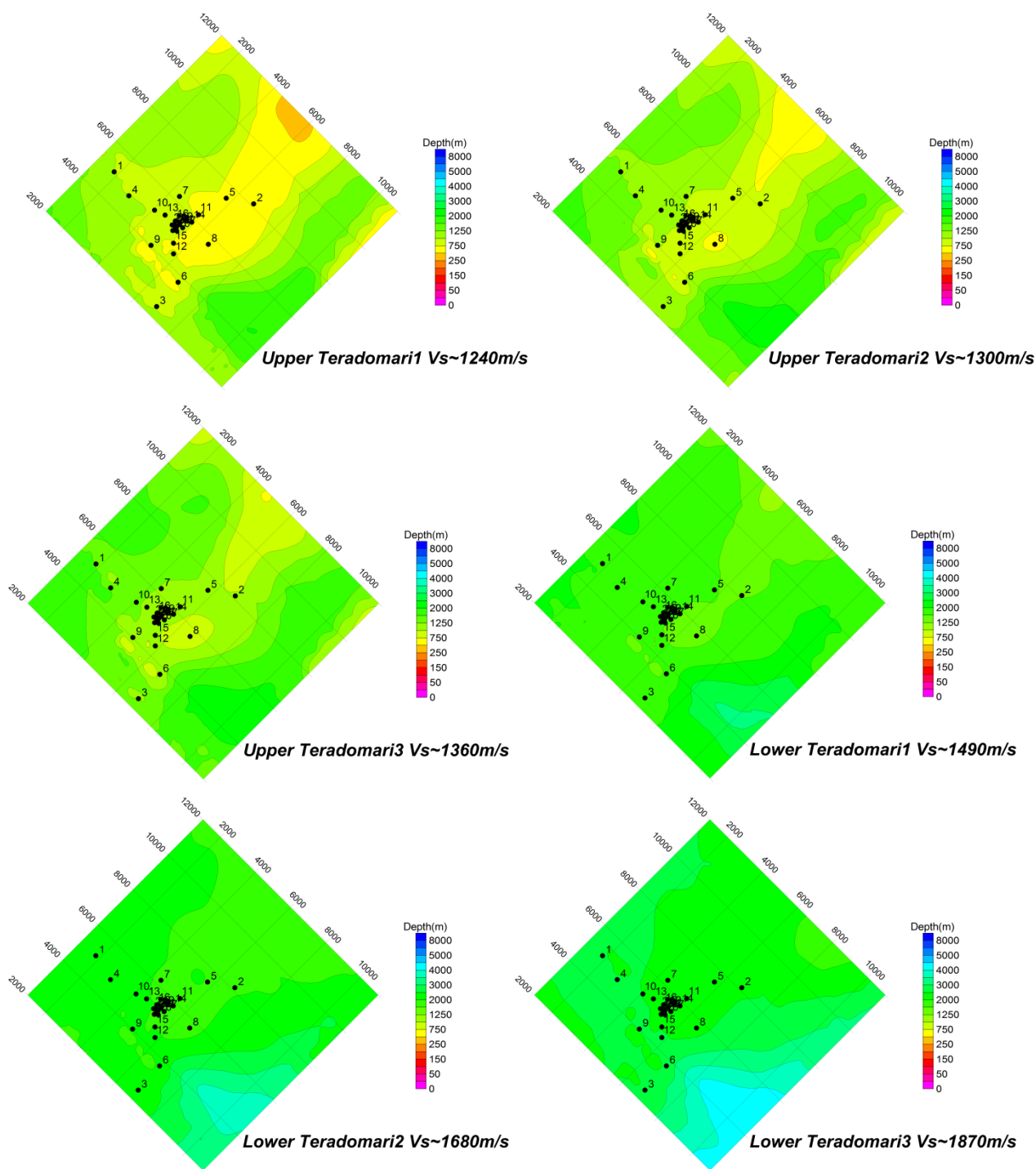


図 3.1-43 各層の上面深度分布

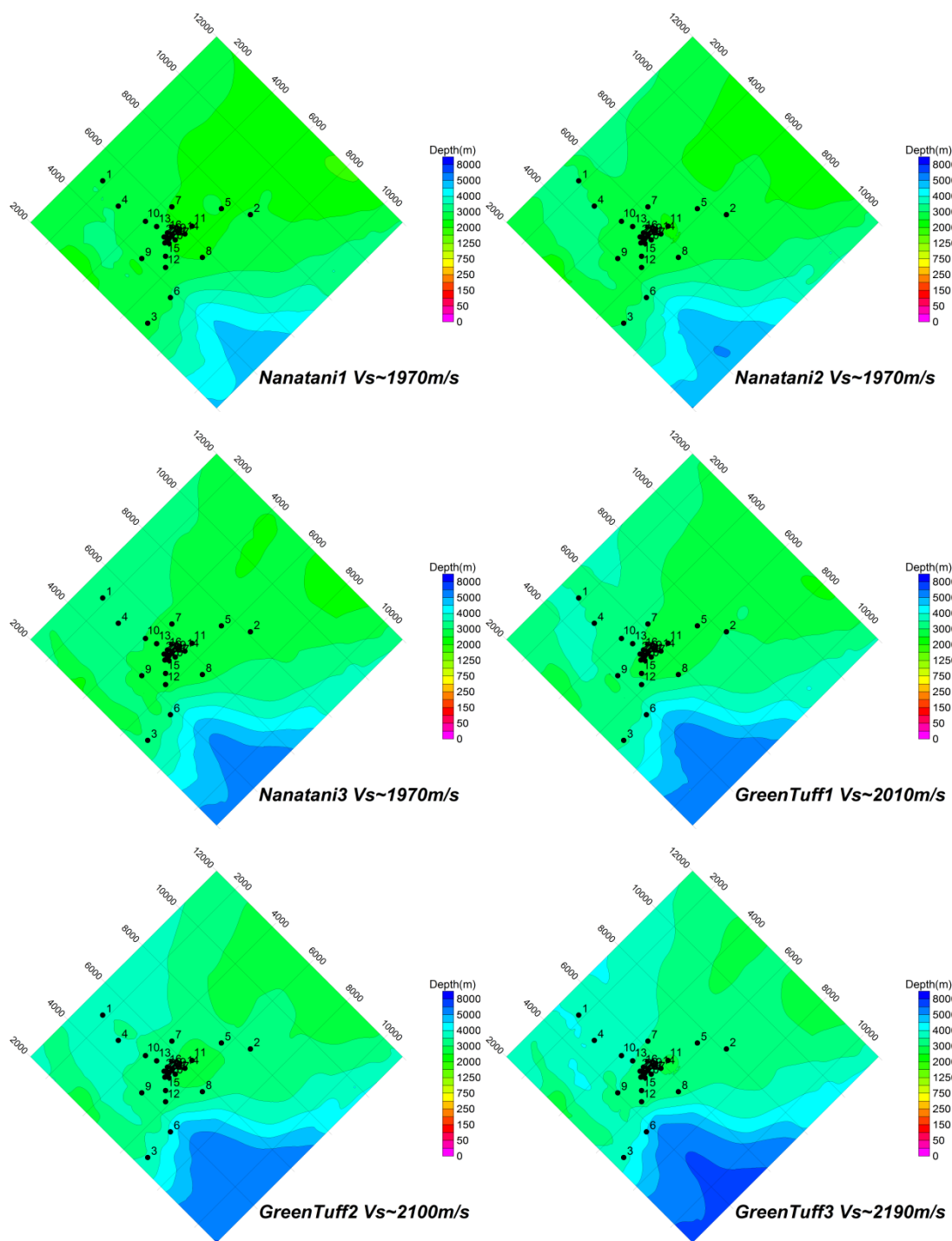


図 3.1-44 各層の上面深度分布

3.1.4.2 地表/地表スペクトル比および地表/孔中スペクトル比データの整理

上記で示した、5つの方向で発生した地震について、地表/地表スペクトル比、地表/孔中スペクトル比を求めた。なお、ケース②、④、⑤については、地表/孔中スペクトル比が安定して求められているため、孔中とのスペクトル比を用いて検討した。ケース①、③については、地表/地表スペクトル比を用いて検討した。規模の小さい地震では、観測孔の 3000m 地震計記録の SN があまり良好でなかったためである。スペクトルは、NS、EW 成分の相乗平均を使用した。

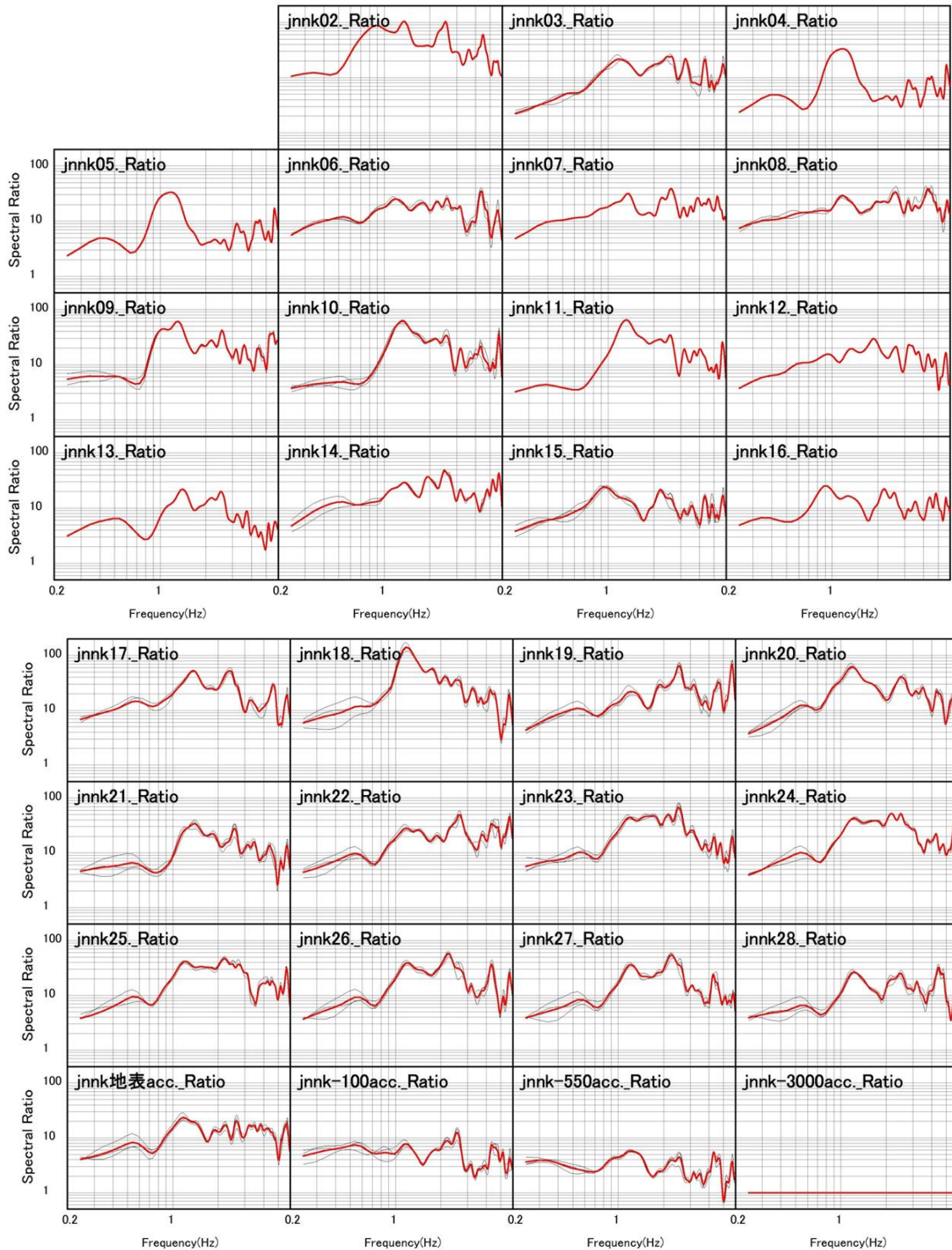
図 3.1-45 にケース④方向で発生した地震の地表/孔中スペクトル比を示す。用いた地震は、表 3.1-1 で示した No.62、63、64 の地震である。3つの地震の地表/孔中スペクトル比はどの観測点でもばらつきが少くない結果である。

図 3.1-46 にケース⑤方向で発生した地震の地表/孔中スペクトル比を示す。同じく、No.5、6、7 の地震を用いている。ケース⑤方向についても地震間のばらつきは小さい。

図 3.1-47 には、ケース②、④、⑤方向で発生した地震の地表/孔中スペクトル比を示す。ケース④、⑤方向については、上記で示したケースごとの平均値を表示している。JNNK02 についてはややばらつきがみられるが、到来方向によるスペクトル比の相違は総じて顕著でなかった。

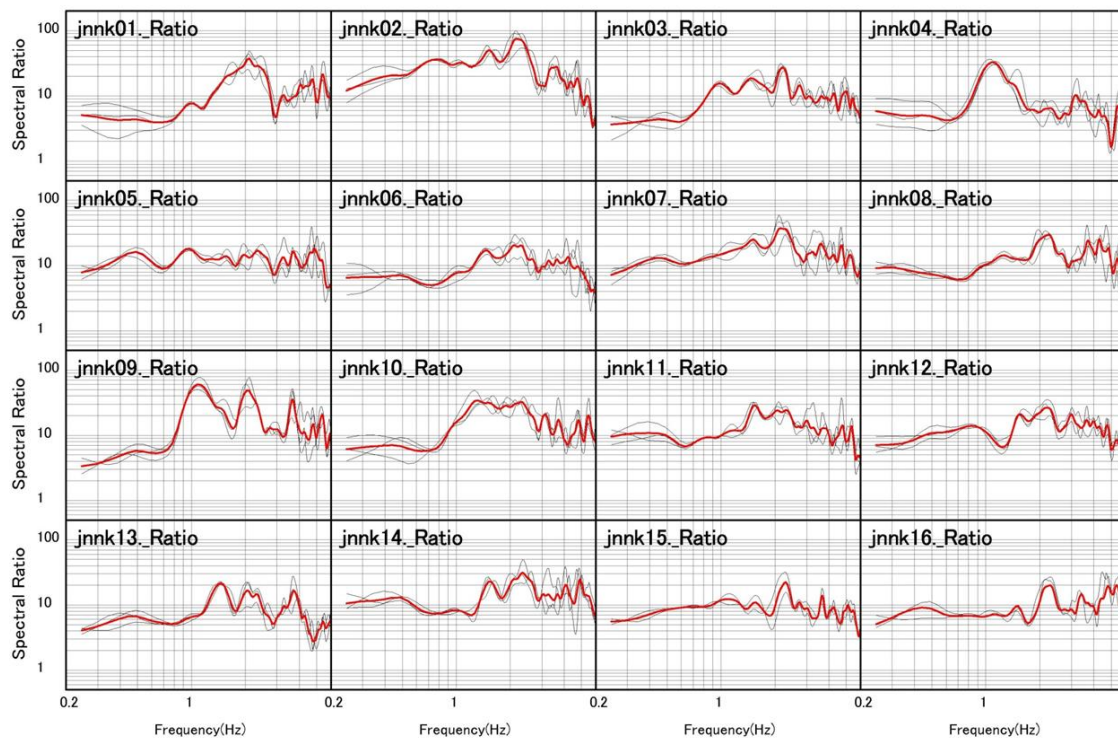
図 3.1-48 には地表/地表スペクトル比を示す。地表地震計を基準とした場合でも、到来方向による地表/地表スペクトル比の相違はあまり顕著でなかった。

JNNK02 はほかの観測点に比べ 2Hz 以下の周波数帯域でスペクトル比の値が最も大きい。JNNK04、09、10、18 において周波数 1Hz 付近の地表/地表スペクトル比にピークがみられる。

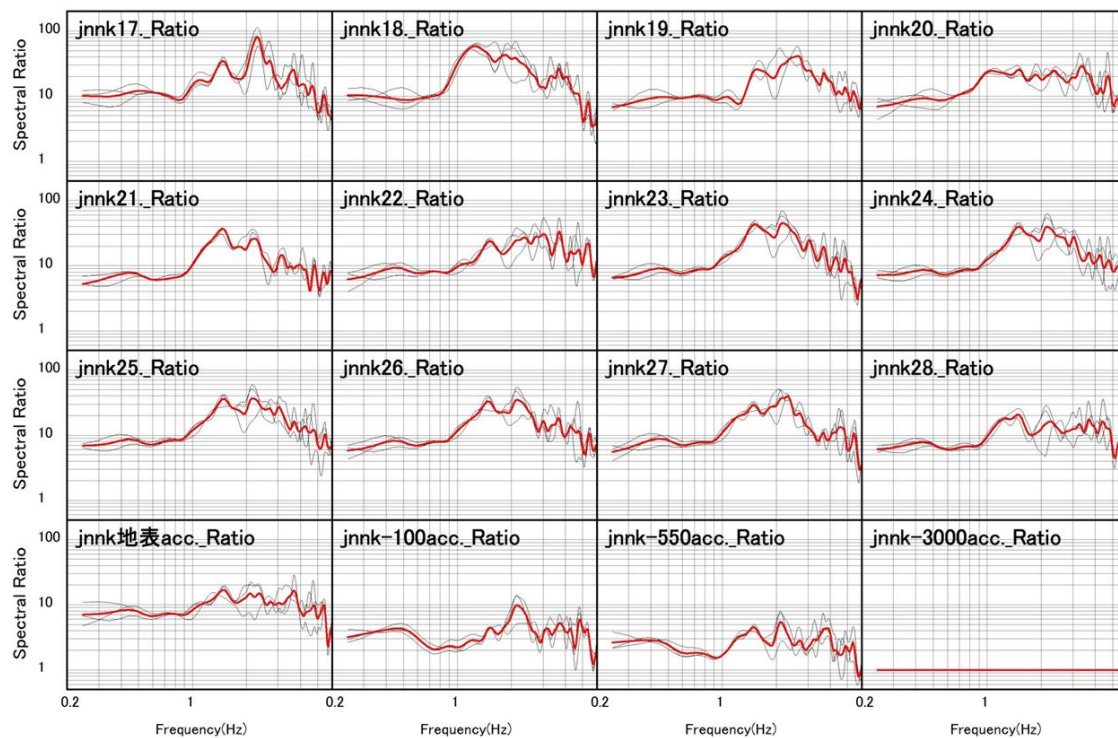


黒: D:\規制庁\data\分析結果\孔中スペクトル比\4南東\ratio基盤¥

図 3.1-45 地表/孔中スペクトル比 ケース④方向 No.62,63,64
 細い線は各地震の地表/孔中スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す



黒: D/V規制庁YdataY~解析結果Y孔中スペクトル比⑤南Vratio基盤Y



黒: D/V規制庁YdataY~解析結果Y孔中スペクトル比⑤南Vratio基盤Y

図 3.1-46 地表/孔中スペクトル比 ケース⑤方向 No.5,6,7
 細い線は各地震の地表/孔中スペクトル比を表し、赤線は平均値を表す

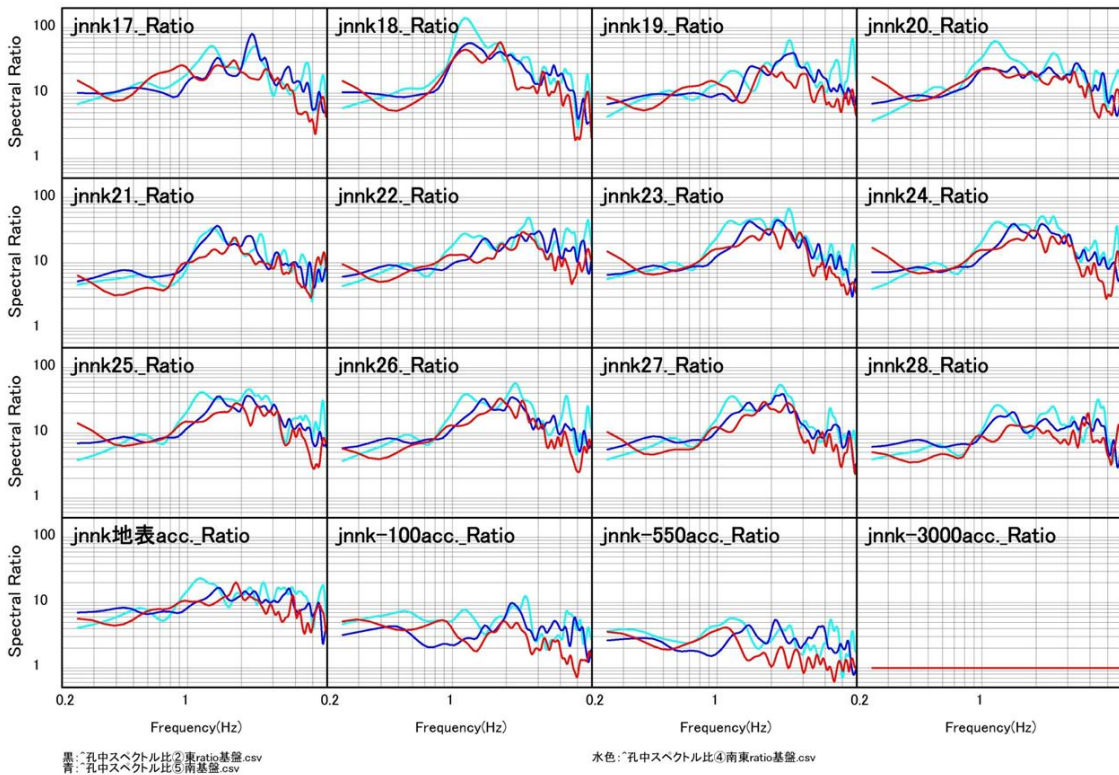
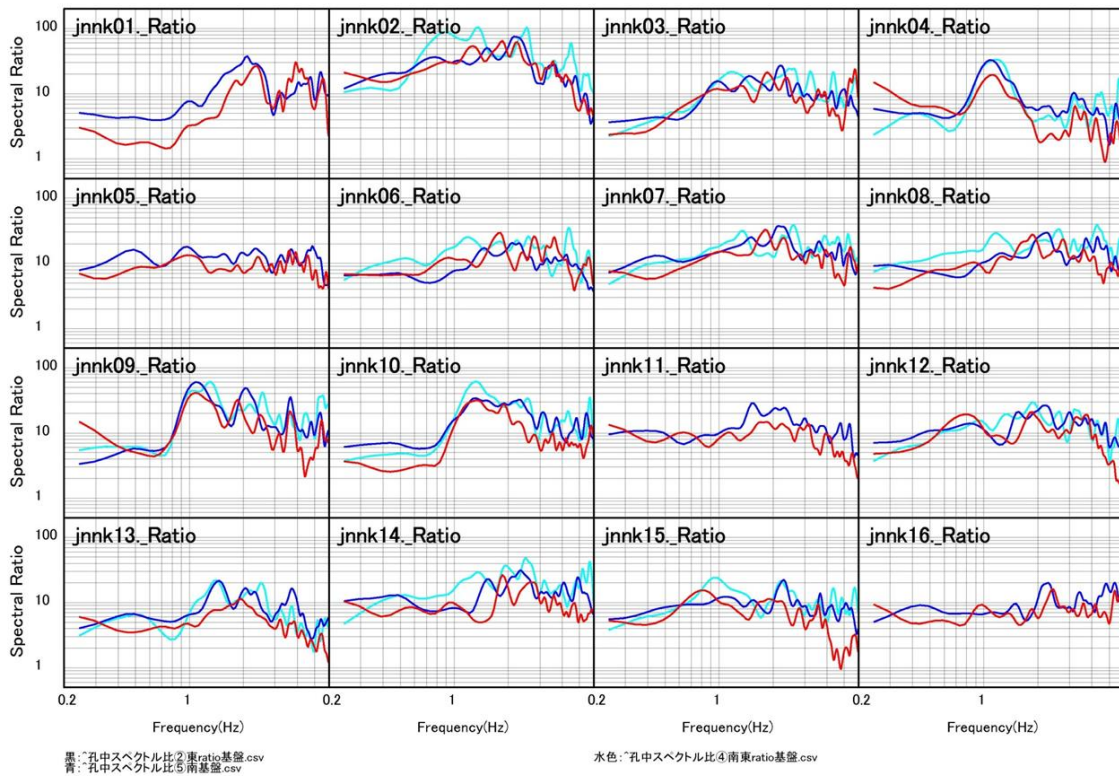


図 3.1-47 地表/孔中スペクトル比 赤：ケース②方向 水色：ケース④方向
青：ケース⑤方向、 ケースごとに色分けして示している

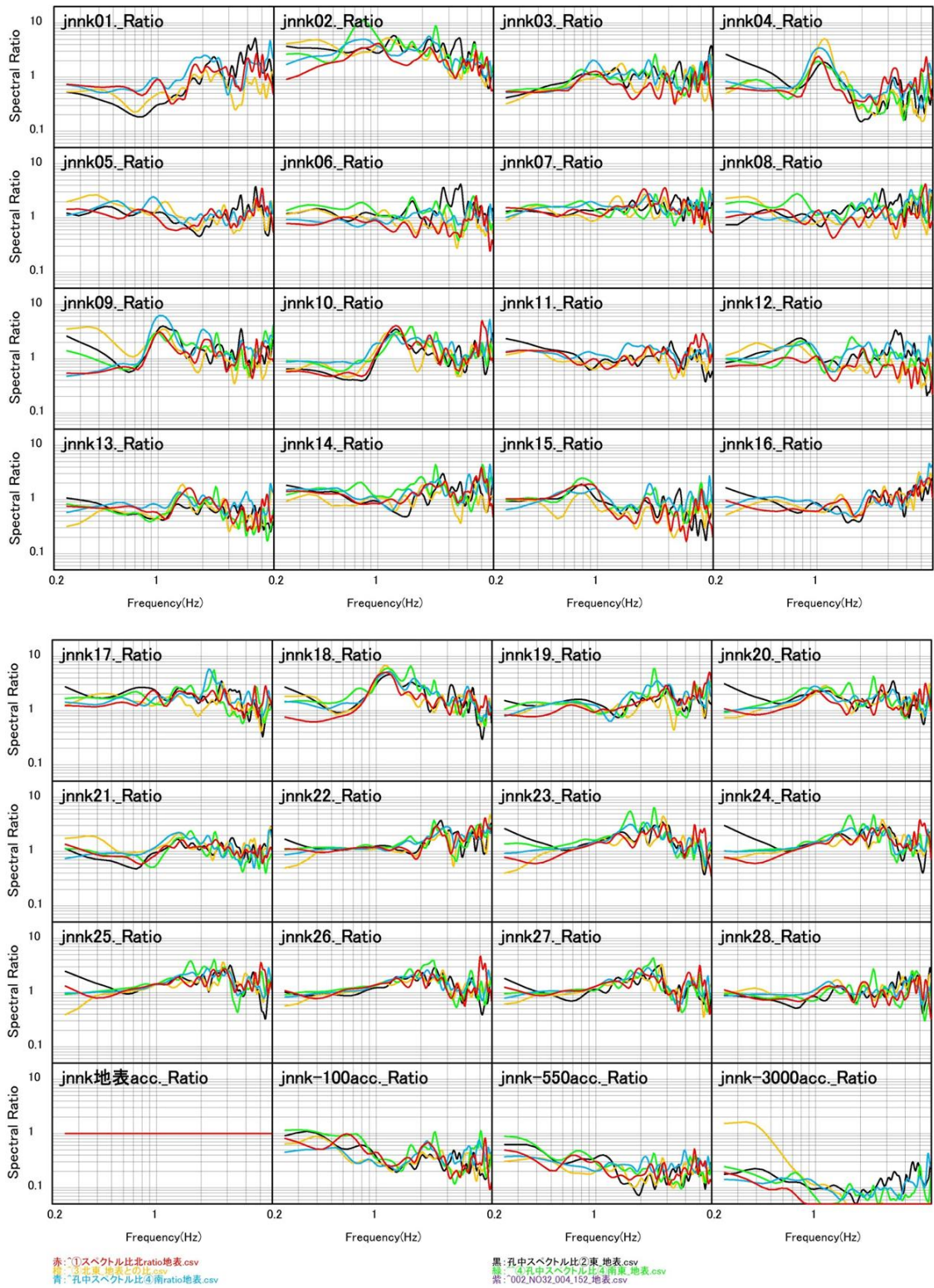


図 3.1-48 地表/地表スペクトル比 赤:ケース①方向 黒:② 橙:③ 緑:④
青:⑤、ケースごとに色分けして示している

3.1.4.3 地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルの比較

図 3.1-49～51 に地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルの比較を示す。図 3.1-49 はケース②方向の地震、図 3.1-50 はケース④方向の地震、図 3.1-51 はケース⑤方向の地震のそれぞれの地表/孔中スペクトル比、H/V スペクトルの平均を示したものである。低周波数側のピーク周波数は両者でほぼ同じである。これは、上下動成分については地盤による増幅がほとんどないため、水平動成分の伝達関数とH/V スペクトルのピーク周波数がほぼ同じになったと考えられる。

