

八戸市低地部 2 箇所の地震基盤までの地下構造推定*

弘前大学 片岡俊一

1. はじめに

1968 年十勝沖地震の際に、八戸港湾において観測された強震記録には周期約 3 秒の成分が卓越していた。その後、その成分の生成理由を探るために、屈折法探査¹⁾が行われ、その結果を踏まえて、微動を利用して S 波速度構造^{2,3)}が推定されている。さらに、単点微動を八戸測候所から北側の海岸線に沿って行い、それらをまとめて坂尻は中新世基底部までの S 波速度構造を推定している⁴⁾。彼らが求めた地下構造には八戸港湾観測点直下も含まれている点で大変有益であるが、内陸側の地下構造は調べられていない。

今回、八戸港湾観測点 (以下、HC_KWN または KWN 地点) から内陸に 6.5km 入った地点 (以下、HC_JGB または JGB 地点) で地震観測をする機会を得た。そこで、八戸港湾地点と合わせて Kawase et al. の考え⁵⁾を用いて、地震基盤以浅の構造を推定した。地下構造を推定した 2 地点と八戸測候所 (現在の観測点名は八戸市湊町観測点) の位置関係を図 1 に示す。

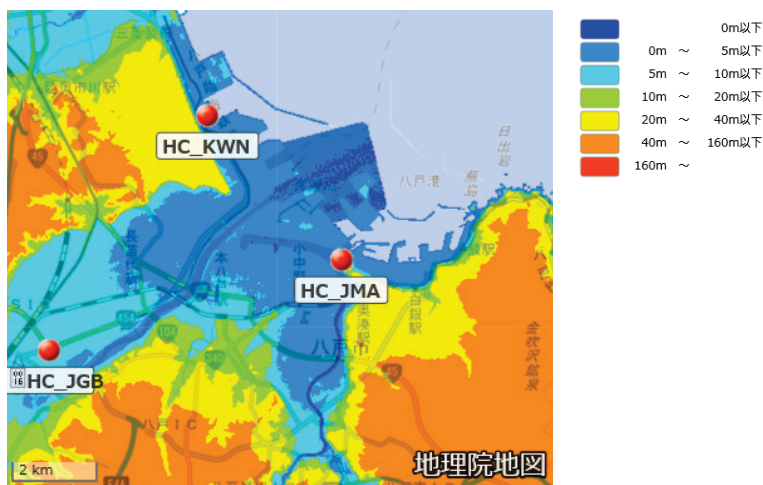


図 1 地下構造を推定した八戸港湾観測点 (HC_KWN) と HC_JGB 地点および気象庁が設置している八戸市湊町観測点 (HC_JMA)

2. 地下構造の推定方法

文献²⁾によると、地震動の S 波部分の水平動と上下動とのスペクトル比 $H(f)/V(f)$ は拡散波動場理論に基づいて、式 (1) のように地震基盤からその地点の地盤に鉛直入射する S 波と P 波の増幅特性 (それぞれ、 $TF_h(f)$ 、 $TF_v(f)$) に定数を乗じたものと等しくなる (以下、 $z(f)$)。

$$\frac{H(f)}{V(f)} = \sqrt{\frac{\alpha_B}{\beta_B} \frac{TF_h(f)}{TF_v(f)}} = z(f) \quad (1)$$

ここで、 α_B 、 β_B は地震基盤の P 波速度、S 波速度である。この考えを逆に使い地下構造を推定する。つまり、ある地下構造から $z(f)$ を算出し、それと観測地震動の水平動上下動スペクトル比 (以下、 $EHVR(f)$) とが一致すれば、その地下構造がその観測点直下の地下構造である。

このような逆解析手法では初期モデルがあると良い。その際には、水平方向の連続性が確保さ

* Estimating sub-soil structure at two stations in the lowland of Hachinohe, Aomori, Japan by Shunichi Kataoka

れていた方がよいと考え、日本全国の地震基盤までの地下構造を统一的にモデル化したもの⁹⁾を参照した。このモデルは地震ハザードステーション (J-SHIS)⁷⁾で公開されているので、以下ではJ-SHISモデルと呼ぶ。しかしながら、J-SHISモデルの最表層のS波速度は実際の地盤と対応しない。今回対象とした2地点では表層付近の地震波速度分布が調査されているので、それをJ-SHISモデルの表層に組み込んだものを初期モデルとする。

