

2024 年度 弘前大学大学院地域共創科学研究科 修士論文

五所川原市における長周期地震動の 分析と地下構造の推定

弘前大学大学院地域共創科学研究科

地域リノベーション専攻

レジリエンステクノロジー研究領域

学籍番号 23GC133

氏 名 小田島智弘

2025 年 1 月 31 日提出

学位論文要旨		
学籍番号	23 G C 133	氏 名 小田島智弘
地域リノベーション専攻 レジリエンステクノロジー領域		
論文題目 五所川原市における長周期地震動の分析と地下構造の推定		
<p>平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の際の青森県つがる市車力町観測点におけるスペクトル振幅の空間分布を調査した結果から五所川原周辺の観測点で、観測点同士の距離が近いにも関わらず、スペクトル振幅の大きさに違いがあることが確認された。</p> <p>本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に五所川原市周辺の観測点で観測された長周期地震動は隣接した観測点でもスペクトル振幅の大きさが異なっていた。この事実を確認するために、五所川原周辺の 5 観測点において、余震の際のスペクトル特性を確認することとした。その結果、水平動成分の 0.2Hz では、西側 3 地点の方が大きく、水平動成分の 0.3Hz、0.4Hz では K-NET 五所川原観測点が最も大きいことが確認できた。</p> <p>さらに、フーリエ解析を行う対象区間が本震と余震で違ったため、速度波形にバンドパスフィルターを施し、時々刻々と変化する速度波形の様子を比較した。東側 2 地点と西側 3 地点では、S 波到来直後の部分の卓越する振動数に違いが見られた。東側 2 地点は 0.3Hz が卓越している一方で、西側 3 地点は 0.2Hz が卓越していた。これは地下構造の影響が要因である。東側 2 地点は盆地の縁に存在しており、西側 3 地点は盆地に存在していて、西側 3 観測点は堆積層が厚いことが想定される。後続部分に着目した結果、東側 2 地点は 0.2Hz と 0.3Hz の振幅は S 波到来部分と同等のように見え、西側 3 地点は S 波到来部分と比較すると後続部分の方が大きいように見えた。</p> <p>東側と西側の観測点で卓越する振動数が異なることが確認されたが、このことが一般的なもののなかを地震記録を数多く集めて検討した。地震記録そのものの震源特性を除去するために、水平動と上下動とのスペクトル比を取った。その結果、東側の 2 地点は、最低次のピークは 0.2Hz よりも高い振動数で見られ、1.0Hz 前後のピークも顕著に見られた。しかし、西側の 3 地点は、最低次のピークは 0.2Hz よりも低く、その次のピークは 0.5Hz で見られた。このことから、東側の 2 地点に比べて西側の 3 地点は地震基盤より上の堆積層が厚いことが想定される。</p> <p>そこで、地震動の特性を理解するために、地震観測点直下の地下構造を把握する必要があるため、Kawase et al.(2011)の考えを用いて、五所川原周辺の 5 地点の観測点直下の地下構造を推定した。その結果、五所川原市内の 2 つの観測点と青森鶴田町鶴田観測点では、初期モデルから計算した水平動上下動スペクトル比 (EHVR) の理論値よりも最適モデルの方が、0.2Hz 付近のピークに対する対応が良いことが確認できた。ところが、その他の 2 地点の最適モデルは、0.2Hz 付近のピークは観測値よりも低振動数側であった。</p> <p>以上を通して、2011 年東北地方太平洋沖地震の際にスペクトル振幅の大きさに違いが見られた事実は余震で確認したところ、水平動成分の 0.2Hz のものは西側 3 地点の方が東側 2 地点よりも大きいことが確認できた。さらに、五所川原市周辺の観測点直下の地下構造を推定した結果、西側 3 地点の表層が厚いことが分かり、その表層が厚いことが 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に西側 3 地点の地震動の増幅に影響を与えていると考える。</p>		

目次

要旨	1
第1章 序論	3
1.1 これまでの検討	
1.2 本研究の目的	
第2章 スペクトル振幅の空間分布とその解釈	6
2.1 用いる地震	
2.2 観測された地震動	
2.3 スペクトル振幅の空間分布	
2.4 考察	
第3章 地震動の水平上下動スペクトル比から見た5地点の相違	25
3.1 はじめに	
3.2 K-NET 五所川原観測点 (GSGK)	
3.3 気象庁五所川原市栄町観測点 (GSGJ)	
3.4 その他の3地点 (KSWL, KZKL, TRTL)	
3.5 考察	
第4章 地下構造の推定	34
4.1 地下構造の推定方針	
4.2 K-NET 五所川原観測点 (GSGK)	
4.3 気象庁五所川原市栄町観測点 (GSGJ)	
4.4 その他の3地点 (KSWL, KZKL, TRTL)	
第5章 結論	54
参考文献	57
謝辞	60

第 1 章 序論

1.1 これまでの検討

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の際の青森県つがる市車力町観測点における震度は震度 3.9 と周辺の観測点に比べてやや大きかった。その理由として、NS 成分に周期 2 秒程度のパルス状な位相の影響が考えられる。また、1983 年日本海中部地震の際に津軽平野の中心部に位置する津軽大橋観測点の記録も周期 2.5 秒程度の地震動が卓越していた。ここでは長周期地震動として振動数が 0.2Hz から 0.5Hz の範囲を取り上げている。

小田島(2024)では、2011 年東北地方太平洋沖地震の際の津軽平野における長周期地震動の振幅分布を示している。その結果の一例を図 1-1, 1-2 に示す。そこでは、本震の際の津軽平野にある観測点における地震動記録に対してフーリエ解析を行い、スペクトル振幅を求めたところ、卓越振動数は観測点毎に異なっていた。また、得られたスペクトル振幅を 0.2Hz, 0.3Hz, 0.4Hz, 0.5Hz を中心としたバンド幅 0.12Hz の帯域に区切り、その平均値を求め、さらに水平動成分は NS 成分と EW 成分の平均値をそれぞれ二乗し和を取ったものの平方根を返したもので空間分布を求めたところ、津軽平野南部に位置するつがる市柏観測点やつがる市木造観測点、青森鶴田町鶴田観測点では水平動と上下動では 0.2Hz と 0.3Hz 成分が他の地点よりも卓越していた。特に、五所川原市周辺に位置する JMA 五所川原観測点や K-NET 五所川原観測点のスペクトル振幅の 0.2Hz の成分と比較すると、観測点間の距離が短いにも関わらず、スペクトル振幅の大きさに違いがある。しかし、0.3Hz 以降の振動数ではその特徴が確認されなかった。振幅の大きさに違いが見られた東側の 2 地点と西側の 3 地点における観測点間の最短距離は JMA 五所川原観測点とつがる市柏観測点であり、約 5km である。

1.2 本研究の目的

本研究では、五所川原市周辺の 5 つの観測点における 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の最大余震におけるスペクトル振幅の空間分布を求め、本震で見られたスペクトル振幅の違いが余震でも見られるのかを試みることで、五所川原市周辺の 5 つの観測点の地盤震動特性を明確にする。さらに、五所川原市周辺の 5 つの観測点直下の地下構造を推定することで、津軽平野の地下構造を把握することにつなげることを目的とする。

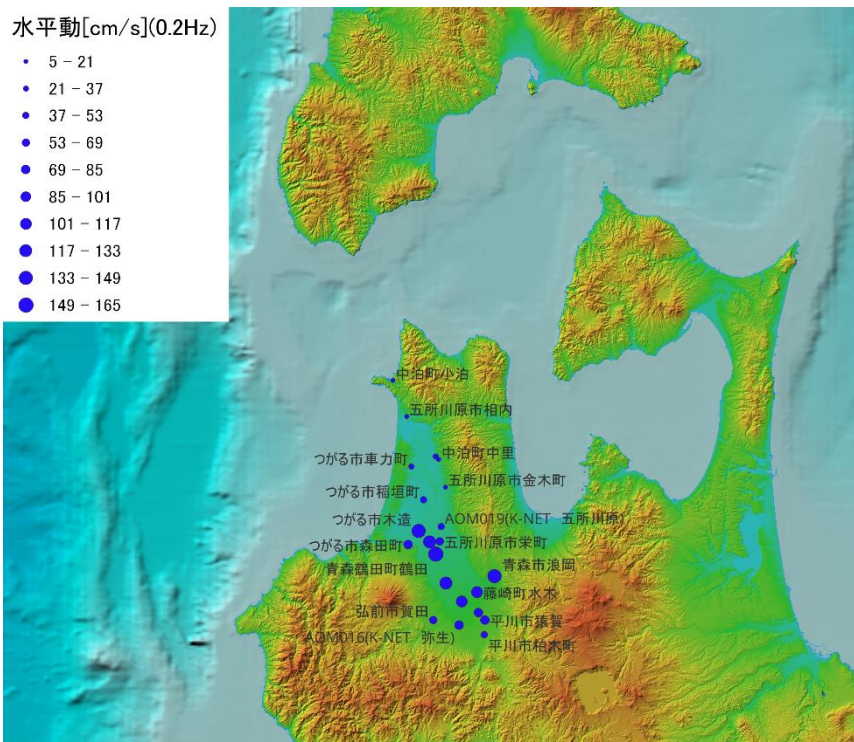


図 1-1 0.2Hz の水平動成分の空間分布

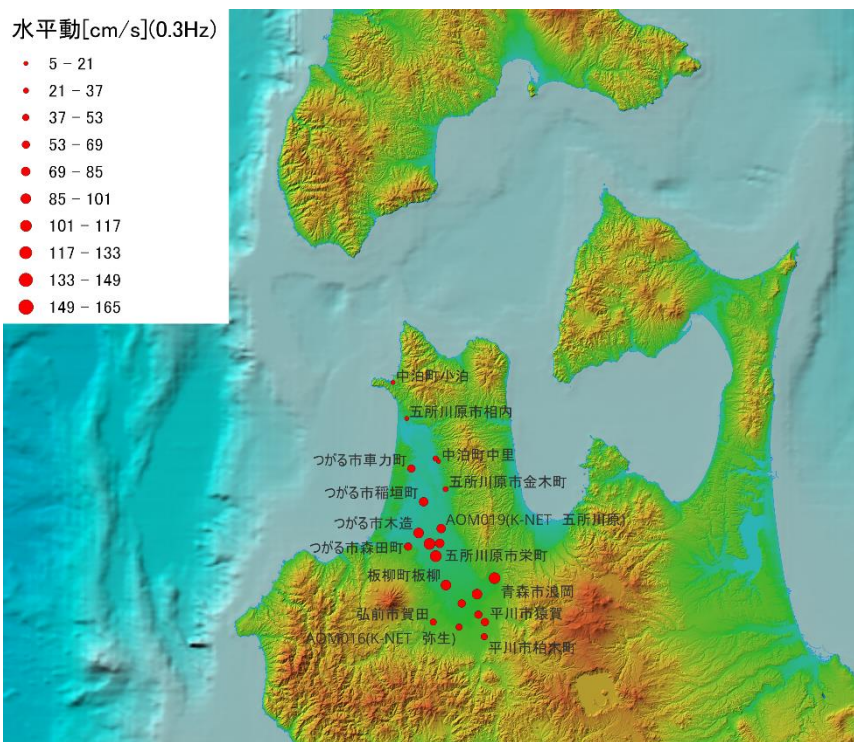


図 1-2 0.3Hz の水平動成分の空間分布

第2章 スペクトル振幅の空間分布とその解釈

2.1. 用いる地震

2011年東北地方太平洋沖地震の本震の際の津軽平野におけるスペクトル特性を求めたところ、距離が近いにも関わらず、スペクトル振幅が大きく異なる観測点群があることがわかった。そこで、スペクトル振幅の大きさの違いが見られた JMA 五所川原観測点、K-NET 五所川原観測点、つがる市木造観測点、つがる市柏観測点、青森鶴田町鶴田観測点の5つの観測点において、東北地方太平洋沖地震の余震の際のスペクトル特性を確認することとした。その際に用いた余震の諸元を表 2-1、本震と大規模余震の震央位置を図 2-1 に示す。この2つの地震はマグニチュードが7を超え、本検討で対象とする振動数領域の地震動を震源において発生させたと考えている。以下では、15:08:53.4 に発生した余震を余震 1、15:25:44.3 に発生した余震を余震 2 と呼ぶことにする。

表 2-1 地震の諸元

	年	月日	発生時刻	震央位置	北緯(°)	東経(°)	深さ(km)	M
余震1	2011	3月11日	08:53.4	岩手県沖	39.82	142.7666	32	7.4
余震2	2011	3月11日	25:44.3	三陸沖	37.9133	144.75	11	7.5

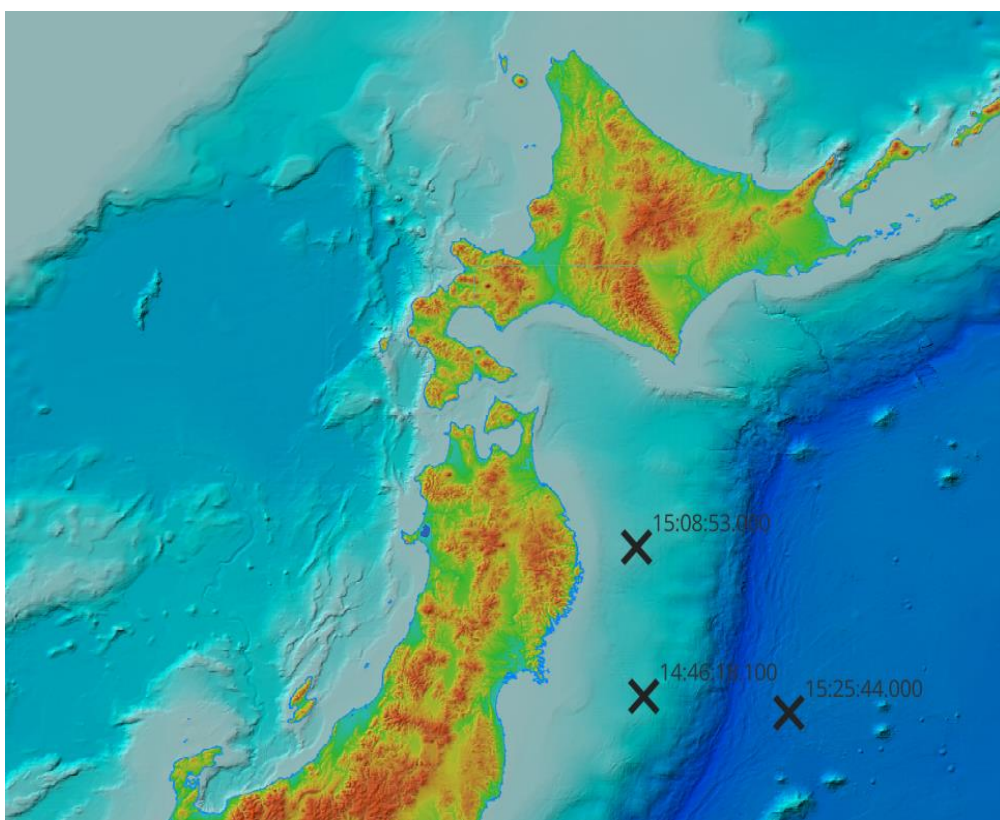


図 2-1 震央分布

2.2 観測された地震動

上述した 2 つの大規模地震の記録は五所川原周辺の 5 観測点で観測されている。気象庁観測点の五所川原市栄町観測点の震度計の記録と K-NET 五所川原観測点 (AOM019) の記録、青森県設置の 3 か所 (つがる市柏観測点、つがる市木造観測点、青森鶴田町鶴田観測点) の震度計の記録を積分した速度波形のうち 15 : 08 : 53.4 の余震 1 のものを図 2-2、15 : 25 : 44.3 の余震 2 のものを図 2-3 に示す。ここではフリーの地震記録処理ソフトである「View Wave」を用いて積分した後にカットオフ振動数 1.2Hz のローパスフィルターを施した。「View Wave」では積分の際に 0.1Hz のハイパスフィルターが施されているので結局 0.1Hz ~ 1.2Hz のバンドパスフィルターを施したことになる。また、図 2-2、2-3 の横軸は時間を示しており、K-NET 五所川原観測点の記

録開始時刻に時刻を揃えている．縦軸は速度波形の大きさを示している．また，図では NS 成分，EW 成分，UD 成分の順に各成分の速度波形を示している．さらに，観測点地名の図での表記で JMA 五所川原観測点は「GSGJ」，K-NET 五所川原観測点は「GSGK」，つがる市柏観測点は「KSWL」，つがる市木造観測点は「KZKL」，青森鶴田町鶴田観測点は「TRTL」と示している．