振幅値は地表/孔中スペクトル比のほうが大きい値を示しているが、周波数 10Hz 程度では、両者の値はほぼ同じ程度になる。一方、図 3.1-52 に示すように、観測孔 3000m 地震計記録の NS 成分と UD 成分のスペクトル比はほぼ 1 を示している。以下の式に示されるように、10Hz 程度では、上下動の地下 3000m 地点からの増幅はほぼ 1 とみなすことができ、地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルの違いが水平動と上下動の増幅率の違いをほぼあらわしていると考えられる。

$$\frac{H_{Surface}}{H_{Base}} = Amp_{Hor}$$
$$H/V = \frac{H_{Surface}}{V_{Surface}} = \frac{H_{Base} * Amp_{Hor}}{V_{Base} * Amp_{Ver}} \sim \frac{Amp_{Hor}}{Amp_{Ver}}$$

ここで、 $H_{Surface}$ 、 H_{Base} 、 $V_{Surface}$ はそれぞれ、観測孔の地表地震計記録の水平動のスペクトル、観測孔の 3000m 地震計記録の水平動のスペクトル、観測孔の地表地震計記録の上下動のスペクトルを表す。 Amp_{Hor} 、 Amp_{Ver} はそれぞれ、水平動、上下動の地下 3000m 地点と地表地点の伝達関数である。

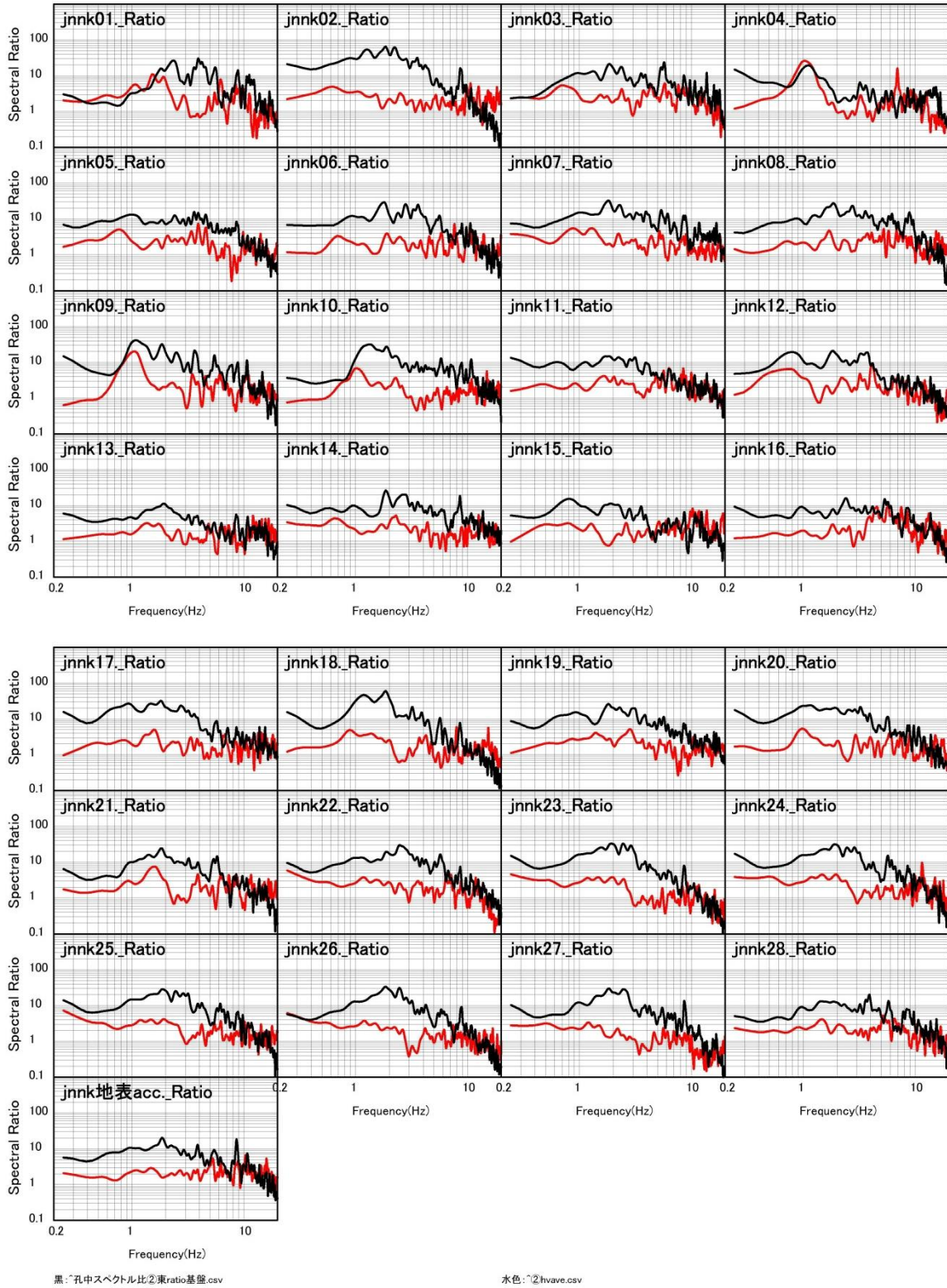
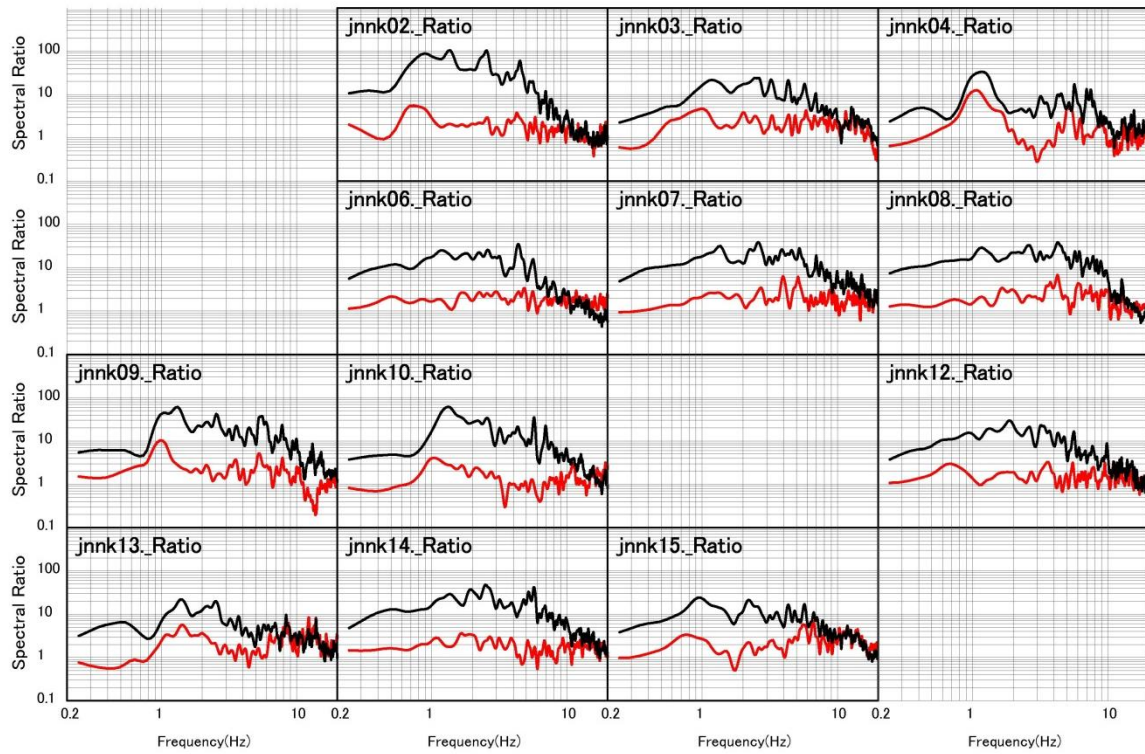


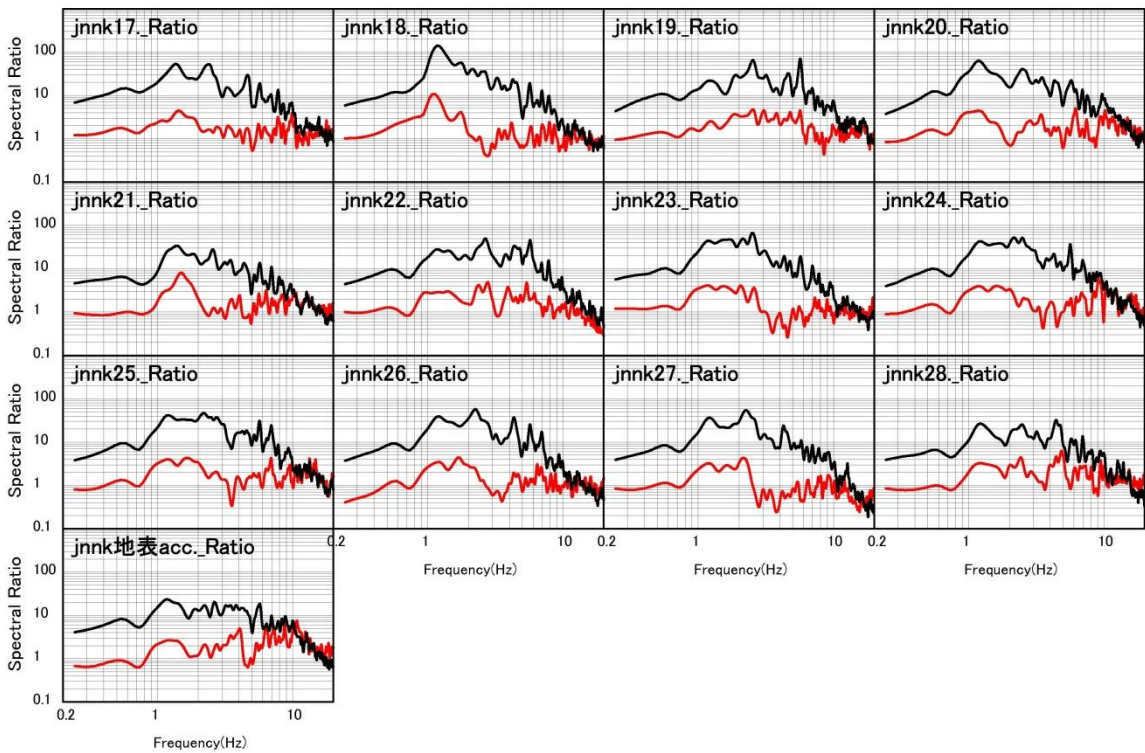
図 3.1-49 地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルの比較 (ケース②方向)

黒: 地表/孔中スペクトル比 赤: H/V スペクトル



黒: 〓孔中スペクトル比④南東ratio基盤.csv

水色: 〓④Average_HV.csv

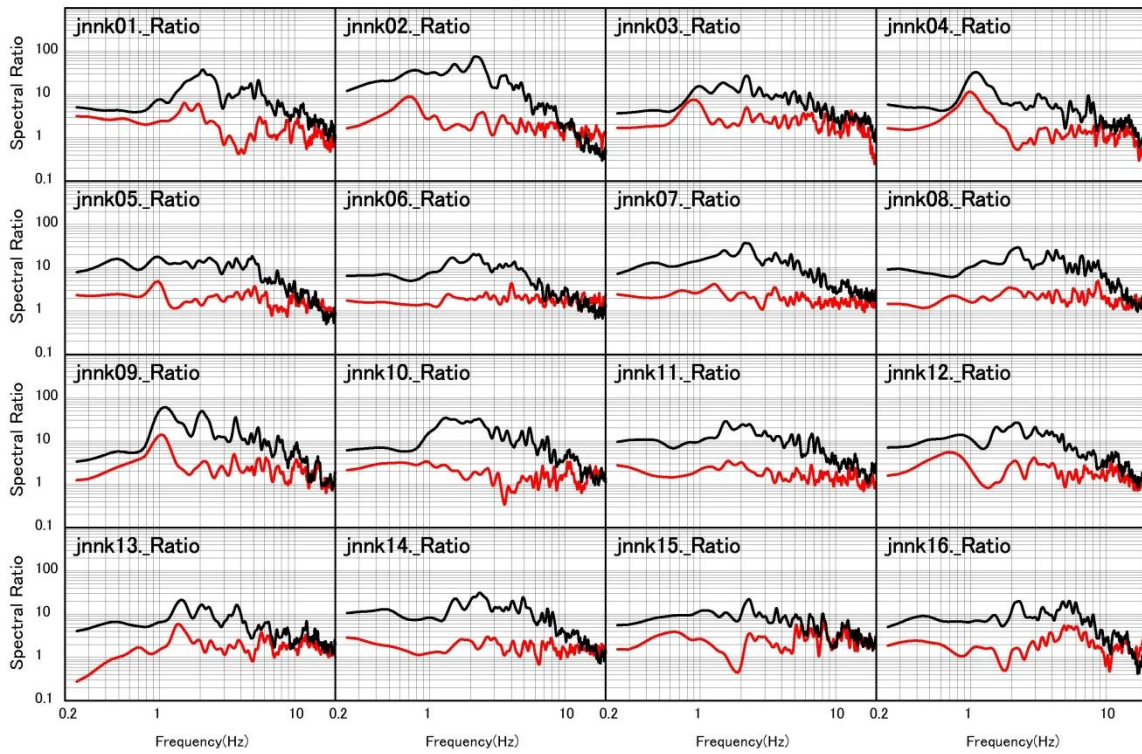


黒: 〓孔中スペクトル比④南東ratio基盤.csv

水色: 〓④Average_HV.csv

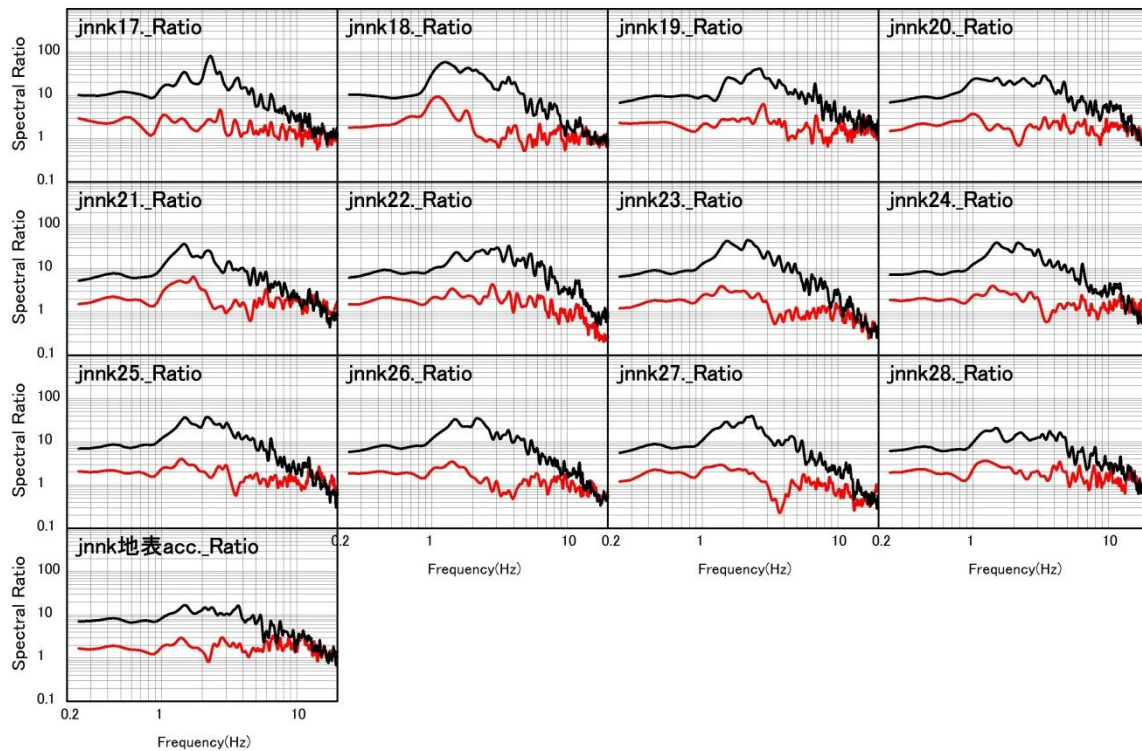
図 3.1-50 地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルの比較 (ケース④方向)

黒: 地表/孔中スペクトル比 赤: H/V スペクトル



黒：孔中スペクトル比⑤南基盤.csv

水色：⑥HV.csv



黒：孔中スペクトル比⑤南基盤.csv

水色：⑥HV.csv

図 3.1-51 地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルの比較 (ケース⑤方向)

黒：地表/孔中スペクトル比 赤：H/V スペクトル

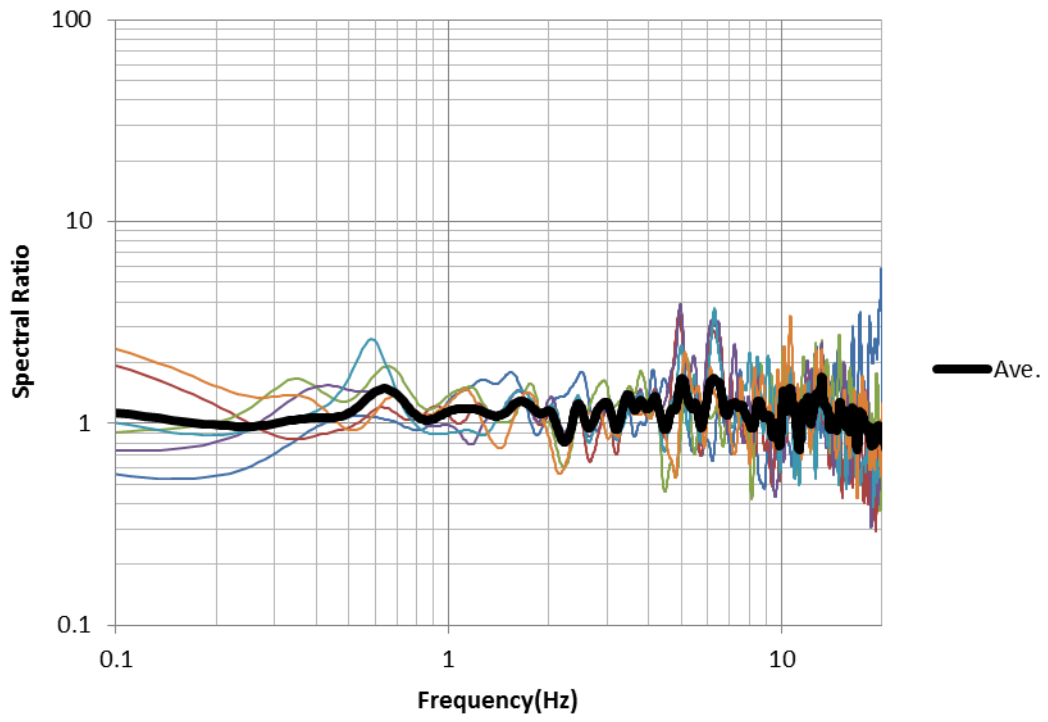


図 3.1-52 観測孔の 3000 m 地震計記録の NS 成分と UD 成分のスペクトル比
 黒線は、ケース②、④、⑤の地震の平均を表す

3.1.4.4 地表/地表スペクトル比とH/V スペクトルの比較

図 3.1-53 にケース①地表/地表スペクトル比とH/V スペクトルの比較を、図 3.1-54 にケース②の比較を、図 3.1-55 にケース③の比較を、図 3.1-56 にケース④の比較を、図 3.1-57 にケース⑤の比較を示す。

地表/孔中スペクトル比の場合と同様に、低周波数側のピーク周期は両者ともにほぼ一致している。

3.1.3 節で示したように、震央方向による相違はあまり顕著でなかった。

前節では、地表/孔中スペクトル比とH/V スペクトルについても低周波数側のピーク周波数が対応していることを示したが、地表/地表スペクトル比とも対応していた。これは、観測孔の地表地震計記録において、観測孔の 3000m 地震計記録との伝達関数に明瞭なピークを示さないことを示している。図 3.1-49～51 における観測孔の地表記録(JNNK 地表と表記)の黒線の地表/孔中スペクトル比のデータを見ても特に周波数 2Hz 以下において明瞭なピークがみられないことがわかる。

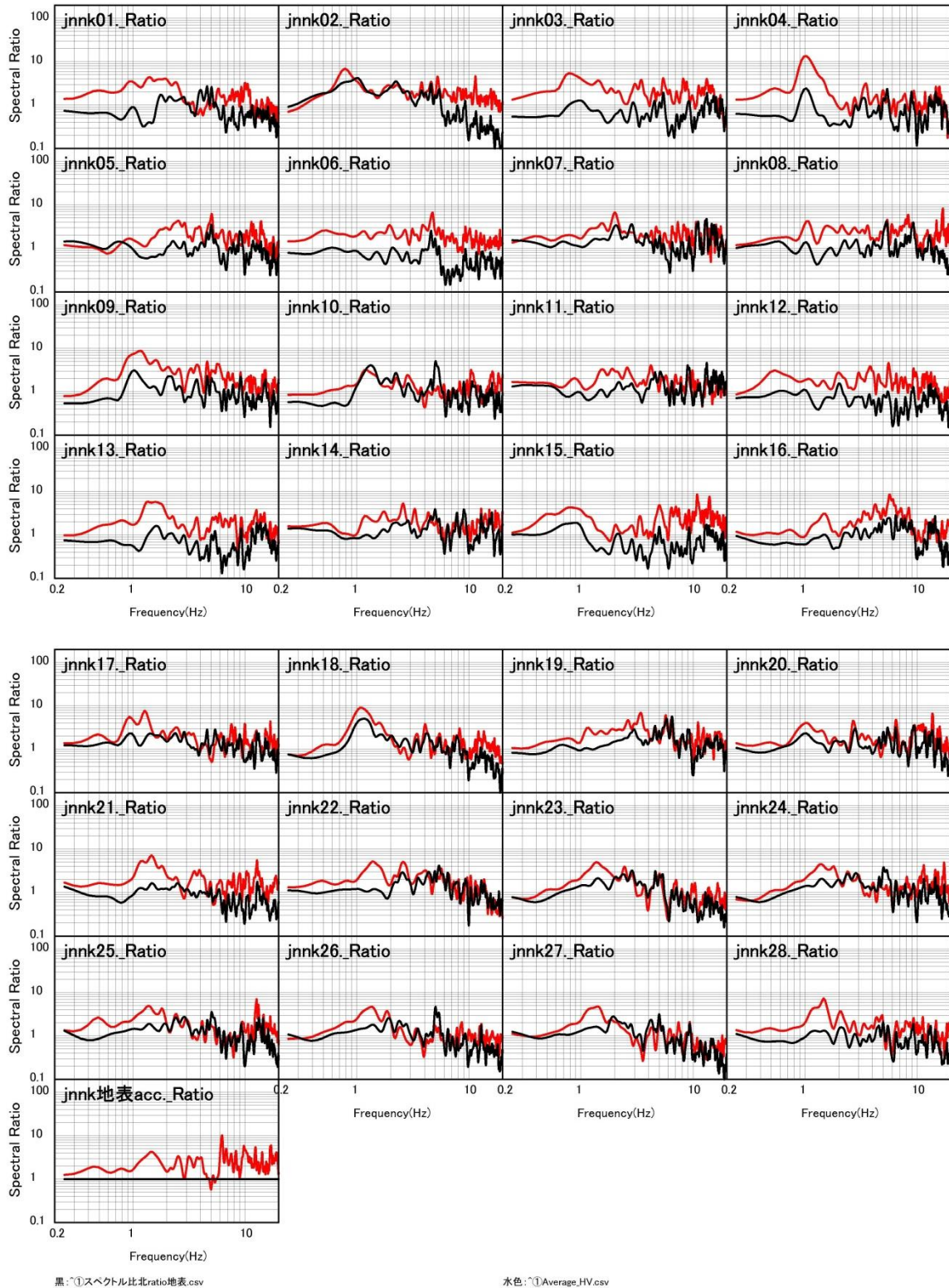


図 3.1-53 地表/地表スペクトル比とH/Vスペクトルの比較(ケース①方向)
黒: 地表/地表スペクトル比 赤: H/V スペクトル

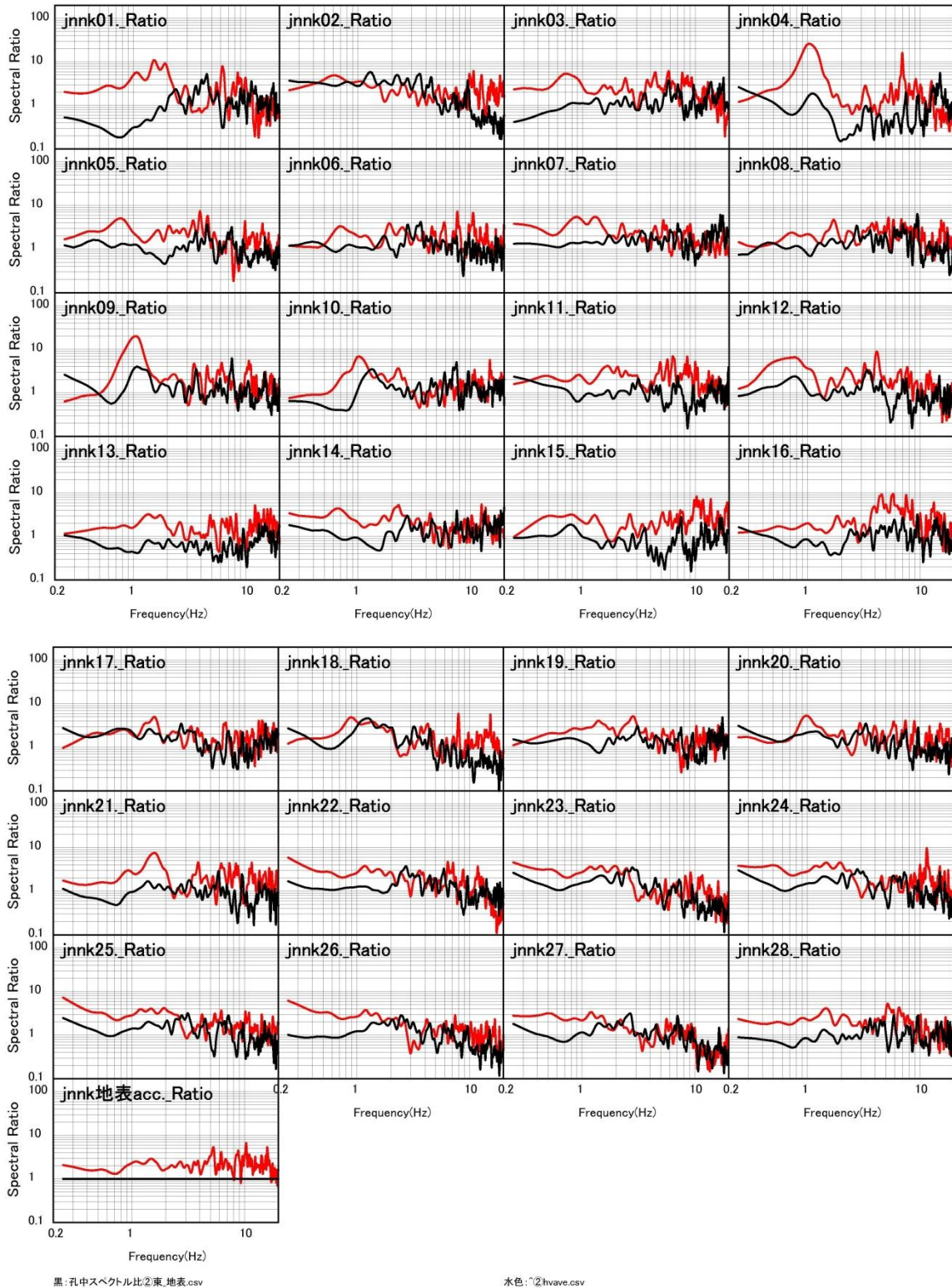


図 3.1-54 地表/地表スペクトル比とH/Vスペクトルの比較(ケース②方向)