3. 当該地点の地下速度構造

KWN地点の速度構造はホームページ⁸⁾で公開されている。一方、JGB地点では青森県の施設を建設するためにPS検層が行われている。2地点のS波、P波速度分布を図2の(a)に示す。

KWN地点では深さ18mまで調査されており、深さ13m以深のN値は50となっている。最浅部のS波速度は170m/sであり、最深部ではそれが340m/sとなる。文献4)では最表層のS波速度を0.39km/sとしているが、KWN地点の最深部の速度はそれに対応しているように思える。

JGB地点では深さ64mまで調査が行われている。表層のS波速度は200m/sを超えているが、深さ4mから38mまでは200m/sを下回る。深さ38mから60mまでは400m/s程度の値であり、最深部は750m/sとなっている。文献4)では第2層、第3層の0.45km/s、0.72km/sとしており、JGB地点の深さ40m以深はそれに対応しているように思える。

J-SHISモデルを図2の(b)に示す。J-SHISモデルの最表層のS波速度は650m/sであり、KWN地点の最深部のS波速度よりは早く、JGB地点の最深部の速度よりは遅い。2地点を比較すると、同一の物性値をもつ層はJGB地点の方が浅いので、海がある東に向かって深くなることになる。地震基盤の深度で言うと、JGB地点では約2400mであるが、KWN地点では約3100mである。

4. 地震動記録の収集と水平上下動比の算出

KWN地点における地震動記録はインターネット上で公開されている⁹⁾。そこで、2022年10月から2024年10月までの期間を対象に、深さ100km以浅、震央距離300km以下の地震記録を収集したところ13記録が該当した。この13地震の震央位置を図3(a)に示す。青森県東方沖で起きた地震の数が相対的に多いが、震源方位は北から南まで分布していることが分かる。

JGB地点では、2024年6月から2ヶ月間白山工業製のJU210を用いて、S造3階建て建物の1階において地震観測を行った。データは連続で取得し、

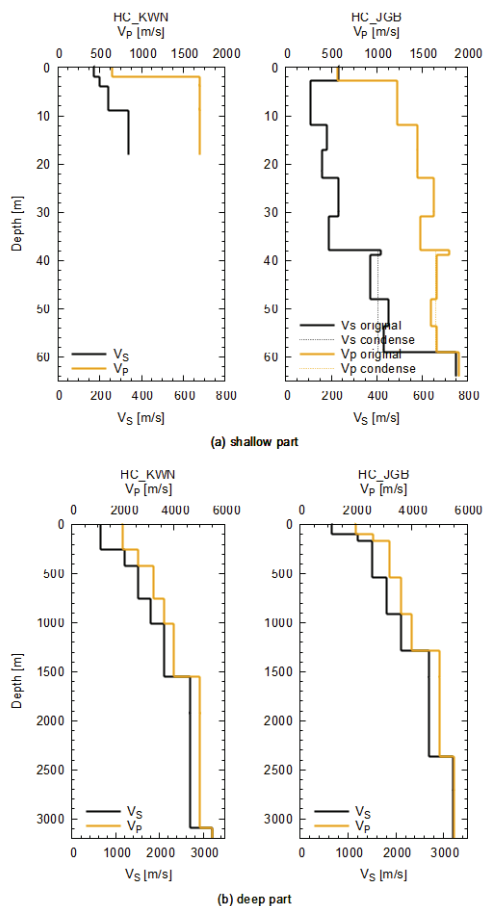


図2 地盤調査が発表されている表層の速度分布 (a)、J-SHISモデル (b)

GPS 信号を用いて時刻校正を行った。この期間中に青森県内のいずれかの震度観測点で震度 1 以上を観測した 24 個の地震を対象に、震源時刻から 10 分間のデータを連続記録から切り出した。このうち、目視で振幅が十分大きく、上述した深さ 100km 以浅、震央距離 300km の 12 記録を対象とすることとした。この 12 地震の震央位置を図 3(b)に示す。短い期間であったため、震源方位が等方的とはならないが、狭い範囲ではない。