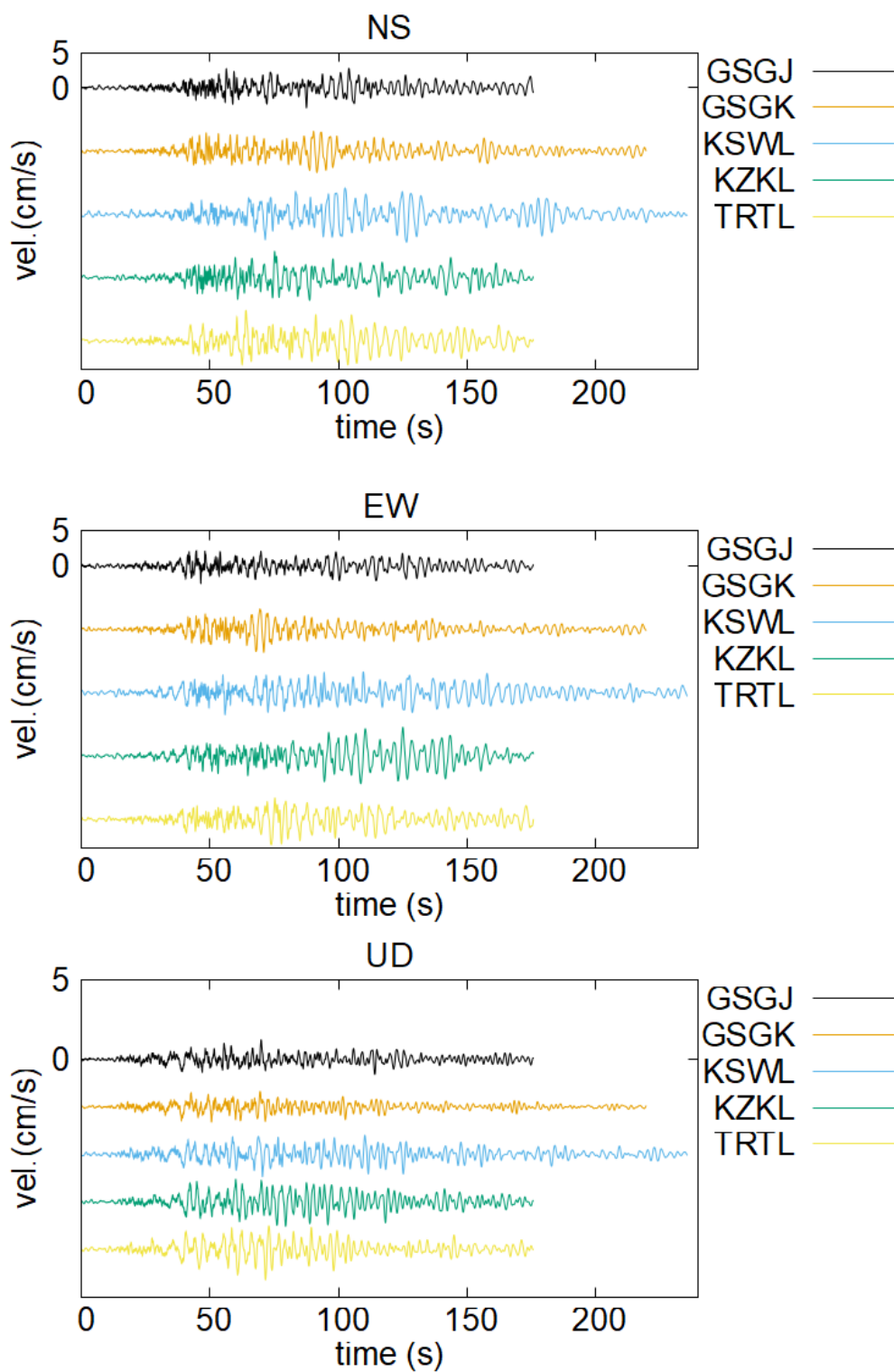


図 2-2 余震 1 の速度波形

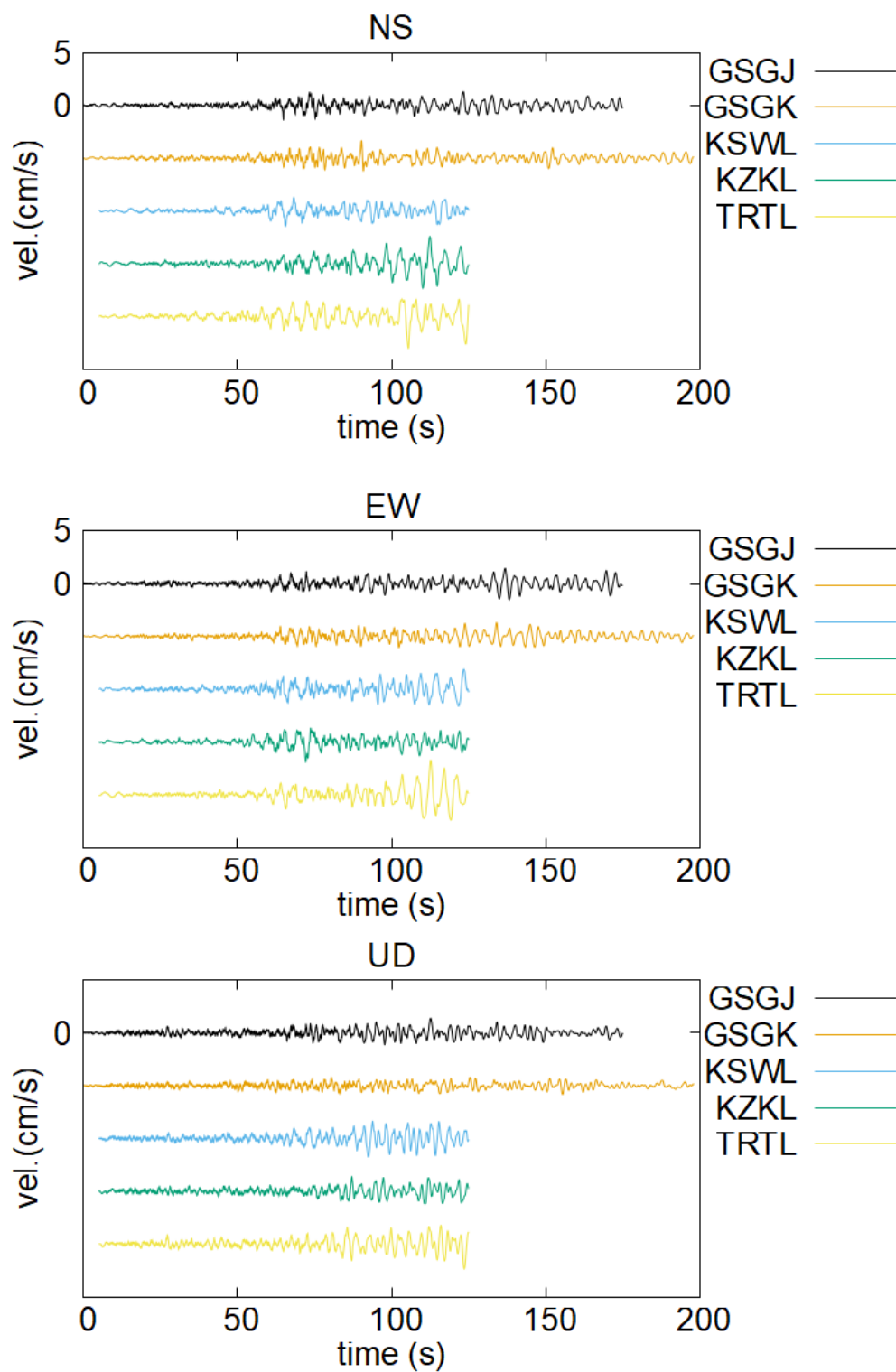


図 2-3 余震 2 の速度波形

2.3 スペクトル振幅の空間分布

前節で紹介した記録について、フーリエ解析を行い、さらにスペクトル振幅の空間分布を求めた。スペクトル振幅を比較するにあたって比較する波動成分を観測点間で対応させる必要がある。そこで、気象庁の JMA2001 走時表を基に理論走時を求め、各観測点における P 波初動時刻と S 波初動時刻を求めた。一方で、各観測点記録はトリガー式で起動しており、さらに長さが異なる。そのため走時に合わせて比較すると、S 波初動時刻から 60 秒間が全地点を統一的に比較できる最長の長さであった。よって、この区間を対象にフーリエスペクトルを求めることにした。

求めたスペクトル振幅を 0.2Hz, 0.3Hz, 0.4Hz を中心としたバンド幅 0.12Hz の帯域に区切り、その平均値の空間分布を比較した。また、水平動成分は NS 成分と EW 成分の平均値をそれぞれ二乗し和を取ったものの平方根とした。余震 1 の水平動成分の空間分布を図 2-4(a)～(c)、上下動成分の空間分布を図 2-4(d)～(f)に示す。また、余震 2 の水平動成分の空間分布を図 2-5(a)～(c)、上下動成分の空間分布を図 2-5(d)～(f)に示す。

結果として、五所川原市周辺における最大余震の際のスペクトル振幅を求めたところ、水平動成分の 0.2Hz では、西側の 3 地点の方が大きく、余震 2 の 0.2Hz では、西側 3 地点と東側 2 地点の違いが目立つ。水平動成分の 0.3Hz, 0.4Hz では K-NET 五所川原観測点が最も大きいことが確認できた。