黒: 地表/地表スペクトル比 赤: H/V スペクトル

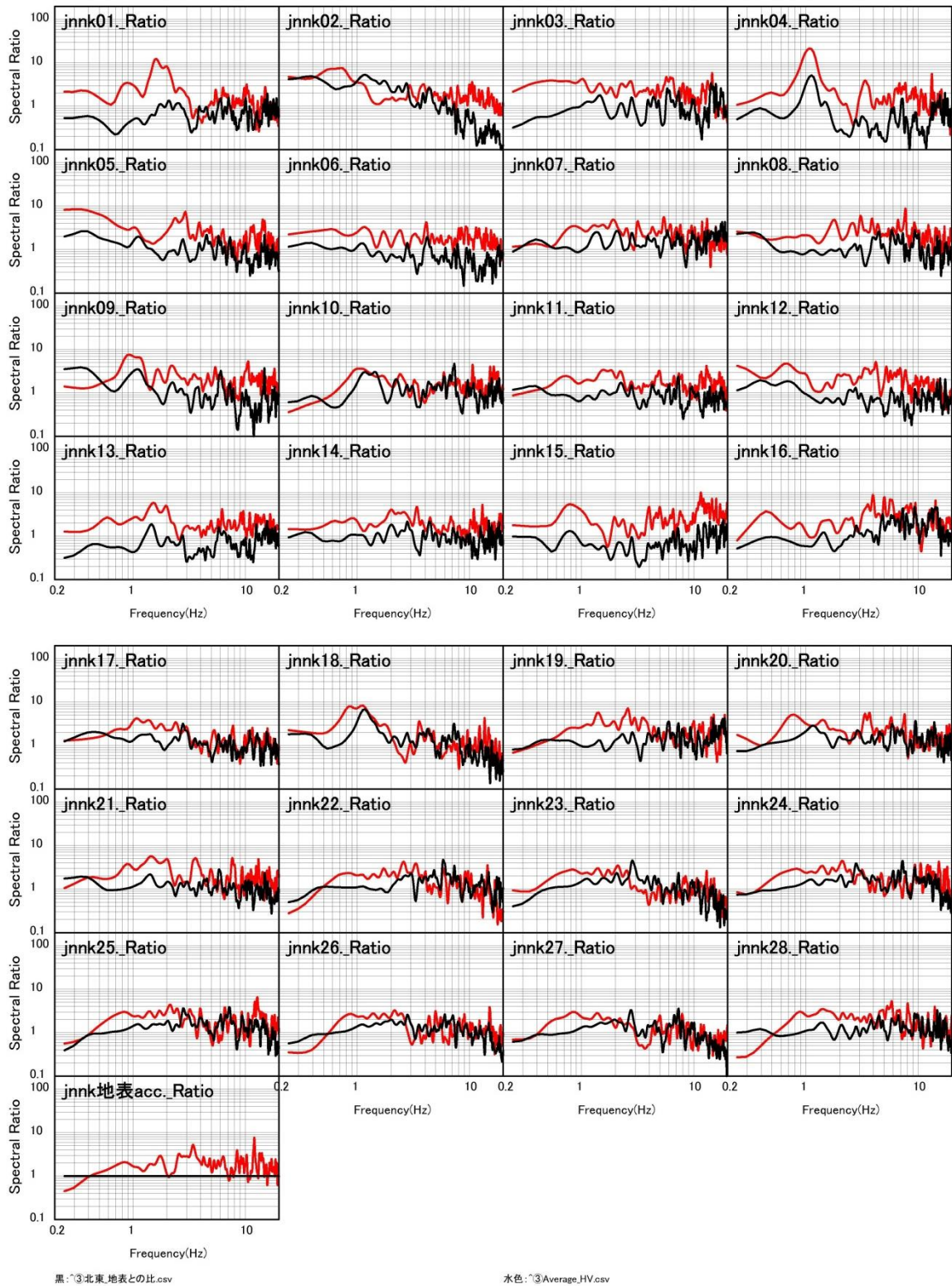
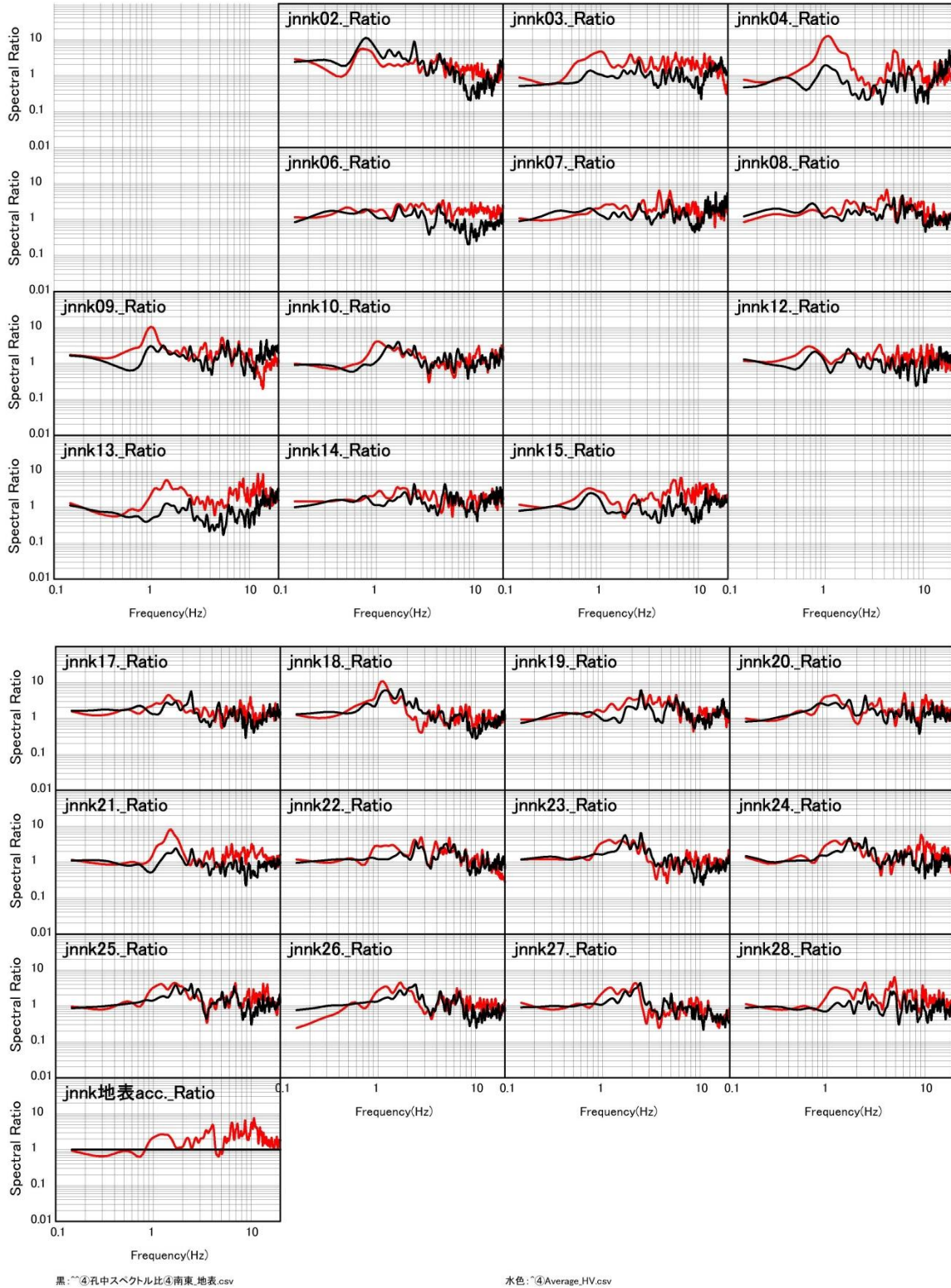


図 3.1-55 地表/地表スペクトル比とH/Vスペクトルの比較(ケース③方向)

黒: 地表/地表スペクトル比 赤: H/V スペクトル



黒: ④孔中スペクトル比④南東_地表.csv

赤色: ④Average_HV.csv

図 3.1-56 地表/地表スペクトル比とH/Vスペクトルの比較(ケース④方向)

黒: 地表/地表スペクトル比 赤: H/V スペクトル

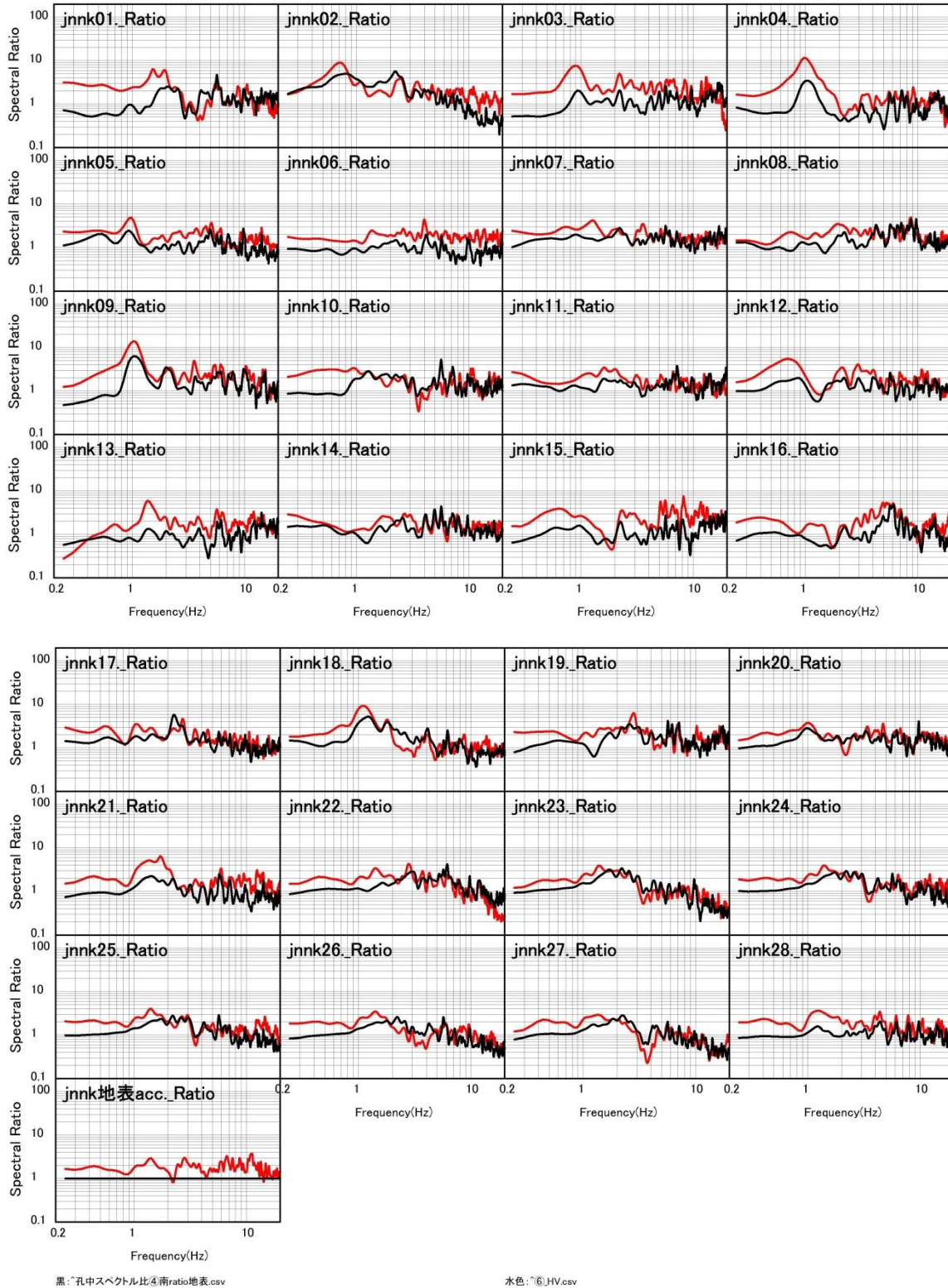


図 3.1-57 地表/地表スペクトル比とH/Vスペクトルの比較(ケース⑤方向)
 黒: 地表/地表スペクトル比 赤: H/V スペクトル

3.1.4.5 5つの方向の計算結果

(1) ケース①方向計算結果

図 3.1-58 に、ケース①の地表/地表スペクトル比の計算結果と観測データの比較を示す。赤線は、観測データであり、橙色は、135 度方向からの入射、緑色は 225 度方向からの入射、青色は 315 度方向からの入射、紫色は 45 度方向からの入射した計算結果のスペクトル比を示している。鉛直下方 30 度の入射角で平面波を入射している。黒線は鉛直下方からの入射結果である。番号の小さい観測孔からやや離れた観測点について観測結果とやや整合していない地点が多くみられる。一方、観測孔の 100m 地震計記録の地表/地表スペクトル比(100 m 地震計/地表地震計のスペクトル比となる)は観測データをよく説明する結果となった。観測点番号が小さい観測点は入射方向に応答特性が異なっていることがわかる。

図 3.1-59 には計算結果のトランスバース成分の速度波形のペーストアップを示す。上図が鉛直入射の結果、下図が 135 度方向からの入射結果を示す。到来方向 135 度のケースでは、JNNK21 以降の観測点や JNNK11 観測点で後続位相が強く励起されている。一方、JNNK01 などは後続位相が鉛直入射に比べ小さい。

図 3.1-60 に 225 度方向入射による波形のスナップショットを示す。ほぼ東側からの入射である。6.48 秒では、東から到来した波群が、米山層に反射して東側へ伝播していく様子が見える。米山層が急激に浅くなる地域において最大値を示していることがわかる。

(2) ケース②方向計算結果

図 3.1-61 にケース②方向の地表/孔中スペクトル比の計算結果と観測データの比較を示す。赤線は、観測データであり、橙色は、242 度方向からの入射、緑色は 332 度方向からの入射、青色は 62 度方向からの入射、紫色は 152 度方向からの入射した計算結果のスペクトル比を示している。鉛直下方 30 度の入射角で平面波を入射している。黒線は鉛直下方からの入射結果である。JNNK02 や JNNK03 など観測孔から遠く離れた地点で観測データとの対応が悪い。観測孔の地表地震計や 100 m 地震計、550 m 地震計のスペクトル比の観測と計算結果の対応はおおむね良い。また、鉛直下方からの入射結果が観測データとの整合はよい結果となった。

図 3.1-62 にケース②方向のスナップショットを示す。鉛直下方からの入射である。米山層が露頭している西側に最初に S 波が到達し、北東方向へ波が伝播している様子が見える。西側から東側へ波が伝播しており、波の干渉によってモデルの中央付近や観測点 5 付近で最大振幅を示していることがわかる。

(3) ケース③方向計算結果

図 3.1-63 にケース③方向の地表/地表スペクトル比の計算結果と観測データの比較を示す。赤線は、観測データであり、橙色は、191 度方向からの入射、緑色は 281 度方向からの入射、青色は 371 度方向からの入射、紫色は 101 度方向からの入射した計算結果のスペクトル比を示している。鉛直下方 30 度の入射角で平面波を入射している。黒線は鉛直下方からの入射結果である。観測点番号が小さい地点では、281 度方向(南東方向)からのスペクトル比が大きい観測点が多い。JNNK02 や JNNK18 では 1Hz 付近のスペクトル比が過小評価である。

(4) ケース④方向計算結果

図 3.1-64 にケース④方向の地表/孔中スペクトル比の計算結果と観測データの比較を示す。赤線は、観測データであり、橙色は、308 度方向からの入射、緑色は 38 度方向からの入射、青色は 128 度方向からの入射、紫色は 218 度方向からの入射した計算結果のスペクトル比を示している。鉛直下方 30 度の入射角で平面波を入射している。黒線は鉛直下方からの入射結果である。

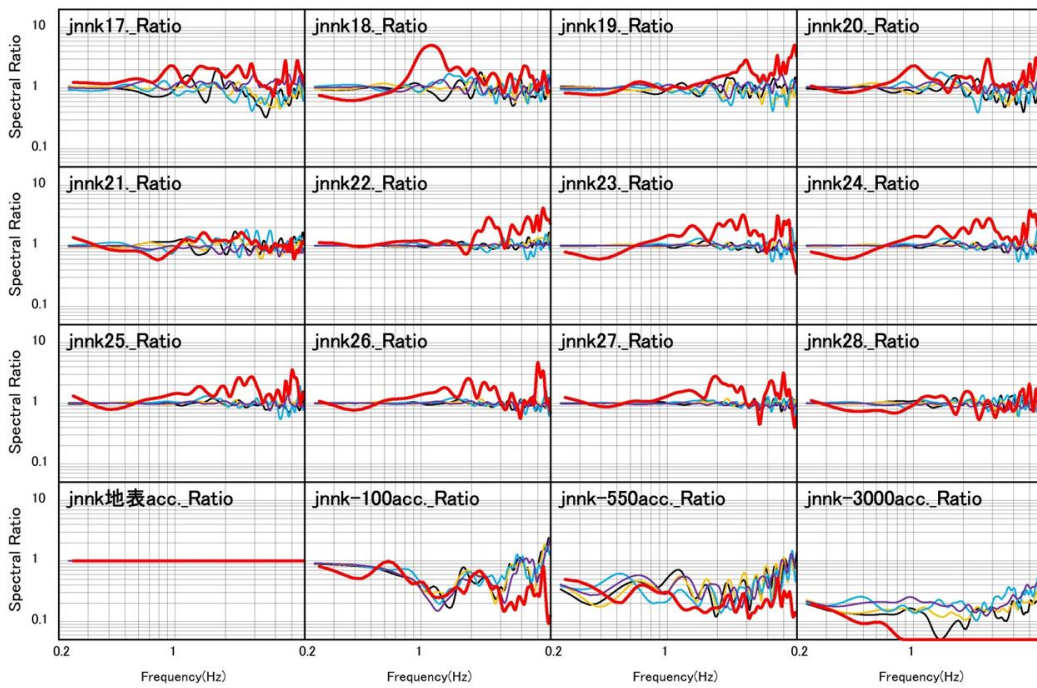
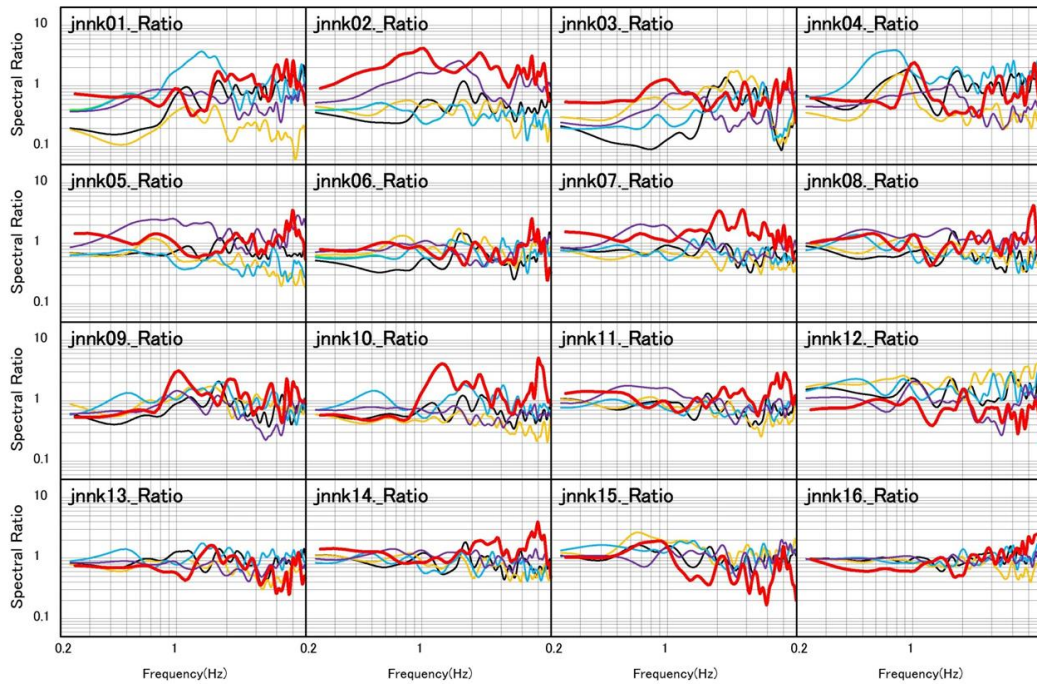
ケース①方向から③方向と同様に JNNK01、02、18 など観測記録との対応は悪いが、観測孔の地表地震計や 100m 地震計、550m 地震計のスペクトル比の観測と計算結果の対応はおおむね良い。鉛直下方からの入射は 1.5Hz 付近にスペクトル比のピークがみられ、地盤振動特性がやや異なっている。

図 3.1-65 にケース④方向のスナップショットを示す。38 度方向から入射した結果である。ほぼ西側からの入射になる。モデルの西側で最大速度が大きくなる地域がみられることが確認できる。

(5) ケース⑤方向計算結果

図 3.1-66 にケース⑤方向の地表/孔中スペクトル比の計算結果と観測データの比較を示す。赤線は、観測データであり、橙色は、331 度方向からの入射、緑色は 61 度方向からの入射、青色は 157 度方向からの入射、紫色は 241 度方向からの入射した計算結果のスペクトル比を示している。鉛直下方 30 度の入射角で平面波を入射している。黒線は鉛直下方からの入射結果である。

ケース①から④と同様に JNNK01、02、18 など観測記録との対応は悪いが、観測孔の地表地震計や 100m 地震計、550m 地震計の記録のスペクトル比の観測と計算結果の対応はおおむね良い。



赤: ①スペクトル比北北東地表面.csv
 橙: 001_NO29_001_135_地表面.csv
 青: 001_NO29_003_315_地表面.csv

黒: 001_NO29_005_鉛直_F3_new_地表面.csv
 緑: 001_NO29_002_225_地表面.csv
 紫: 001_NO29_004_45_地表面.csv

計算結果との比較(地表との比)
 赤: 観測(ケース①方向) 黒: 鉛直入射
 橙: 135度 緑: 225度 青: 315度 紫: 45度

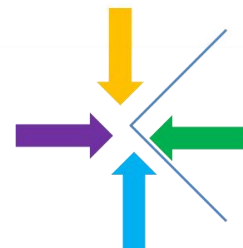


図 3.1-58 計算結果との比較 (地表/地表スペクトル比) (ケース① 色は入射方向を示す)

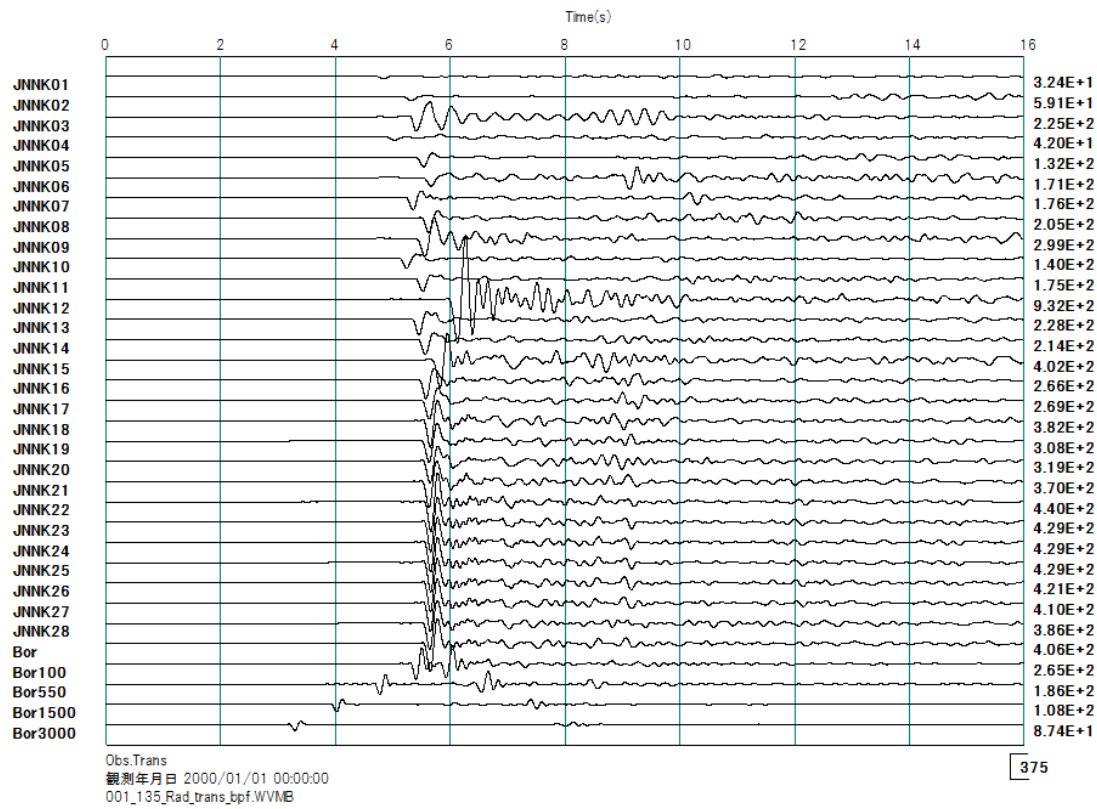
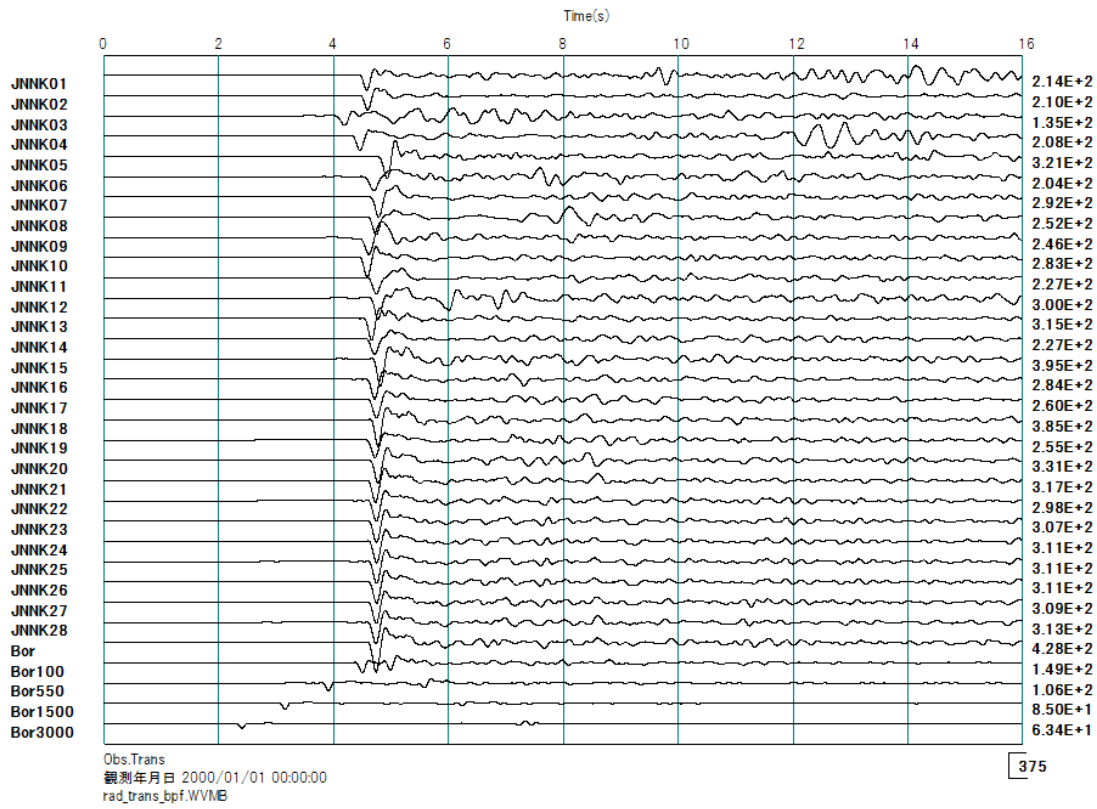


