

気象庁五所川原市栄町観測点の地下構造推定*

弘前大学 片岡俊一

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震の際に津軽平野内で観測された地震動記録を分析すると、近接した地点であっても同じ周期帯域の振幅が大きく異なっていたり。卓越していた周期は、J-SHISの地下構造からとめたSH波の増幅帯域と対応するものの、両者の周期が一致する訳ではない。

地震動の特性を理解するには、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、津軽平野内の地震観測点のうち、地震動記録が公開されている気象庁五所川原市栄町観測点を取り上げ、その地点の地震基盤までの地下構造を推定した。以下では観測点名を栄町観測点とする。また、栄町観測点の近傍にはK-NET五所川原(AOM019)観測点がある。そこで、津軽平野内にあるもう一つのK-NET観測点である、K-NET中里(AOM023)と合わせて図1に示す。

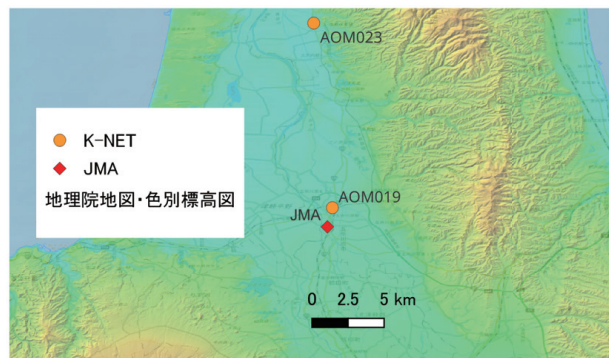


図1 気象庁五所川原栄町観測点(JMA)とK-NET五所川原(AOM0019)、中里(AOM023)の位置

2. 地下構造の推定方法の基本方針

長周期地震動を説明するためには、地震基盤以浅の地下構造が必要である。そこで、Kawase et al. (2011)の考え²⁾を用いて、地震基盤以浅の構造を推定することにした。日本全国の地震基盤までの地下構造を統一的にモデル化したモデルがJ-SHISで公開されているので(以下、J-SHISモデル)、それを基本とし、当該地点のJ-SHISモデルの層厚を調整して観測値と合わせることで地下構造を推定する。但し、対象地点は軟弱地盤であることから、表層のモデル化は重要である。そこで、J-SHISモデルの表層については微動アレー探査等で推定して妥当なものに置き換える。

3. 浅層部分の地下構造モデル

この地点では、2005年に微動計測を行っている。その際には、1辺長が約10.4mの正三角形の各頂点に鉛直成分のセンサーを、重心に3成分のセンサーを設置した。サンプリング振動数を200Hzとし、200秒間のデータを3回計測した。用いたセンサーはANET製のCR4.5-2Sである。

計測された微動の鉛直成分を用いて、空間相関法により位相速度を求めた。その際には、重心と頂点のもの(以下、C-A)と頂点間相互のもの(以下、A-A)を別個に評価した上で、各々の結果について3回の計測結果を平均し、さらにC-Aの結果とA-Aの結果を平均した。結果を図2に示す。高振動数では位相速度は100m/sに漸近している。K-NET五所川原の地盤データでは表層か

* Estimating sub-soil structure at JMA Goshogawara Sakaemachi station, Aomori, Japan by Shunichi Kataoka

ら深さ 9m まで S 波速度は 100m/s であり、その速度と栄町観測点の位相速度は対応している。

2005 年に計測した微動の水平動と上下動のスペクトル比のピーク振動数は 1Hz 付近にあった。CR4.5-2S の振動数特性は 0.5Hz 以上で平坦であることから、低振動数成分の卓越の有無を確認するために、2024 年に東京測振製の CV-374AV を用いて、微動を 2 時間計測した。CV-374AV はサーボ型速度計を内蔵しており、カタログにある周波数範囲は 0.1~100Hz である。微動データは 10 分間毎のファイルとなっているので、10 分間毎に水平動と上下動とのスペクトル比 (H/V 比) を求め、その H/V 比を平均したものを図 3 に示す。H/V 比のピークは 1Hz 付近にあるが、その幅は広い。また、水平動 2 成分に違いはないことも分かる。1Hz 付近が卓越することは、文献³⁾にも記載がある。なお、0.5Hz 以下で H/V 比が大きくなるが、これはセンサーのノイズの影響と考えている。