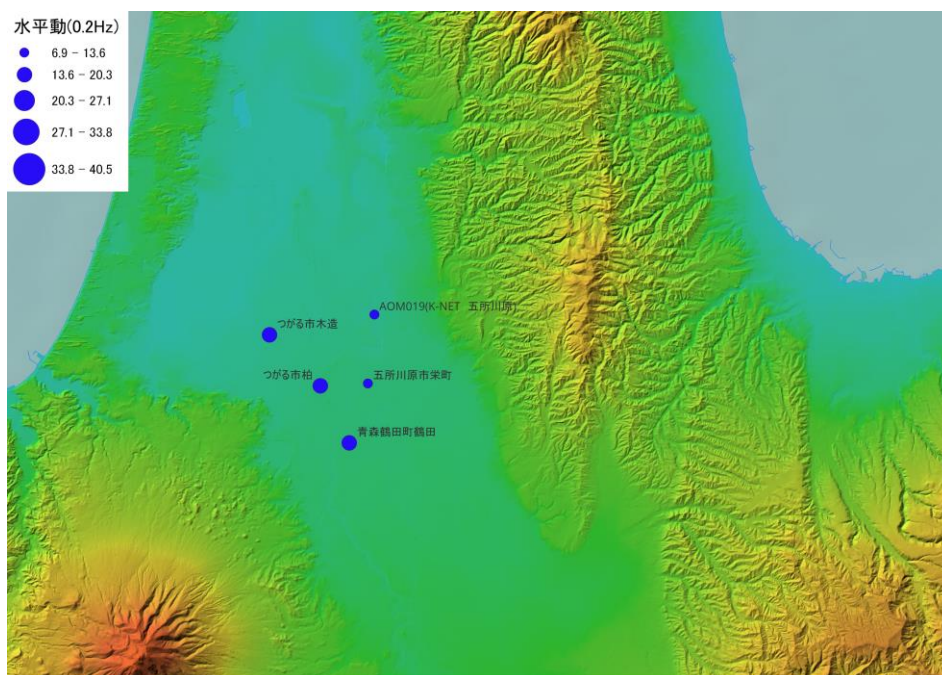


図 2-4(a) 0.2Hz の水平動成分の空間分布

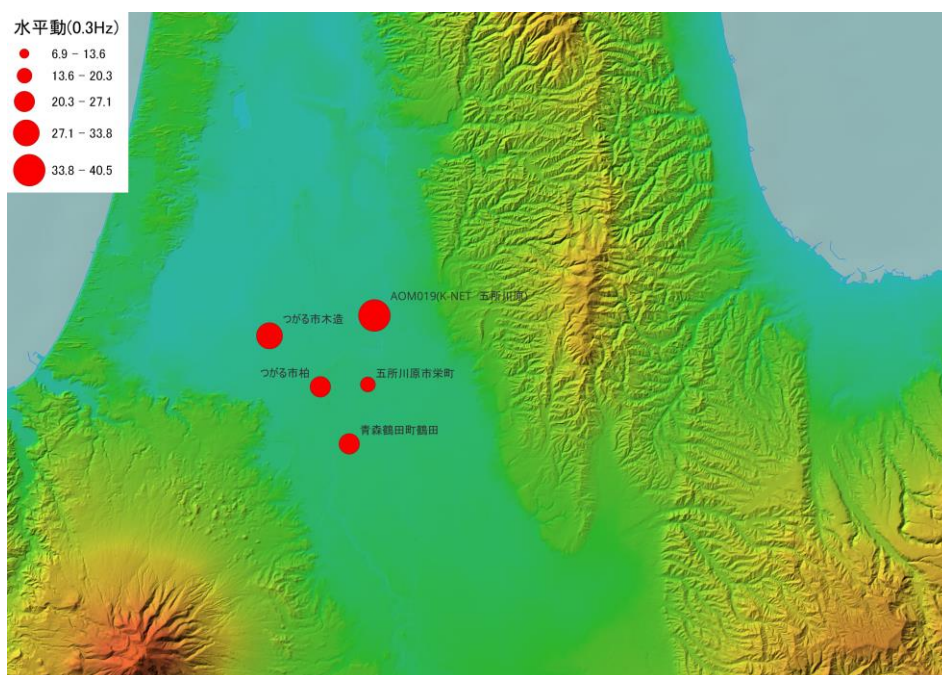


図 2-4(b) 0.3Hz の水平動成分の空間分布

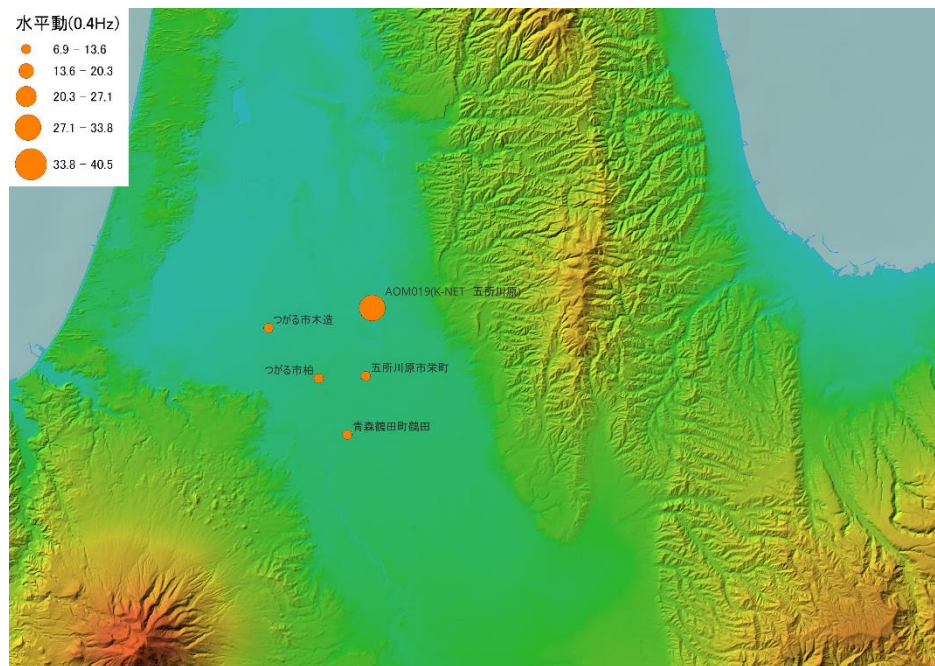


図 2-4(c) 0.4Hz の水平動成分の空間分布

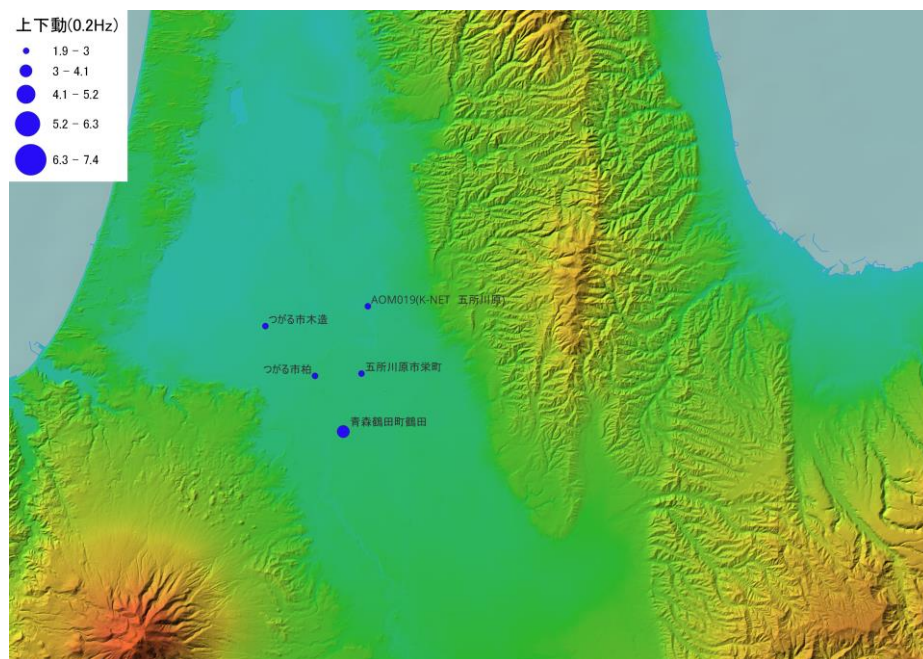


図 2-4(d) 0.2Hz の上下動成分の空間分布

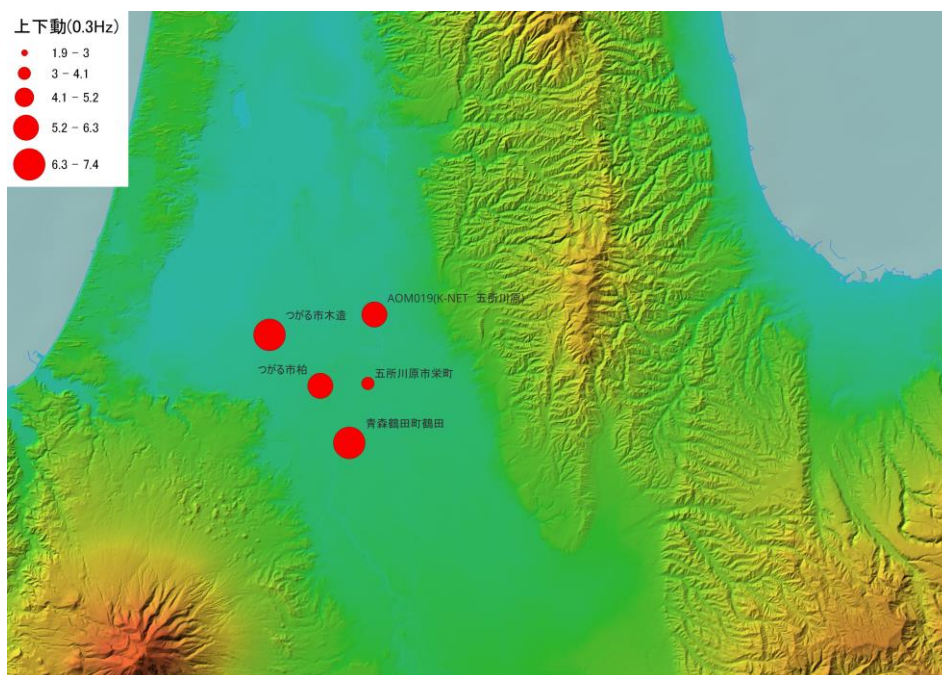


図 2-4(e) 0.3Hz の上下動成分の空間分布

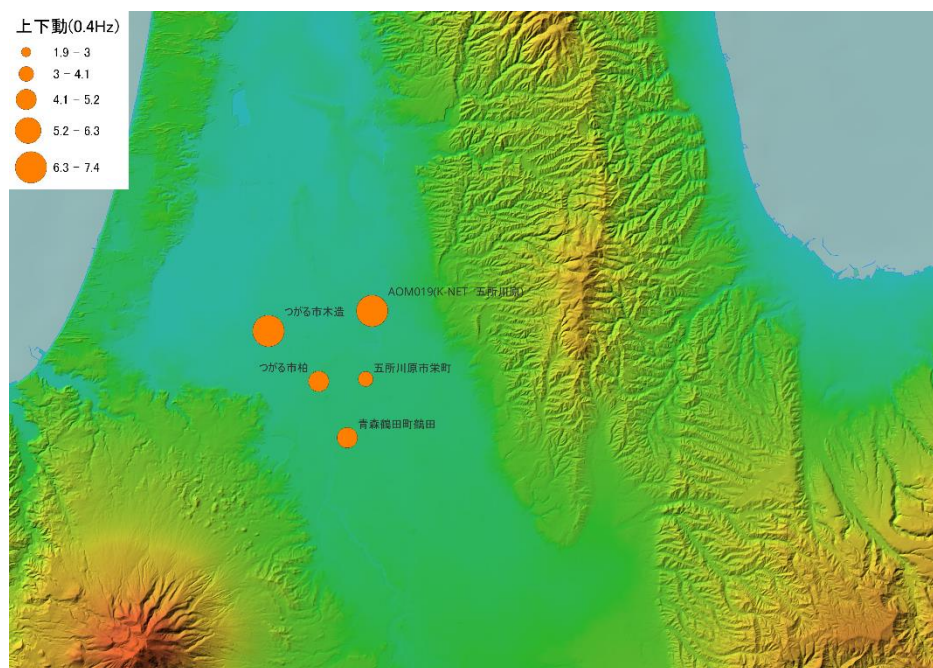


図 2-4(f) 0.4Hz の上下動成分の空間分布

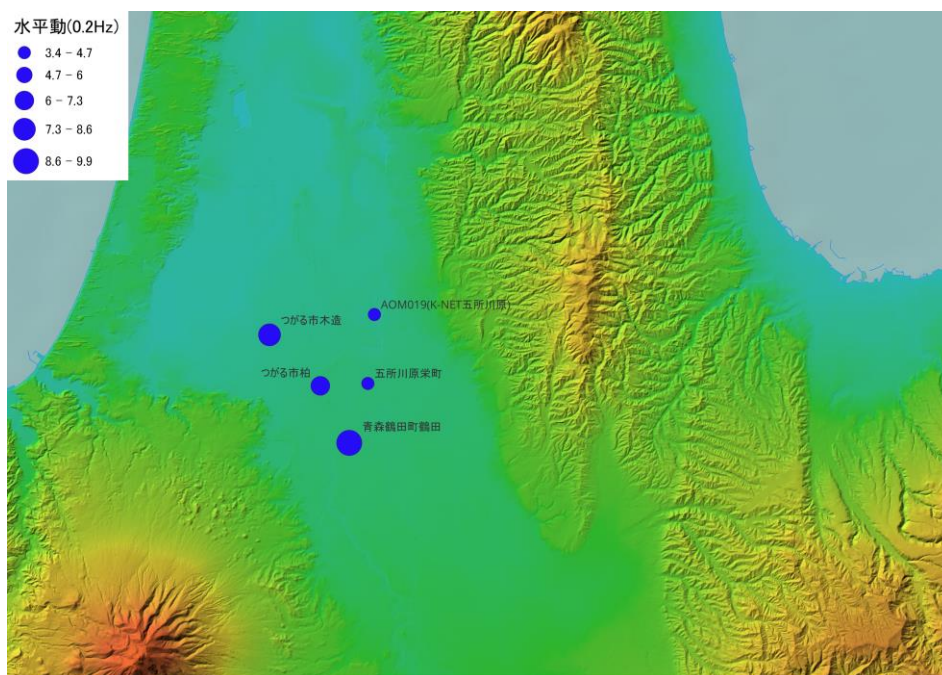


図 2-5(a) 0.2Hz の水平動成分の空間分布

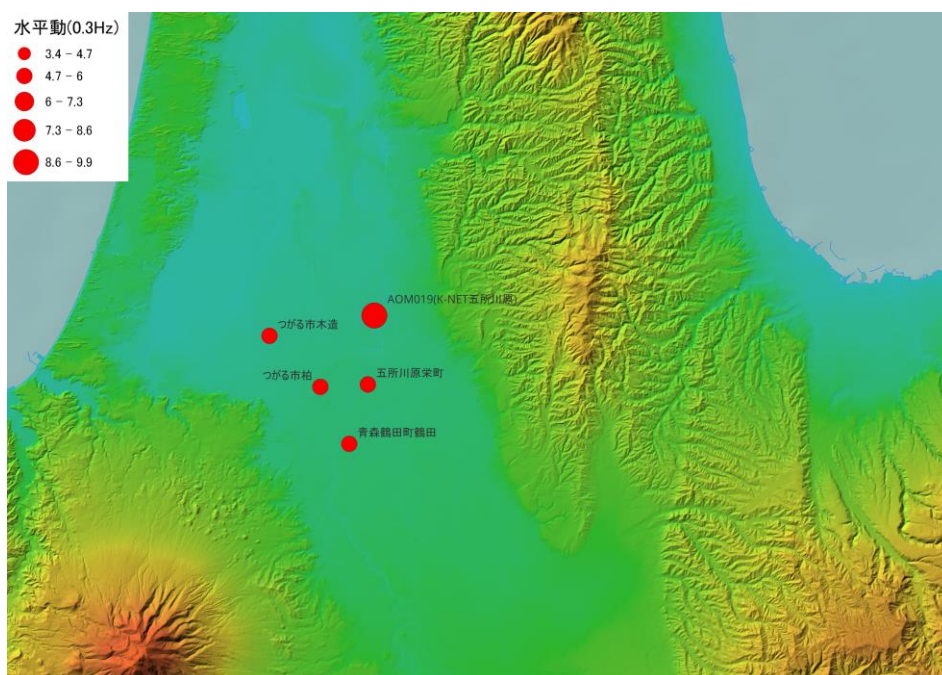


図 2-5(b) 0.3Hz の水平動成分の空間分布

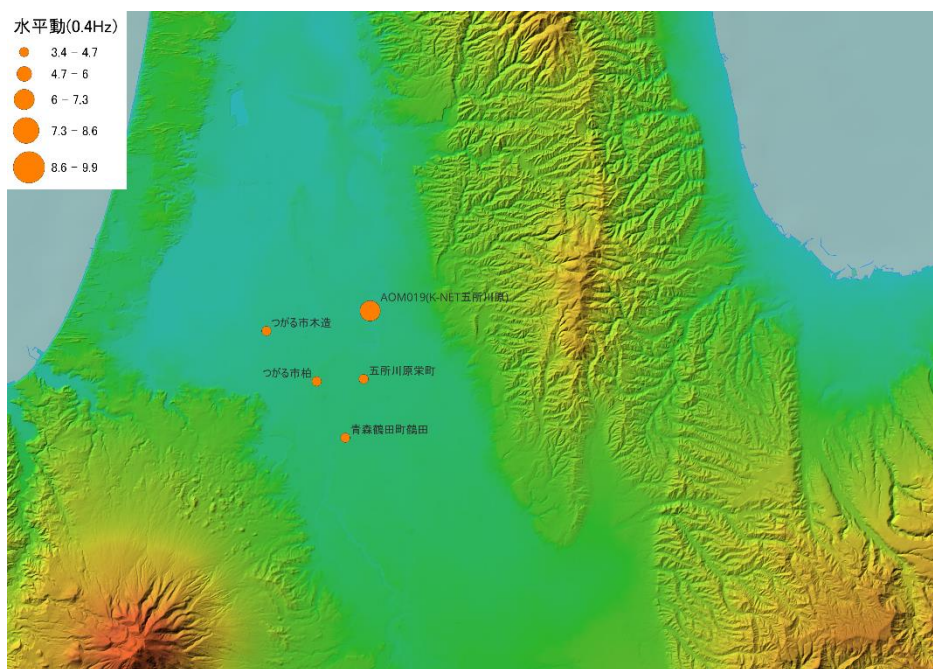


図 2-5(c) 0.4Hz の水平動成分の空間分布

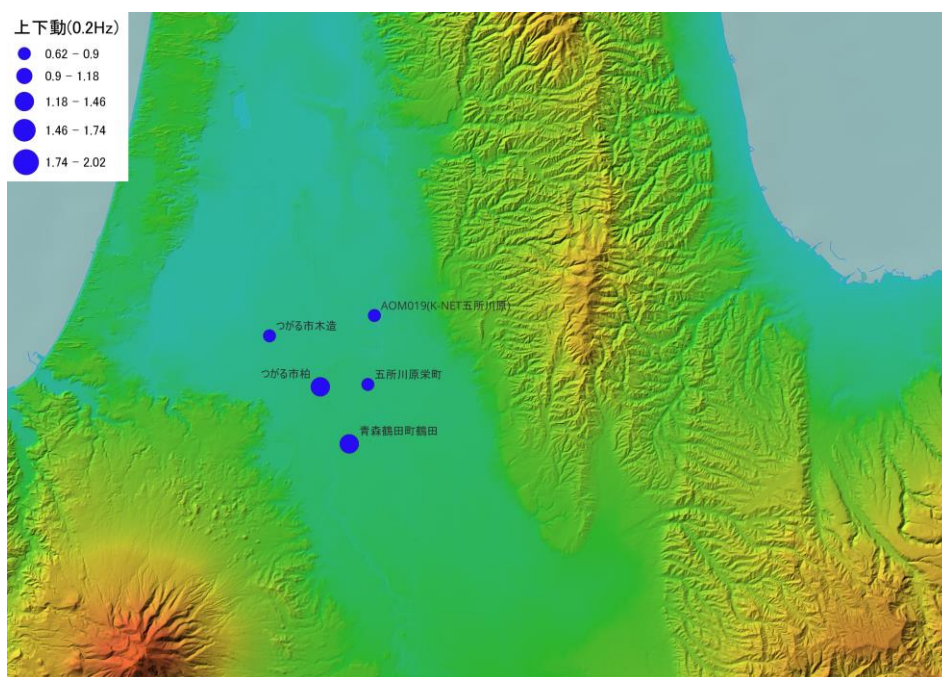


図 2-5(d) 0.2Hz の上下動成分の空間分布

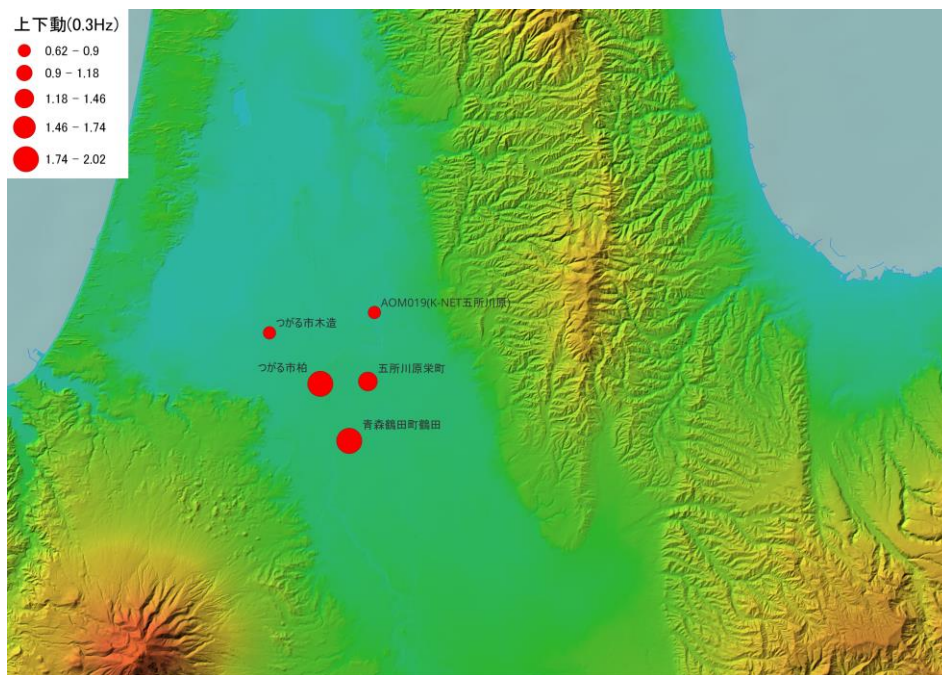


図 2-5(e) 0.3Hz の上下動成分の空間分布

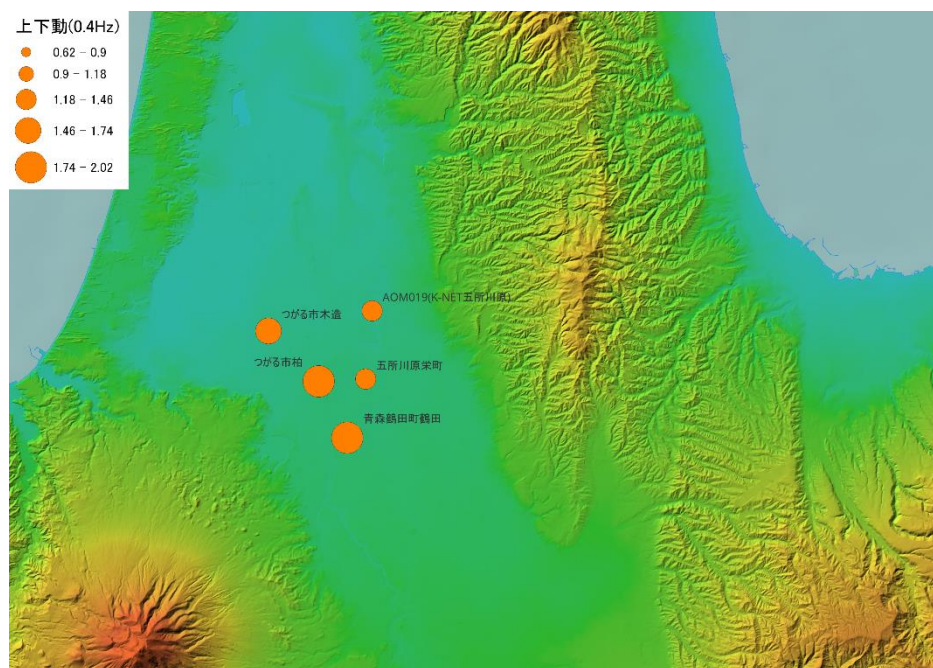


図 2-5(f) 0.4Hz の上下動成分の空間分布

2.4 考察

2011 年東北地方太平洋沖地震の本震の際に津軽平野の五所川原市周辺の観測点で観測された長周期地震動は隣接した観測点でも大きさが異なっていた。この事実を確認するために、2011 年東北地方太平洋沖地震の余震を使って同様な検討を行ったところ、2つの余震では本震で観測されたような特徴は確認できなかった。つまり、本震と余震では、スペクトル振幅の空間分布の傾向が異なることが分かった。しかしながら、本震におけるスペクトル振幅を求める際のフーリエ解析では、S 波初動から 140 秒間を対象にフーリエスペクトルを求めている一方で、2つの余震では、S 波初動から 60 秒間を対象にフーリエスペクトルを求めた。つまり、余震ではスペクトル振幅を求める際の対象とする範囲が本震の際よりも短い。

2つの余震の際のつがる市柏観測点やつがる市木造観測点、青森鶴田町鶴田観測点では、速度波形の S 波初動から 60 秒以降に大きな振幅が確認されている。この部分は、同一の長さで比較するという前提からスペクトル振幅を求める際には、含んでいない。そこで、五所川原市周辺に位置する 5つの観測点における本震と 2つの最大余震の速度波形にバンドパスフィルターを施し、時々刻々と変化する速度波形の様子を求めた。本震の結果を図 2-6(a)~(e)に示し、余震 1 の結果を図 2-7(a)~(e)、余震 2 の結果を図 2-8(a)~(e)に示す。図 2-6~2-8 の横軸は時間、縦軸は速度波形の大きさを示している。また、黒色の波形は観測された速度波形、橙色はバンドの中心振動数が 0.2Hz の波形、以下、水色は中心振動数が 0.3Hz の波形、緑色は中心振動数が 0.4Hz の波形、黄色は中心振動数が 0.5Hz の波形を示している。ここでバンドは 0.12Hz の帯域に区切っている。

図 2-6~2-8 について S 波到来部分と後続部分に着目していく。S 波到来部分では JMA 五所川原観測点と K-NET 観測点では 0.3Hz が卓越している一方で、つがる市柏観

測点やつがる市木造観測点，青森鶴田町鶴田観測点では 0.2Hz が卓越していることが確認できる．このような卓越する振動数の違いが見られる要因として，地下構造の影響が考えられる．JMA 五所川原観測点と K-NET 五所川原は盆地の縁に存在しており，つがる市柏観測点とつがる市木造観測点，青森鶴田町鶴田観測点は盆地に存在している．盆地に存在している 3 つの観測点は堆積層が厚いことが想定される．

次に後続部分に着目すると，本震では JMA 五所川原観測点と K-NET 観測点では 0.2Hz と 0.3Hz で S 波到来部分と同等のように見え，つがる市柏観測点やつがる市木造観測点，青森鶴田町鶴田観測点では S 波到来部分と比較して後続部分の方が大きいように見える．これは震源から各観測点に至るまでの間で生成された表面波の影響があると考えられる．また，余震でも本震の後続部分と同様に西側の 3 地点は S 波到来部分と比較して後続の方が大きいことが確認される．このように 5 つの近接した観測点における速度波形にバンドパスフィルターを施したことで，スペクトル振幅の空間分布では確認できなかった後続位相の違いが明らかになった．