図 3.1-59 ケース①計算結果 トランスバース成分波形
上図:鉛直入射 下図:到来方向 135 度

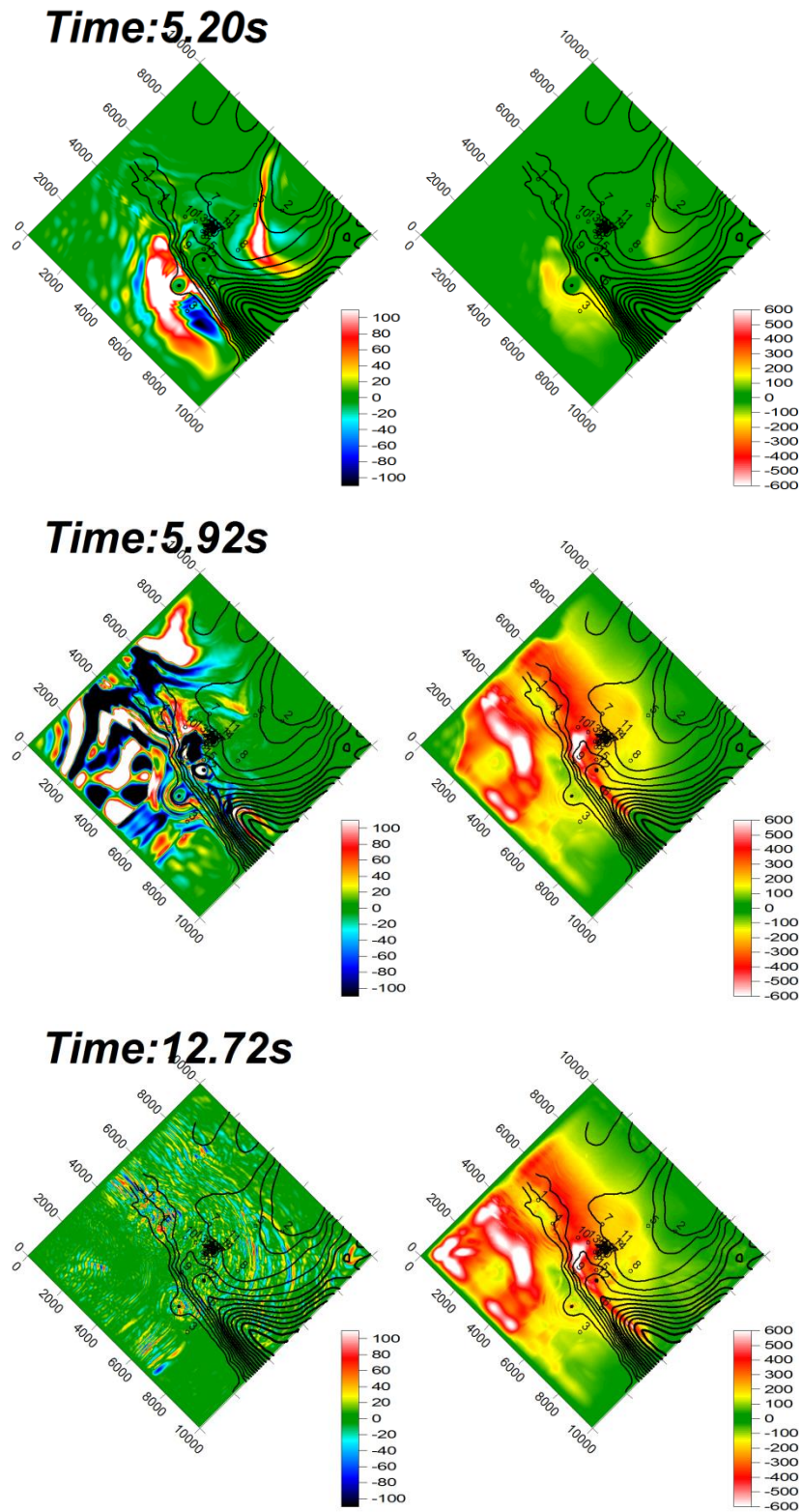
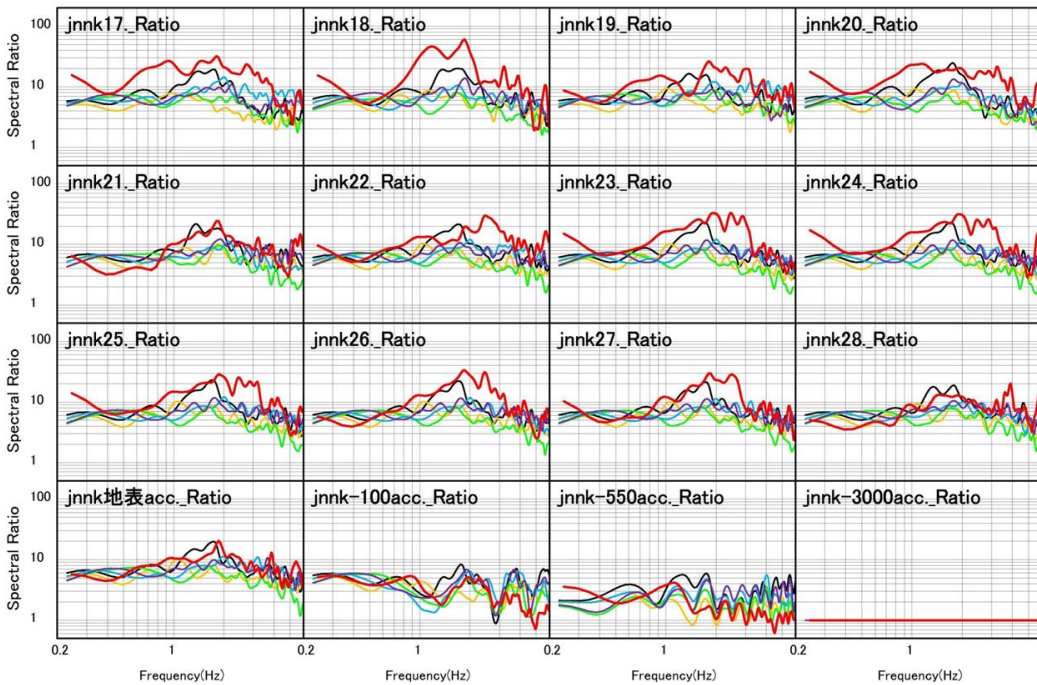
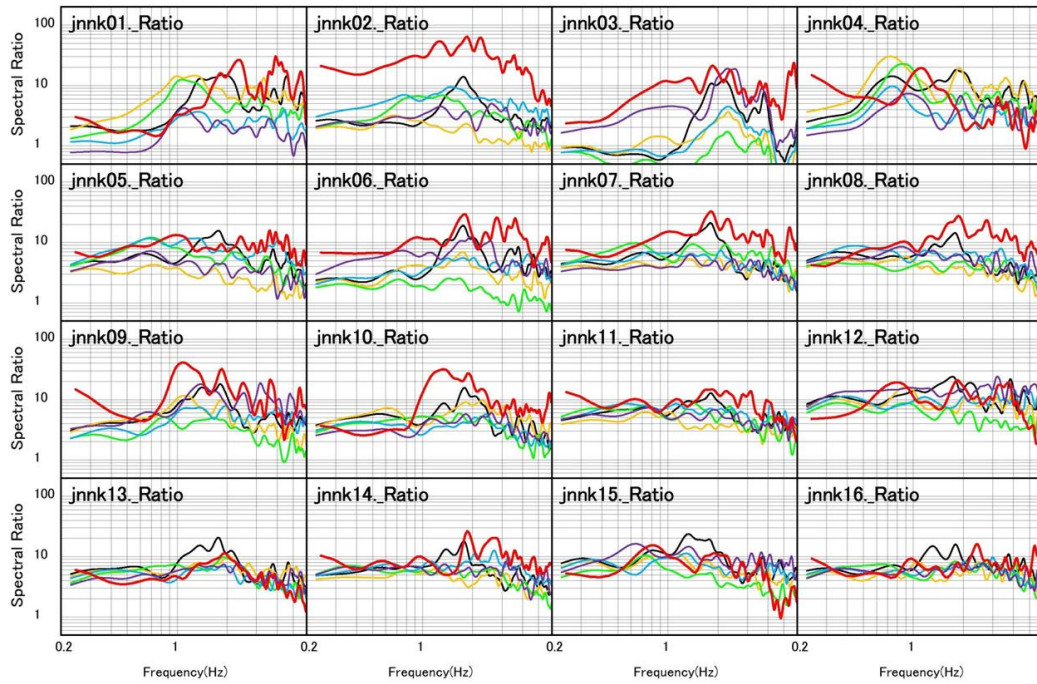


図 3.1-60 ケース①スナップショット 225 度方向入射
 左図: ある時刻の波形振幅 右図: ある時刻までの波形の最大値
 コンター線は、米山層の上面



赤: 孔中スペクトル比②東ratio基礎.csv
 黒: 002_NO32_001_242.csv
 青: 002_NO32_003_62.csv

黒: 002_NO32_005_242_鉛直.csv
 緑: 002_NO32_002_332.csv
 紫: 002_NO32_004_152.csv

計算結果との比較(孔中との比)
 赤: 観測(ケース②方向) 黒: 鉛直入射
 橙: 242度 緑: 332度 青: 62度 紫: 152度

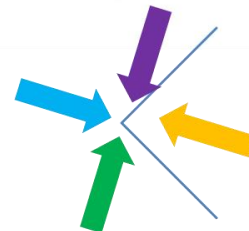


図 3.1-61 計算結果との比較(地表/孔中スペクトル比) (ケース② 色は入射方向を示す)

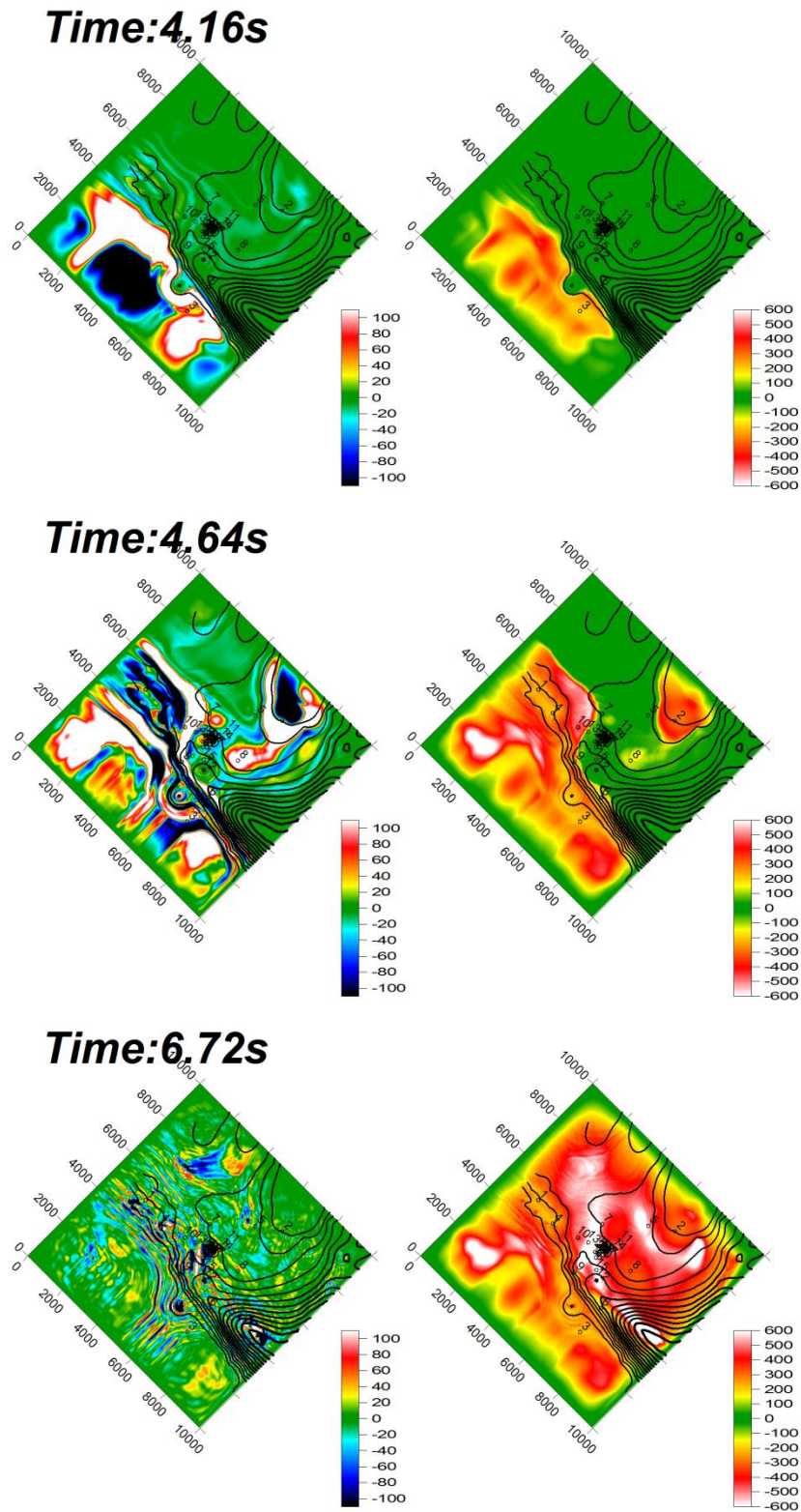
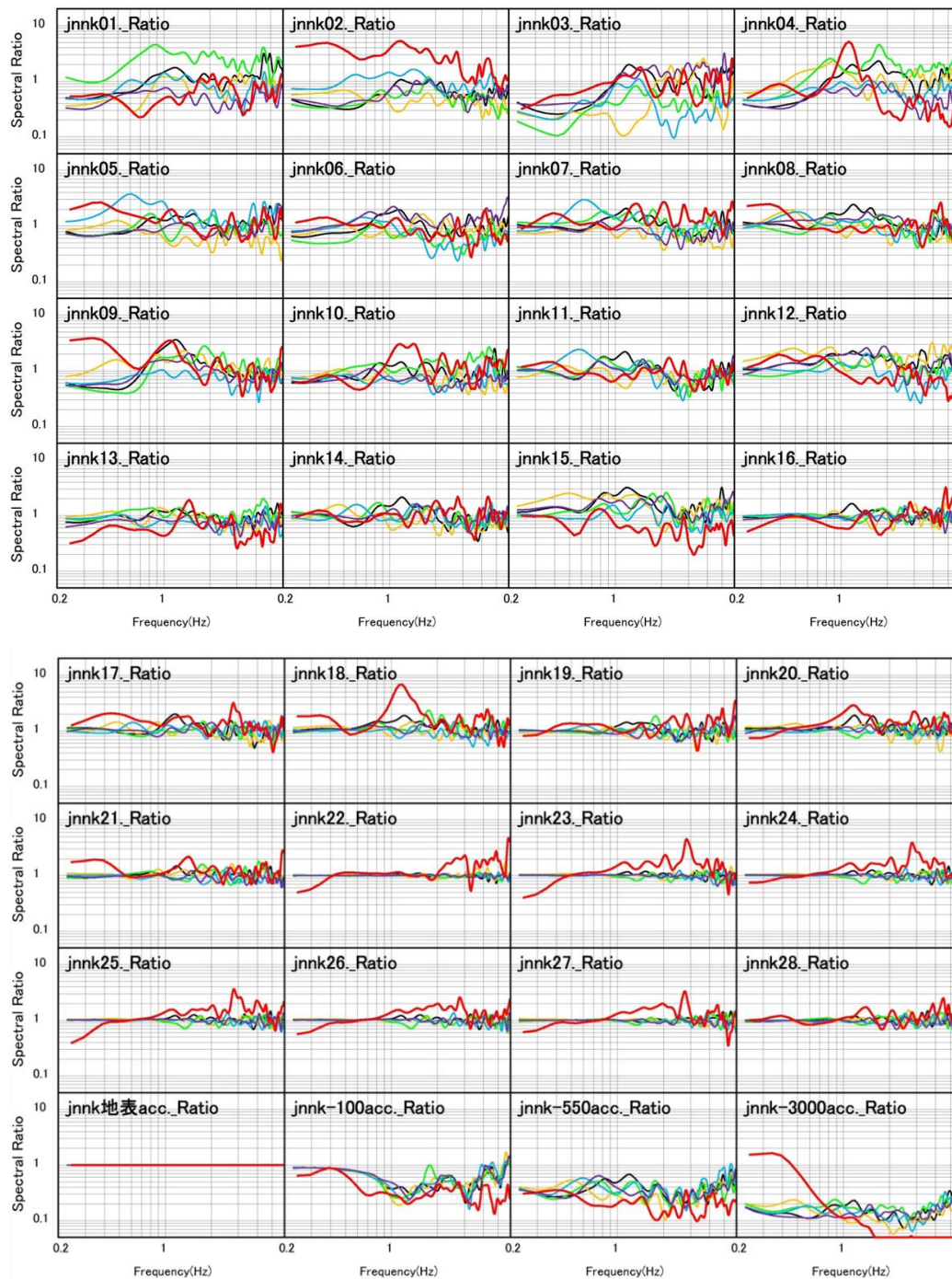


図 3.1-62 ケース②スナップショット 鉛直入射
 左図: ある時刻の波形振幅 右図: ある時刻までの波形の最大値
 コンター線は、米山層の上面



赤: "03_北東_地表との比.csv
 橙: "03_no02_011_191_地表.csv
 青: "03_no02_003_371_地表.csv
 紫: "jns_2007MODEL_no1_鉛直.csv

黒: "003_NO2_005_191鉛直_地表.csv
 緑: "003_no02_002_281_地表.csv
 紫: "003_NO2_004_101_地表.csv

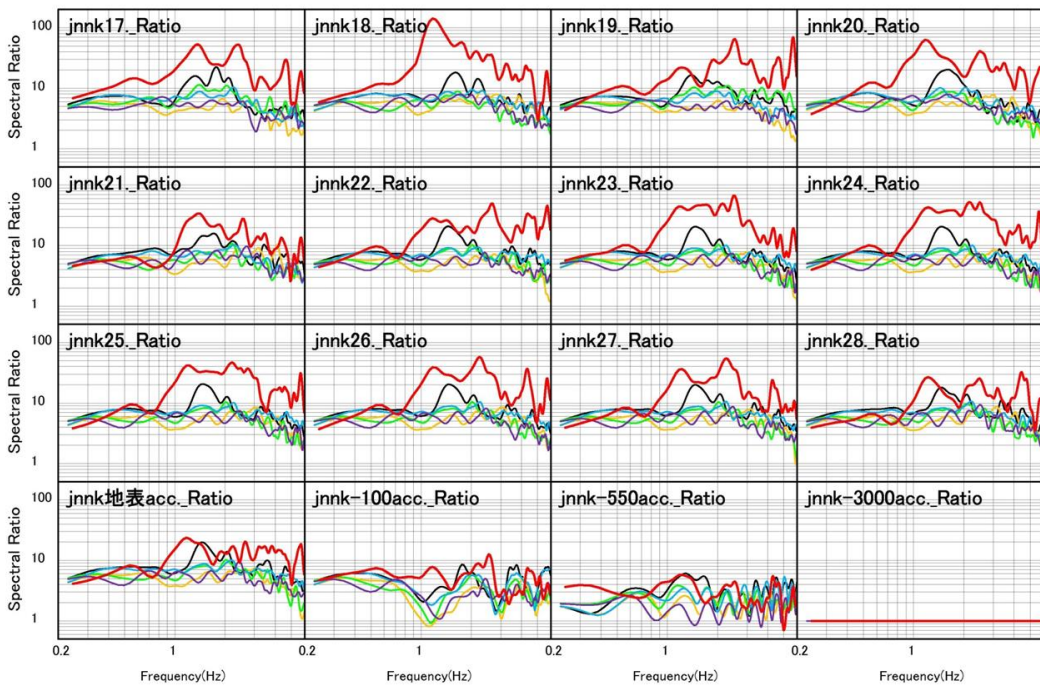
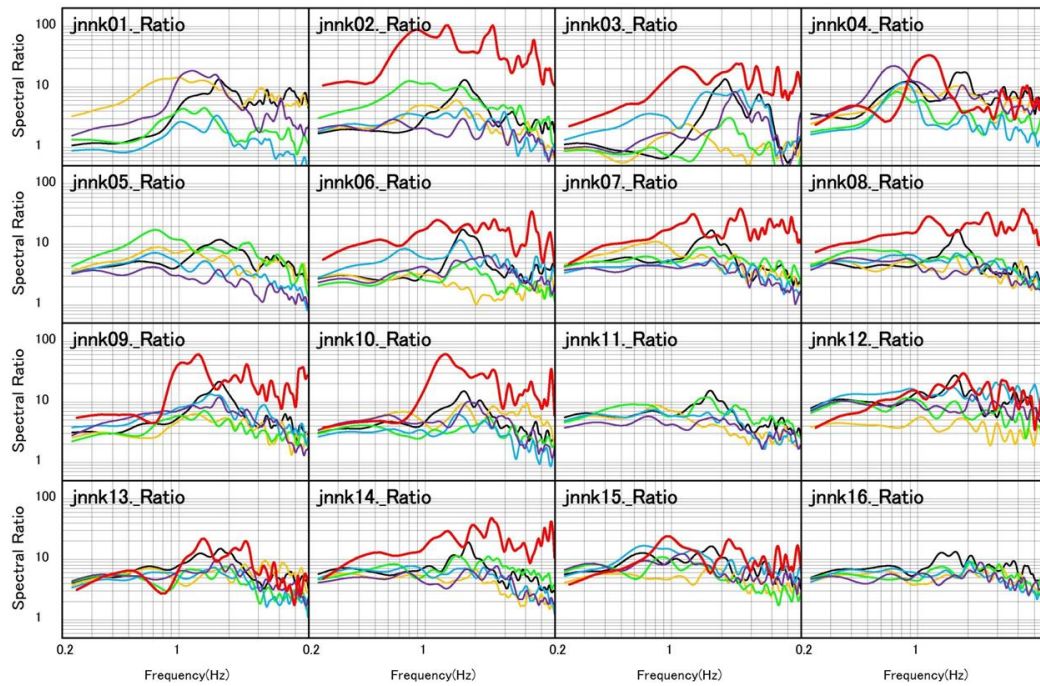
計算結果との比較(地表との比)

赤: 観測(ケース③方向) 黒: 鉛直入射

橙: 191度 緑: 281度 青: 371度 紫: 101度



図 3.1-63 計算結果との比較 (地表/地表スペクトル比) (ケース③ 色は入射方向を示す)



赤: 孔中スペクトル比④南東ratio_基準.csv
 橙: 004_NO14_003_308.csv
 青: 004_NO14_003_128.csv
 灰: jnes_no4_鉛直_G.csv

黒: 004_NO14_005_308_鉛直F.csv
 緑: 004_NO14_003_38.csv
 紫: 004_NO14_004_218_F1.csv

計算結果との比較(孔中との比)
 赤: 観測(ケース④方向) 黒: 鉛直入射
 橙: 308度 緑: 38度 青: 128度 紫: 218度

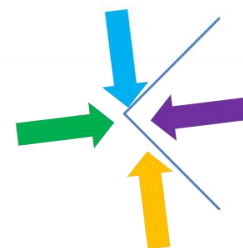


図 3.1-64 計算結果との比較 (地表/孔中スペクトル比) (ケース④ 色は入射方向を示す)

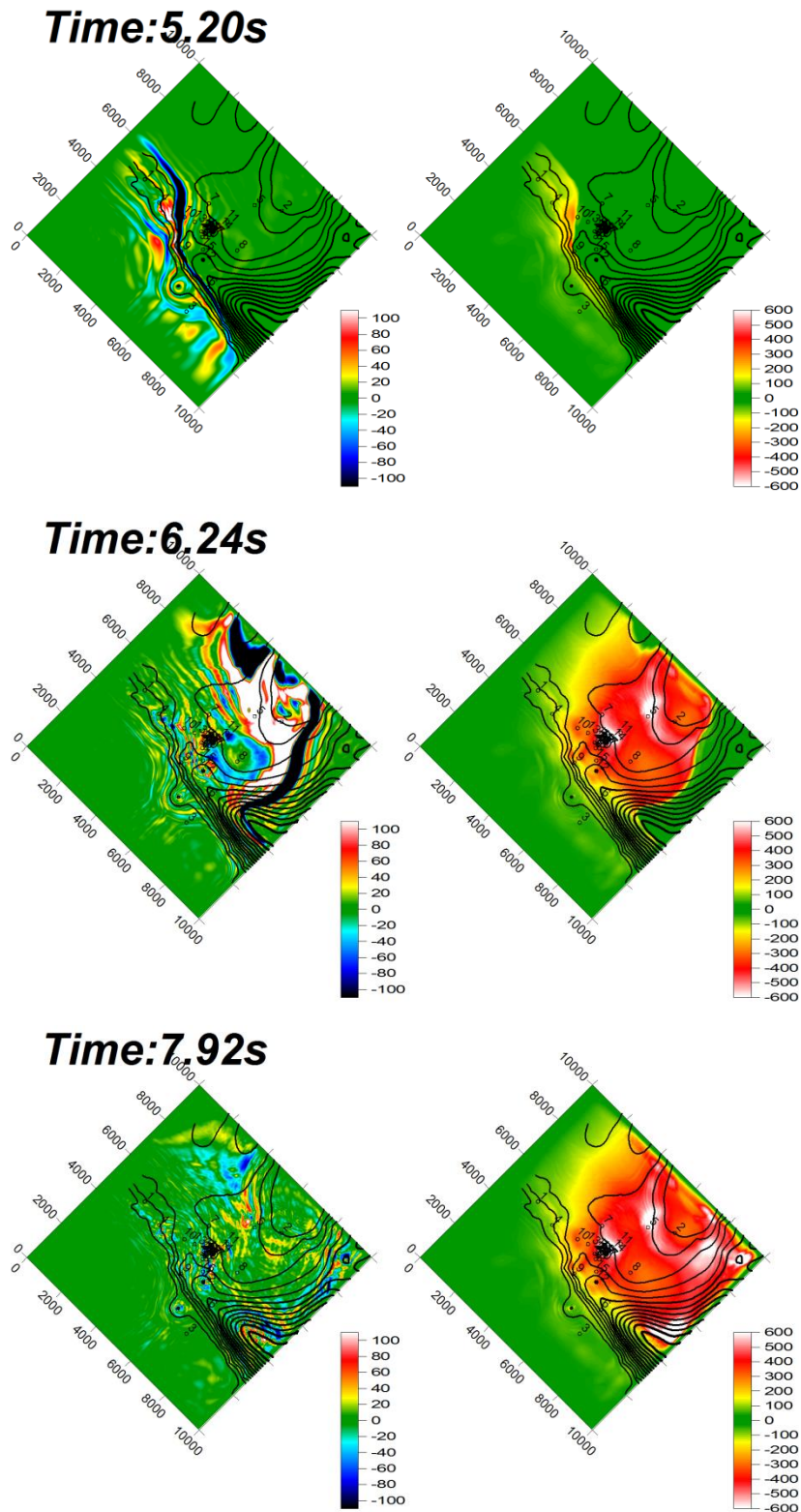
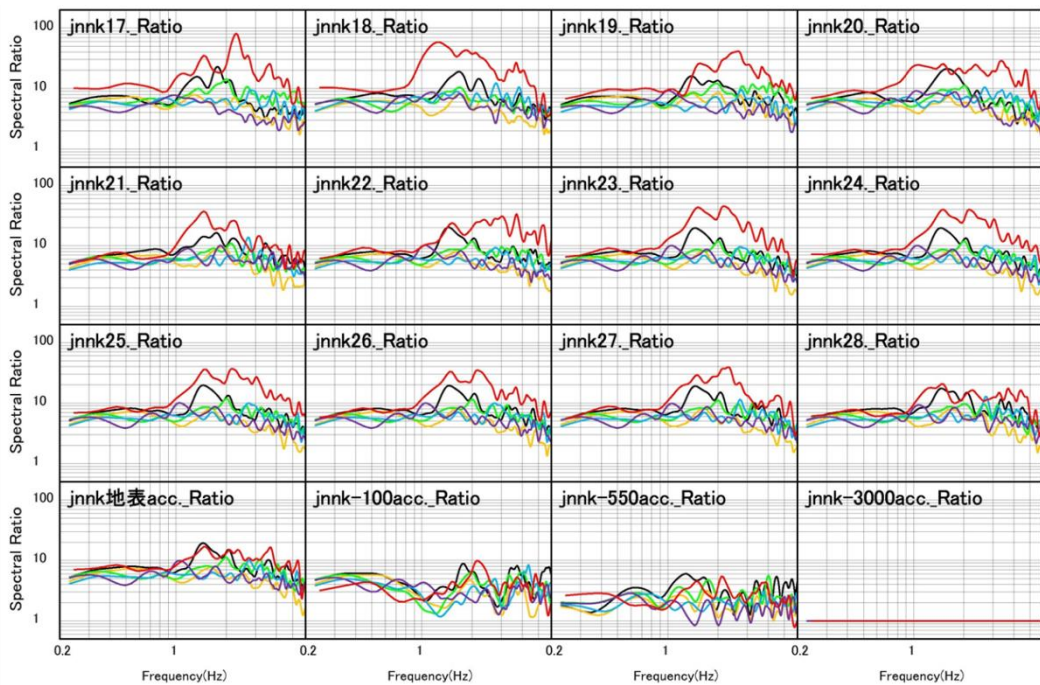
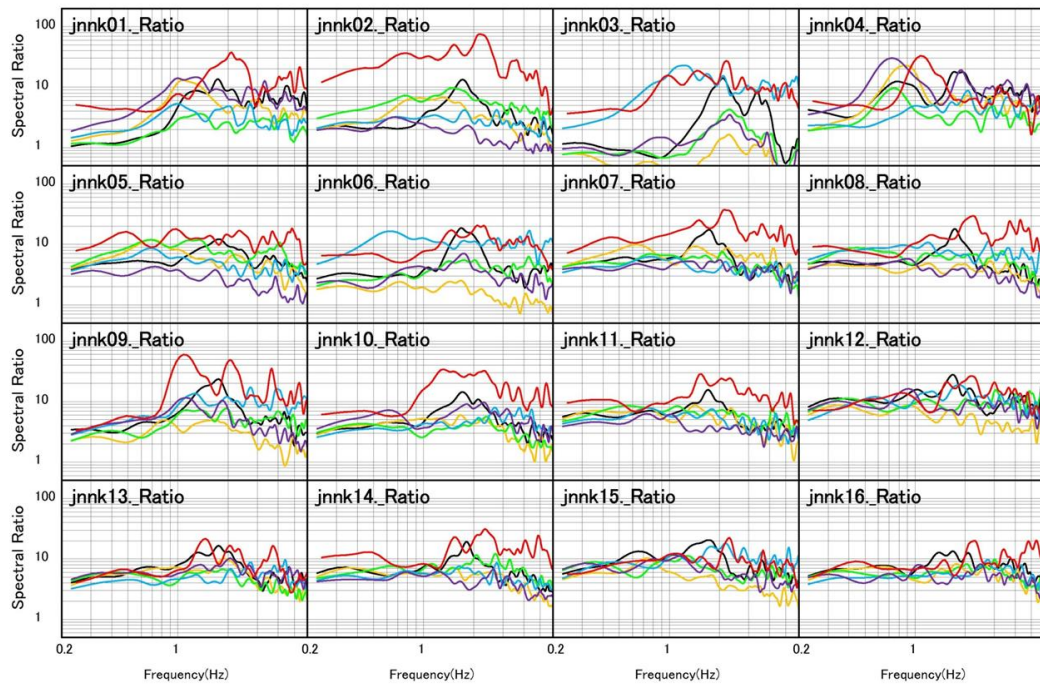