以上のデータから浅層モデルを構成することとした。この地点では、地盤柱状図がなく、K-NET 五所川原でも深さ 20m までの地盤構造しか分らない。

しかしながら、この地点から北方に約 21km 離れた津軽大橋では深さ 50m に橋脚を支持できる地盤が存在する⁴⁾。また、文献⁵⁾には五所川原周辺では表層から 50m 程度の深さに砂礫層があるとの記述もある。つまり、数十 m 程度の深さには硬質な地層が存在するものと考えられる。ここでは、簡単のため、この地層の上面を工学基盤面と称する。

工学基盤面の深度を推定するために、まず H/V 比のピーク振動数がこの地層から浅部の地下構造で形成されていると考えた。最表層の S 波速度は 100m/s 程度と考えられるので、この速度が工学基盤面まで続いているとし、さらに 1Hz の卓越が 4 分の 1 波長則で説明できるとすると、層厚は 25m になる。一方で、観測位相速度 $c(f)$ を式 (3) に示すように Ballard の方法⁹⁾で疑似深度 QZ と疑似 S 波速度 QVS に変換すると、疑似深度 30m 程度まで安定して疑似 S 波速度が求まっていることが分かった。

$$QZ = 1.1c(f) \quad (3a)$$

$$QVS = 1/3c(f)/f \quad (3b)$$

そこで、表 1 に記すように浅層の全体の層厚を 41m とし、最表層の厚さは 3m、それ以深は 6m あるいは 7m とし、41m 以深は層厚が無限大とする地下構造を仮定し、文献 6) に掲載されているフリーのソフトウェア SWAMI を用いて S 波速度分布を推定した。SWAMI は Rix と Lai により開発された表面波の位相速度から地下構造を推定するプログラムである⁹⁾。このプログラムでは初期値

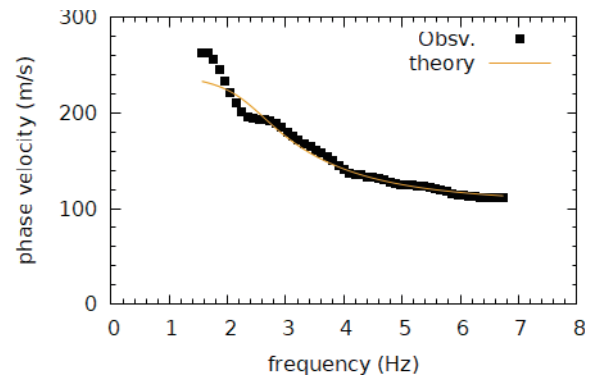


図 2 観測位相速度 (Obsv.) と推定した地下構造から求めた理論位相速度 (Theory)

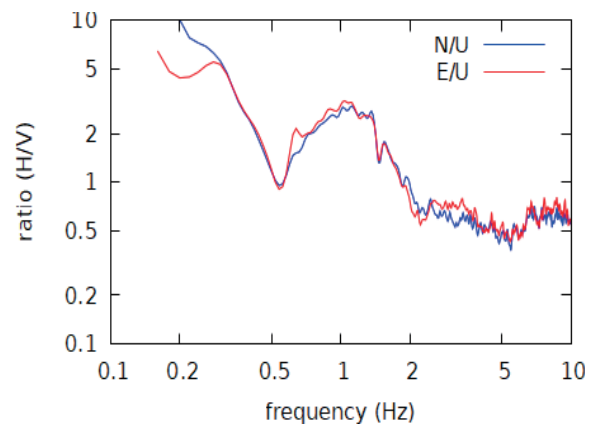


図 3 微動の水平動と上下動のスペクトル比

として層厚と密度，S波速度，およびポアソン比が必要であり，変数はS波速度のみである。まず，表層各層のS波速度を110m/sとし，最表層のポアソン比を0.485，それ以外の層のポアソン比を0.495として，SWAMIを適用し，その結果を再度初期値にするという計算を行い，もっとも残差が小さいものを浅層モデルとした。結果を表1のVs欄に記す。また，図2には，推定した地下構造による理論位相速度も描いているが，低振動数側を除いて，観測値をよく説明している。