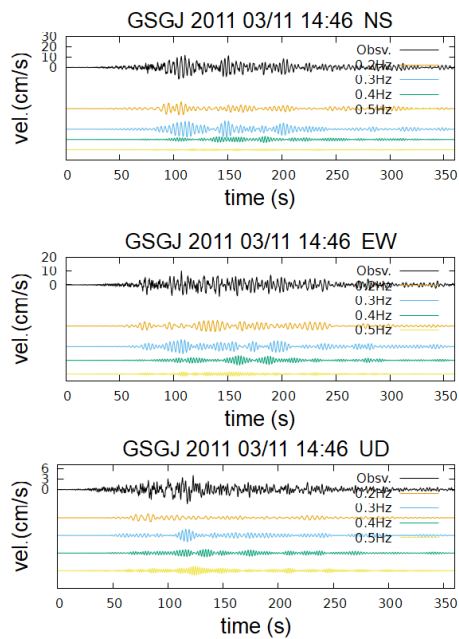


図 2-6(a) JMA 五所川原観測点

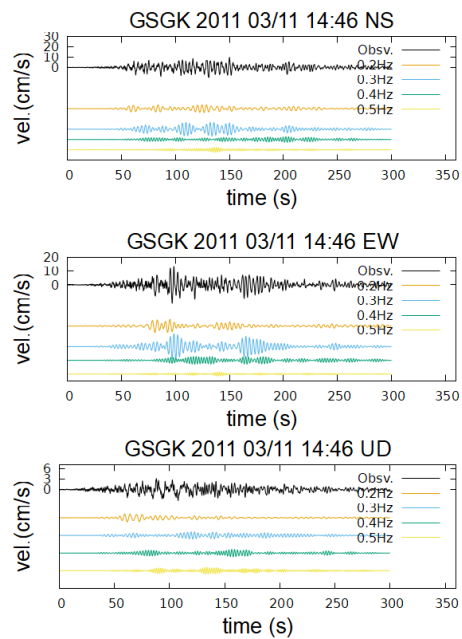


図 2-6 (b) K-NET 五所川原観測点

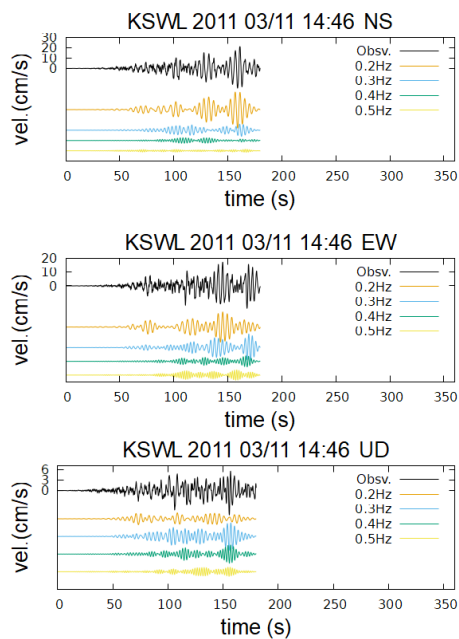


図 2-6 (c) つがる市柏観測点

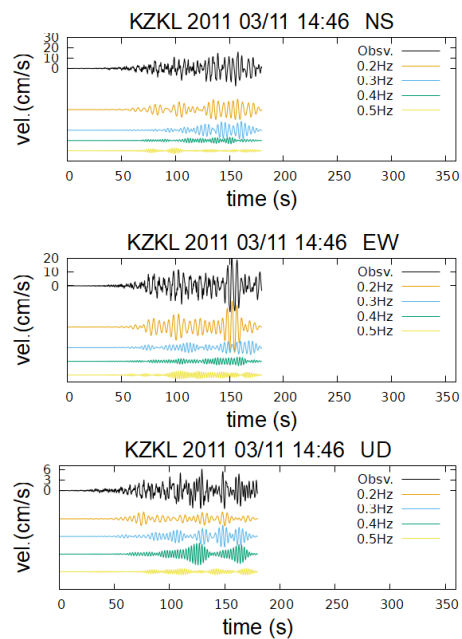


図 2-6 (d) つがる市木造観測点

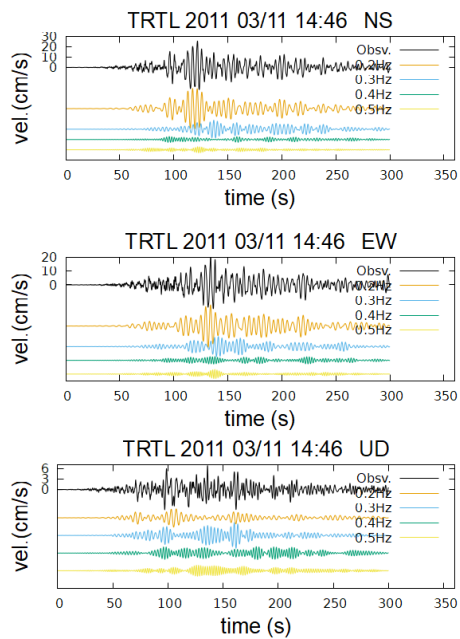


図 2-6 (e) 青森鶴田町鶴田観測点

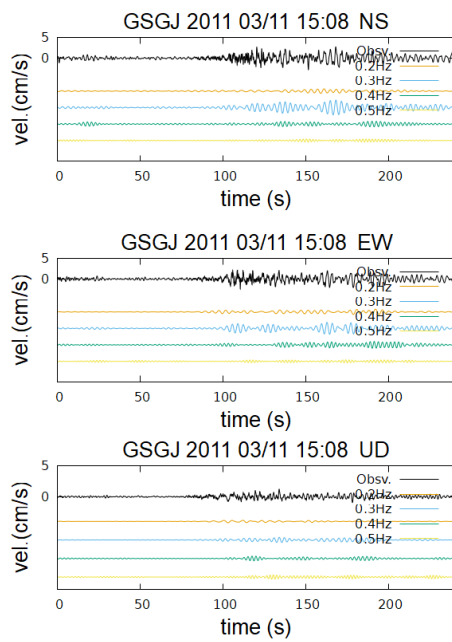


図 2-7(a) JMA 五所川原観測点

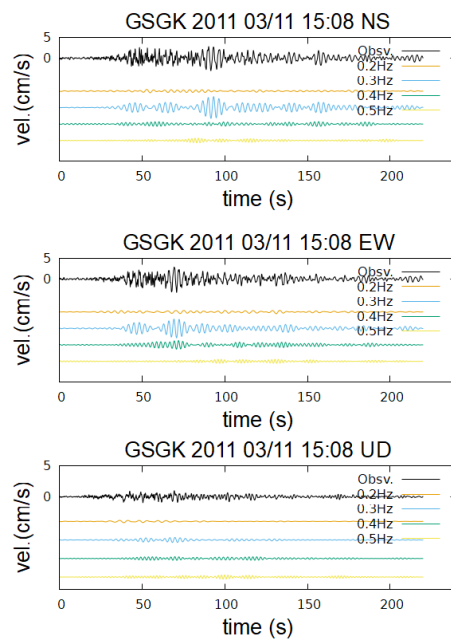


図 2-7 (b) K-NET 五所川原観測点

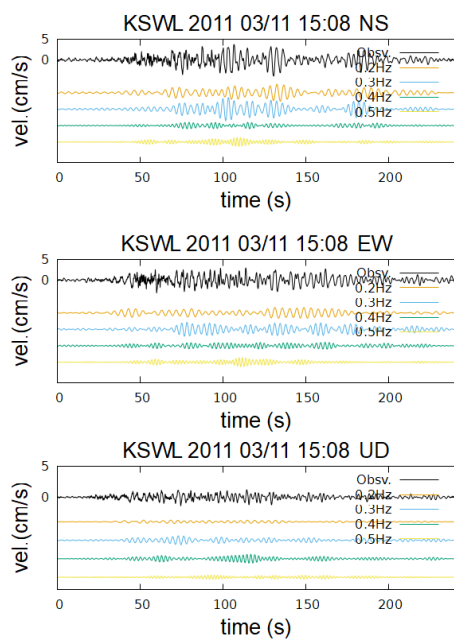


図 2-7 (c) つがる市柏観測点

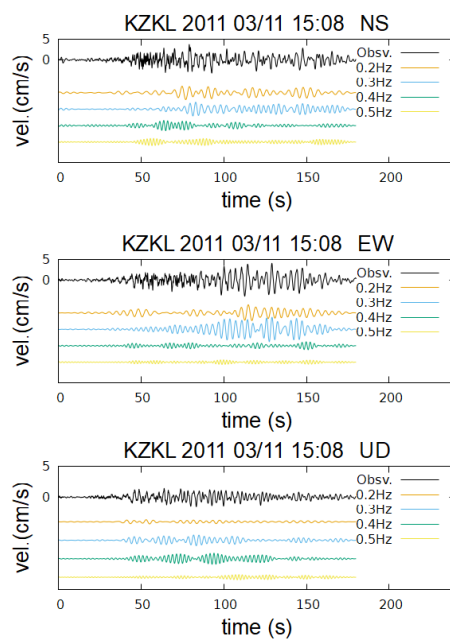


図 2-7 (d) つがる市木造観測点

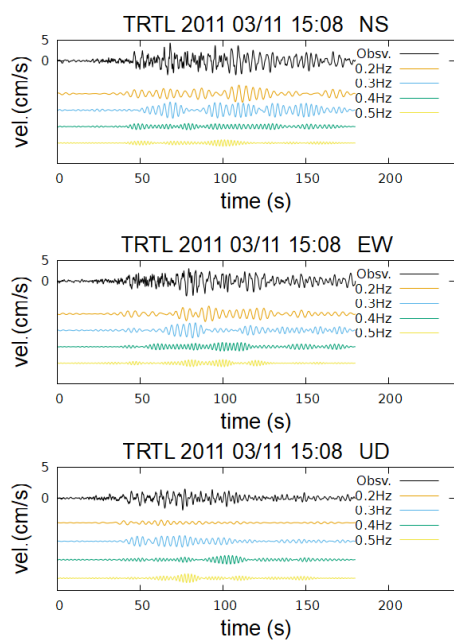


図 2-7 (e) 青森鶴田町鶴田観測点

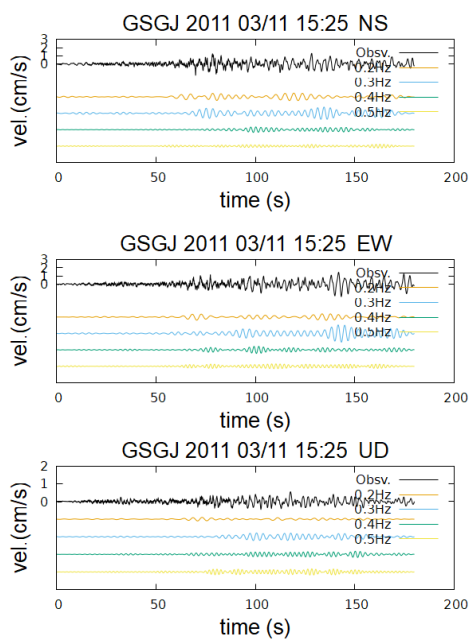


図 2-8(a) JMA 五所川原観測点

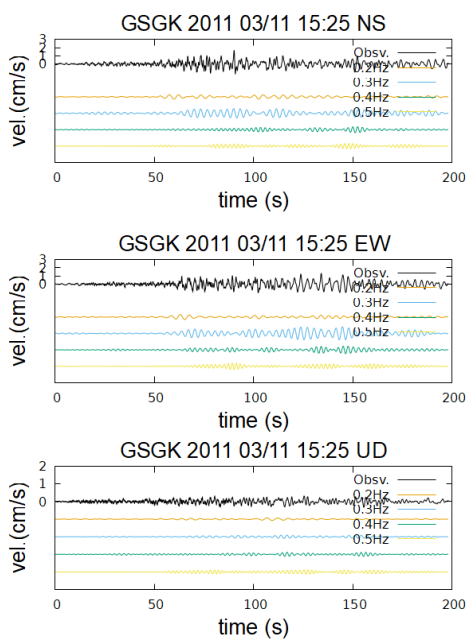


図 2-8(b) K-NET 五所川原観測点

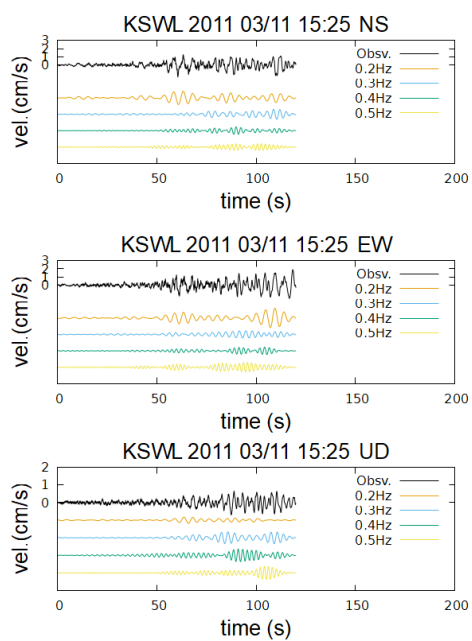


図 2-8 (c) つがる市柏観測点

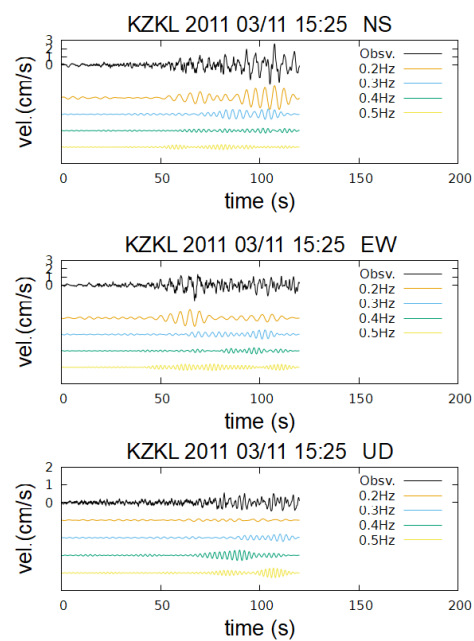


図 2-8 (d) つがる市木造観測点

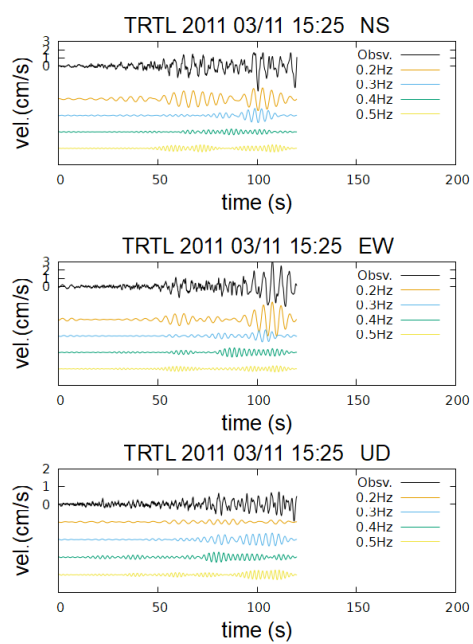


図 2-8 (e) 青森鶴田町鶴田観測点

第3章 地震動の水平動上下動スペクトル比から見た5地点の相違

3.1 はじめに

前章では、五所川原周辺の5つの観測点のうち、JMA 五所川原観測点と K-NET 五所川原観測点と他の3地点の卓越振動数が異なることを指摘した。このことが一般的なもののなかを地震記録を数多く集めて検討した。ただし、地震記録のスペクトルそのものには震源特性の影響が含まれる。その影響を除去するのに、水平動と上下動とのスペクトル比を取ることが行われている。さらに、Kawase et al. (2011)によると、地震動の水平動と上下動とのスペクトル比は地震基盤からの地表までの地盤構造と対応づけることが可能である。そこで、地震動記録を収集し、五所川原周辺の5つの観測点(JMA 五所川原観測点(GSGJ), K-NET 五所川原観測点(GSGK), つがる市柏木観測点(KSWL), つがる市木造観測点(KZKL), 青森鶴田町鶴田観測点(TRTL))で観測された地震動の水平動と上下動とのスペクトル比(EHVR)を求めた。

S波部分を解析対象とした。観測された地震動記録のS波初動付近から、4096個(40.96秒)のデータを取り出し、そのデータを高速フーリエ変換を用いフーリエ変換し、水平動のスペクトルを上下動のスペクトルで除する。Parzen ウィンドで平滑化を行っている。また、スペクトル比は平滑化後の各スペクトルを用いて求めた。

3.2 K-NET 五所川原観測点 (GSGK)

Kawase et al.(2011)が提案した考えを適用するために、K-NET 五所川原観測点において、2011年5月1日から2024年7月1日の期間内で最大加速度が 3 cm/s^2 から 50 cm/s^2 の記録を対象にし、さらにP波初動が記録されている表2に示す29記録を解析対象とした。震央位置を図3-1に示し、地震諸元を表3-1にまとめる。

表 3-1 地震動の水平動上下動スペクトル比を求めるために用いた地震の諸元

年	月日	時刻	震央位置	震央緯度	震央経度	深さ(km)	M
2011	5月04日	14:42:03	青森県三八上北地方	40.84	141.41	92	4.6
2011	6月04日	12:33:10	秋田県内陸北部	40.24	140.38	13	4.1
2011	6月23日	6:51:25	岩手県沖	39.95	142.59	36	6.9
2012	3月27日	20:01:19	岩手県沖	39.80	142.33	21	6.6
2012	5月24日	0:02:50	青森県東方沖	41.34	142.12	60	6.1
2012	12月07日	17:19:31	三陸沖	38.02	143.87	49	7.3
2014	6月09日	7:51:17	青森県東方沖	40.96	141.61	82	4.6
2014	8月10日	12:43:44	青森県東方沖	41.13	142.28	51	6.1
2014	10月11日	11:36:30	青森県東方沖	40.95	143.24	36	6.1
2015	5月13日	6:13:45	宮城県沖	38.86	142.15	46	6.8
2015	6月08日	15:01:37	青森県東方沖	41.45	142.02	66	5.6
2015	7月10日	3:33:10	岩手県内陸北部	40.35	141.56	88	5.7
2016	6月16日	14:21:51	内浦湾	41.95	140.99	11	5.3
2016	7月16日	22:13:10	秋田県内陸北部	40.29	140.92	8	4.6
2017	9月27日	5:22:39	岩手県沖	40.27	142.46	35	6.1
2018	9月06日	3:08:43	胆振地方中東部	42.69	142.01	37	6.7
2018	11月08日	7:35:34	陸奥湾	41.02	140.71	16	3.6
2019	8月15日	14:33:10	青森県三八上北地方	40.79	141.34	93	5.5
2019	8月29日	8:47:14	青森県東方沖	40.98	143.03	21	6.1
2019	12月19日	15:21:57	青森県東方沖	40.51	142.18	50	5.5
2021	5月01日	10:28:25	宮城県沖	38.17	141.74	51	6.8
2021	7月26日	11:16:46	青森県東方沖	41.48	142.14	52	5.2
2021	10月06日	2:46:30	岩手県沖	40.01	142.25	56	5.9
2022	11月17日	9:28:46	青森県東方沖	40.73	142.42	64	5.0
2023	3月28日	18:19:00	青森県東方沖	41.16	142.85	28	6.2
2023	6月11日	18:55:21	苫小牧沖	42.56	141.91	136	6.2
2023	8月11日	9:15:06	青森県東方沖	41.12	142.91	28	6.2
2023	11月20日	6:01:57	青森県東方沖	41.17	142.29	52	5.9
2024	4月02日	4:24:59	岩手県沿岸北部	40.13	141.71	71	6.0

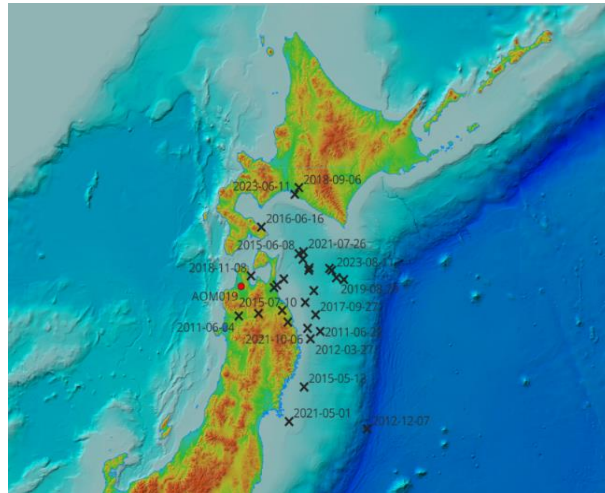


図 3-1 検討に用いた地震記録に対する震央位置

地震の発生時刻と理論走時から S 波初動時刻を求め、それより 2 秒前から 40.96 秒間のスペクトル振幅を求めた。対象区間の 40.96 秒間の最初と最後の 2 秒間にはコサイン型のテーパーをかけた。また、Parzen ウィンドでスペクトルの平滑化を行った。得られたスペクトルから水平上下動比(EHVR)を求め、それらを平均した。それぞれの EHVR と平均値を図 3-2 に示す。最低次のピーク振動数は 0.3Hz 付近にあり、NS/UD と EW/UD ではその高さは同程度である。また、1.0Hz 付近のスペクトル比の形状は 2 成分で異なる。

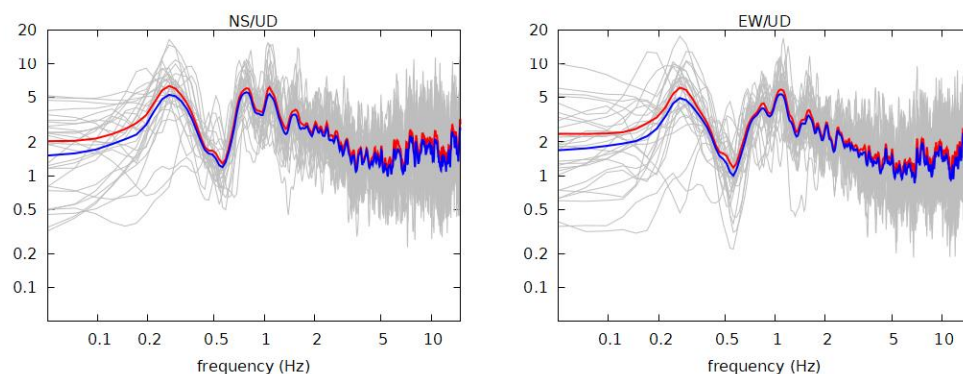


図 3-2 GSGK における地震動の水平動上下動比(EHVR)。左は NS/UD、右は EW/UD。灰色は個々の地震の EHVR であり、赤色実線は算術平均、青色実線は幾何平均。