図 3.1-65 ケース④スナップショット 38 度方向入射
 左図: ある時刻の波形振幅 右図: ある時刻までの波形の最大値
 コンター線は、米山層の上面



赤: 孔中スペクトル比5南基盤.csv
 青: '005,no5,002,157.csv

黒: '006,no6,005鉛直_331.csv
 紫: '006,no6,004,241.csv

計算結果との比較(孔中との比)
 赤: 観測(ケース⑤方向) 黒: 鉛直入射
 橙: 331度 緑: 61度 青: 157度 紫: 241度

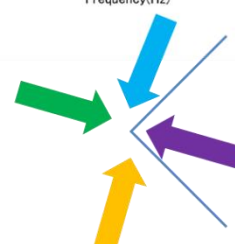


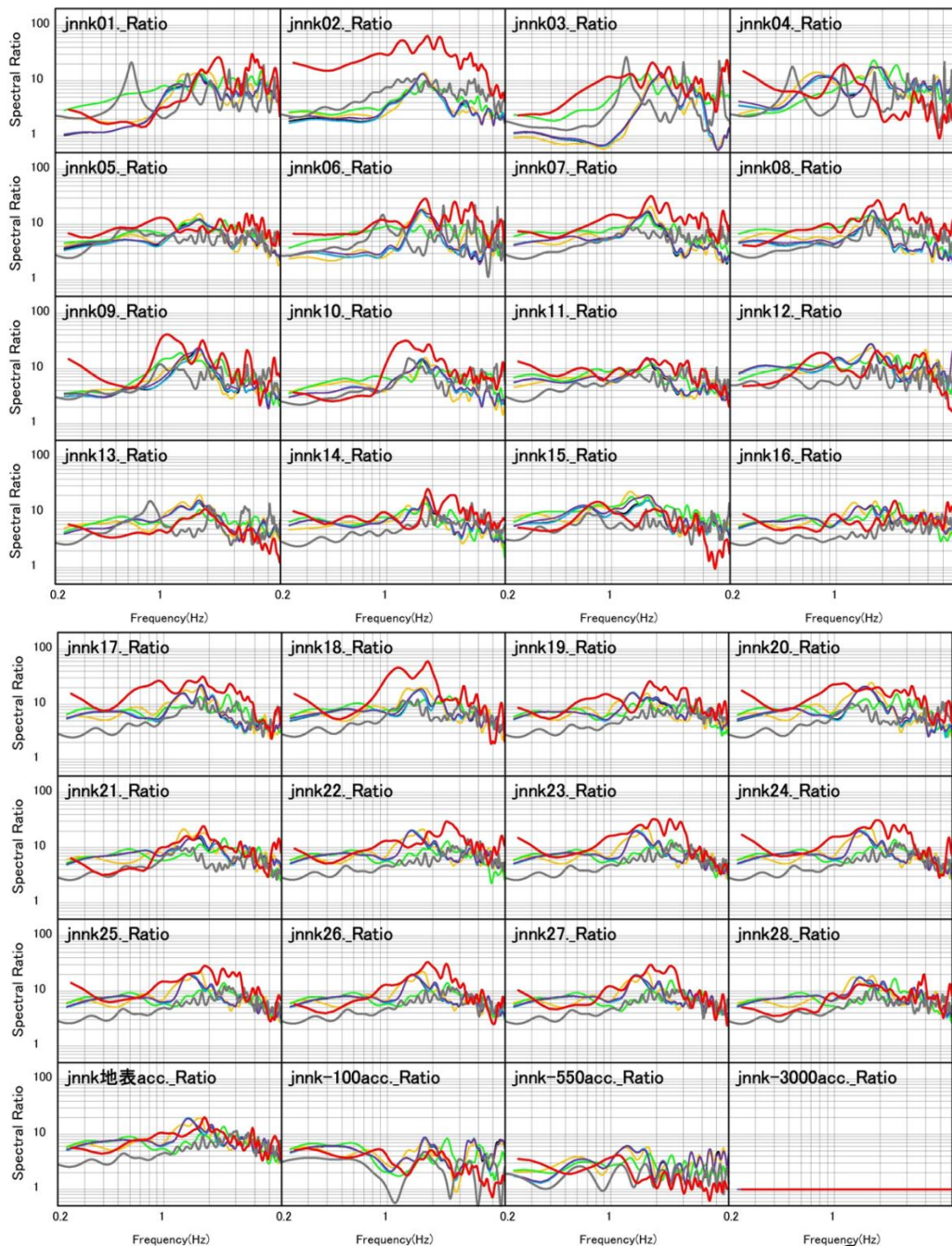
図 3.1-66 計算結果との比較 (地表/孔中スペクトル比) (ケース⑤) 色は入射方向を示す)

3.1.4.6 振動方向の違いによる応答の違い

図 3.1-67 に地表/孔中スペクトル比について鉛直入射の場合の計算結果との比較を示す。鉛直入射であるが、振動方向が異なる場合の比較である。図には、一次元重複反射理論の結果も示している。観測孔の 100m 地震計記録結果は概ね一次元重複反射理論の結果と対応しているが、地表では差分法結果の振幅が大きい。これは、表面波の影響によるものと思われる。ケース①と④は入射方向が 180 度異なるのでほぼ同じ結果になっている。ケース⑤についても同様である。JNNK03 や JNNK06、JNNK08 においてはケース③の振幅が大きくなっている。逆に JNNK22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 ではスペクトル比が小さくなっている。

観測孔地点のデータでは、振動方向による応答の違いは顕著ではなかった。

一次元構造による増幅特性と三次元構造による増幅特性を比較すると観測孔地点において両者はおおむね一致しているが、JNNK01 や JNNK03、JNNK04 などでは両者はあまり一致していない。したがって、観測孔近傍においては三次元構造を考慮する必要性は小さく、一次元構造による検討で地盤の振動特性を概ね評価することができるが、上記に挙げた地点では、三次元構造による検討が必要であることを示している。図 3.1-42 などを見ると観測孔地点では地盤構造が比較的フラットであるのに対し、JNNK01 や JNNK03、JNNK04 では地盤構造が変化している。したがって、地盤構造が三次元的に変化している地点については、三次元構造による地震動の検討が必要であるといえる。



赤: 孔中スペクトル比(東) 黒: 001_NO29_005_鉛直_F3_new.csv
 青: 002_001_005_44_鉛直_new.csv 黒: 001_NO29_005_鉛直_F3_new.csv
 紫: 004_NO14_005_308_鉛直_F.csv 紫: 006_no6_005_鉛直_331.csv
 灰: 増幅特性基礎理論_地盤モデル-0219.csv

計算結果との比較(孔中との比)

赤: 観測(ケース②方向) 黒: ① 橙: ② 緑: ③
 青: ④ 紫: ⑤ 鉛直入射 灰色: 1次元

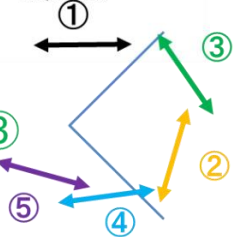


図 3.1-67 計算結果との比較 (地表/孔中スペクトル比) 鉛直入射の比較

①,②,③,④,⑤は鉛直入射の地表/孔中スペクトル比を示す。赤線は観測地表/孔中スペクトル比
 灰色は 1次元重複反射理論による増幅特性を示す

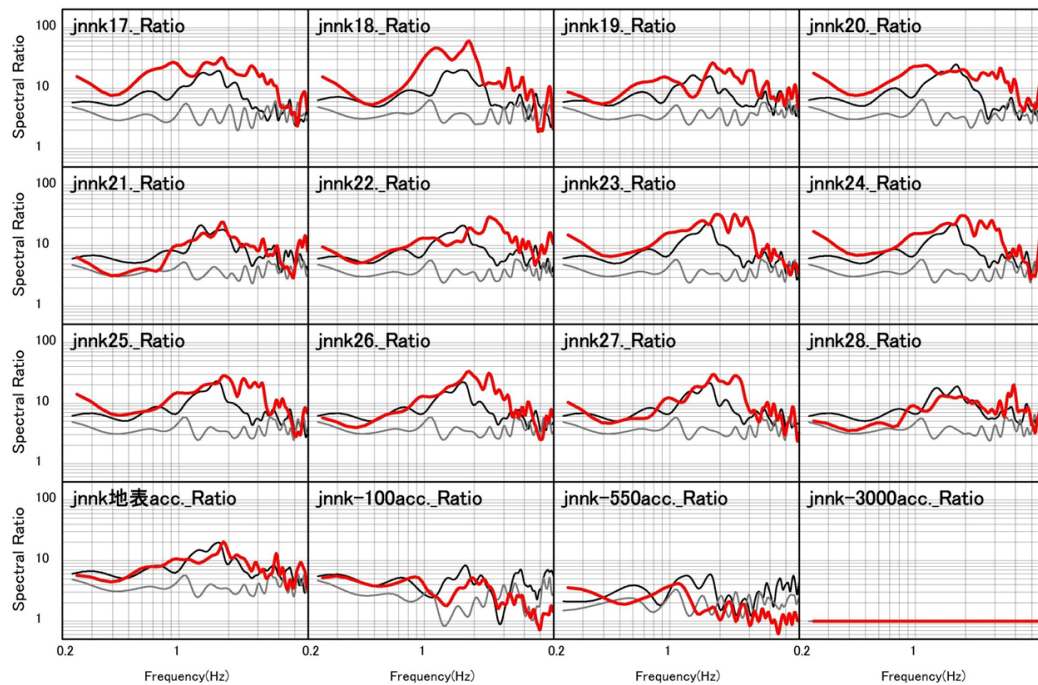
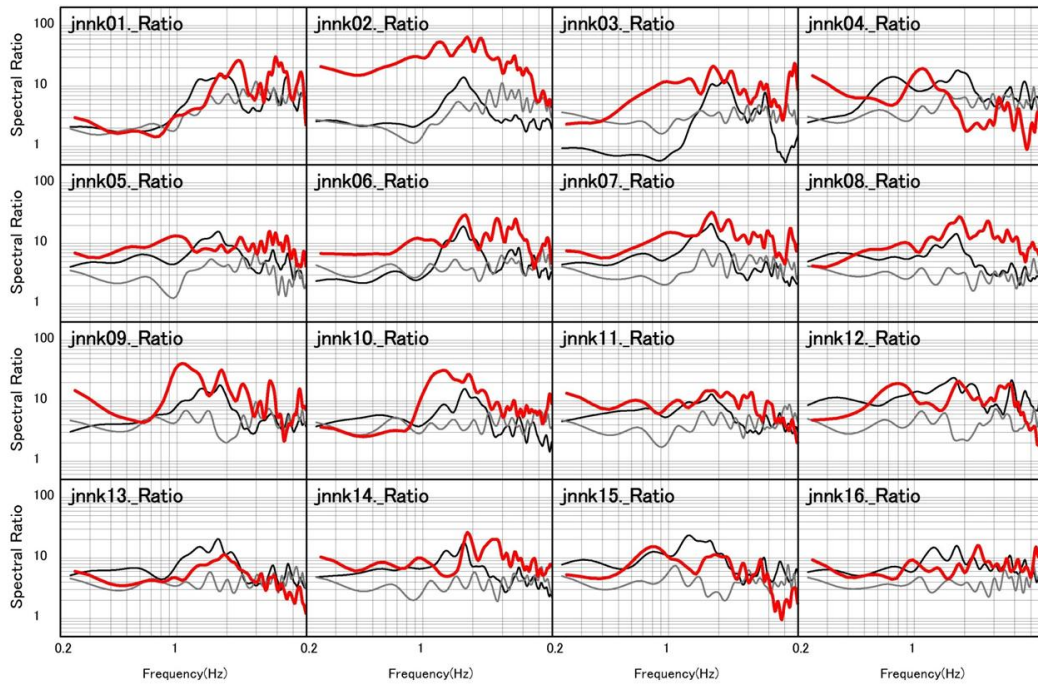
3.1.4.7 JNES2007 モデルとの違い

図 3.1-68 に、詳細速度構造モデルと JNES2007 モデルとの地表/孔中スペクトル比の比較を示す。ケース②方向の鉛直下方からの入射結果の比較である。

JNES2007 モデルによるシミュレーション結果では、周波数 1-2Hz 程度の観測データとの整合が悪い地点が多い。これは、JNES2007 モデルは、S 波速度 500m/s までの速度構造を推定し、周波数 0.5Hz 以下の地震動の特性を説明できるモデルであったためと考えられる。

一方、詳細速度構造モデルは、一次元応答計算を用いて 5-10Hz までの地震動特性を説明しているモデルであり、上記に示したように三次元差分法における表層地盤の取り扱い(低速度の層を V_s300 m/s の層で置き換えている)の為、周波数 2Hz 程度までの地震動をよく説明できる結果となった。

全体的には、JNES2007 モデルに比べ、詳細速度構造モデルの方が観測データをよく説明できていることが確認できた。



赤: 孔中スペクトル比②東Ratio基礎.csv
 黒: 002_NO32_005_242_鉛直.csv
 青: 004_NO14_004_218_F1.csv
 灰: jnes_no2_鉛直.csv

黒: 002_NO32_005_242_鉛直.csv
 青: 002_NO32_003_62.csv
 紫: 002_NO32_004_152.csv

計算結果との比較(孔中との比)
 赤: 観測(ケース②方向)
 黒: 鉛直入射 灰: JNESモデル鉛直入射

図 3.1-68 詳細速度構造モデルと JNES2007 モデルとの比較
 (地表/孔中スペクトル比) ケース②

3.1.4.8 周波数毎のスペクトル比と入射方向の関係

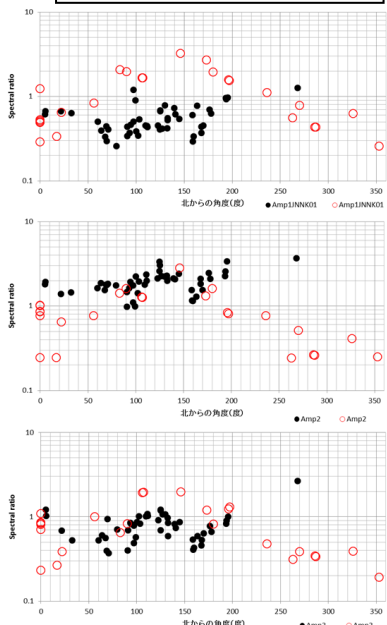
図 3.1-69～82 に周波数ごとの地表/地表スペクトル比を示す。地表/地表スペクトル比の周波数 0.5Hz～1.5Hz (AMP1)、1.5～2.5Hz (AMP2)、2.5～3.5Hz (AMP3)の平均値を北からの震源の方向を横軸として記したものである。表 3.1-3 に JNNK01～28 での特徴を一覧として示す。

図 3.1-83 には、JNNK01 と JNNK10 について、基盤を基準にした場合と地表を基準にした場合の計算スペクトル比を示す。値の大きさは異なっているが、入射角に対する傾向は両者よく対応しており、上記で示した関係は、基盤を基準にした場合にもあてはまると考えられる。

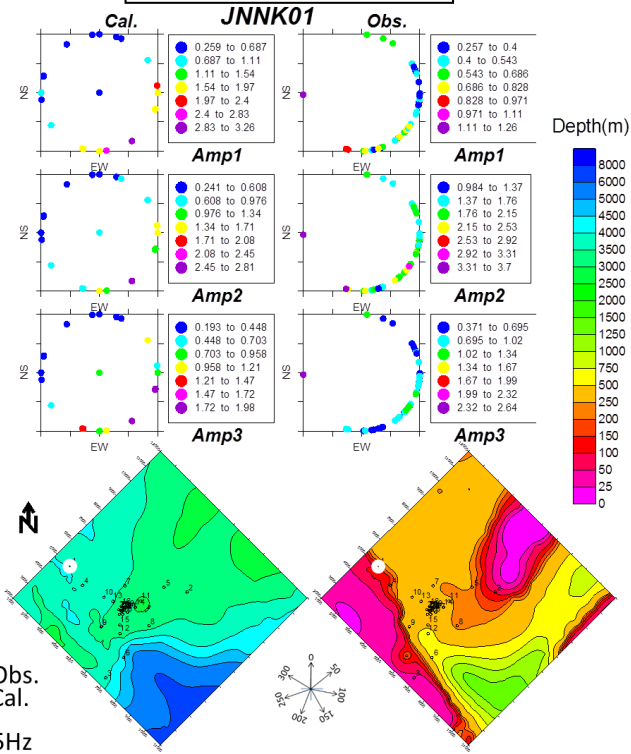
表 3.1-3 各位置での特徴等

観測点	特徴と考察
JNNK01	計算結果の150度付近のスペクトル比が大きい。基盤の深い方向からの入射した地震の振幅が観測孔の記録に比べ大きく増幅している。
JNNK02	計算結果は250度付近のスペクトル比が大きく、米山層上面の傾斜方向に直交する方向からの入射で振幅が大きくなっている。観測データは、AMP1、AMP2については150-200度程度で振幅が大きい、AMP3では100度方向で振幅が大きい傾向がみられる。
JNNK03	計算結果が有意に小さく過小評価である。
JNNK04	AMP1はおおむね良く対応しているが、AMP2、3は過大評価である。
JNNK05	米山層の傾斜方向に直交する250度方向の計算スペクトル比が大きくなっている。
JNNK06	20度方向の計算スペクトル比が大きくなっている。
JNNK07	150-200度方向の振幅が大きく、観測データの特徴をよくとらえている。
JNNK08	観測データは150-200度方向が振幅が大きい、計算結果では明瞭な傾向は見られなかった。
JNNK09	AMP1、AMP2では150度方向が振幅が大きい。計算結果は、30度程度が大きく米山層の構造の影響を受けていると考えられる。
JNNK10	観測データに比べ、計算結果が小さく過小評価である。
JNNK11	AMP1は概ね観測データをよく説明できているが、AMP2、AMP3ではやや過小評価である。
JNNK12	振幅は概ね観測データをよく説明できている。
JNNK13	入射方向による振幅の違いは、観測、計算ともにあまり明瞭でない。AMP3においてやや過大評価である。
JNNK14	観測データの150-200度方向の振幅が大きい、計算結果の入射方向による違いは明瞭でない。
JNNK15	概ね観測データを説明できている。
JNNK16	概ね観測データを説明できている。
JNNK17	観測データに比べて過小評価である。150-200度で観測スペクトル比が大きくなる傾向があるが、計算結果では再現できていない。
JNNK18	観測データに比べて過小評価である。
JNNK19	観測データに比べて過小評価である。
JNNK20	観測データに比べて過小評価である。
JNNK21	観測データは概ね1となっており計算結果とほぼ対応している。
JNNK22	AMP2、AMP3が過小評価である。
JNNK23	AMP1、AMP2、AMP3が過小評価であり、観測点極近傍の局所的な構造の影響を受けていると考えられる。
JNNK24	AMP1、AMP2、AMP3が過小評価であり、観測点極近傍の局所的な構造の影響を受けていると考えられる。
JNNK25	観測データ、計算結果共に到来方向による振幅の違いは見られないがやや過小評価である。
JNNK26	観測データ、計算結果共に到来方向による振幅の違いは見られないがやや過小評価である。
JNNK27	AMP2、AMP3が過小評価である。
JNNK28	観測データは概ね1となっており計算結果とほぼ対応している。

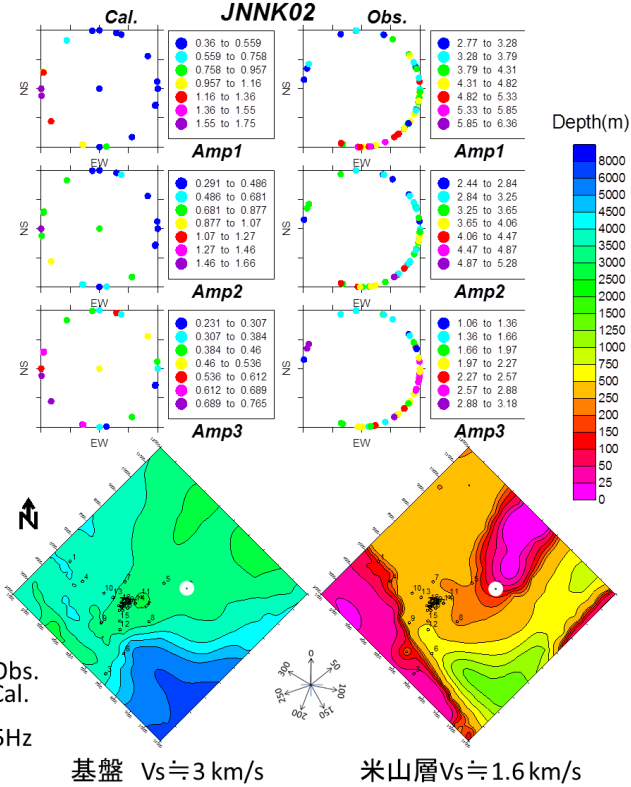
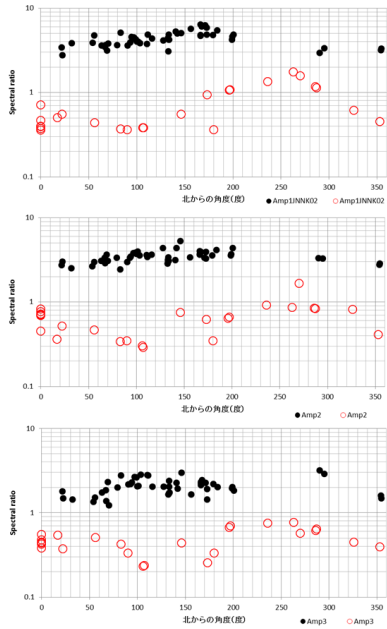
計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの



計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.1 AMP2 1.5-2.5Hz

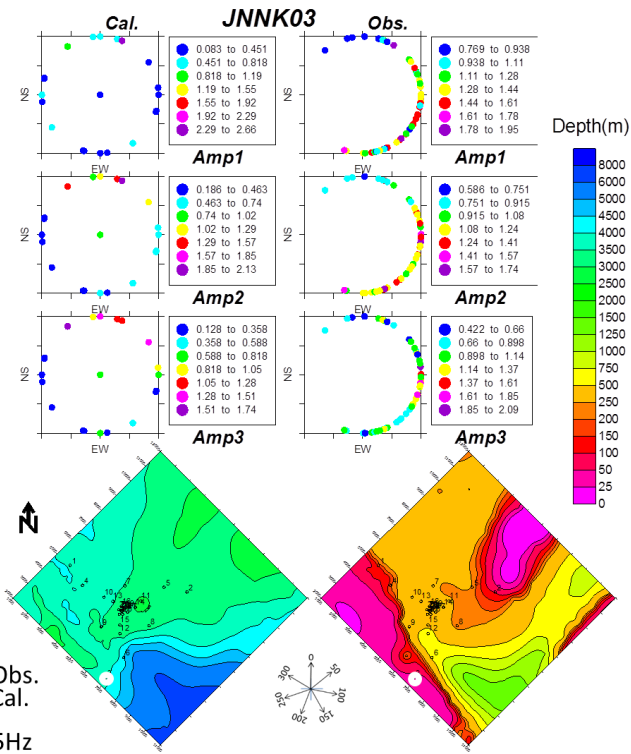
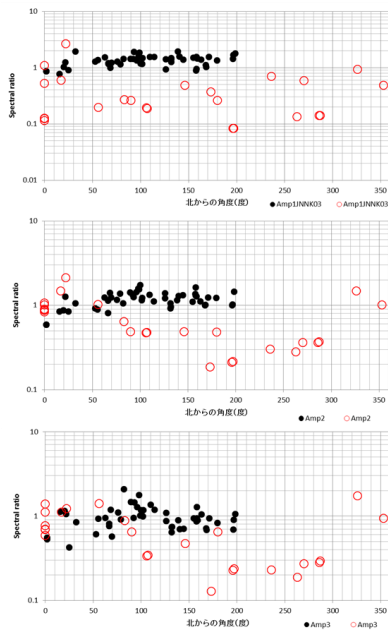


● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.2 AMP2 1.5-2.5Hz

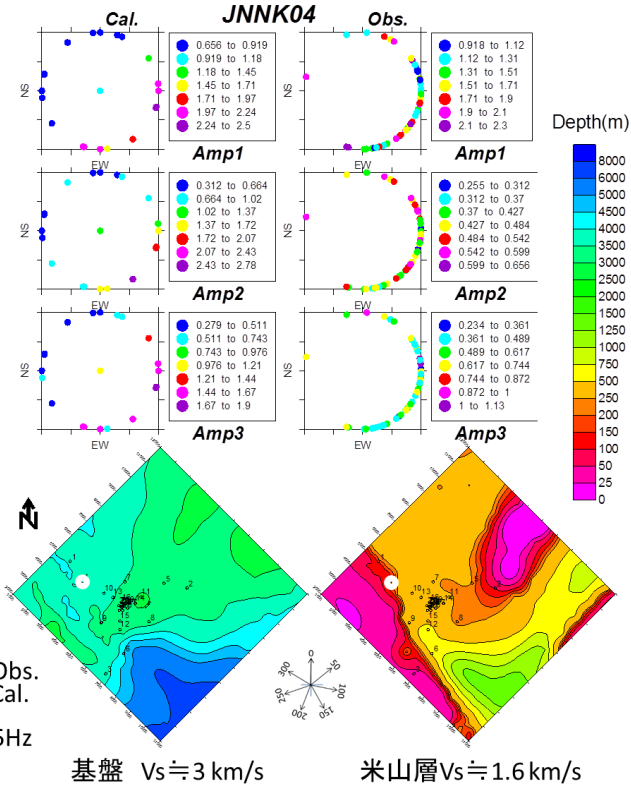
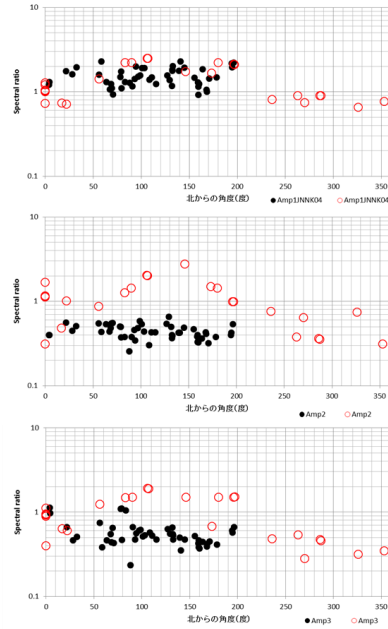
図 3.1-69 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK01 下図: JNNK02
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



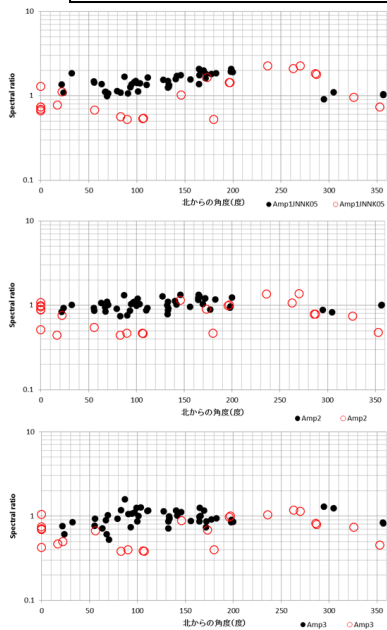
● Obs. ○ Cal.
 周波数ごとのスペクトル比
 AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
 No.3 AMP2 1.5-2.5Hz



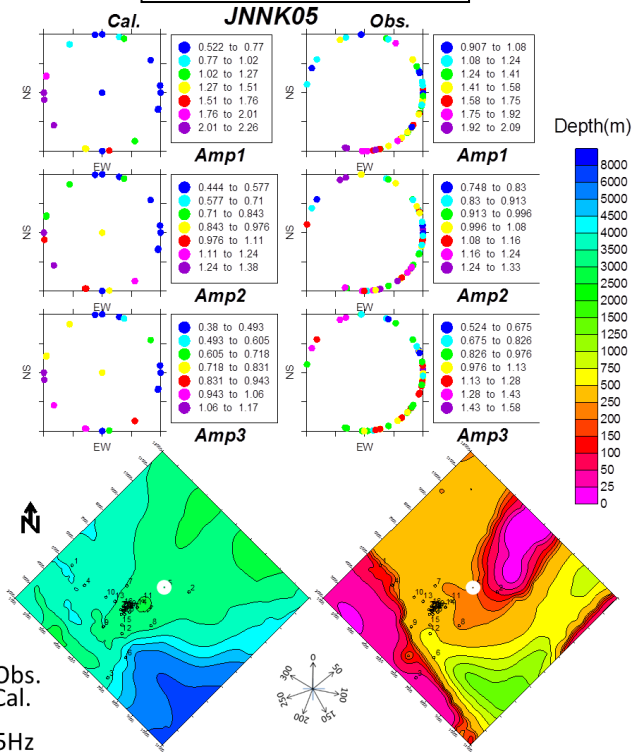
● Obs. ○ Cal.
 周波数ごとのスペクトル比
 AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
 No.4 AMP2 1.5-2.5Hz

図 3.1-70 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK03 下図: JNNK04
 AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

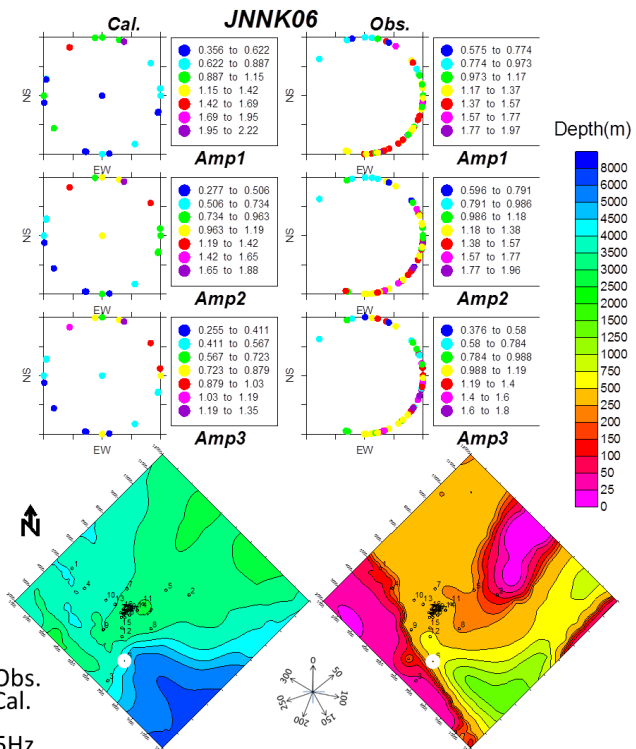
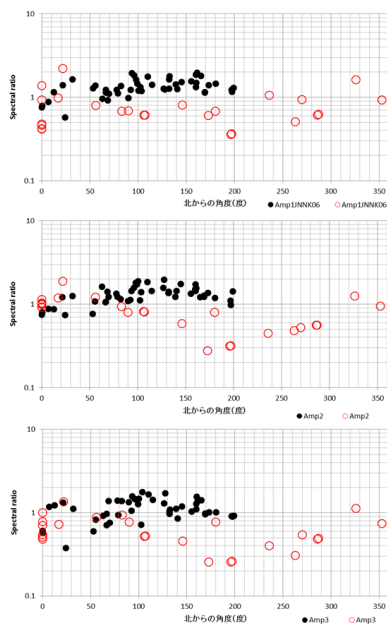


計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.5 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s



周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.6 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

図 3.1-71 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK05 下図: JNNK06
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの

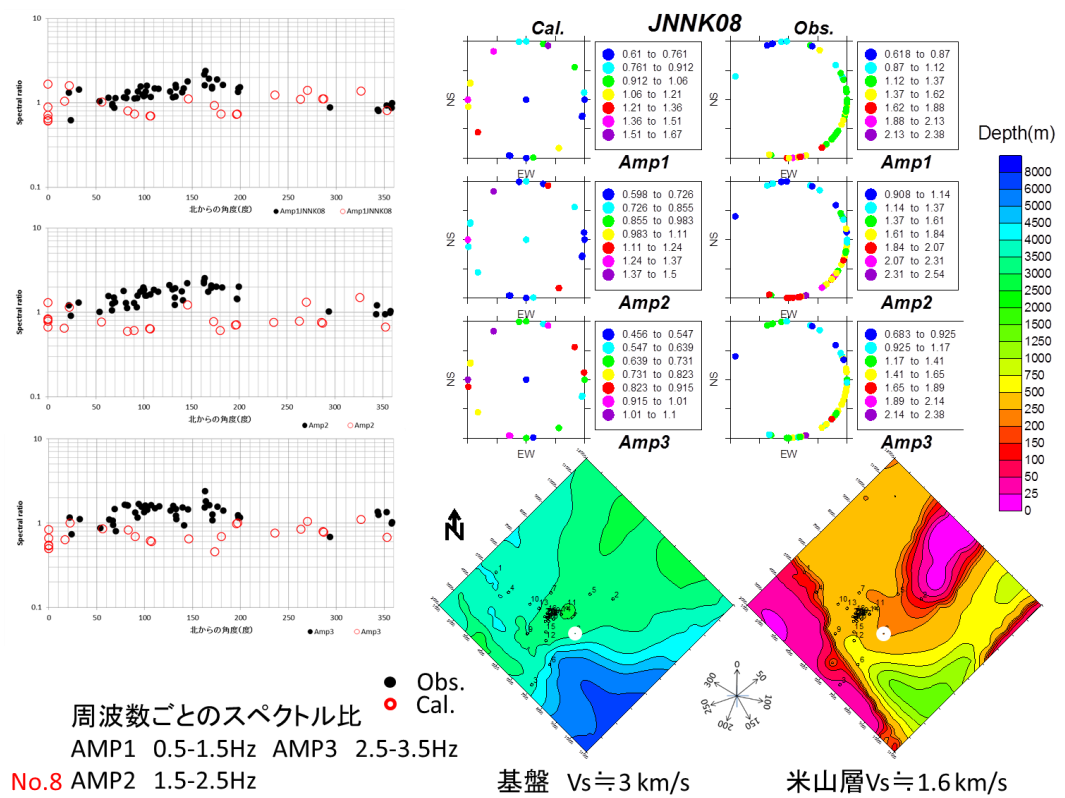
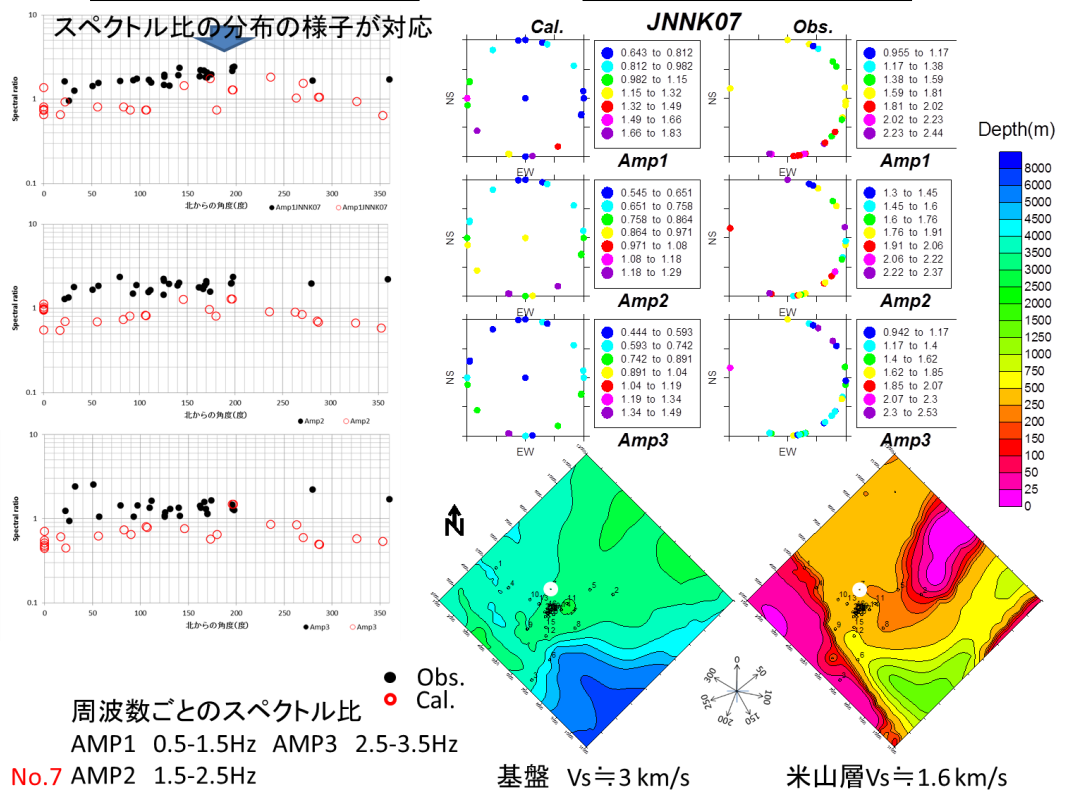
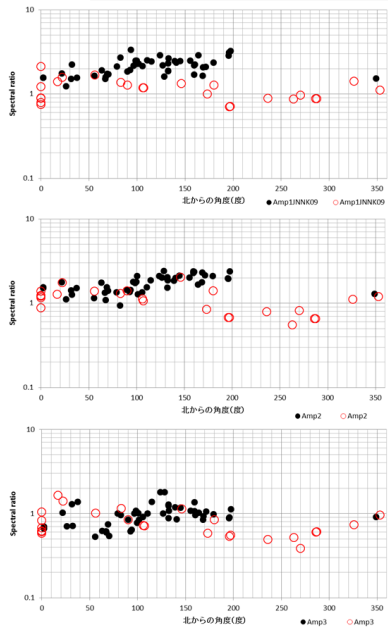
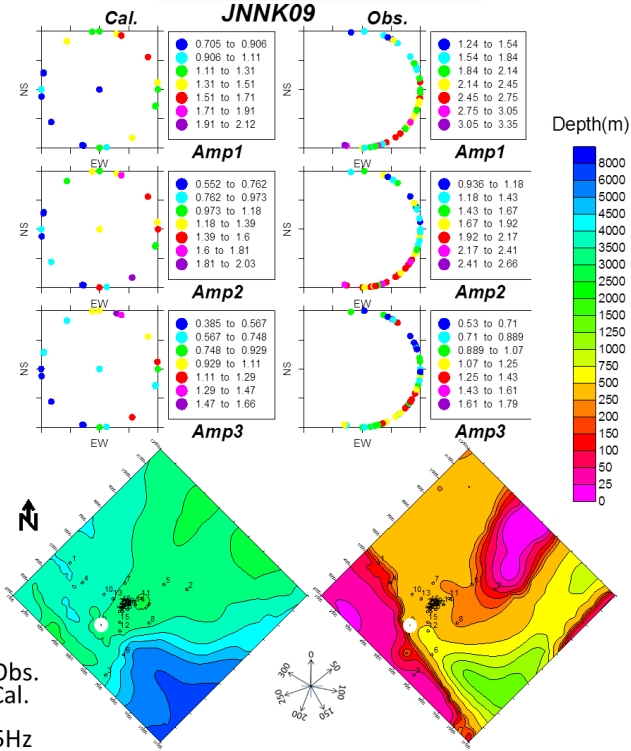


図 3.1-72 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK07 下図: JNNK08
 AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

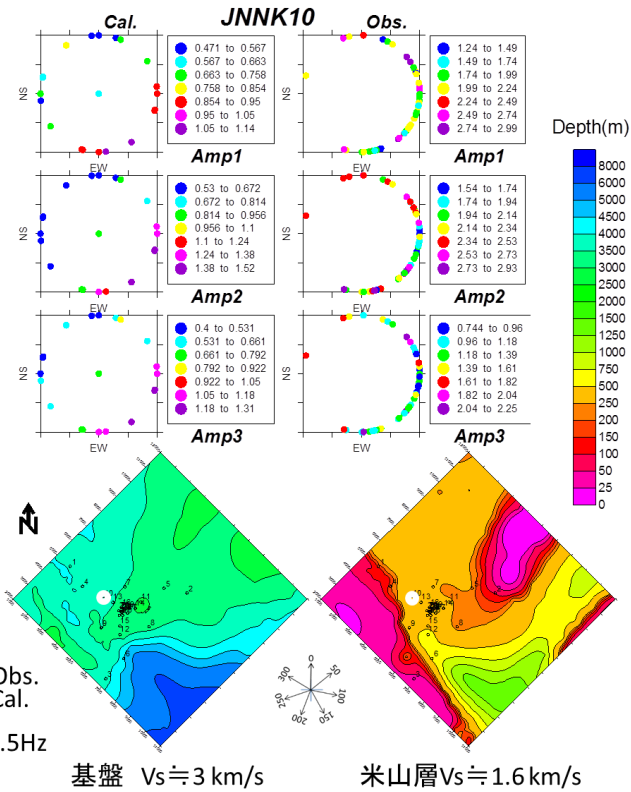
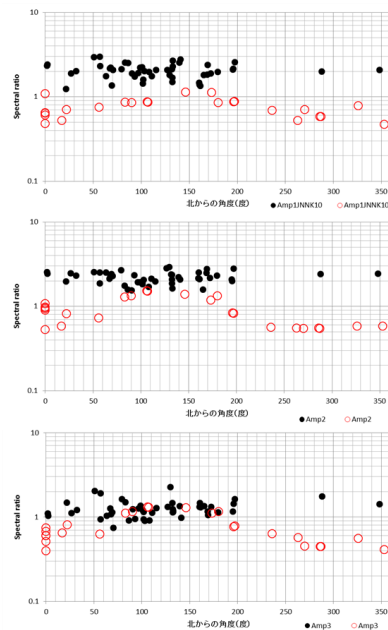
計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの



計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.9 AMP2 1.5-2.5Hz

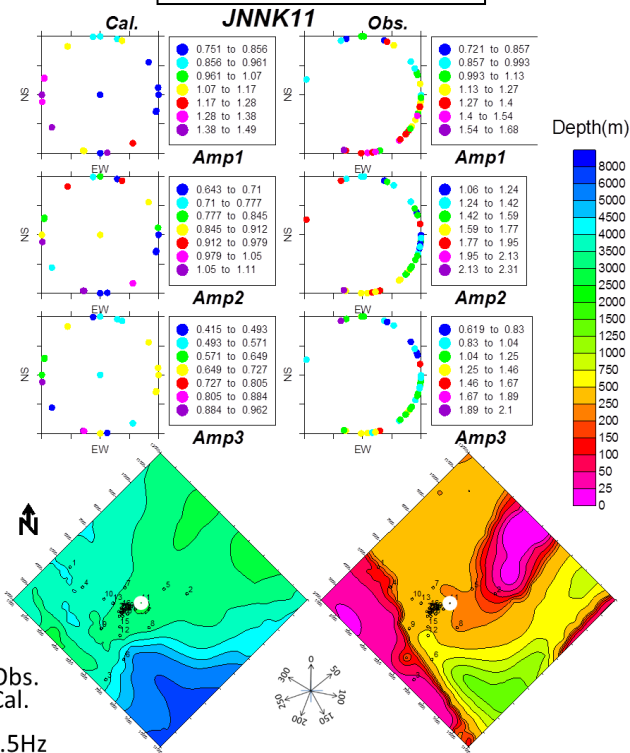
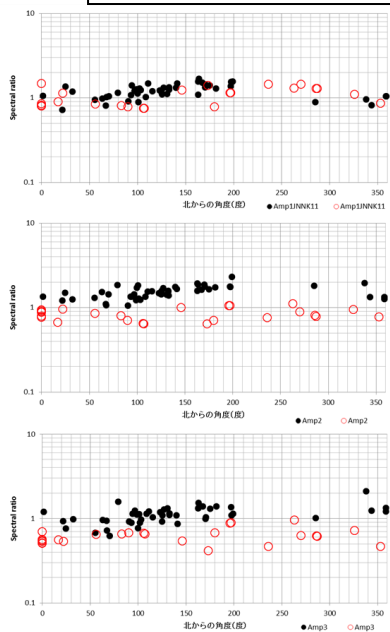


● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.10 AMP2 1.5-2.5Hz

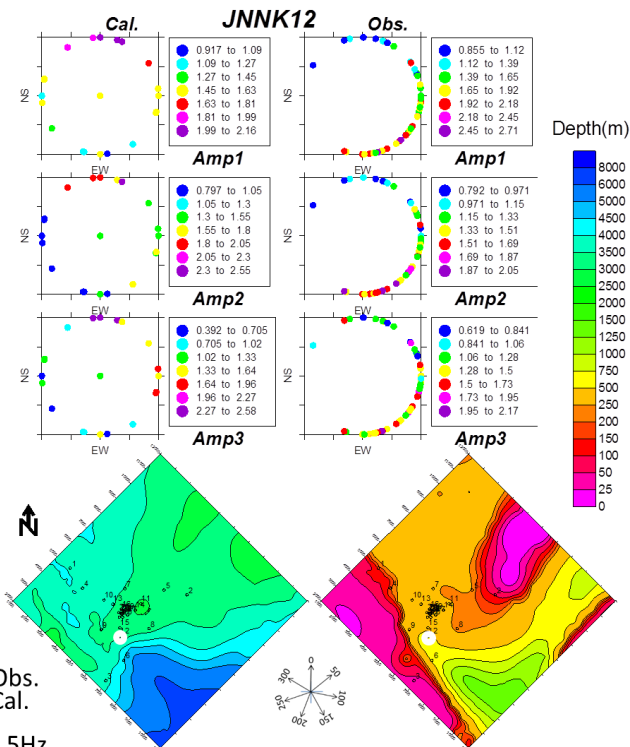
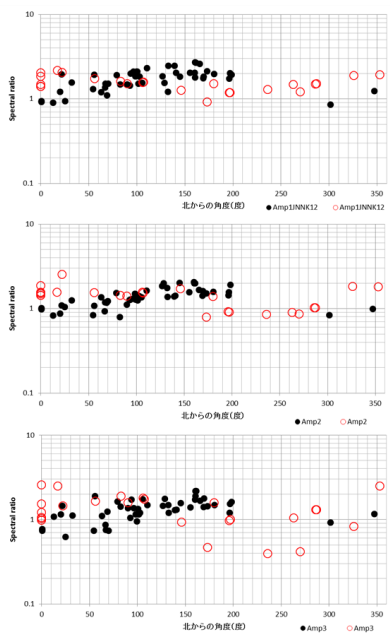
図 3.1-73 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK09 下図: JNNK10
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



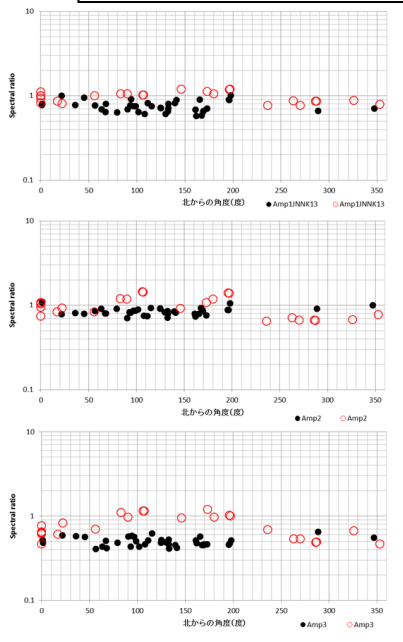
● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.11 AMP2 1.5-2.5Hz



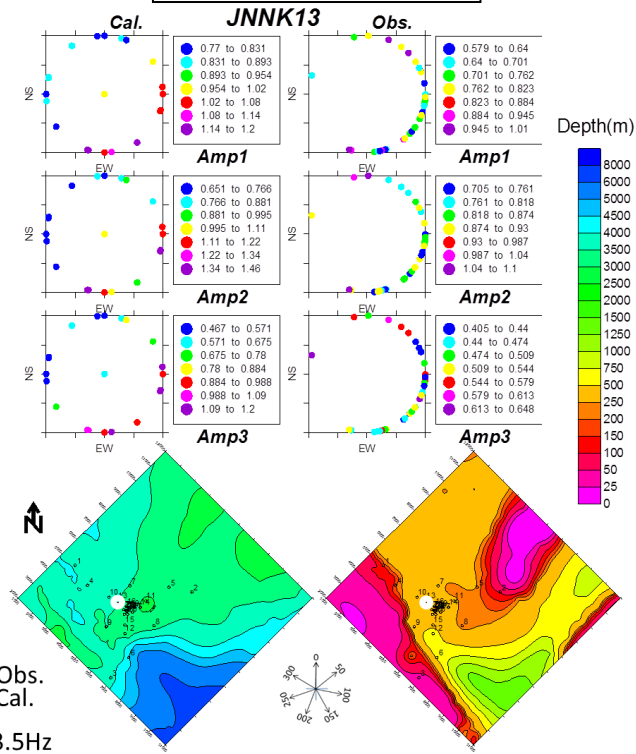
● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.12 AMP2 1.5-2.5Hz

図 3.1-74 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK11 下図: JNNK12
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

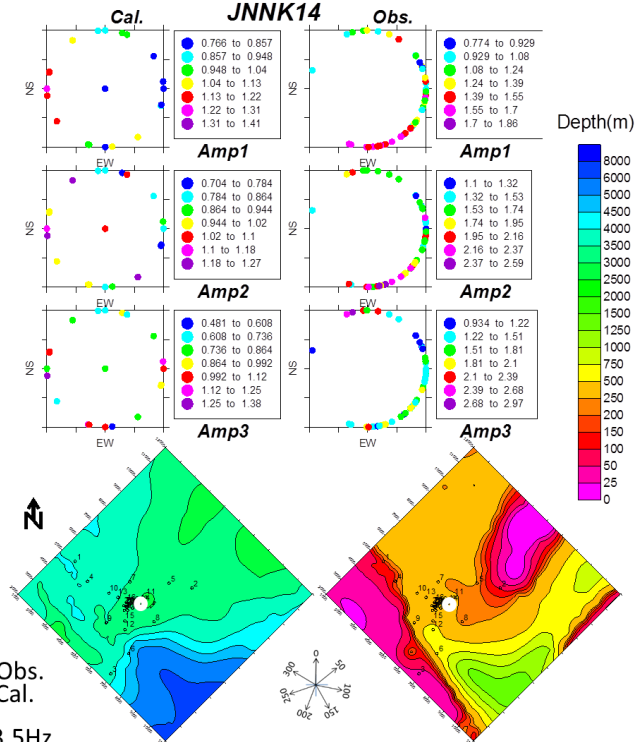
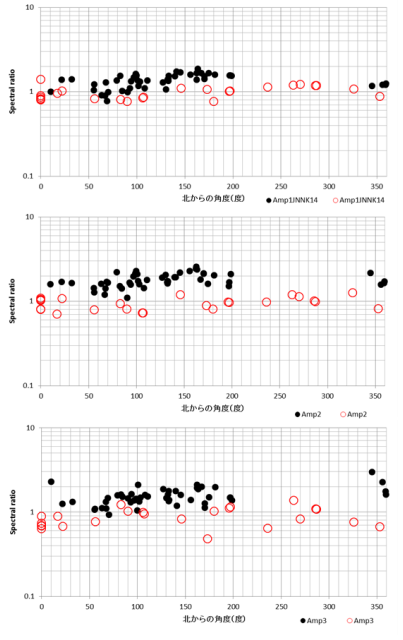


計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.13 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