地震動の水平動上下動スペクトル比 (EHVR) は S 波を対象とする必要がある。KWN 地点の地震動記録には時刻情報がないことから、目視で S 波初動を判定し、JGB 地点では理論走時を参考に判定した。スペクトル解析には、S 波初動の前 2 秒から 40.96 秒のデータを利用した。このタイムウィンドウの前後 2 秒はコサイン型のテーパーを施した。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 4 に示す。図 4 の左側が KWN 地点、右側が JGB 地点で最上段が NS 成分を上下動で除したもので、中段が EW 成分を UD 成分で除したものであり、各記録から求めたスペクトル比を灰色で表し、平均値を赤、青の実線とし、変動係数を破線で示してある。KWN 地点では 0.3Hz 付近にピークがある。水平 2 成分でピーク形状がやや異なり、ピーク振動数もやや異なるが有意な違いであるか否かは分からない。変動係数は EHVR がピークとなる振動数よりも低い振動数帯域で大きくなるが、最低次のピーク振動数から 10Hz の間ではほぼ一定値である。JGB 地点のスペクトル比は約 1Hz 付近でピークとなり、その値は KWN 地点よりもかなり大きい。この地点でも水平 2 成分でピーク付近の形状が異なり、NS/UD ではピークが二つに割れているが、EW/UD では一つになっており、その為と考えられるが、EW/UD の方が比の値は大きい。また、この地点では屋内に地震計を設置しているために、高振動数成分においては構造物応答の影響が含まれていると思われるが、EHVR のピーク付近では構造物の影響はないと判断している。