表1 地盤モデルと逆解析のパラメータ

Layer	Vs	1 st BF					2 nd BF				
		Pre-set 層厚(m)			Result 層厚(m)		Pre-set 層厚(m)			Result 層厚(m)	
		初期値	r	n	1 st best	2 nd best	初期値	r	n	1 st best	
1	105	3.0	1.0	0	3.0	3	3.0	1.0	0	3.0	
2	114	7.0	1.0	0	7.0	7	7.0	1.0	0	7.0	
3	151	7.0	1.0	0	7.0	7	7.0	1.0	0	7.0	
4	180	6.0	1.0	0	6.0	6	6.0	1.0	0	6.0	
5	205	6.0	1.0	0	6.0	6	6.0	1.0	0	6.0	
6	226	6.0	1.0	0	6.0	6	6.0	1.0	0	6.0	
7	246	6.0	1.0	0	6.0	6	6.0	1.0	0	6.0	
8	400	63.0	1.2	2	75.6	63.0	63.0	1.2	2	63.0	
9	600	260.0	1.3	3	439.4	338.0	338.0	1.3	3	494.4	
10	1100	265.0	1.3	3	265.0	203.8	203.8	1.3	3	203.8	
11	1400	239.0	1.3	3	525.1	108.8	108.8	1.3	3	64.4	
12	2100	515.0	1.3	3	515.0	669.5	669.5	1.3	3	660.5	
13	3100	629.0	1.3	3	286.3	817.7	817.7	1.3	3	372.2	
14	3300	infinity	-	-			infinity	-	-		

4. 地震動記録の収集と水平上下動比の算出

Kawase et al. (2011)が提案した考えを適用するために，柴町観測点において，2003年以降で震度3以上を記録した地震動のうち，表2に示す19記録を解析対象とした。震央位置を図6に示し，地震諸元を表2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。

地震の発震時刻と理論走時からS波初動時刻をもとめ，それより2秒前から40.96秒間のスペクトルを求めた。その際には，最初と最後の2秒間にはコサイン型のテーパをかけた。また，Hanningウィンドを3回施すこと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。各々のEHVRと平均値とを図5に示す。最低次のピーク振動数は0.2Hz付近にあるが，NS/UDとEW/UDではその高さが異なる。また，1Hz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