3.3 JMA 五所川原観測点 (GSGJ)

JMA 五所川原観測点における水平上下動比 (EHVR) については、片岡 (2024) の算出結果を用いた。

片岡 (2024) によると JMA 観測点において、2003 年以降で震度 3 以上を記録した地震動のうち、表 3-2 に示す 19 記録を解析対象とした。対象には第 2 章で扱った、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の本震および直後に発生した大規模余震は含まれていない。震央位置を図 3-3 に示し、地震諸元を表 3 にまとめる。用いた地震記録のうち、2003 年 9 月 26 日に起きた十勝沖地震の最大余震記録の震度が 4 であり、それ以外は震度 3 である。

表 3-2 地震動の水平動上下動スペクトル比を求めるために用いた地震の諸元

年	月日	時刻	震央位置	震央緯度	震央経度	深さ (km)	M
2003	5月26日	18:24:33	宮城県沖	38.82	141.65	72	7.1
2003	9月26日	4:50:07	十勝沖	41.78	144.08	45	8.0
2003	9月26日	6:08:02	十勝沖	41.71	143.69	21	7.1
2008	6月14日	8:43:45	岩手県内陸南部	39.03	140.88	8	7.2
2008	7月24日	0:26:20	岩手県沿岸北部	39.73	141.64	108	6.8
2011	3月09日	11:45:13	三陸沖	38.33	143.28	8	7.3
2011	3月11日	20:36:40	岩手県沖	39.23	142.58	24	6.7
2011	3月12日	4:46:46	秋田県沖	40.39	139.09	4	6.4
2011	6月23日	6:50:51	岩手県沖	39.95	142.59	36	6.9
2012	5月17日	0:59:01	青森県津軽北部	40.72	140.45	15	3.6
2012	5月24日	0:02:27	青森県東方沖	41.34	142.12	60	6.1
2012	12月07日	17:18:31	三陸沖	38.02	143.87	49	7.3
2013	2月02日	23:17:36	十勝地方南部	42.70	143.23	102	6.5
2014	8月10日	12:43:18	青森県東方沖	41.13	142.28	51	6.1
2015	7月10日	3:32:51	岩手県内陸北部	40.35	141.56	88	5.7
2016	1月14日	12:25:33	浦河沖	41.97	142.80	52	6.7
2019	8月29日	8:46:39	青森県東方沖	40.98	143.03	21	6.7
2020	12月21日	2:23:22	青森県東方沖	40.78	142.69	43	6.5
2021	2月13日	23:07:51	福島県沖	37.73	141.70	55	7.3

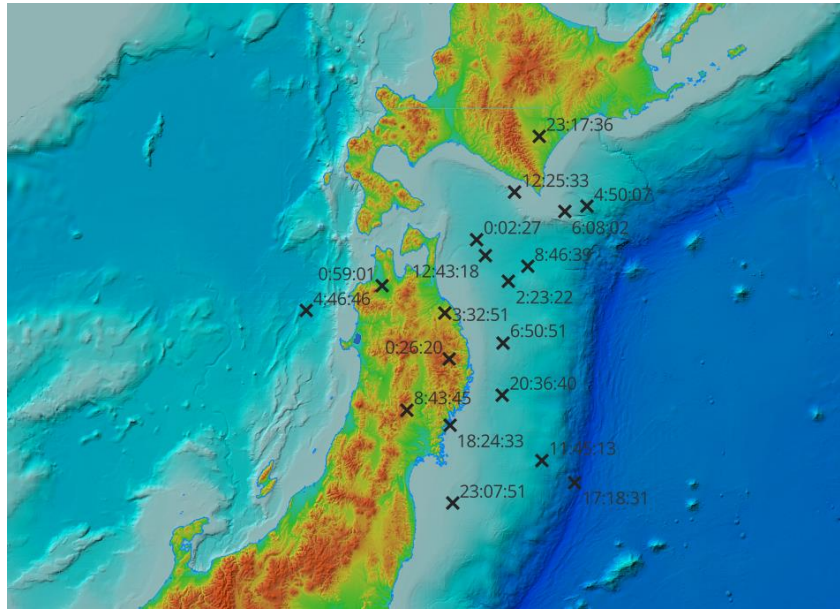


図 3-3 検討に用いた地震記録に対する震央位置

得られたスペクトルから水平上下動比 (EHVR) を求め、それらを平均した。それぞれの EHVR と平均値を図 3-4 に示す。最低次のピーク振動数は 0.3Hz 弱付近にあるが、NS/UD と EW/UD ではその高さが異なる。また、1.0Hz 付近のスペクトル比の形状も 2 成分で異なる。これらのことは、津軽平野という盆地構造の影響があると考ええる。

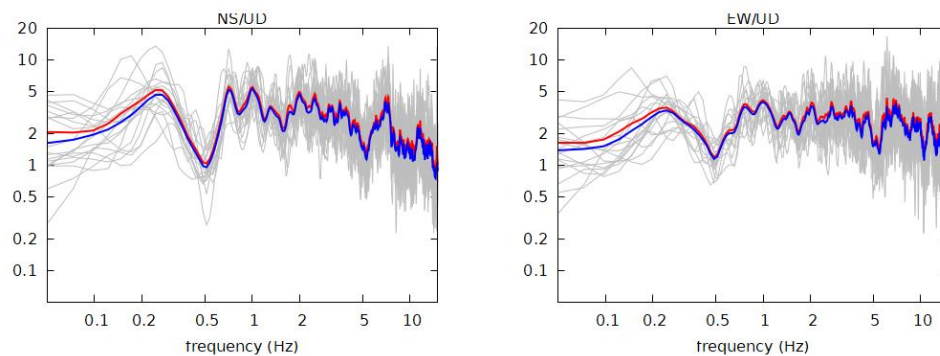


図 3-4 GSGJ における地震動の水平動上下動比 (EHVR)。左は NS/UD、右は EW/UD。灰色は個々の地震の EHVR であり、赤色実線は算術平均、青色実線は幾何平均。

3.4 その他3地点(KSWL, KZKL, TRTL)

つがる市柏観測点とつがる市木造観測点，青森鶴田町鶴田観測点は県が設置したものであり，地震記録が公開されることは稀である．よって，多くの地震記録を収集した上での検討は行えない．ただし，幸いなことに，2011年3月11日に観測された地震動記録を青森県危機管理局の好意により，もらい受けていた．そこで，それを利用する．具体的には，表3-4に示す8記録を解析対象とした．しかし，つがる市柏観測点では2011年3月11日20:36の記録がないため，柏観測点では7記録を解析対象とした．震央位置を図3-5に示し，地震諸元を表3-4にまとめる．

表 3-4 地震動の水平動上下動スペクトル比を求めるために用いた地震の諸元

年	月日	時刻	震央位置	震央緯度	震央経度	深さ(km)	M
2011	3月11日	14:46:18	三陸沖	38.10	142.85	24	9.0
2011	3月11日	15:06:11	岩手県沖	39.03	142.39	29	6.5
2011	3月11日	15:08:53	岩手県沖	39.82	142.77	32	7.4
2011	3月11日	15:49:50	岩手県沖	40.10	142.62	7	5.9
2011	3月11日	16:29:00	岩手県沖	39.02	142.30	17	6.6
2011	3月11日	18:42:20	岩手県沖	39.49	142.75	24	5.6
2011	3月11日	19:10:40	岩手県沖	39.33	142.15	44	6.2
2011	3月11日	20:36:40	岩手県沖	39.22	142.57	24	6.7

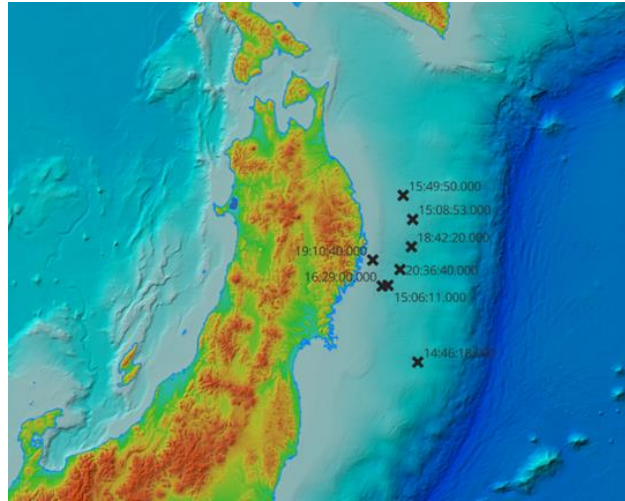


図 3-5 検討に用いた地震記録に対する震央位置

得られたスペクトルから水平上下動比 (EHVR) を求め、それらを平均した。それぞれの EHVR と平均値をつがる市柏観測点は図 3-6、つがる市木造観測点は図 3-7、青森鶴田町鶴田観測点は図 3-8 に示す。3 地点において最低次のピーク振動数は 0.2Hz より低いところがあり、NS/UD と EW/UD ではその高さが異なる。また、その次のピークが 0.5Hz 付近で確認できる。

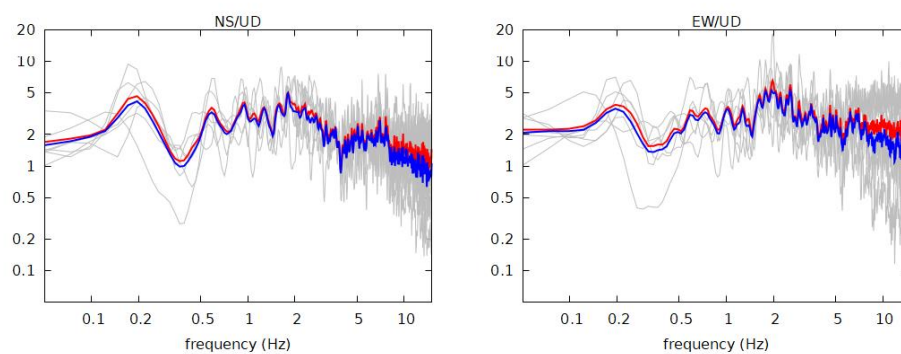


図 3-6 KSWL における地震動の水平動上下動比 (EHVR)。左は NS/UD、右は EW/UD。灰色は個々の地震の EHVR であり、赤色実線は算術平均、青色実線は幾何平均。

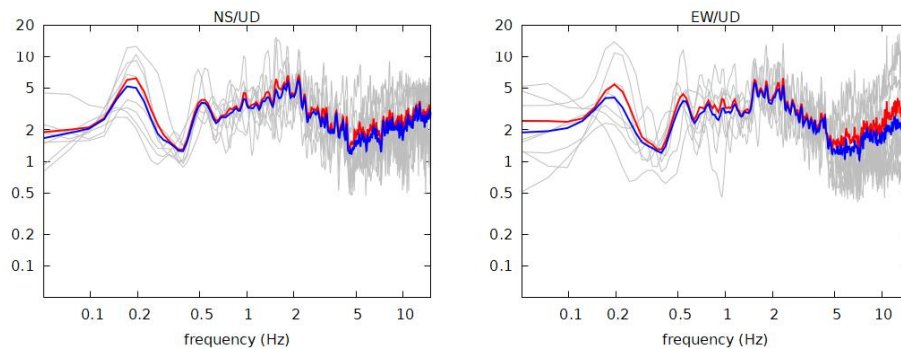


図 3-7 KZKL における地震動の水平動上下動比 (EHVR)．左は NS/UD，右は EW/UD．
灰色は個々の地震の EHVR であり，赤色実線は算術平均，青色実線は幾何平均．

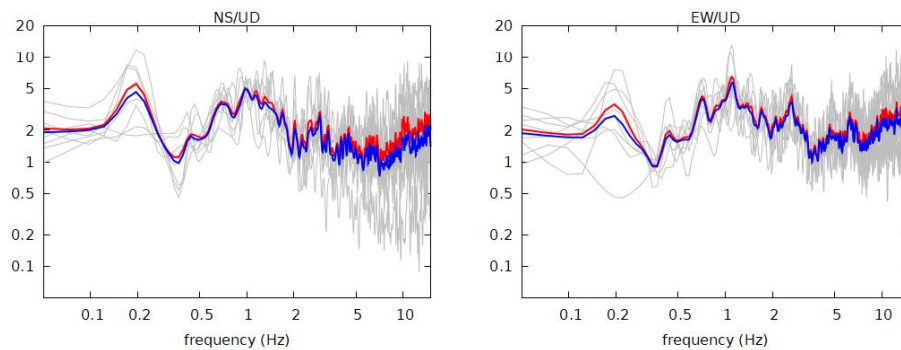


図 3-8 TRTL における地震動の水平動上下動比 (EHVR)．左は NS/UD，右は EW/UD．
灰色は個々の地震の EHVR であり，赤色実線は算術平均，青色実線は幾何平均．

3.5 考察

五所川原市周辺の 5 地点において，地震動記録を収集した．本節では 5 地点の EHVR を比較して考察する．5 地点の EHVR を図 3-9 に示す．JMA 五所川原観測点と K-NET 五所川原観測点は，最低次のピークは 0.2Hz よりも高い振動数で見られ，1.0Hz 前後のピークも顕著に見られる．しかし，他の 3 地点は，最低次のピークは 0.2Hz よりも低く，その次のピークは 0.5Hz で見られる．このことから，JMA 五所川原観測点と K-NET 五所川原観測点に比べて他の 3 地点は地震基盤より上の堆積層が厚いことが考えられる．

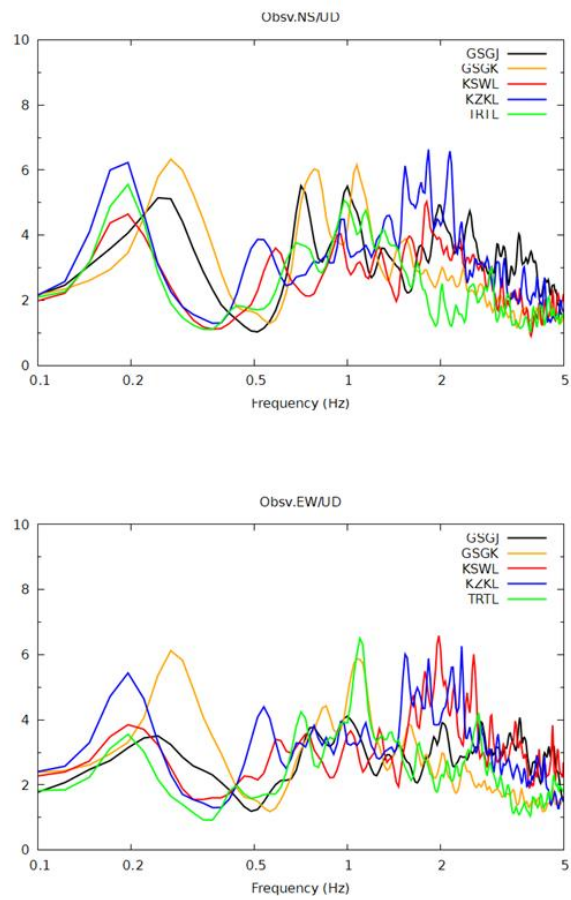


図 3-9 5 地点における水平動上下動比 (EHVR)．上は NS/UD，下は EW/UD．

第 4 章 地下構造の推定

4.1 地下構造の推定方針

前述したように、2011 年東北地方太平洋沖地震の際の津軽平野内の地震動記録を分析したところ、観測点の距離が近いにも関わらず、同じ周期帯域のスペクトル振幅が大きく異なることが確認されていた。さらに、五所川原市周辺の 5 観測点で多くの地震動の水平動上下動比を求めたところ、五所川原市内の 2 つの観測点とそれ以外の観測点では、最低次のピークが異なっていた。

地震動の特性を理解するためには、地震観測点直下の地下構造を把握する必要がある。そこで、五所川原市周辺の 5 観測点の観測点直下の地下構造を推定する。ただし、JMA 五所川原観測点に関しては、片岡 (2024) の推定結果を用いる。そのために、まず対象地点の位置を指定して、J-SHIS で公開されている WebAPI を用いて深部地下構造を入手した。J-SHIS の深部地盤構造は全国にわたって定義されていることから、これを基本とすることにした。

Kawase et al. (2011)によると、水平成層構造においては、地表における水平動と上下動とのスペクトル比(EHVR)は、地震基盤に鉛直入射する SH 波、P 波の地表までの増幅関数(TH_{SH} , TH_P)と式(1)で示される関係になっている。

$$EHVR = \sqrt{\frac{\alpha TH_{SH}}{\beta TH_P}} \quad (1)$$

ここで、 α , β はそれぞれ、地震基盤の P 波速度、S 波速度である。

このことを利用して、層構造を仮定し、総当たりの計算を繰り返して地下構造を推定する。総当たりの計算の具体的な方法は以下である。第 l 層の層厚(th_l)を式(2)の

ように変化させ、各々のモデルについて式(1)の右辺を計算し、それと観測結果である EHVR との式(3)に記す *misfit* が最小となる地下構造を最適な地下構造とした。

$$th_l = th_{l_0} \cdot r^i \quad (i = -n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n) \quad (2)$$

ここで th_0 は第 th_0 層の層厚の初期値である。また、上式の r は変化の度合いを決める定数で、各層毎に指定する。式(2)中の i は、式にあるように、 $-n$ から n まで変化するので、結局、初期値の r^{-n} 倍から r^n 倍の間を $2n+1$ 個に分けた層厚モデルを作成して、理論値を計算することになる。

残差 (*misfit*) は式(3)で定義している。ここで、 $SPR(f)$ は観測結果のスペクトル比 (式(1)の左辺)、 $z(f)$ は式(1)の右辺である。この関数は振動数によって大きく変化することから、単純な差の2乗ではピーク付近の影響が大きくなるので、理論値で基準化している。

$$misfit = \sum_i \left\{ \frac{SPR(f_i) - z(f)}{z(f)} \right\}^2 \quad (3)$$

4.2 K-NET 五所川原観測点 (GSGK)

K-NET 五所川原観測点における地下構造の推定に際して、J-SHIS の地下構造は地表付近では地震波速度が実際よりも速いので、浅層部分については強震観測網の土質データを用いる。また、片岡(2018)では、深さ 50m 以深の S 波速度を 450m/s としていることから S 波速度が 400m/s の層を仮定し、表 4-1 の Pre-set の欄に示すような初期モデルを作成した。その際の *misfit* 値を計算した順に図 4-1 に示す。図 4-1 中の A(1st best) と B(2nd best) において最小の *misfit* を与える地下構造は A であった。そこで、A の値を初期値としてさらに総当たり法により、最適値を求めた。その際の *r* と *n* の値も表 5 に示している。また、残差を計算する振動数範囲を 0.1Hz から 3.0Hz に指定し水平 2 成分で EHVR が異なることから、NS/UD を対象とし、各観測点における推定した地下構造との残差が最小となるよう計算をした。