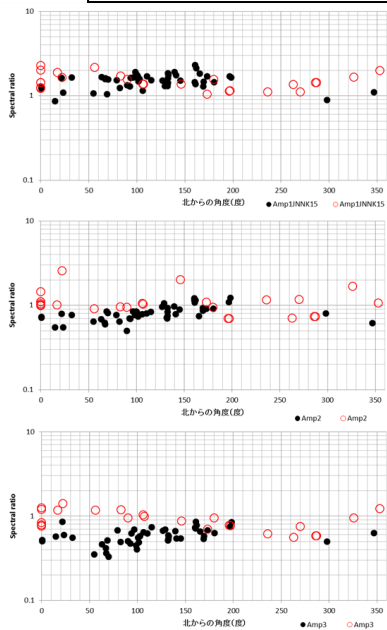


● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.14 AMP2 1.5-2.5Hz

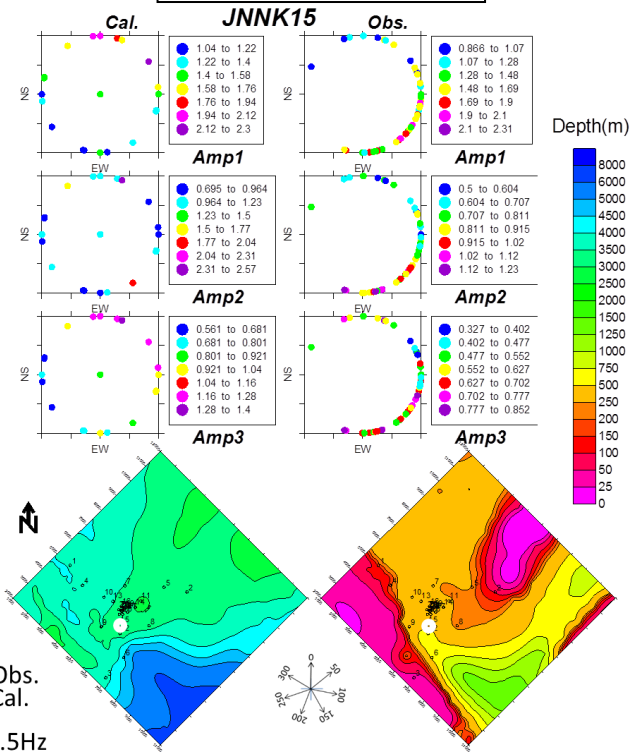
基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

図 3.1-75 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK13 下図: JNNK14
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

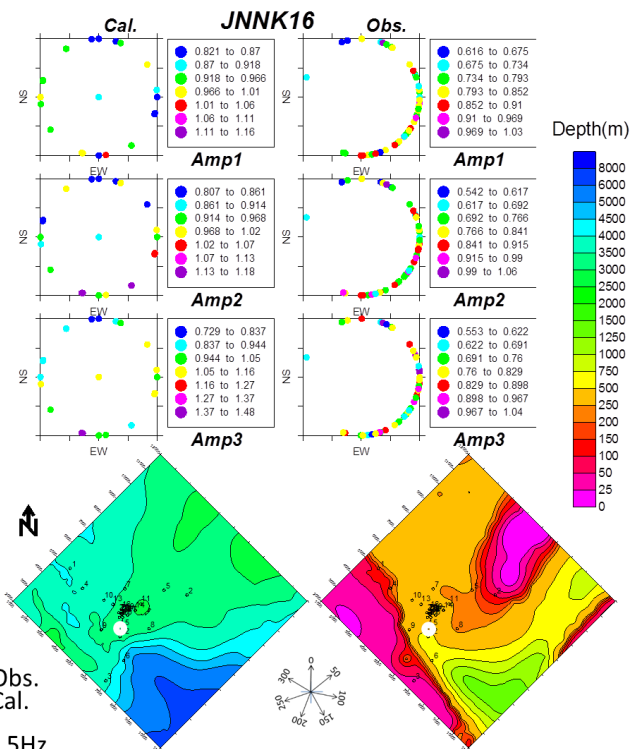
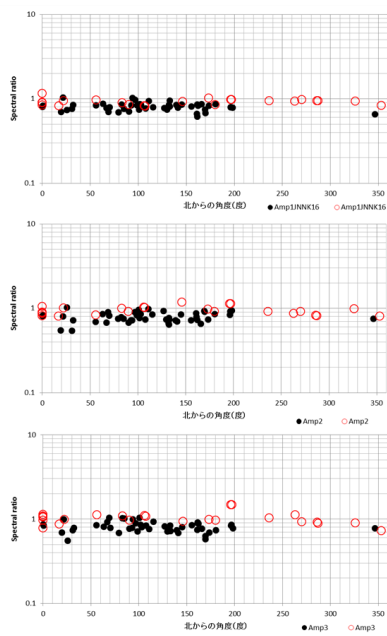


計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.15 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

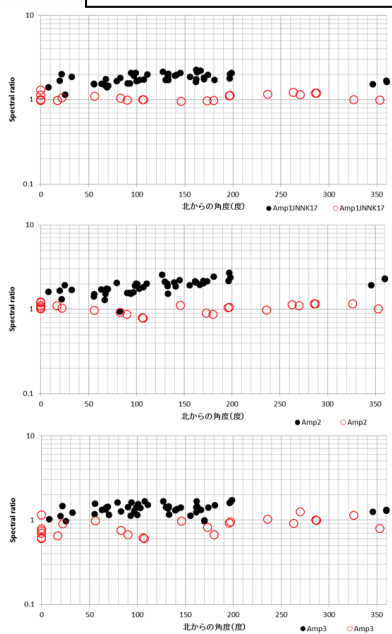


周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.16 AMP2 1.5-2.5Hz

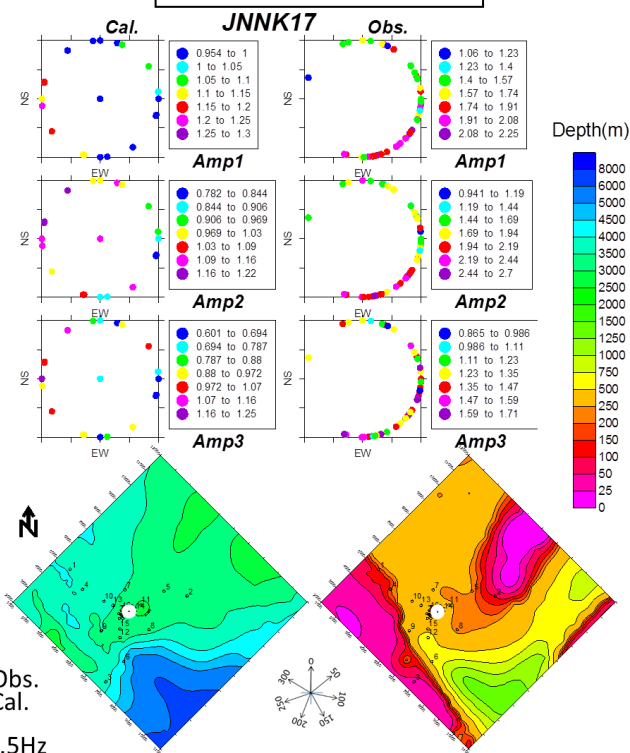
基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

図 3.1-76 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK15 下図: JNNK16
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

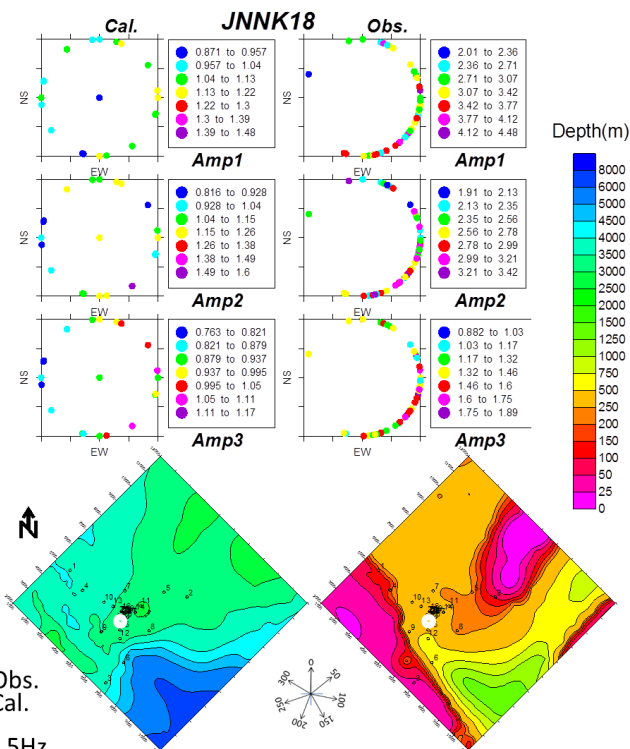
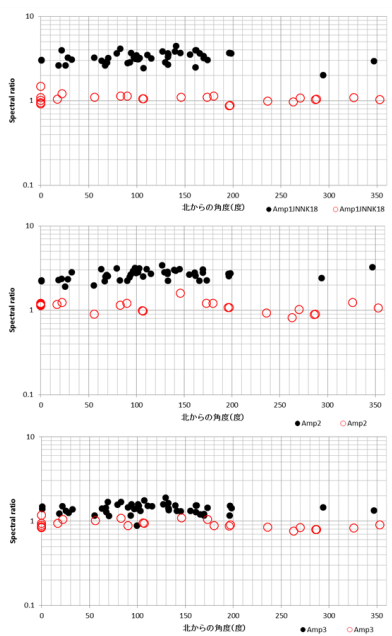
計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの



計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



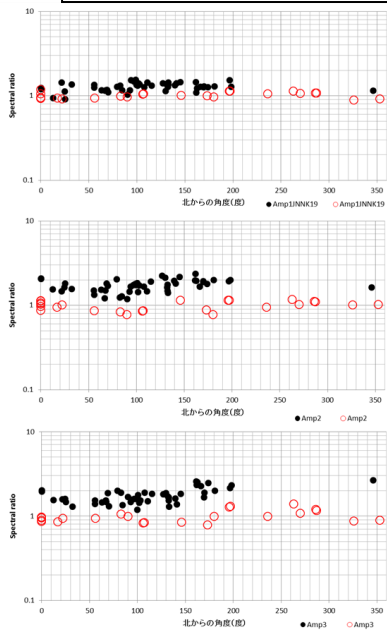
● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.17 AMP2 1.5-2.5Hz



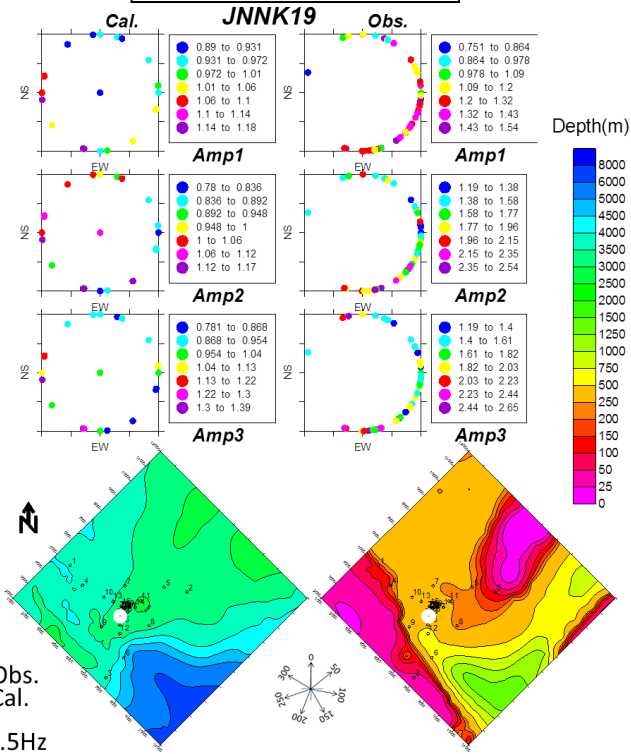
● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.18 AMP2 1.5-2.5Hz

図 3.1-77 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK17 下図: JNNK18
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

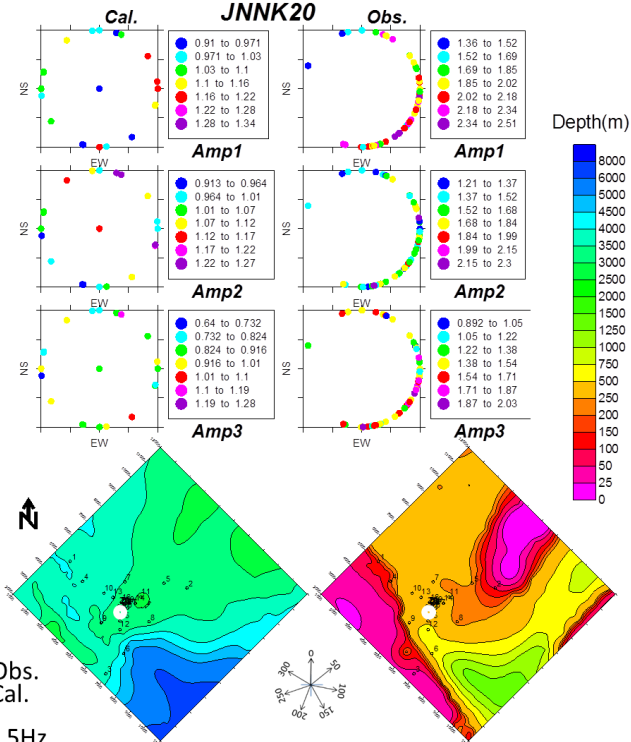
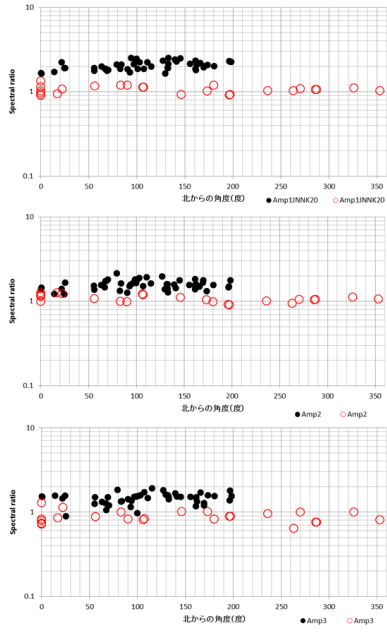


計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.19 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

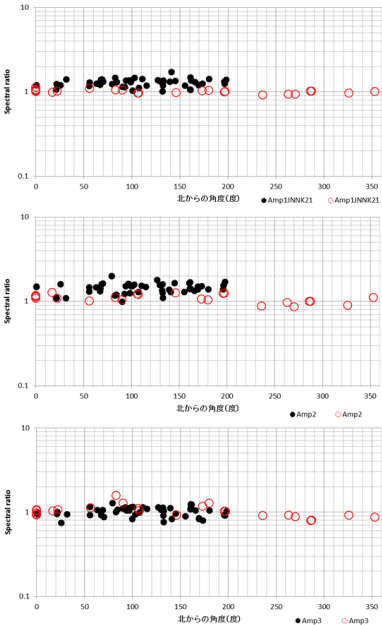


● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.20 AMP2 1.5-2.5Hz

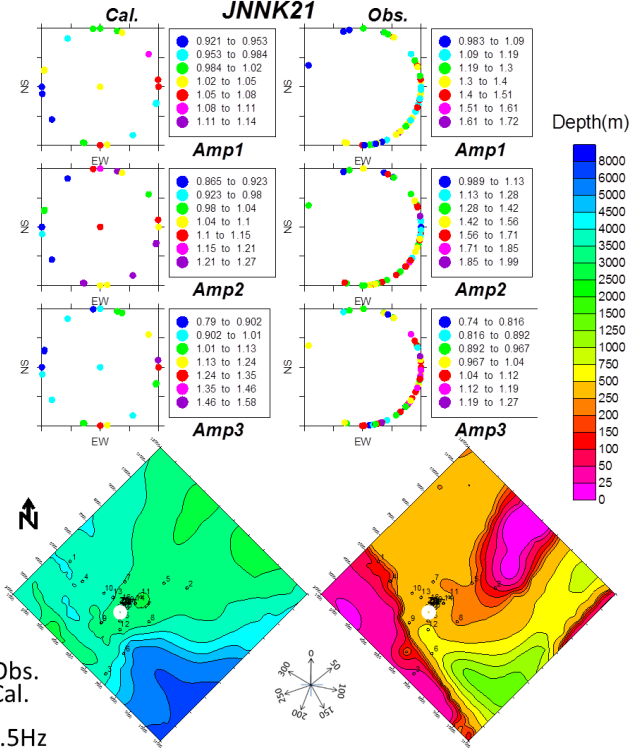
基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

図 3.1-78 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK19 下図: JNNK20
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

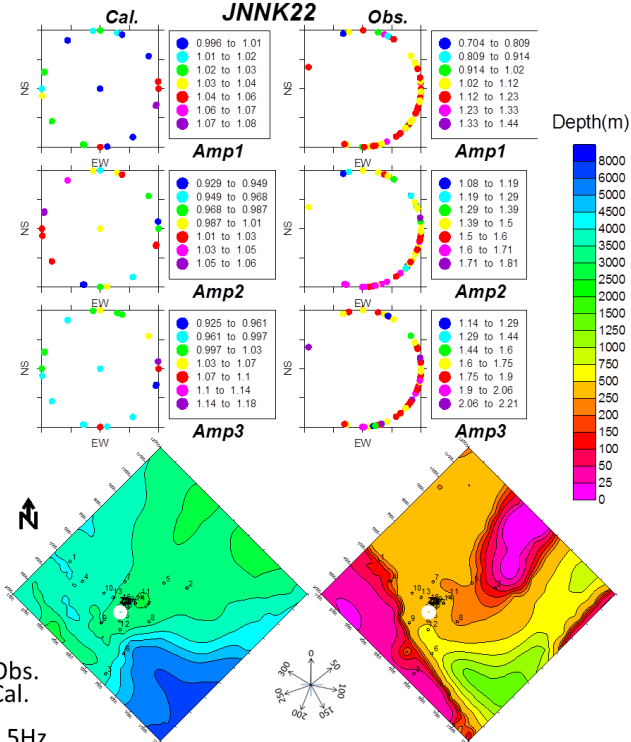
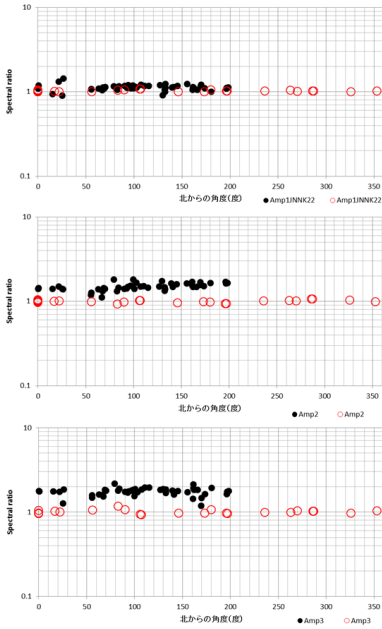
計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの



計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.21 AMP2 1.5-2.5Hz

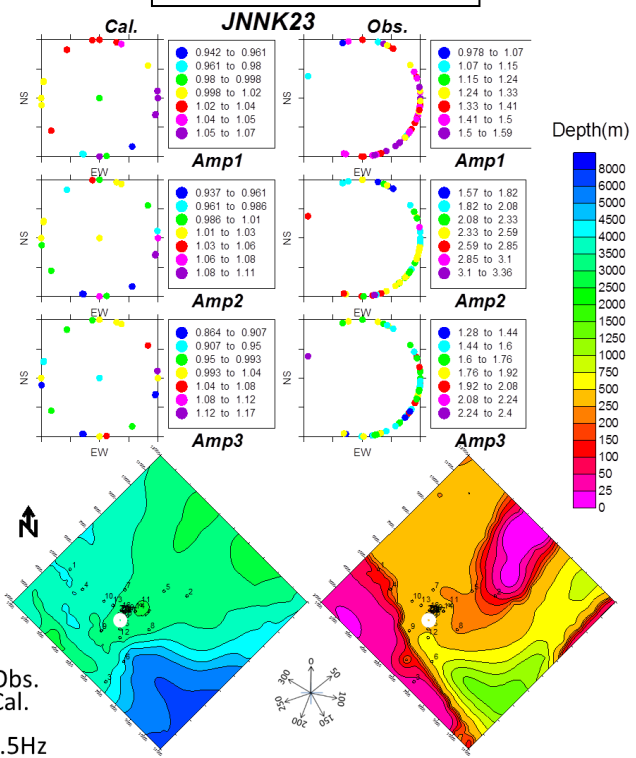
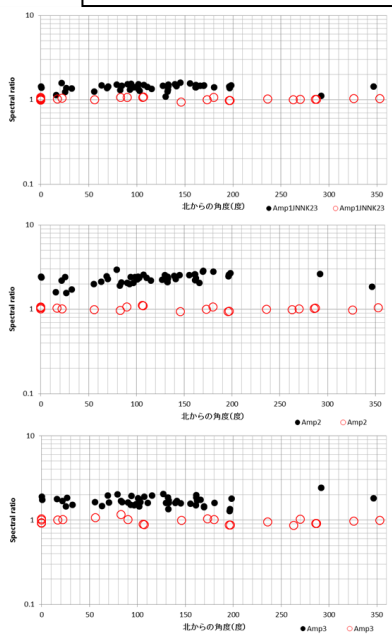


● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.22 AMP2 1.5-2.5Hz

図 3.1-79 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK21 下図: JNNK22
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

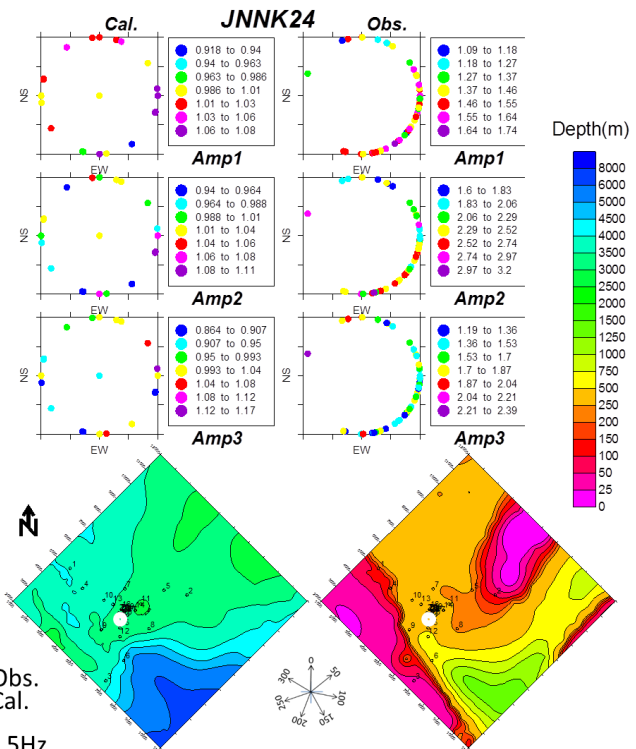
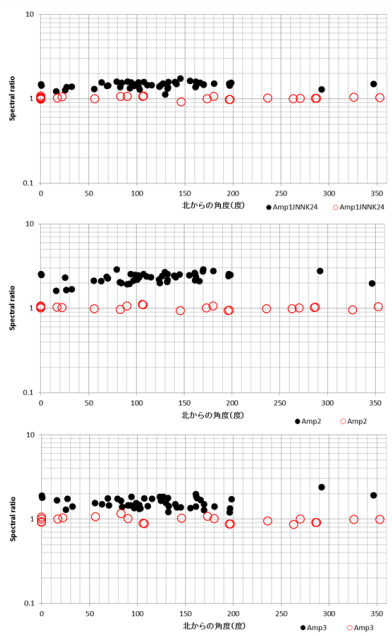
計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.23 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.24 AMP2 1.5-2.5Hz

基盤 $V_s \approx 3$ km/s 米山層 $V_s \approx 1.6$ km/s

図 3.1-80 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK22 下図: JNNK24
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの

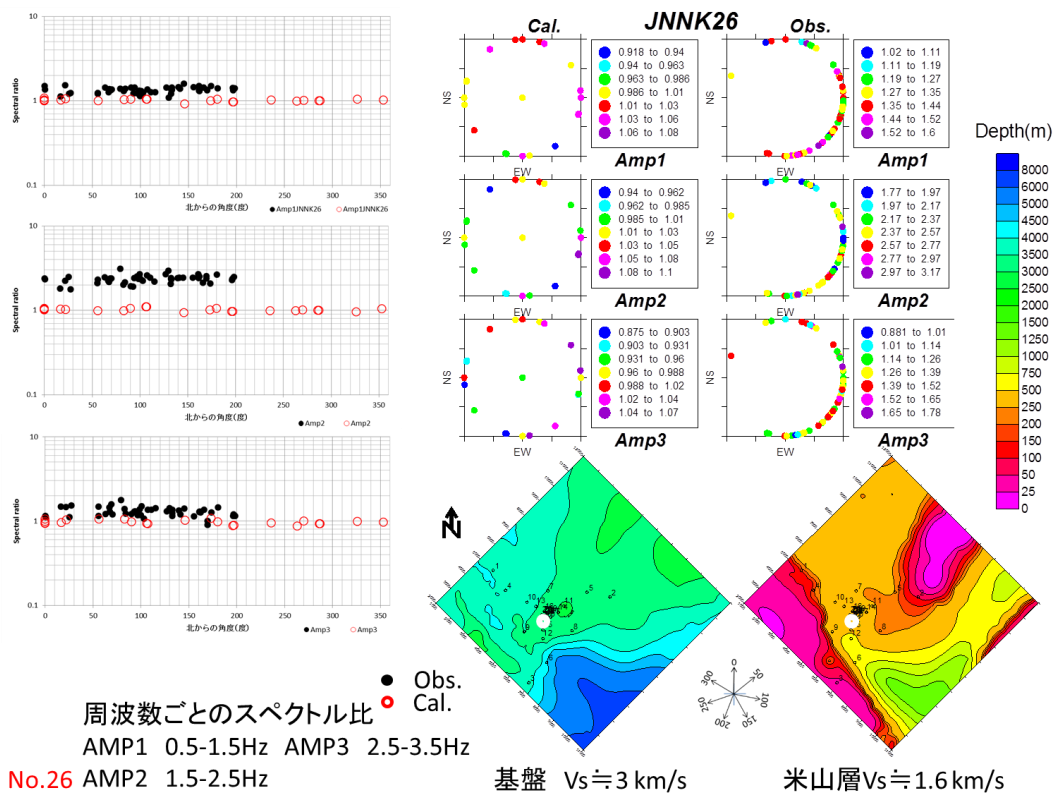
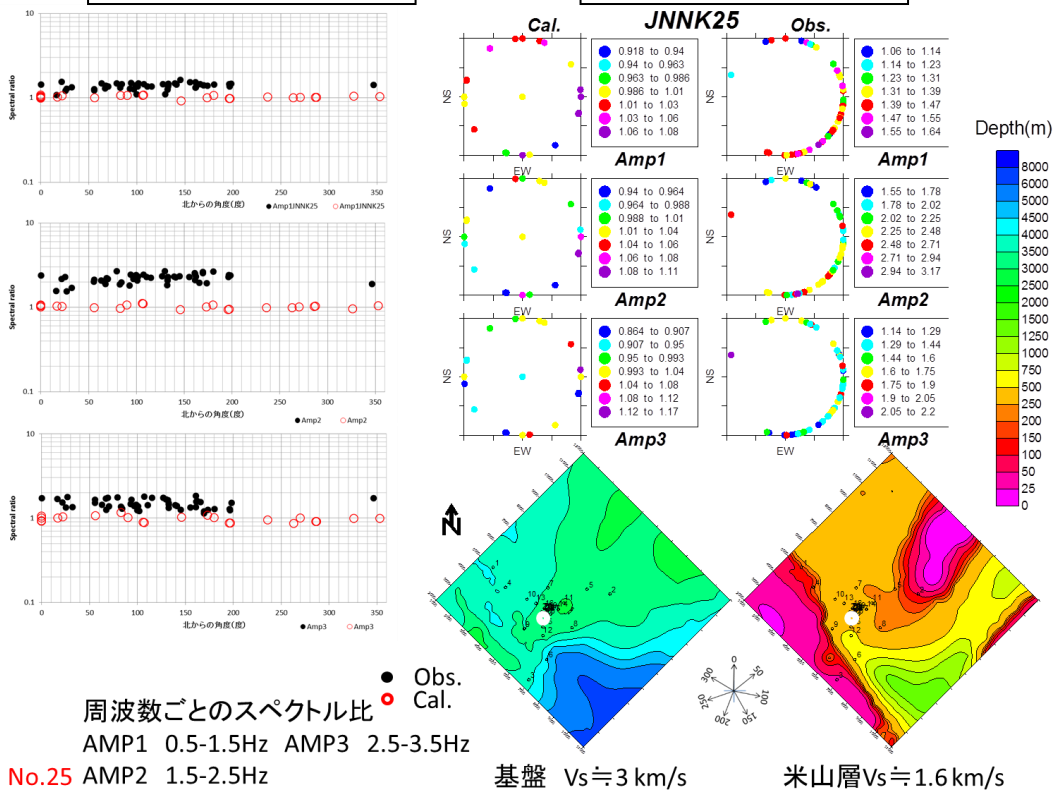
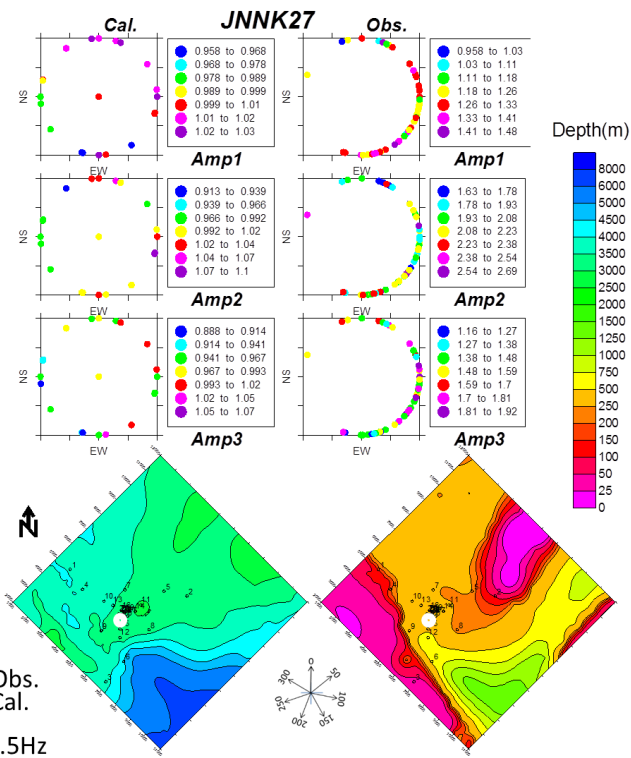
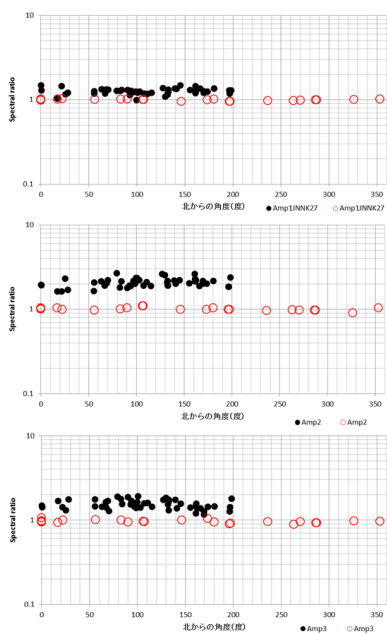