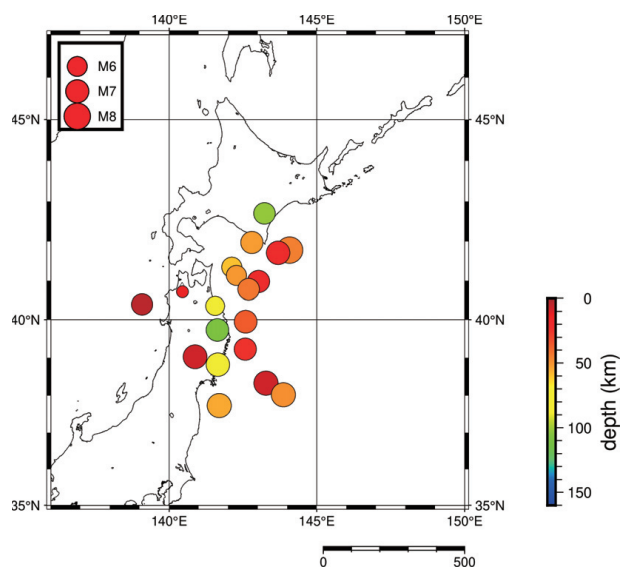


図4 検討に用いた地震記録に対する震央位置

表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

No.	地震の発生日時		震央地名	緯度	経度	深さ (km)	M
	日付け	時刻					
1	2003/05/26	18:24:33.4	宮城県沖	38.8200	141.6500	72	7.1
2	2003/09/26	04:50:07.4	十勝沖	41.7783	144.0783	45	8.0
3	2003/09/26	06:08:01.8	十勝沖	41.7083	143.6900	21	7.1
4	2008/06/14	08:43:45.3	岩手県内陸南部	39.0283	140.8800	8	7.2
5	2008/07/24	00:26:19.6	岩手県沿岸北部	39.7317	141.6350	108	6.8
6	2011/03/09	11:45:12.9	三陸沖	38.3283	143.2783	8	7.3
7	2011/03/11	20:36:39.9	岩手県沖	39.2300	142.5783	24	6.7
8	2011/03/12	04:46:46.1	秋田県沖	40.3933	139.0883	4	6.4
9	2011/06/23	06:50:50.7	岩手県沖	39.9467	142.5900	36	6.9
10	2012/05/17	00:59:01.1	青森県津軽北部	40.7167	140.4533	15	3.6
11	2012/05/24	00:02:26.5	青森県東方沖	41.3433	142.1233	60	6.1
12	2012/12/07	17:18:30.8	三陸沖	38.0183	143.8667	49	7.3
13	2013/02/02	23:17:35.8	十勝地方南部	42.7017	143.2267	102	6.5
14	2014/08/10	12:43:18.1	青森県東方沖	41.1333	142.2783	51	6.1
15	2015/07/10	03:32:51.2	岩手県内陸北部	40.3533	141.5583	88	5.7
16	2016/01/14	12:25:33.3	浦河沖	41.9700	142.8000	52	6.7
17	2019/08/29	08:46:39.3	青森県東方沖	40.9800	143.0267	21	6.7
18	2020/12/21	02:23:21.5	青森県東方沖	40.7817	142.6917	43	6.5
19	2021/02/13	23:07:50.5	福島県沖	37.7283	141.6983	55	7.3

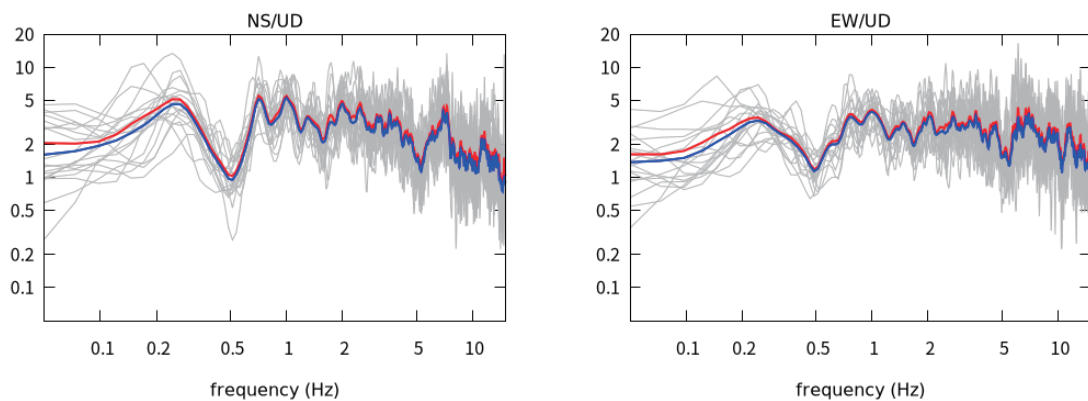


図5 地震動の水平動上下動比 (EHVR) . 左はNS/UD, 右はEW/UD. 灰色線は個々の地震のEHVRであり, 赤色線は算術平均, 青色線は幾何平均.