表 4-1 GSGK の地盤モデルと逆解析のパラメータ

		1 st BF				2 nd BF				
		Pre-set 層厚(m)		Result 層厚(m)		Pre-set 層厚(m)		Result 層厚(m)		
Layer	Vs	初期値	r	n	1 st best	2 nd best	初期値	r	n	1 st best
1	100	2.0	1.0	0	2.0	2.0	2.0	1.0	0	2.0
2	100	7.0	1.0	0	7.0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
3	140	2.0	1.0	0	2.0	2.0	2.0	1.0	0	2.0
4	120	2.0	1.0	0	2.0	2.0	2.0	1.0	0	2.0
5	140	22.0	1.0	0	22.0	22.0	22.0	1.0	0	22.0
6	400	60.0	1.2	2	72.0	86.4	72.0	1.1	2	65.5
7	600	240.0	1.2	2	345.6	345.6	345.6	1.1	2	380.2
8	1100	235.0	1.2	2	163.2	163.2	163.2	1.1	2	163.2
9	1400	235.0	1.2	2	282.0	338.4	282.0	1.1	2	282.0
10	2100	539.0	1.2	2	374.3	374.3	374.3	1.1	2	340.3
11	3100	665.0	1.2	2	957.6	554.2	957.6	1.1	2	1158.7
12	3300	infinity	—	—			infinity	—	—	
misfit					5.6874	6.6274				4.6075

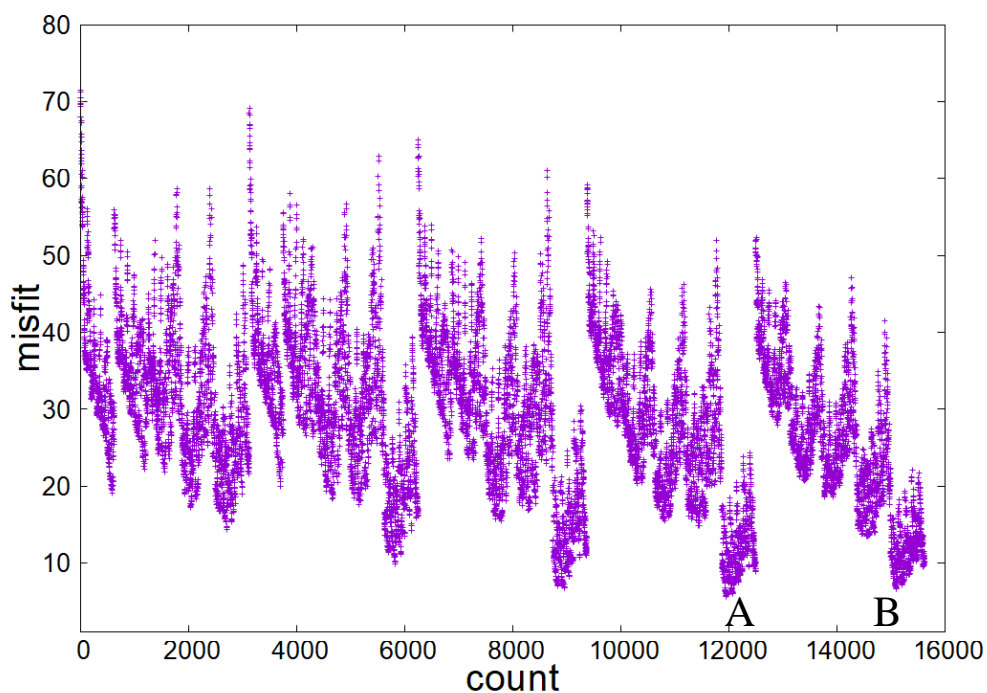


図 4-1 GSGK の計算した各モデルの misfit の値

最適モデルから算出される鉛直下方から入射する SH 波，P 波の増幅倍率と EHVR の理論値を図 4-2 に示す．図 4-2 には初期モデル(Initial model)も描いている．初期モデルから計算した EHVR の理論値よりも最適モデル(Fit model)の方が，0.2Hz 付近のピークに対する対応が良いことが確認できた．また，1.0Hz 付近にある 2 つのピークも最適モデルは再現されている．

最適モデルの速度の深さ方向の分布を 3 つの深度区間に分けて図 4-3 に示す．深部については J-SHIS モデルと比較してある．地震基盤の深さは J-SHIS モデルよりも 800m 程度浅くなることが確認できた．

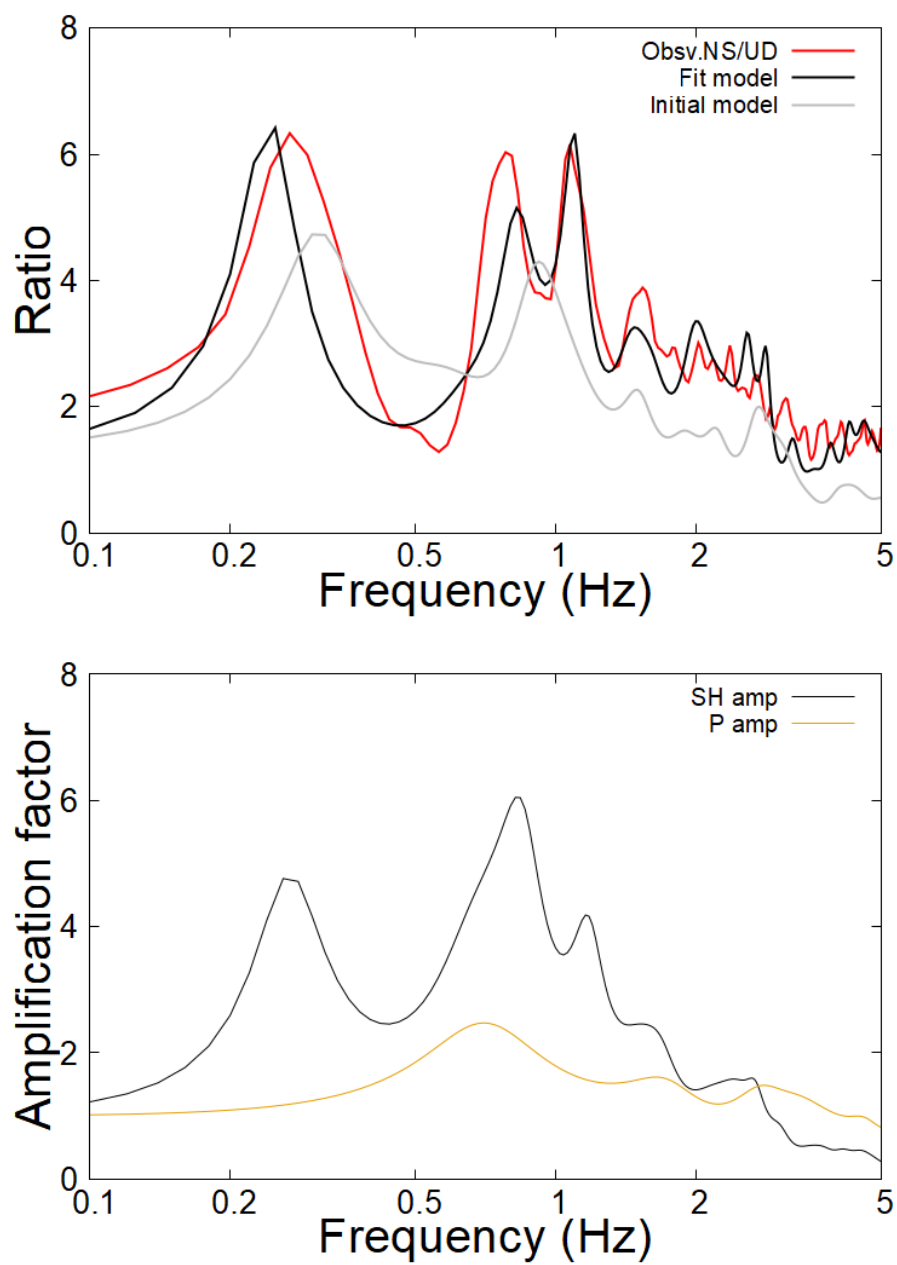


図 4-2 GSGK においての最適モデルによる鉛直下方から伝播する SH 波、P 波の理論増幅値(下)と理論 EHVR(上)

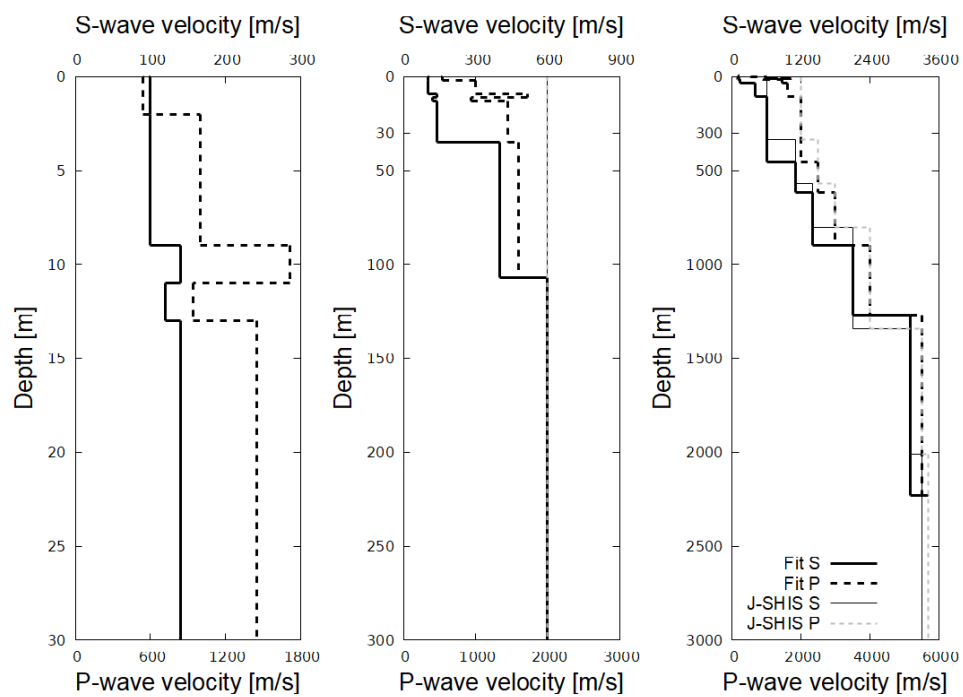


図 4-3 GSGK の最適モデルの速度分布と J-SHIS モデルの速度分布との比較

4.3 JMA 五所川原観測点 (GSGJ)

JMA 五所川原観測点における地下構造の推定結果については、片岡(2024)の推定結果を用いた。片岡(2024)では本論文とほぼ同じ方法で地下構造を推定しているが、その概要を紹介する。

微動アレー探査で推定した表層部分の速度構造の下に S 波速度 400m/s の層を仮定し、表 4-2 の Pre-set の欄に示すような初期モデルを作成した。水平 2 成分で EHVR が異なることから、NS/UD を対象とし、*misfit*値を計算する区間を 0.2Hz から 1.5Hz として地下構造を総当たりの求めた。

総当たりで計算した全ての*misfit*値を計算した順に図 4-4 に示す。本来なら最小の*misfit*を与える地下構造を採用するべきだが、図 4-4 中の A(2nd best)と B(1st best)を比較したところ、低振動数側のピークの合致が良いのは、A であった。そこで、片岡(2024)では A の値を初期値としてさらに総当たり法により、最適値を求めている。その際の*r*と*n*の値も表 4-2 に示している。この結果を最適モデルとした。

表 4-2 GSGJ の地盤モデルと逆解析のパラメータ (片岡, 2024 から引用)

		1 st BF				2 nd BF			
		Pre-set 層厚(m)			Result 層厚(m)		Pre-set 層厚(m)		
Layer	Vs	初期値	r	n	1 st best	2 nd best	初期値	r	n
1	105	3.0	1.0	0	3.0	3.0	3.0	1.0	0
2	114	7.0	1.0	0	7.0	7.0	7.0	1.0	0
3	151	7.0	1.0	0	7.0	7.0	7.0	1.0	0
4	180	6.0	1.0	0	6.0	6.0	6.0	1.0	0
5	205	6.0	1.0	0	6.0	6.0	6.0	1.0	0
6	226	6.0	1.0	0	6.0	6.0	6.0	1.0	0
7	246	6.0	1.0	0	6.0	6.0	6.0	1.0	0
8	400	63.0	1.2	2	75.6	63.0	63.0	1.2	2
9	600	260.0	1.3	3	439.4	338.0	338.0	1.3	3
10	1100	265.0	1.3	3	265.0	203.8	203.8	1.3	3
11	1400	239.0	1.3	3	525.1	108.8	108.8	1.3	3
12	2100	515.0	1.3	3	515.0	669.5	669.5	1.3	3
13	3100	629.0	1.3	3	286.3	817.7	817.7	1.3	3
14	3300	infinity	—	—			infinity	—	—

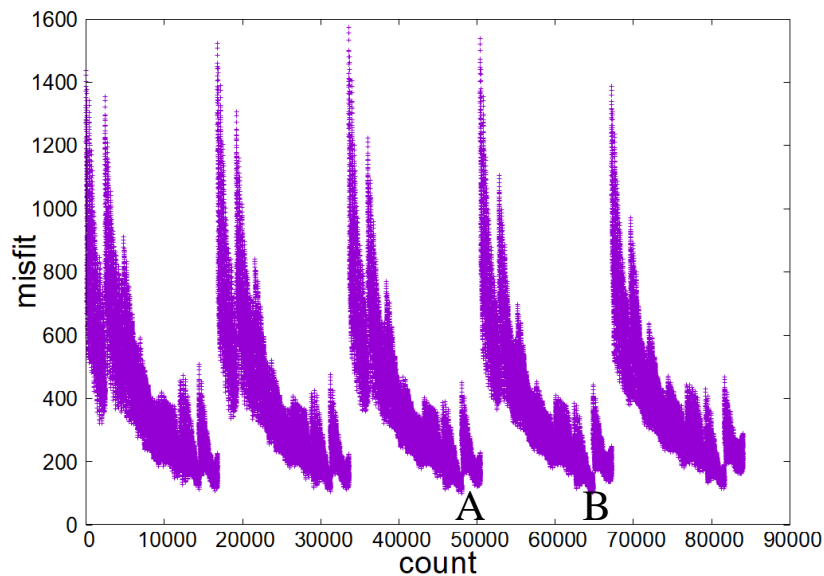


図 4-4 GSGJ の計算した各モデルの misfit の値（片岡，2024 から引用）

最適モデルから算出される鉛直下方から入射する SH 波，P 波の増幅倍率と EHVR の理論値と観測値とを比較して図 4-5 に示す．図 4-5 には初期モデル(Initial model)も描いている．初期モデルから計算した EHVR の理論値よりも最適モデル(Fit model)の方が，0.2Hz 付近のピーク振動数に対する対応が良いことが確認できる．また，0.5Hz から 1.0Hz の間にある 2 つのピークも最適モデルは再現されている．

最適モデルの速度の深さ方向の分布を 3 つの深度区間に分けて図 4-6 に示す．深部については J-SHIS モデルと比較してある．深さ 40m 程度までは S 波速度が漸増している．地震基盤の深さは J-SHIS モデルよりも 150m 程度浅くなることが確認できた．

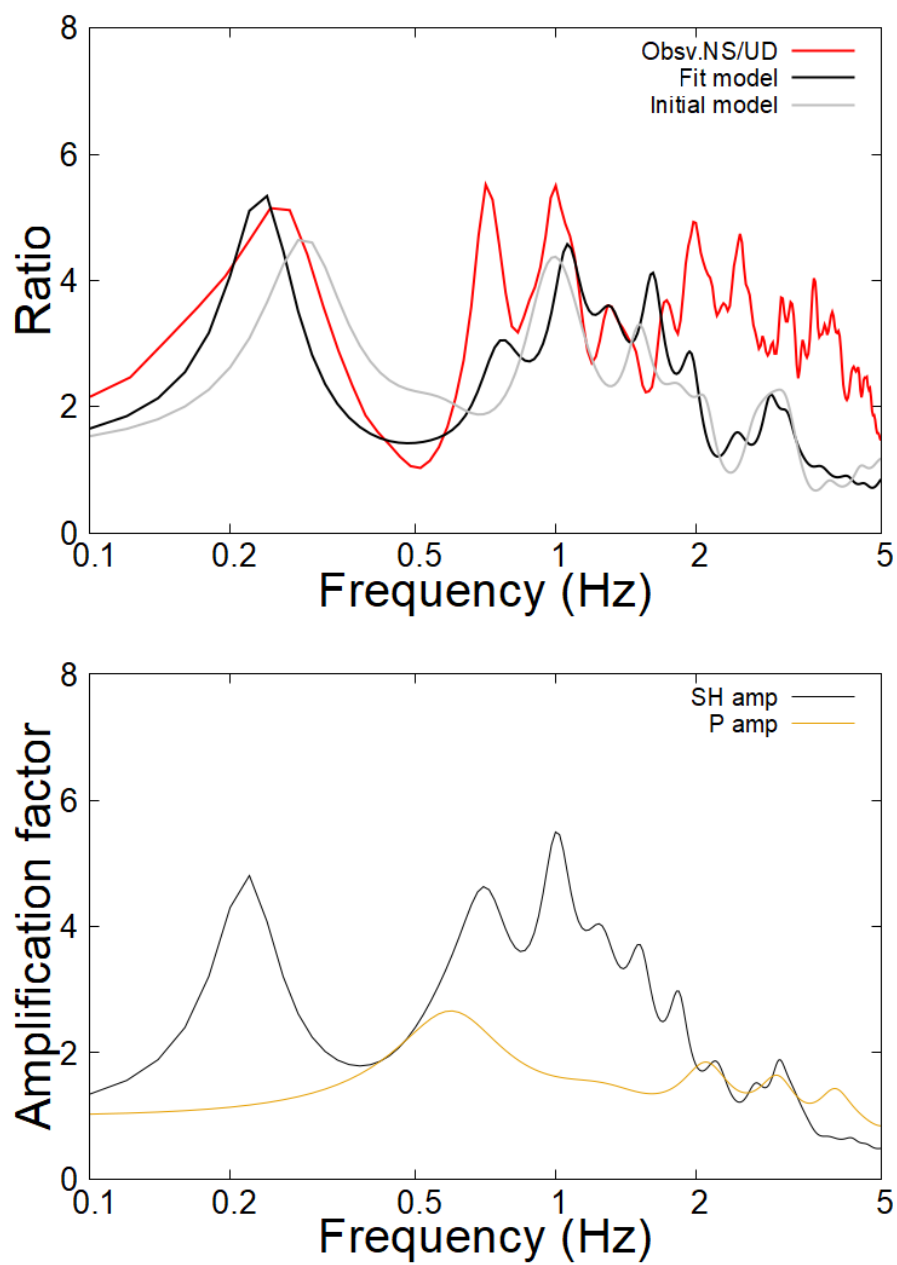


図 4-5 GSGJ における最適モデルによる鉛直下方から伝播する SH 波, P 波の理論増幅値(下)と理論 EHVR(上)