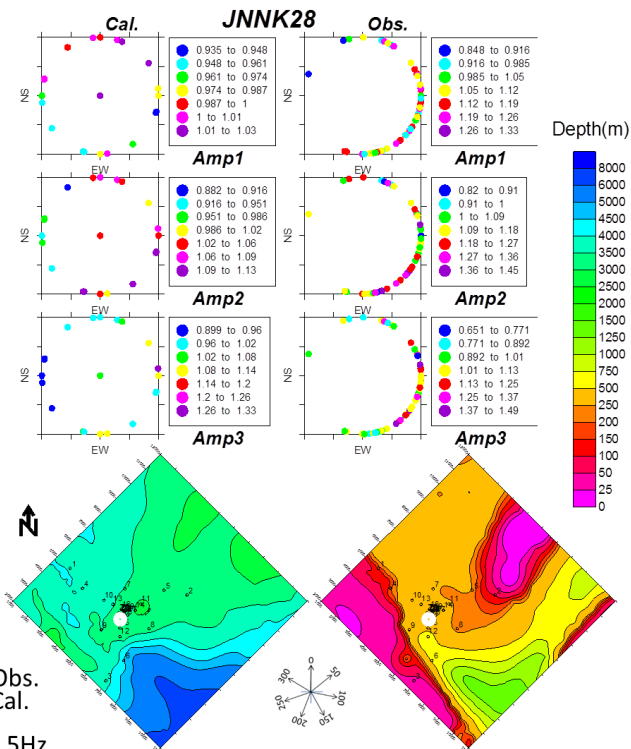
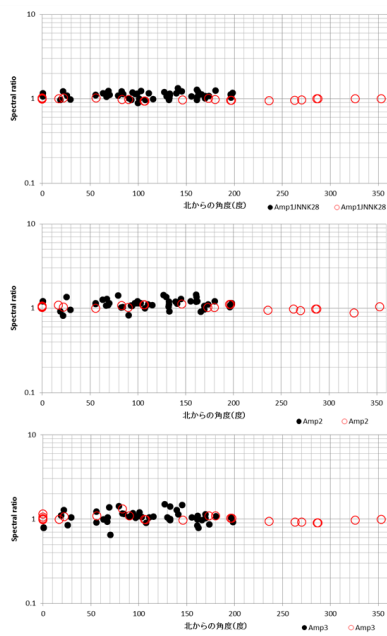
図 3.1-81 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK25 下図: JNNK26
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を到来方向に対応する角度にプロットしたもの



● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.27 AMP2 1.5-2.5Hz

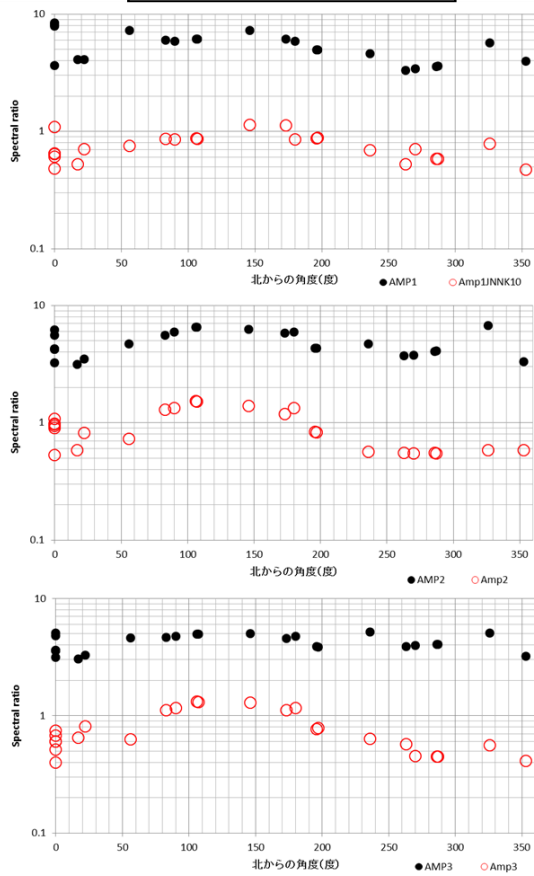
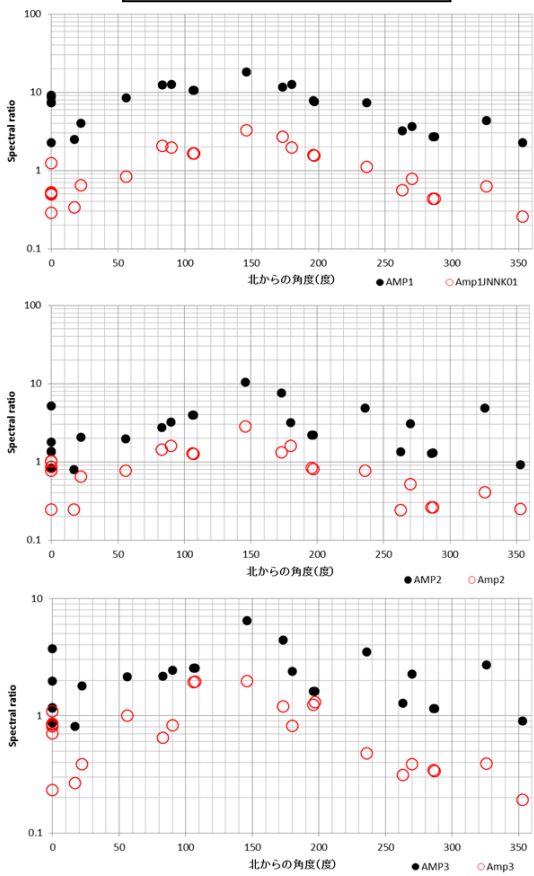


● Obs.
○ Cal.
周波数ごとのスペクトル比
AMP1 0.5-1.5Hz AMP3 2.5-3.5Hz
No.28 AMP2 1.5-2.5Hz

図 3.1-82 周波数ごとの地表/地表スペクトル比 上図: JNNK27 下図: JNNK28
AMP1(0.5-1.5Hz) AMP2(1.5-2.5Hz) AMP3(2.5-3.5Hz)

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの

計算および観測データのスペクトル比を横軸に到来方向の北からの角度をとりプロットしたもの



● 基盤との比 ○ 地表との比

JNNK01

JNNK10

図 3.1-83 周波数ごとのスペクトル比 上図: JNNK01 下図: JNNK10
 黒丸: 地表/孔中スペクトル比 赤丸: 地表/地表スペクトル比

3.1.4.9 表層の構造が伝達関数に与える影響について

ここでは、表層の構造が伝達関数に与える影響について検討するために、1次元応答計算を用いて観測波形をS波速度300m/s相当の解放基盤に引き戻して、計算結果との比較を行った。

図3.1-84に観測記録の剥ぎ取り解析に使用したS波速度構造モデルを示す。S波速度が300m/s程度である第3層の上面深度を解放基盤面として剥ぎ取りを行った。計算結果についても図3.1-84に示したS波速度300m/s以下の層を300m/sに置換したモデルで、第3層の上面深度を解放基盤面として剥ぎ取り解析を行った。

その結果を、図3.1-85に示す。示した結果は、NS成分のスペクトル比である2Hz以上において観測データの振幅に近づく結果となった。S波速度300m/s以下の層を300m/sに置換したモデルでの増幅特性は5Hz付近で1.2倍程度であった。

このように、S波速度300m/s以下の速度構造は2Hz以上の周波数帯域のスペクトルに影響を及ぼすことが分かった。図3.1-86には、水平アレー地震動観測点と微動アレー観測点を示す。観測孔周辺では検層結果もあり、比較的詳細な浅部速度構造モデルが得られている地点である。水平アレーの番号の小さい観測点の周辺では、微動アレー探索も実施されておらず、詳細なS波速度構造が把握されているとは言い難い。2Hz以上の高周波数領域の地震動を精度よく推定するには、本地域では深さ50m以浅のS波速度構造を精度よく推定する必要があることが分かった。

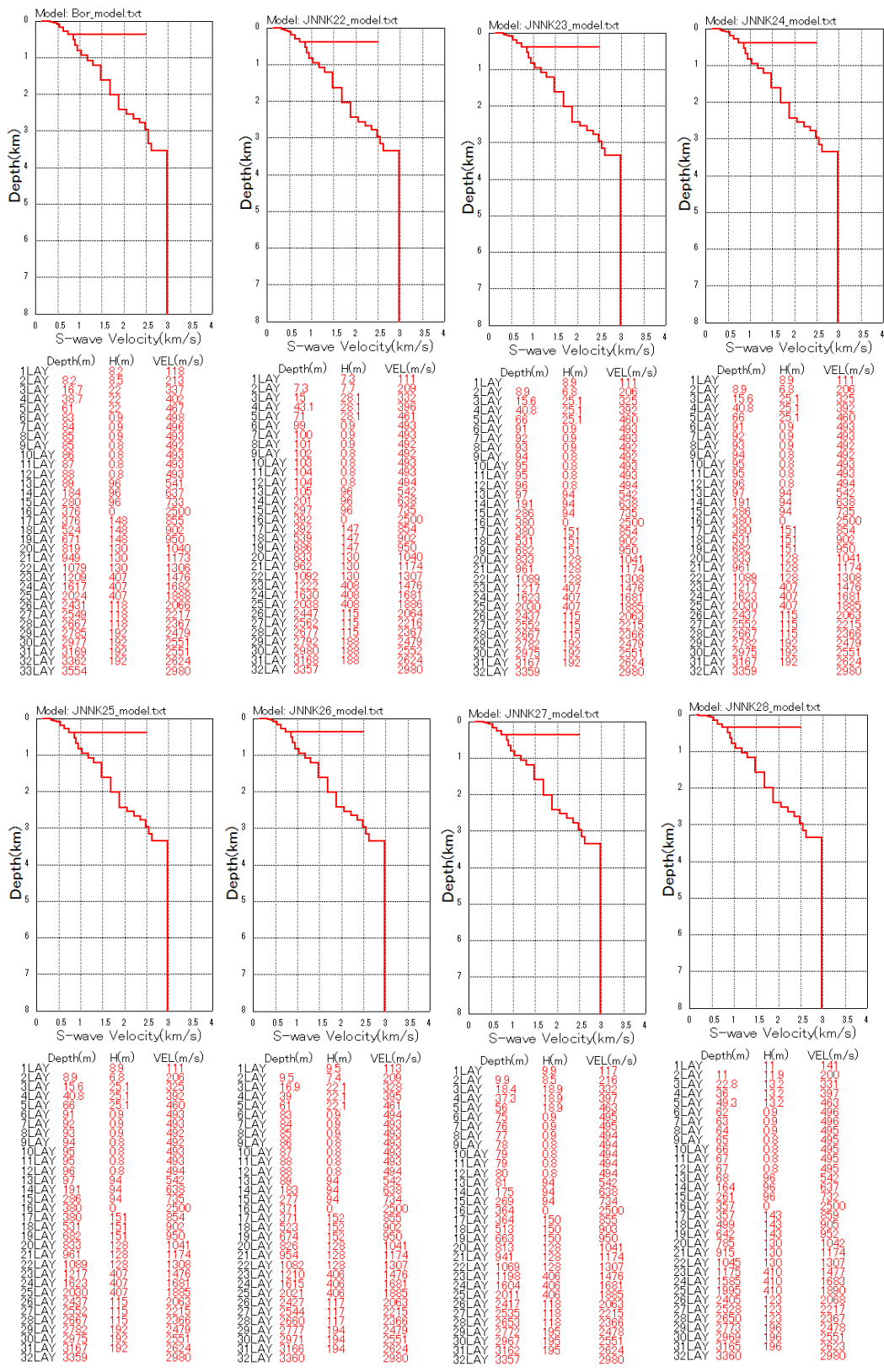


図 3.1-84 観測波形の剥ぎ取り解析に用いた S 波速度構造
第 3 層上面を解放基盤面にして剥ぎ取り

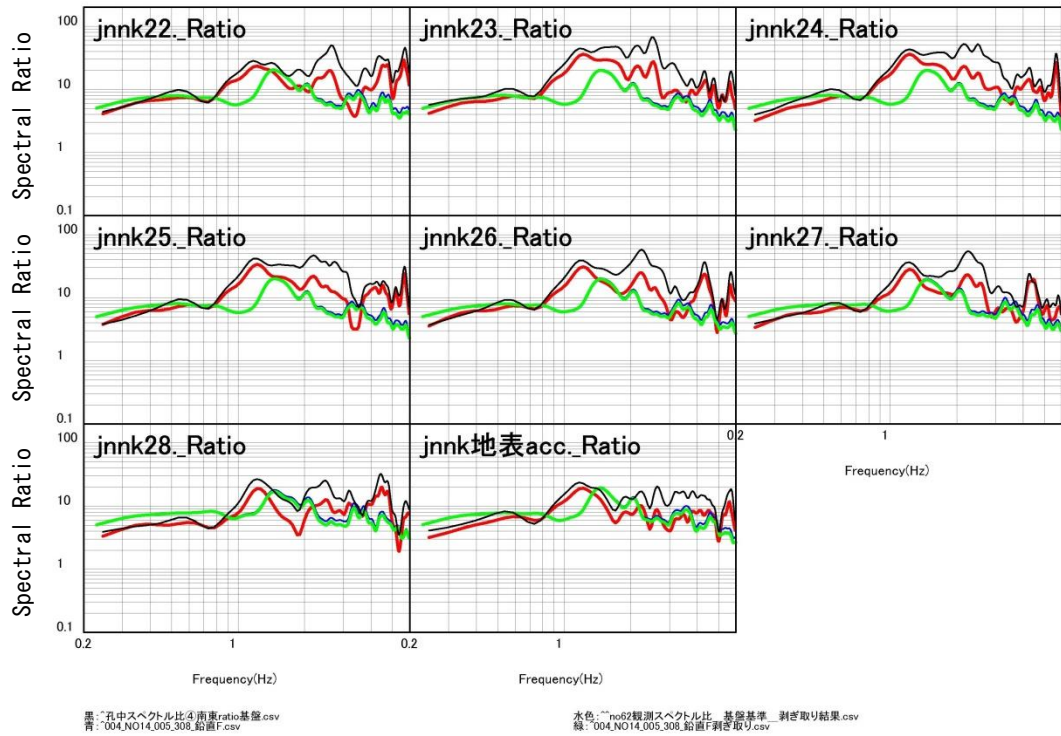


図 3.1-85 No.62 における地表/孔中スペクトル比の比較(NS 成分) (ケース④)

黒: 観測地表/孔中スペクトル比 赤: 剥ぎ取り結果による観測地表/孔中スペクトル比
青: 計算地表/孔中スペクトル比 緑: 剥ぎ取り結果による計算地表/孔中スペクトル比

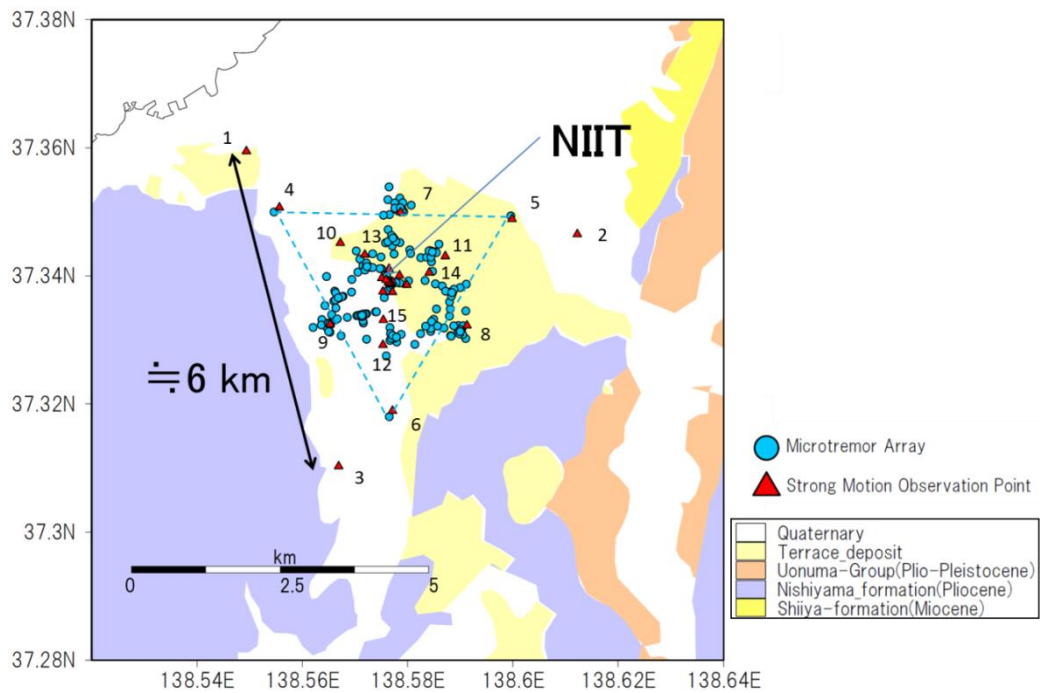


図 3.1-86 水平アレー地震動観測点(赤三角)と微動アレー観測点(青丸)

3.1.4.10 モデルの精度が地震動評価へ与える影響評価

観測孔地点については、観測スペクトル比と計算スペクトル比はよく一致していた。また、微動アレー探査が観測点の近傍で実施されている JNNK07、JNNK08、JNNK09、JNNK11 については 2Hz 程度までのスペクトル比はよく一致していた。3.1.4.9 節で示したように、表層の構造が適切に表現できればより高周波数帯域の地震動も精度よく推定することができると考えられる。

一方、微動アレー探査が観測点近傍で実施されていない JNNK01、02、03 などでは、2Hz 以下の長周期帯域においても観測データとの整合はあまり良くない結果であった。詳細速度構造モデルでは、地震動のスペクトル比のジョイントインバージョン解析により一次元の S 波速度構造が推定されているが、スペクトル比は地盤のインピーダンス比によって値が決まるため、必ずしも地盤構造の絶対値が精度よく推定されているとは限らない。したがって、PS 検層や微動アレー探査によって表層付近の S 波速度の絶対値を精度よく推定する必要があると思われる。ただし、最適な数量を検討するためには、例えば微動アレー探査のデータを間引いて地盤モデルを作成し、シミュレーション結果にどの程度影響を及ぼすかの検討が別途必要であると考えられる。

3.1.5 まとめ

(独)原子力安全基盤機構(当時、現、原子力規制庁)の柏崎深部地震動観測プロジェクトの一環として取得した深部地震動観測記録及び水平アレー地震動観測記録を整理・分析し、地震データベースを作成した。また、サイト特性の評価手法の適用性検討に資するために三次元地下構造モデルの精度検証を三次元差分法により行った。具体的には、水平アレー地震動観測点における記録と観測孔の3000m地震計記録や観測孔の地表地震計記録とのスペクトル比について観測データと計算結果を比較することにより行った。以下に、本章で得られた知見をまとめる。

(1) 観測記録の分析結果

観測データについて、地表/孔中スペクトル比の震源の位置によるばらつきはあまり大きくなかった。倍半分程度のばらつきにどの観測点も収まっている。ただし、多くの観測点で周波数0.5-1.5Hzの成分は、150度の方向(磁北から時計回り)の地震の地表/地表スペクトル比が大きい傾向がみられた(JNNK2、3、5、6、7、8、9、11等)。これは、地震基盤が深い地域から浅い地域へ入射する地震であり、地震波が重ね合わさって振幅が大きくなったと考えられる。

観測点間のばらつきについては、JNNK2、4、9、10、18では、周波数1Hz付近の地表/孔中スペクトル比が4倍程度を示す観測点もあり、調査地内において1Hz付近の地盤振動特性が異なることが確認された。

(2) 差分法計算結果の分析結果

鉛直下方から入射した5ケースでの計算の結果について、観測孔における地表/孔中スペクトル比は観測データをよく説明できている。ただし、ななめ入射の場合は鉛直下方入射に比べてスペクトル比の値が小さく、観測データとの整合はあまり良くない。これは、ななめ入射により地震波の干渉が発生し、振幅が小さくなったと考えられる。したがって、今回対象とした地震については、鉛直下方の入射を仮定することができると考えられる。

観測孔近傍の観測点(JNNK7以降)については、周波数2Hz程度までは観測データをよく説明できている。したがって、詳細速度構造モデルについては、周波数2Hz程度までは適用性が高いモデルであるといえる。ただし、微動アレー探査を実施している地域から離れた観測点では、1Hz付近のデータを説明できていない地点も見られる。また、観測孔近傍の観測点(例えばJNNK18、JNNK20)においても、周波数1Hz程度のスペクトル比が過小評価であり、局所的な構造の影響を受けていると思われる。この原因を特定するためには、観測点付近の一次元構造の詳細な構造を把握する必要がある。今後の課題と考えられる。本検討では、S波速度300m/s以下の速度層については、300m/sの層で置き換えて計算している。観測孔周辺の観測点では、S波速度300m/s以下の速度層の影響は、概ね2Hz以上の帯域で影響していることが確認できた。したがって、周波数2Hz以上の地盤振動特性を精度よく推定するためには、S波速度300m/s以下の速度構造を考慮した解析を調査地域全域で行う必要がある。

本地域では、観測データに到来方向による振動特性の違いが顕著でなく、差分法による検討でも鉛直入射による計算結果は、観測データをよく説明できる結果であった。したがって、本地域では振動特性に与える影響は、観測点直下の構造の影響が最も大きいと考えられる。

(3) JNES2007 モデルの分析結果

JNES2007 モデルは、S 波速度 500m/s までの速度構造を推定し、周波数 0.5Hz 以下の地震動の特性を説明できるモデルであった。したがって、JNES2007 モデルによるシミュレーション結果では、周波数 1-2Hz 程度の観測データとの整合が悪い地点が多い。

一方、詳細速度構造モデルは、一次元応答計算を用いて 5-10Hz までの地震動特性を説明しているモデルである。しかし、3.1.4.1 節に示した三次元差分法における表層地盤の取り扱いの為、周波数 2Hz 程度までの地震動をよく説明できる結果となった。S 波速度 300m/s 以下の層を考慮した 1 次元応答計算を行うと、観測孔周辺の観測点においては、周波数 5Hz 程度までよく説明できる結果となった。差分法に 1 次元応答計算を考慮することにより、観測孔周辺の観測点においては、周波数 5Hz 程度までの地震動特性をよく説明できるモデルと考えられる。

(4) 一次元構造と三次元構造による地震動の検討について

一次元構造による増幅特性と三次元構造による増幅特性を比較すると観測孔地点において両者はおおむね一致しているが、JNNK01 や JNNK03、JNNK04 などでは両者はあまり一致しない結果となった。速度層の上面深度などを見ると観測孔地点では地盤構造が比較的フラットであるのに対し、JNNK01 や JNNK03、JNNK04 では地盤構造が変化している。したがって、地盤構造が三次元的に変化している地点については、三次元構造による地震動の検討が必要であるといえる。

(5) モデルの精度が地震動評価へ与える影響評価

観測孔地点については、観測地表/孔中スペクトル比と計算地表/孔中スペクトル比はよく一致していた。また、微動アレー探査が観測点の近傍で実施されている JNNK07、JNNK08、JNNK09、JNNK11 については 2Hz 程度までの地表/孔中スペクトル比はよく一致していた。3.1.4.8 で示したように、表層の構造が適切に表現できればより高周波数帯域の地震動も精度よく推定することができると考えられる。

一方、微動アレー探査が観測点近傍で実施されていない JNNK01、02、03 などでは、2Hz 以下の長周期帯域においても観測データとの整合はあまり良くない結果であった。詳細速度構造モデルでは、地震動のスペクトル比のジョイントインバージョン解析により一次元の S 波速度構造が推定されているが、スペクトル比は地盤のインピーダンス比によって値が決まるため、必ずしも地盤構造の絶対値が精度よく推定されているとは限らない。したがって観測点の地盤振動特性を精度よく推定するためには、PS 検層や微動アレー探査によって表層付近の S 波速度の絶対値を精度よく推定する必要があると思われる。今回の調査地においては、基盤程度までの探査可能な大規模(底辺長 4 km 程度)の微動アレー探査と 1 km グリッド間隔程度での底辺長 1 km 程度の微動アレー探査を組み合わせることにより、周波数 5Hz 程度までの地盤振動特性を精度よく説明することが可能であると考えられる。ただし、最適な数量を検討するためには、例えば微動アレー探査のデータを間引いて地盤モデルを作成し、シミュレーション結果にどの程度影響を及ぼすかの検討が別途必要であると考えられる。

[3.1 参考文献]

- [1] (独)原子力安全基盤機構(2013) : 地震動評価のための三次元地下構造モデルの作成手引き, (独)原子力安全基盤機構 JNES-RE-2013-2016, 2013年11月
- Cerjan, C., D. Kosloff, R. Kosloff and M. Reshef: (1985) A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic boundary condition, *Geophysics*, 50, 705-708.
- [2] Graves, R.W. (1996) Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staged-grid finite differences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1091-1106.
- [3] 地震調査委員会 (2012) : 「長周期地震動予測地図」2012年試作版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/
- [4] Levander, A. R. (1988) Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, *Geophysics*, 53, 1425-1436.
- [5] Robertsson, J.O.A., Blanch, J.O., and Symes, W.W. (1994) Viscoelastic finite-difference modeling, *Geophysics*, 59, 1444-1456.
- [6] Virieux, J. (1986) P-SV wave propagation in homogeneous media: Velocity-stress difference method, *Geophysics*, 51, 889-901.