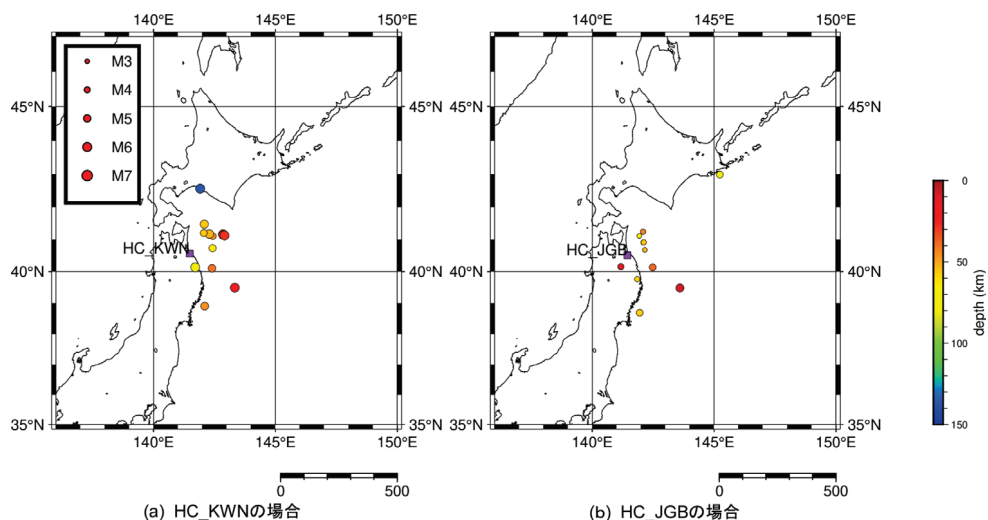


図 3 検討に用いた地震記録に対する震央位置

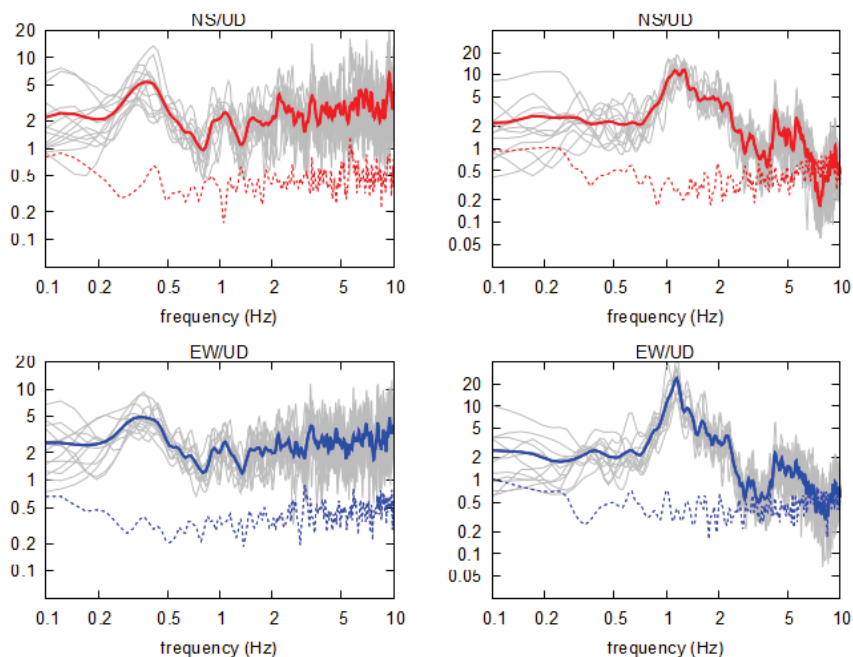


図4 地震動の水平動上下動比 (EHVR) とその平均値。左はKWN地点、右はJGB地点。各々上からNS/UD, EW/UDで灰色線は個々の地震のEHVRであり、実線は算術平均、破線は変動係数で成分によって色を変えている。

5. 地盤のモデル化と逆解析の方法

ここでは初期モデルの設定に当たって J-SHIS モデルを基本とし、最表層（以下、J1層）の上部に地盤調査結果を挿入する。しかしながら、J1層の物性値は地盤調査結果の最深部のそれとは異なっている。そこで、初期モデル設定に当たっては以下のように考えた。

KWN地点では、調査結果のS波速度は340m/sであり、J1層のS波速度650m/sに比べて遅い。そこで、最深部の構造がある程度続いてからJ1層になると仮定し、切り替わる深さを20m, 40m, 80m, 160mと変化させて $z(f)$ を算出したところ、160mがもっとも良かった。そこで、初期モデルとしては、J1層が深さ160mで表れるとした。初期モデルを表1に示す。

JGB地点では、最深部のS波速度は720m/sと報告されている。この値は、J-SHISモデルと対応しないので、720m/sの層をJ1層と考え、物性値はJ1層のものを用いることとした。また、それ以浅の深さ38mから59mでは3つの層に分けられており、S波速度が400m/s前後の値をとるが、初期モデルではこれらの層を一つの層と扱った。その際、速度は走時平均とし、密度は単純平均とした。初期モデルを表1に示す。

地下構造を求めるに当たっては、各層の層厚を総当たりに変化させ、観測値にもっとも近いものを選んだ。具体的には、第1層の層厚 th_1 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_{i_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。表1に計算に用いた r と n を記す。

$$th_l = th_{l_0} r^i \quad (1)$$

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

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

6. 逆解析の結果と考察

両地点ともに水平2成分でEHVRが異なることから、KWN地点ではEW/UDをターゲットとし、JGB地点ではNS/UDを対象とした。 $misfit$ 値を計算する区間は、KWN地点では0.2Hzから1.2Hz、JGB地点では0.3Hzから2.5Hzとした。最適モデルで計算した $z(f)$ を観測結果と合わせて図6に示す。図には参考のために、初期モデルから算出した $z(f)$ も描いてある。KWN地点では初期モデルよりも0.3Hz付近のピークが低振動数側に移行し、それ以外も合致度が高い。JGB地点では初期モデルでも最低次のピークは対応しているが、最適モデルの方が2Hz前後において観測値に近くなっている。

参考のために、全ての計算における $misfit$ を検討したところ、KWN地点ではよく収束していたが、JGB地点では同程度の値をもつ極小値が多数存在していた。今回は機械的に最小値となったものを最適モデルとしているが、さらなる検討が必要であることが分かった。

最適モデルの層厚は表1に記してある。KWN地点では地震基盤の深度は4.2km、JGB地点では3.0kmとなった。この深さは文献4)で示されている基盤深度よりも深い。

7. まとめ

八戸港湾とそれよりも南西方向に6.5kmほど内陸に入ったJGB地点で拡散波動場理論を利用して、J-SHISモデルを参照して地下構造を推定した。八戸港湾地点は観測された地震動から求めた水平動上下動スペクトル比とよく合致する地下構造となり、地震基盤の深さは4.2kmとなった。JGB地点では水平動上下動スペクトル比との対応は悪くないが、それを説明する地下構造が多数あることが分かった。