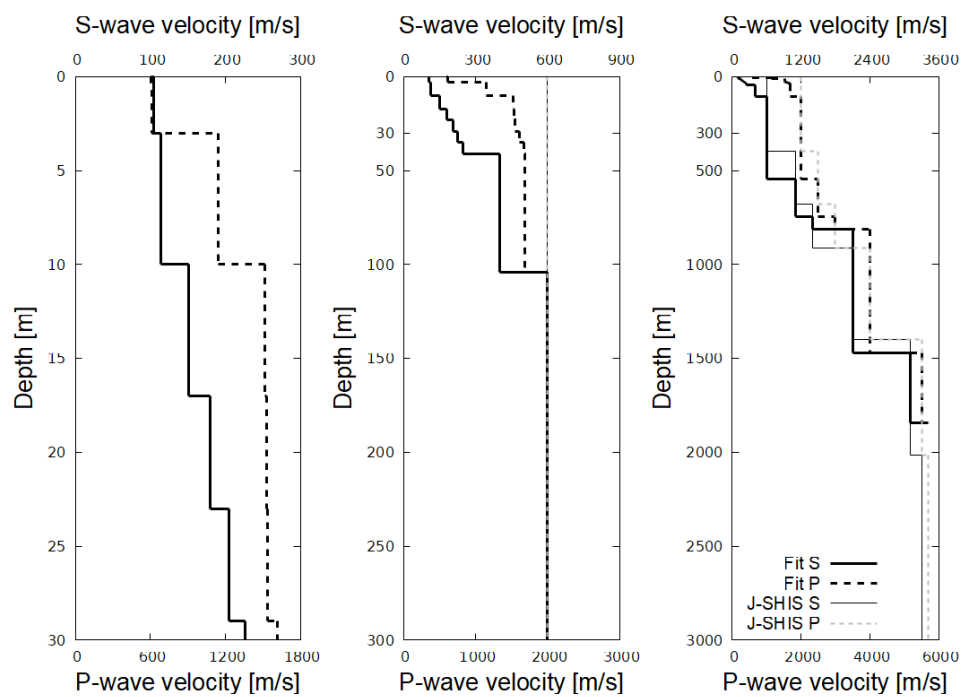


図 4-6 GSGJ の最適モデルの速度分布と J-SHIS モデルの速度分布との比較

4.4 その他 3 地点 (KSWL, KZKL, TRTL)

前節での JMA 五所川原観測点における表層を用いて地下構造を推定していく．その表層の下に S 波速度 400m/s の層を仮定し，表 4-3～4-5 の Pre-set の欄に示すような初期モデルを作成した．水平 2 成分で EHVR が異なることから，NS/UD を対象とし，*misfit*値を計算する区間を 0.1Hz から 3.0Hz として地下構造を求めた．

総当たりに計算した際の*misfit*値を計算した順に地点に応じて図 4-7～4-9 に示す．図 4-7 中の B(1st best)を初期値にして再度総当たりを行い，最適値を求めた．その際の r と n の値も表 4-3 に示している．図 4-8 中の B(1st best)を初期値にして再度総当たりを行い，最適値を求めた．その際の r と n の値も表 4-4 に示している．図 4-9 中の A(1st best)を初期値として再度総当たりを行い，最適値を求めた．その際の r と n の値も表 4-5 に示している．これらの結果を最適モデルとした．

表 4-3 KSWL の地盤モデルと逆解析のパラメータ

	1 st BF				2 nd BF			
	Pre-set 層厚(m)		Result 層厚(m)		Pre-set 層厚(m)		Result 層厚(m)	
Layer Vs	初期値	r	n	1 st best	初期値	r	n	1 st best
1 105	3.0	1.0	0	3.0	3.0	1.0	0	3.0
2 114	7.0	1.0	0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
3 151	7.0	1.0	0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
4 180	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
5 205	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
6 226	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
7 246	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
8 400	55.0	1.3	3	32.5	32.5	1.2	2	27.1
9 600	239.0	1.3	3	403.9	403.9	1.2	2	403.9
10 1100	235.0	1.3	3	516.3	516.3	1.2	2	516.3
11 1400	235.0	1.3	3	397.1	397.1	1.2	2	397.1
12 2100	539.0	1.3	3	700.7	700.7	1.2	2	840.8
13 3100	665.0	1.3	3	1461.0	1461.0	1.2	2	1217.5
14 3300	infinity	—	—		infinity	—	—	
misfit				9.4614				9.1326

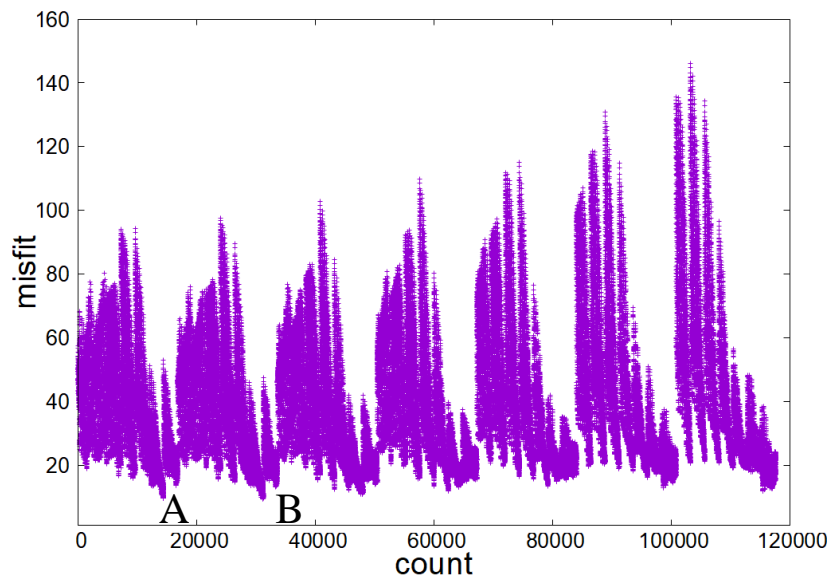


図 4-7 KSWL の計算した各モデルの misfit の値

表 4-4 KZKL の地盤モデルと逆解析のパラメータ

		1 st BF				2 nd BF			
		Pre-set 層厚(m)			Result 層厚(m)	Pre-set 層厚(m)			Result 層厚(m)
Layer	Vs	初期値	r	n	1 st best	初期値	r	n	1 st best
1	105	3.0	1.0	0	3.0	3.0	1.0	0	3.0
2	114	7.0	1.0	0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
3	151	7.0	1.0	0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
4	180	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
5	205	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
6	226	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
7	246	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
8	400	55.0	1.3	3	71.5	71.5	1.2	2	49.7
9	600	239.0	1.3	3	310.7	310.7	1.2	2	258.9
10	1100	235.0	1.3	3	516.3	516.3	1.2	2	619.6
11	1400	235.0	1.3	3	516.3	516.3	1.2	2	430.2
12	2100	539.0	1.3	3	1184.2	1184.2	1.2	2	822.4
13	3100	665.0	1.3	3	302.7	302.7	1.2	2	252.2
14	3300	infinity	—	—		infinity	—	—	
misfit									
		12.296				10.610			

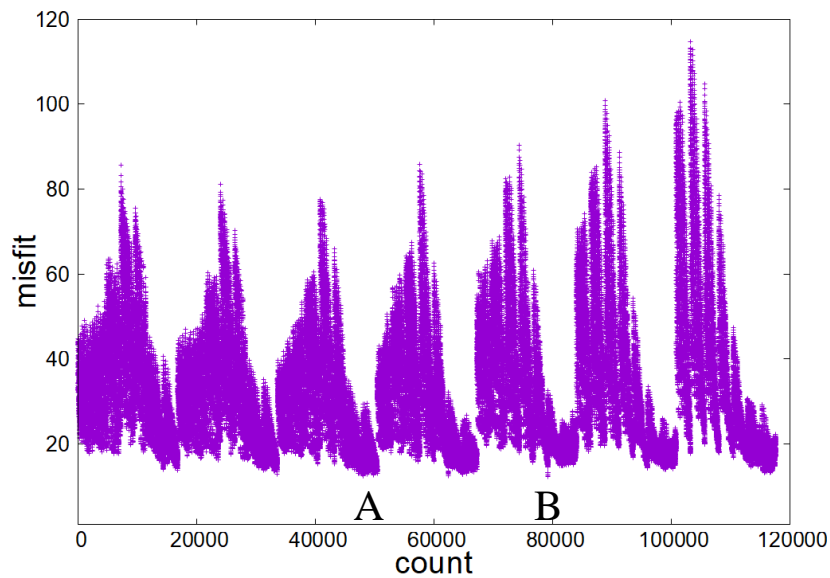


図 4-8 KZKL の計算した各モデルの misfit の値

表 4-5 TRTL の地盤構造モデルと逆解析パラメータ

		1 st BF				2 nd BF			
		Pre-set 層厚(m)		Result 層厚(m)		Pre-set 層厚(m)		Result 層厚(m)	
Layer	Vs	初期値	r	n	1 st best	初期値	r	n	1 st best
1	105	3.0	1.0	0	3.0	3.0	1.0	0	3.0
2	114	7.0	1.0	0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
3	151	7.0	1.0	0	7.0	7.0	1.0	0	7.0
4	180	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
5	205	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
6	226	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
7	246	6.0	1.0	0	6.0	6.0	1.0	0	6.0
8	400	55.0	1.3	3	71.5	71.5	1.3	3	120.8
9	600	239.0	1.3	3	525.1	525.1	1.3	3	682.6
10	1100	235.0	1.3	3	235.0	235.0	1.3	3	180.8
11	1400	235.0	1.3	3	107.0	107.0	1.3	3	63.3
12	2100	539.0	1.3	3	539.0	539.0	1.3	3	414.6
13	3100	665.0	1.3	3	864.5	864.5	1.3	3	1461.0
14	3300	infinity	—	—		infinity	—	—	
misfit		10.9200				9.9169			

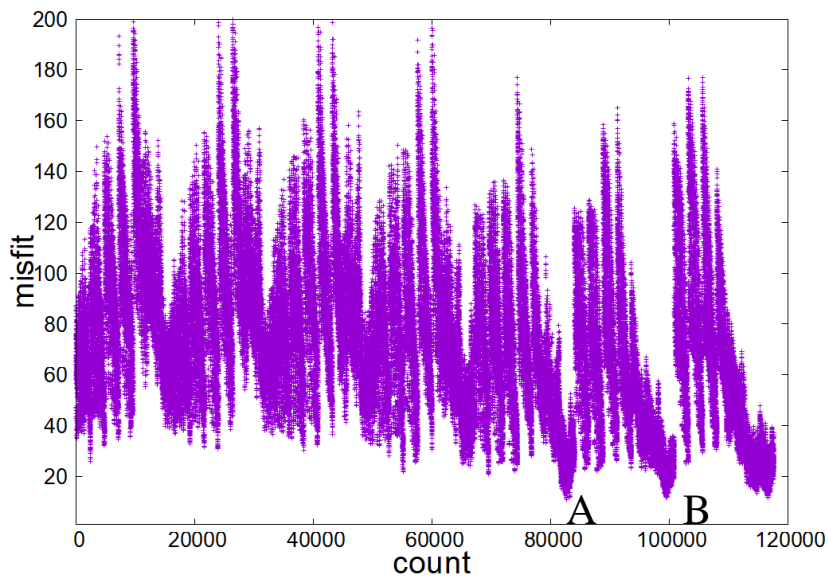


図 4-9 TRTL の計算した各モデルの misfit の値

最適モデルから算出される鉛直下方から入射する SH 波，P 波の増幅倍率と EHVR の理論値を図 4-10～4-12 に示す．図 4-10～4-12 には初期モデル(Initial model)も描いている．つがる市柏観測点とつがる市木造観測点の最適モデル(Fit model)は，0.2Hz 付近のピークは観測値よりも低振動数側に見られた．また，青森鶴田町鶴田観測点の最適モデル(Fit model)は，初期モデルから計算した EHVR の理論値よりも最適モデル(Fit model)の方が，0.2Hz 付近のピーク振動数に対する対応が良いことが確認できた．0.5Hz 付近にあるピークもつがる市木造観測点の最適モデルは再現されているが，つがる市柏観測点と青森鶴田町鶴田観測点の最適モデルは再現がされていない．

最適モデルの速度の深さ方向の分布を 3 つの深度区間に分けて図 4-13～4-15 に示す．深部については J-SHIS モデルと比較してある．最適モデルの地震基盤の深さは J-SHIS モデルよりも 3 地点とも深くなった．

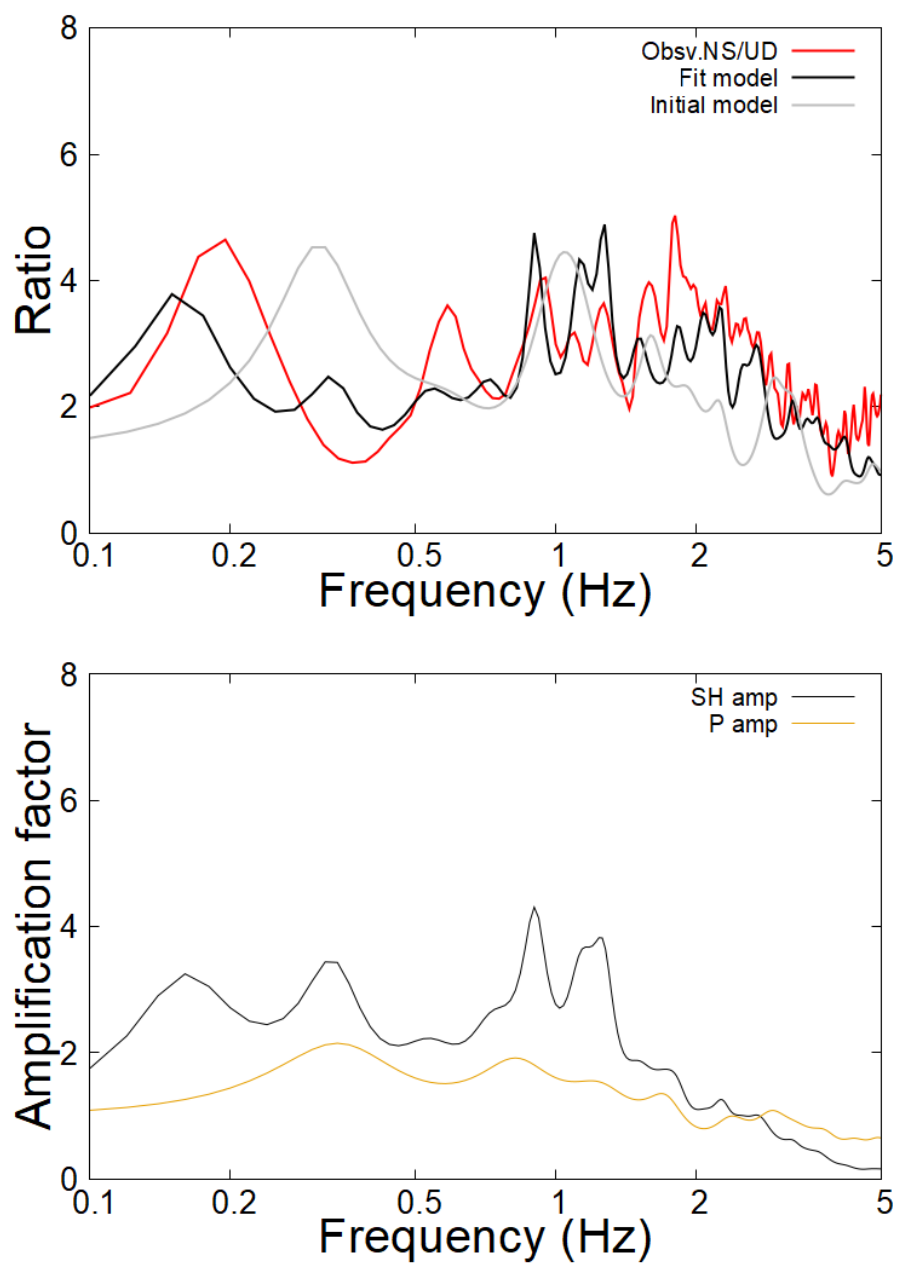


図 4-10 KSWL における最適モデルによる鉛直下方から伝播する SH 波, P 波の理論増幅値(下)と理論 EHVR(上)

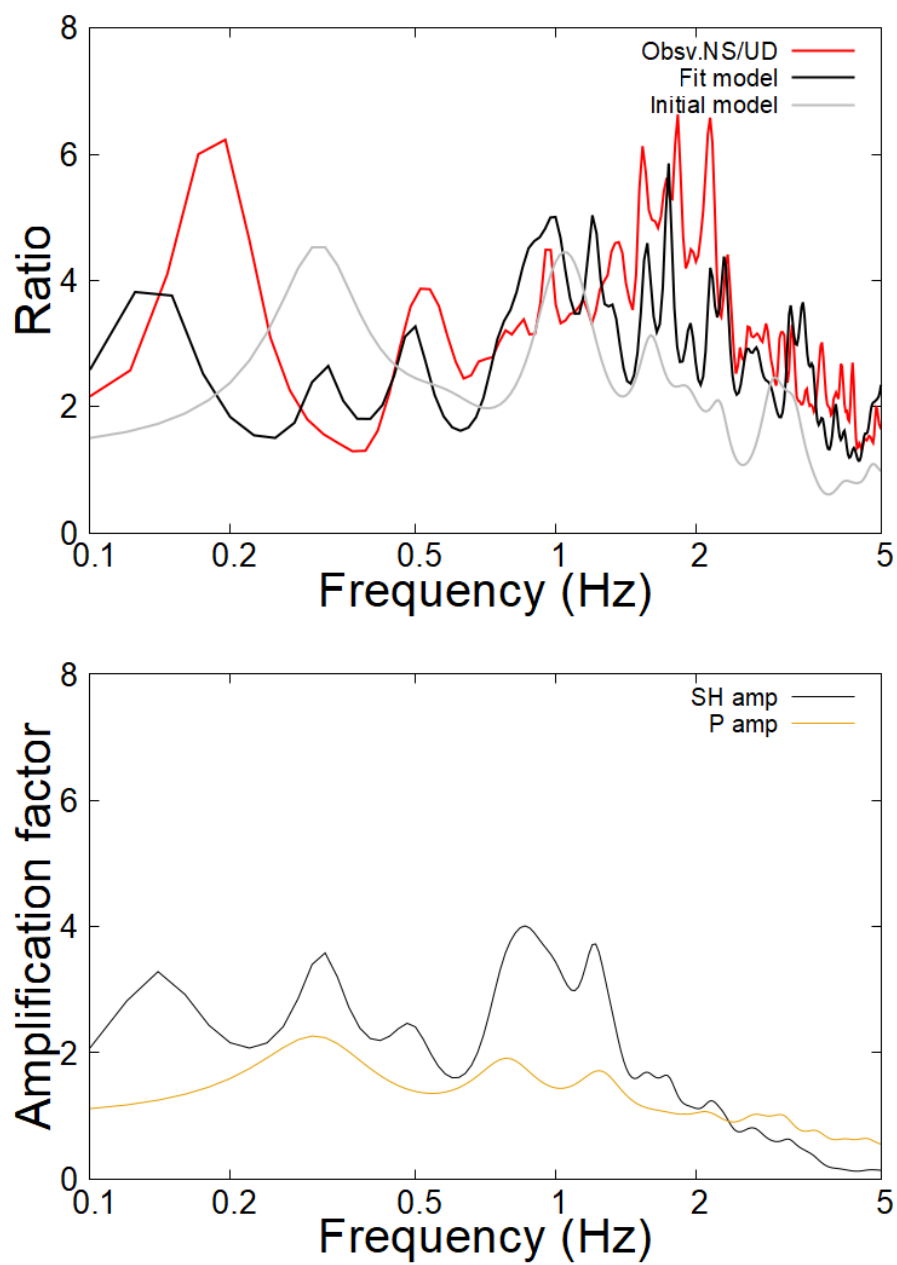


図 4-11 KZKL においての最適モデルによる鉛直下方から伝播する SH 波, P 波の理論増幅値(下)と理論 EHVR(上)