影響であると考えている。

5. 深部のモデル化と逆解析

五所川原市栄町観測点の地下構造を推定するために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。さらに, 先に推定した浅部地下構造との間にS波速度400m/sの層を仮定し, 表1のPre-setの欄に示すような初期モデルを作成した。

ここでは総当たりに計算を繰り返して地下構造を推定する。つまり, 第 l 層の層厚 th_l を式(1)のように変化させ, 式(2)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。ここで, th_{l_0} は第1層の層厚の初期値であり, r は変化の度合いを決める定数で, 各層毎に指定する。式(1)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。式(2)で $\text{SPR}(f)$ は観測の EHVR, $z(f)$ は仮定した地下構造から算出される理論値である。

$$th_i = th_0 r^i \quad (1)$$

$$(i = -n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n)$$

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

表1に第1回目の計算に用いた r と n を記す。

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 として地下構造を求めた。その際の

misfit 値を計算した順に図6に示す。本来ならば最小の misfit を与える地下構造を採用すべきであろうが、図中の 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、Aの値を初期値として更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1に示してある。この結果を最適モデルとした。

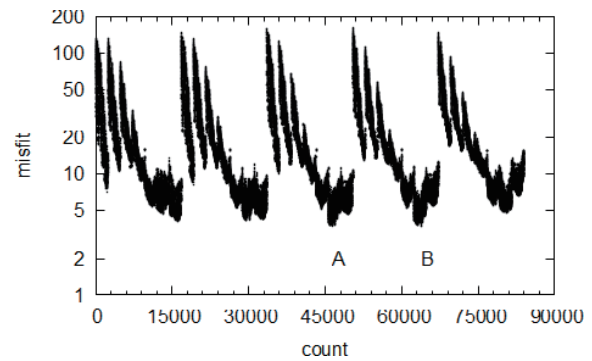


図6 計算した各モデルの misfit の値

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7に示す。図には初期モデルも描いてある。初期モデルから計算した EHVR の理論値よりも最適モデルのものの方が、0.2Hz 付近のピーク振動数に対する対応が良い。また、初期モデルでは表せていない、0.5Hz から 1.0Hz の間にある二つのピークも最適モデルは再現している。

最適モデルの速度の深さ方向の分布を図8に示す。浅層は K-NET 五所川原 (AOM019) と比較し、深部については J-SHIS モデルと比較してある。浅層部分の S 波速度は青線で示した AOM019 のそれと対応している。深さ 40m 程度までは S 波速度が漸増しているが、これは層厚の仮定による可能性もあり、改善の余地は残っている。地震基盤の深さは J-SHIS モデルよりも 10%程度浅くなった。

7. まとめ

津軽平野の地下構造を把握する第一歩として、気象庁五所川原市栄町観測点における地震動および微動アレー探査結果から観測点直下の地下構造を推定した。今回の推定では、平行成層を仮定しているが、地震動の水平動上下動スペクトル比は、水平成分によって形状が異なり、平行成層ではないことが想定される。この点については、今後の課題としたい。

謝辞

気象庁が公開している地震動記録および K-NET の地下構造を利用させて頂いた。微動の計測は当時に片岡研究室に所属していた学生の協力を得て行った。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 小田島智弘, 片岡俊一: 2011年東北地方太平洋地震の際の津軽平野における長周期地震動の振幅分布, 東北地域災害科学, 60, 25-29, 2024.
- 2) Kawase, H., F.J. Sánchez-Sesma, and S. Matsushima: The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse Field Theory for Plane Waves, Bull. Seismo.Soc.Am.,101,2001-2014, 2011.
- 3) 河上房義, 浅田秋江, 森芳信, 神山眞: 津軽チュウ積平野の常時微動特性について, 第7回災害科学総合シンポジウム, 55-58, 1970.
- 4) 山科喜一, 藤谷敦, 竹森弘: 長泥橋の基礎グアイの設計と載荷試験, 橋梁と基礎, 2-5, 15-20, 1968.
- 4) 小貫義男, 三位秀夫, 島田いく郎, 竹内貞子, 石田琢二, 斎藤常正: 青森県津軽十三湖地方の沖積層, 東北大学理学部地質学古生物教室研究邦文報告, 第58号別冊, 1-16, 1963.
- 5) Ballard, R. F., Jr.: Determination of soil shear moduli at depth by in situ vibratory techniques, U. S. Army Waterways Experiment Station, 1964.
- 5) Lai C. G., and Krzysztof Wilmanski: Surface waves in geomechanics: direct and inverse modeling for soils and rocks, International center for mechanical sciences courses and lectures No.481, Springer Wien New York, 2005.
- 6) Lai, C. G. and Rix, G. J.: Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization, Report No. GIT-CEE/GEO-98-2, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 258pp, 1998.