謝辞

青森県にはJGB地点において臨時地震観測を許可していただいたばかりか、地盤調査結果も公開していただいた。八戸港湾の記録と地盤構造は、港湾地域強震観測から入手した。この報告は、弘前大学理工学部地球環境防災学科令和6年度卒業研究として金子大起君が行ったものを再整理したものである。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 岡田広：弾性波による八戸の基盤探査，北大地物研究報告，26，147-166．1971．
- 2) 成瀬聖慈・他：やや長周期の微動観測と地震工学への適用（2）－微動の卓越周期と地下構造の関卓－．地震第2輯，29，25-32．1976．

表1 地盤モデルと逆解析のパラメータ

KWN								JGB							
No.	Vp	Vs	密度	初期層厚	r	n	最適層厚	No.	Vp	Vs	密度	初期層厚	r	n	最適層厚
1	650	170	1.46	2.0	1.0	0	2.0	1	570	230	1.46	2.8	1.0	0	2.8
2	1700	200	1.42	2.0	1.0	0	2.0	2	1220	110	1.42	9.1	1.0	0	9.1
3	1700	240	1.66	5.0	1.0	0	5.0	3	1450	180	1.66	5.2	1.0	0	5.2
4	1700	340	1.63	151.0	1.0	0	181.2	4	1450	160	1.63	5.8	1.0	0	5.8
5	2000	650	1.95	71.0	1.2	3	122.7	5	1630	230	1.69	8.0	1.0	0	8.0
6	2600	1200	2.15	164.3	1.2	3	95.1	6	1480	190	1.50	6.9	1.0	0	6.9
7	3200	1500	2.25	336.3	1.2	3	581.1	7	1650	406	1.73	21.2	1.0	0	21.2
8	3600	1800	2.35	248.0	1.2	3	428.5	8	2000	650	1.95	41.6	1.2	3	59.9
9	4000	2100	2.40	546.5	1.2	3	944.4	9	2600	1200	2.15	67.3	1.2	3	67.3
10	5000	2700	2.50	1544.8	1.2	3	1853.3	10	3200	1500	2.25	371.7	1.2	3	535.2
11	5500	3200	2.65	inf.			inf.	11	3600	1800	2.35	376.1	1.2	3	217.7
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m)			(m)	12	4000	2100	2.40	373.2	1.2	3	216
								13	5000	2700	2.50	1078.8	1.2	3	1864.2
									5500	3200	2.65	inf.			inf.
									(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m)			(m)

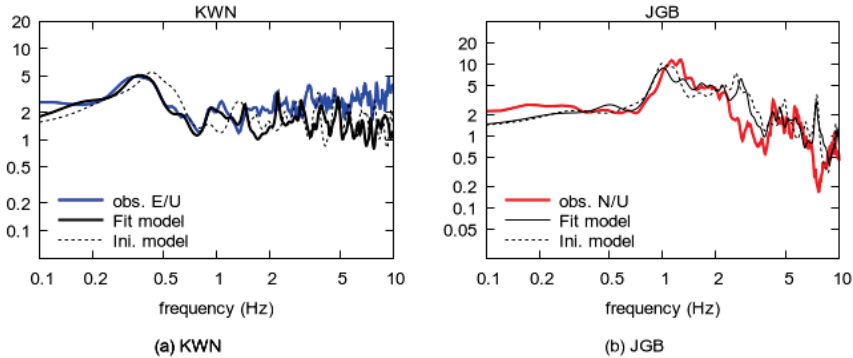


図5 観測EHVRと最適モデルから算出した $z(f)$ 、参考のために初期モデルから算出した $z(f)$ も描いてある。

- 3) 工藤一嘉・他：やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (4) - Array 観測による微動伝播性の検討 - 地震第2輯, 29, 323-337, 1976.
- 4) 坂尻直巳：やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (7) - 八戸測線 (52km) 上の卓越周期と地下構造 - 地震第2輯, 36, 466-469, 1983
- 5) 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.
- 6) 防災科学技術研究所：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, No.337, 2009.
- 7) 地震ハザードステーション. <https://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2026年1月10日確認).
- 8) 港湾地域強震観測地点情報, <https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/data/pnt/hachinohe-o.htm> (2026年1月10日確認)
- 9) 港湾地域強震観測, <https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/> (2026年1月10日確認)