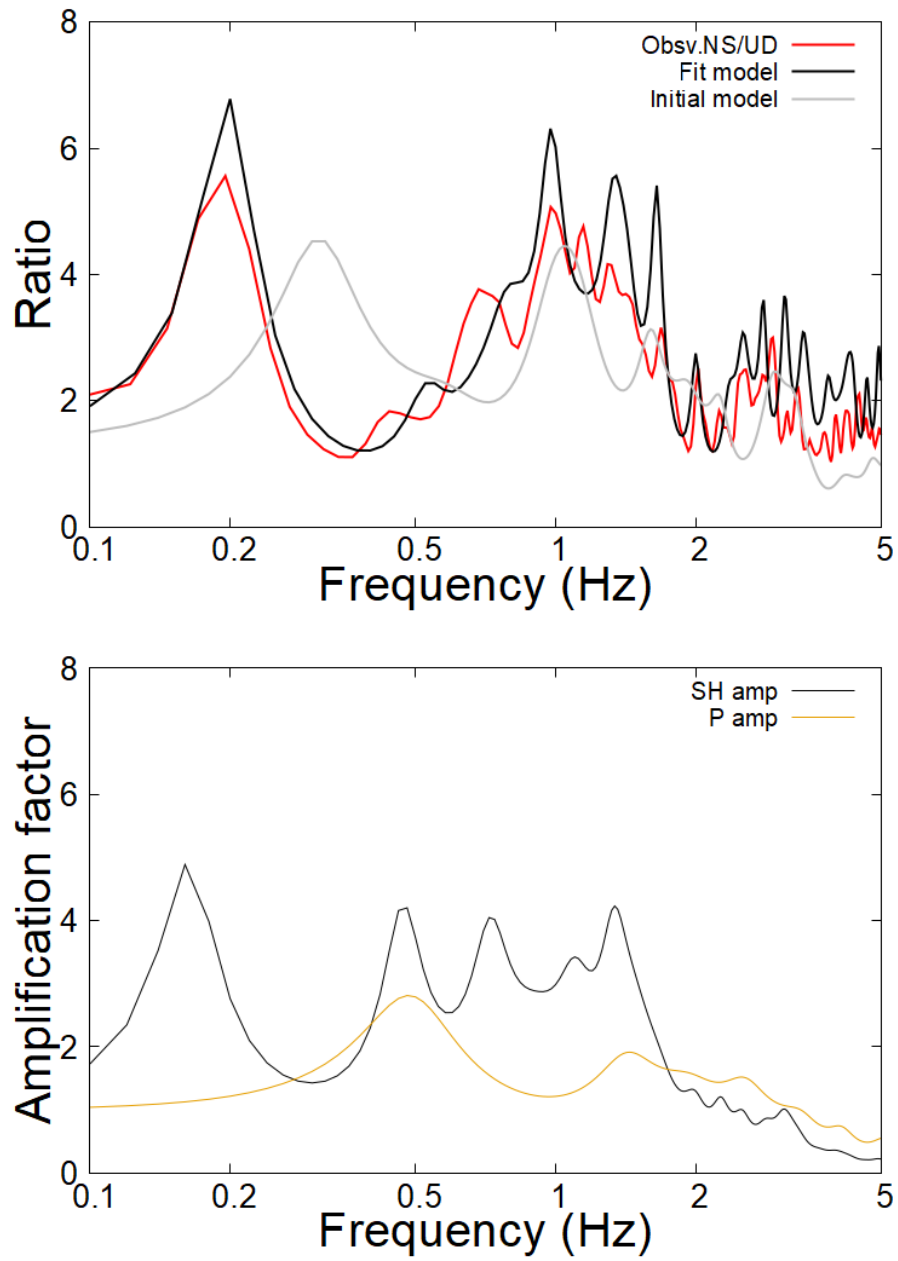


図 4-12 TRTL における最適モデルによる鉛直下方から伝播する SH 波、P 波の理論増幅値(下)と理論 EHVR(上)

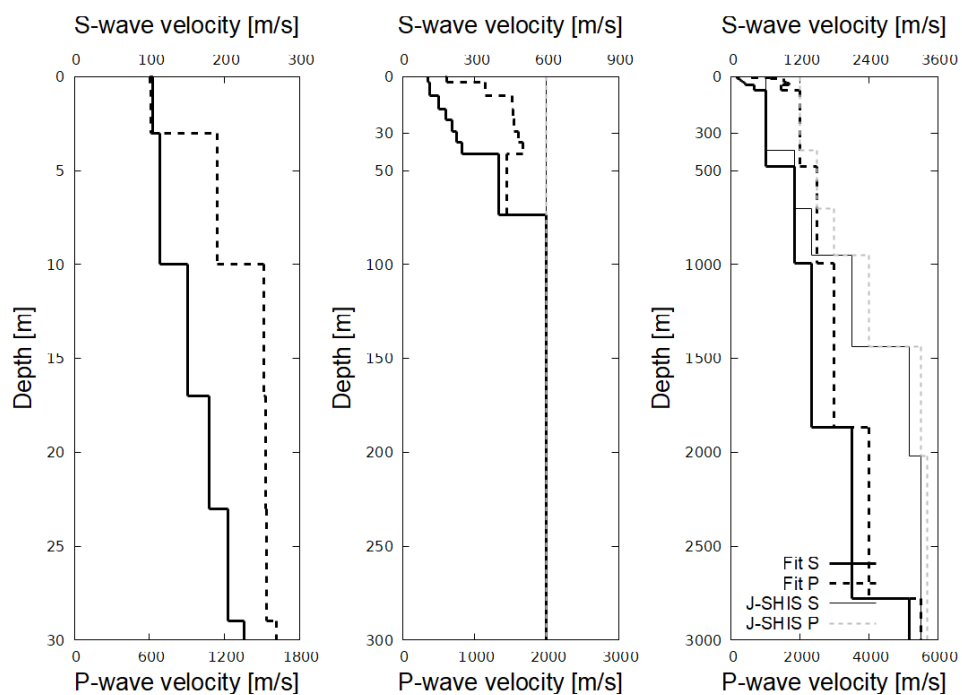


図 4-13 KSWL の最適モデルの速度分布と J-SHIS モデルの速度分布との比較

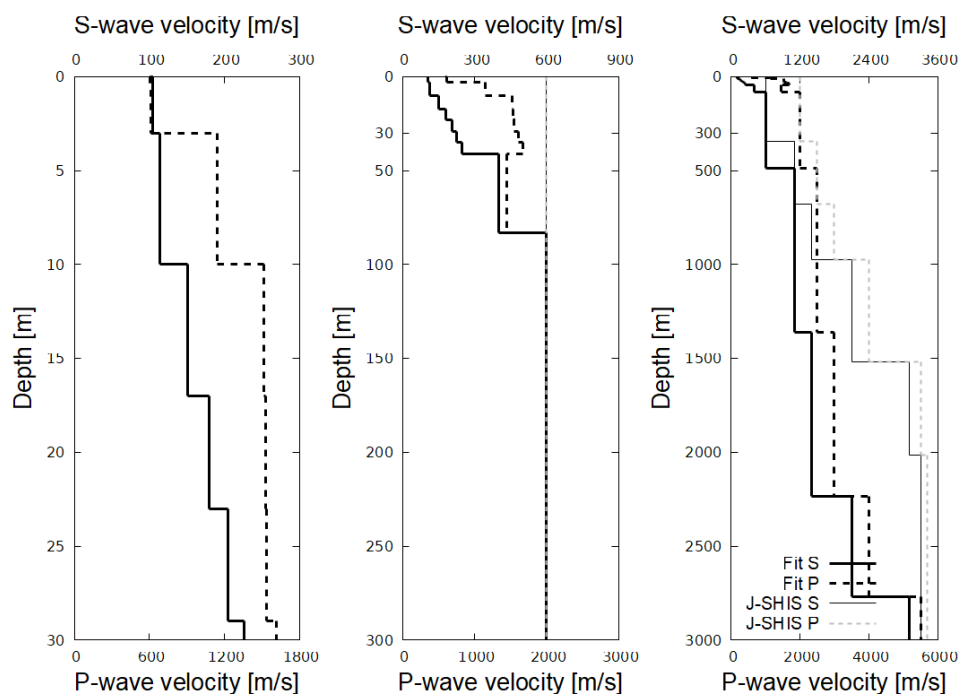


図 4-14 KZKL の最適モデルの速度分布と J-SHIS モデルの速度分布との比較

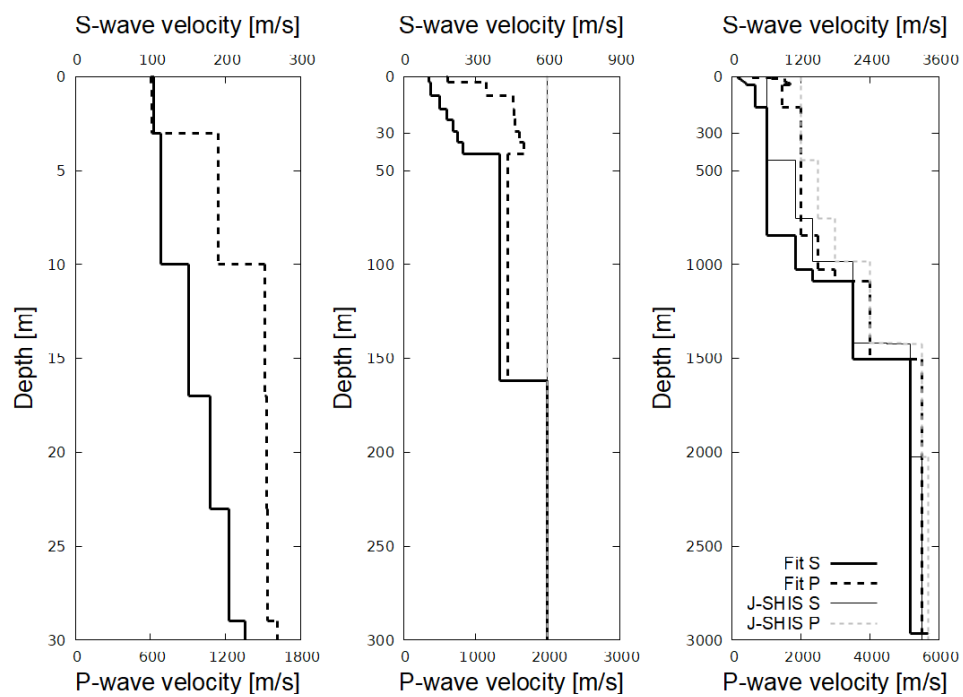


図 4-15 TRTL の最適モデルの速度分布と J-SHIS モデルの速度分布との比較

第 5 章 結論

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の際の津軽平野におけるスペクトル振幅の空間分布を調査した結果から五所川原周辺の観測点で、観測点同士の距離が近いにも関わらず、スペクトル振幅の大きさに違いがあることが確認された。

2011 年東北地方太平洋沖地震の本震の際に津軽平野の五所川原市周辺の観測点で観測された長周期地震動は隣接した観測点でも大きさが異なっていた。この事実を確認するために、JMA 五所川原観測点、K-NET 五所川原観測点、つがる市柏観測点、つがる市木造観測点、青森鶴田町鶴田観測点の 5 つの観測点において、東北地方太平洋沖地震の余震の際のスペクトル特性を確認することとした。その結果、水平動成分の 0.2Hz では、西側の 3 地点の方が大きく、水平動成分の 0.3Hz、0.4Hz では K-NET 五所川原観測点が最も大きいことが確認できた。

さらに、フーリエ解析を行う対象区間が本震と余震で違ったため、速度波形にバンドパスフィルターを施し、時々刻々と変化する速度波形の様子を比較した。S 波到来部分と後続部分に着目した結果、東側の 2 地点と西側の 3 地点では、S 波到来直後の部分の卓越する振動数に違いが見られた。具体的には、東側の 2 地点は 0.3Hz が卓越している一方で、西側の 3 地点は 0.2Hz が卓越していた。これは地下構造の影響が要因として考えられる。東側の 2 地点は盆地の縁に存在しており、西側の 3 地点は盆地に存在している。盆地に存在している 3 つの観測点は堆積層が厚いことが考えられる。次に後続部分に着目した結果、東側の 2 地点は 0.2Hz と 0.3Hz の振幅は S 波到来部分と同等のように見え、西側の 3 地点は S 波到来部分と比較すると後続部分の方が大きいように見えた。

東側と西側の観測点で卓越する振動数が異なることが確認されたが、このことが一般的なものなのかを地震記録を数多く集めて検討した。K-NET 五所川原観測点は 2011

年 5 月から 2024 年 7 月の期間で記録された地震動，JMA 五所川原観測点は 2003 年以降で震度 3 以上を記録した地震動，他の 3 地点は，幸いなことに，2011 年 3 月 11 日に観測された地震動記録を青森県危機管理局の好意により，もらい受けていた地震記録を使用した．地震記録そのものの震源特性の影響を除去するために，水平動と上下動とのスペクトル比を取った．その結果，東側の 2 地点は，最低次のピークは 0.2Hz よりも高い振動数で見られ，1.0Hz 前後のピークも顕著に見られた．しかし，西側の 3 地点は，最低次のピークは 0.2Hz よりも低く，その次のピークは 0.5Hz で見られた．このことから，東側の 2 地点に比べて西側の 3 地点は地震基盤より上の堆積層が厚いことが想定される．

そこで，地震動の特性を理解するためには，地震観測点直下の地下構造を把握する必要があるため，Kawase et al.(2011)の考えを用いて，五所川原市周辺の 5 観測点の観測点直下の地下構造を推定した．その結果，五所川原市内の 2 つの観測点と青森鶴田町鶴田観測点では，初期モデルから計算した水平動上下動スペクトル比（EHVR）の理論値よりも最適モデルの方が，0.2Hz 付近のピークに対する対応が良いことが確認できた．ところが，その他の 2 地点の最適モデルは，0.2Hz 付近のピークは観測値よりも低振動数側となっていた．

五所川原市内の 2 つの観測点の最適モデルの速度の深さ方向の分布から地震基盤の深さは J-SHIS モデルよりも浅くなることが分かり，他の 3 地点の地震基盤の深さは J-SHIS モデルよりも深くなることが分かった．

以上を通して，2011 年東北地方太平洋沖地震の際に五所川原市周辺の観測点で見られた観測点間の距離が短いにも関わらず，スペクトル振幅の大きさに違いが見られたこの事実を余震でも確認したところ．水平動成分の 0.2Hz のものは西側 3 地点の方が東側 2 地点より大きいことが確認できた．さらに，五所川原市周辺の観測点直下の地

下構造を平行成層構造と仮定し推定した結果，西側の 3 地点の表層が厚いことが分かり，その表層が厚いことが 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の東側の 2 地点と距離が近い西側 3 地点の地震動の増幅に影響を与えたことで，スペクトル振幅の大きさに違いが見られたと考える．

参考文献

- 1) 片岡俊一：2008 年岩手・宮城内陸地震の際に宮城県仙北平野で観測されたやや長周期地震動の特徴，日本地震工学会論文集 第 11 巻，第 5 号（特集号），2011
- 2) 森勇太・川瀬博・松島信一・長嶋史明：微動と地震動の観測水平上下スペクトル比の相違とそれに着目した地盤構造同定手法の提案，日本地震工学会論文集 第 16 巻，第 9 号，2016
- 3) 片岡俊一：1983 年日本海中部地震の際に津軽大橋観測点で得られた地震記録に関する地盤震動的考察，第 15 回日本地震工学シンポジウム（2018）
- 4) 片岡俊一：K-NET 青森地点の深部速度構造の推定，第 58 回地盤工学研究発表会
- 5) 片岡俊一：青森平野内 3 地点の深部速度構造の推定，第 59 回地盤工学研究発表会
- 6) 小田島智弘・片岡俊一：2011 年東北地方太平洋沖地震の際の津軽平野における長周期地震動の振動分布 東北地域災害科学研究集会論文集，2024 年，第 60 巻
- 7) 片岡俊一：気象庁五所川原栄町観測点の地下構造推定 東北地域災害科学研究集会論文集，2025 年，第 61 巻
- 8) 吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版，出版日 2020 年 3 月 20 日
- 9) Hiroshi Kawase , Francisco J . Sanchez-Sesma, and Shinichi Matsushima : The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse Field Theory for Plane Waves , Bulletin of the

Seismological Society of America , Vol. 101, No.5, pp.2001-2014, October 2011,

doi: 10.1785/0120100263

10) 日本海地震・津波調査プロジェクト, 平成 30 年度「日本海地震・津波調査プロジ

ェクト」成果報告書:

https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/Japan_Sea/JSH30Report/index_2102051.htm ,

2025 年 1 月 30 日確認

11) 気象庁: 震度データベース検索,

<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html> , 2025 年 1 月 30

日確認

12) J-SHIS 地震ハザードステーション,

<https://www.j-shis.bosai.go.jp/> 2025 年 1 月 30 日確認

13) 防災科学技術研究所 強震観測網(K-NET):

<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> , 2025 年 1 月 30 日確認

14) 測量計算サイト(距離と方位角の計算) (平面直角座標への換算):

<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/main.html> , 2025 年 1 月 30 日確認

15) 震度計ネットワーク:

https://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~kataoka/AOM_obsv/sindokei/sindokei.html ,

2025 年 1 月 30 日確認

16) 気象庁 地震・火山月報(防災編) :

<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/monthly/201103/monthly201103.pdf> , 2025 年 1 月 30 日確認

17) 地理院地図 :

<https://maps.gsi.go.jp> , 2025 年 1 月 30 日確認

18) ViewWave :

[ViewWave | Kashima's Office \(kenken.go.jp\)](http://kenken.go.jp) , 2025 年 1 月 30 日確認

謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教員である弘前大学大学院地域共創科学研究科の片岡俊一教授には，2年間多くの助言を賜り，丁寧なご指導を頂きました．心より感謝申し上げます．同じく弘前大学大学院地域共創科学研究科の上原子晶久准教授，増山篤教授にも研究を進めるにあたりご協力を賜りました．また，弘前大学理工学研究科の前田拓人教授，道家涼介准教授，平野史郎助教には中間報告などでたくさんのご助言を頂きました．重ねて感謝申し上げます．

片岡研究室の皆さんには研究報告の際にはお世話になりました．皆様のお力により，2年間研究を行うことができました．記して感謝とお礼を申し上げます．

地図の作成には「QGIS」を使用させて頂きました．加えて，地震記録の表示の際には「Strong Motion Data Analysis」，地震記録の解析の際に使用させていただいたフリーソフト「View Wave」を制作された国立研究開発法人建築研究国際地震工学センターの鹿島俊英先生，並びに制作に関わられた方々に感謝申し上げます．

最後に，本研究と論文作成に関わっていただいた全ての方々に，厚くお礼申し上げます．