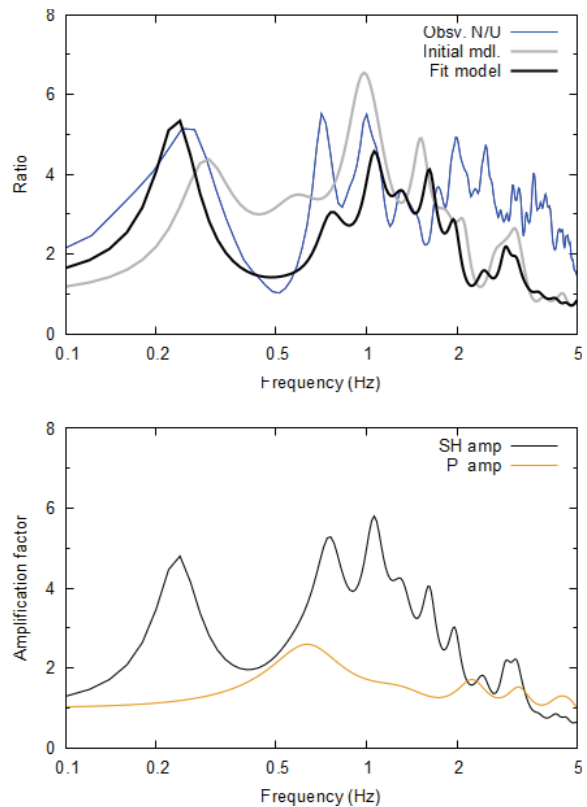


図7 最適モデルによる鉛直下方から伝播するSH波, P波の理論増幅特性(下)と理論EHVR(上)

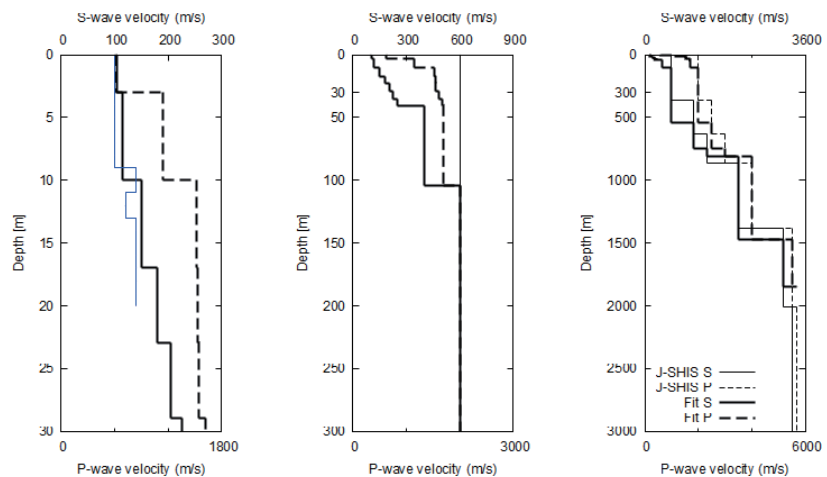


図8 最適モデルの速度分布と既往のものとの比較. 左の青線はAOM019におけるS波速度