

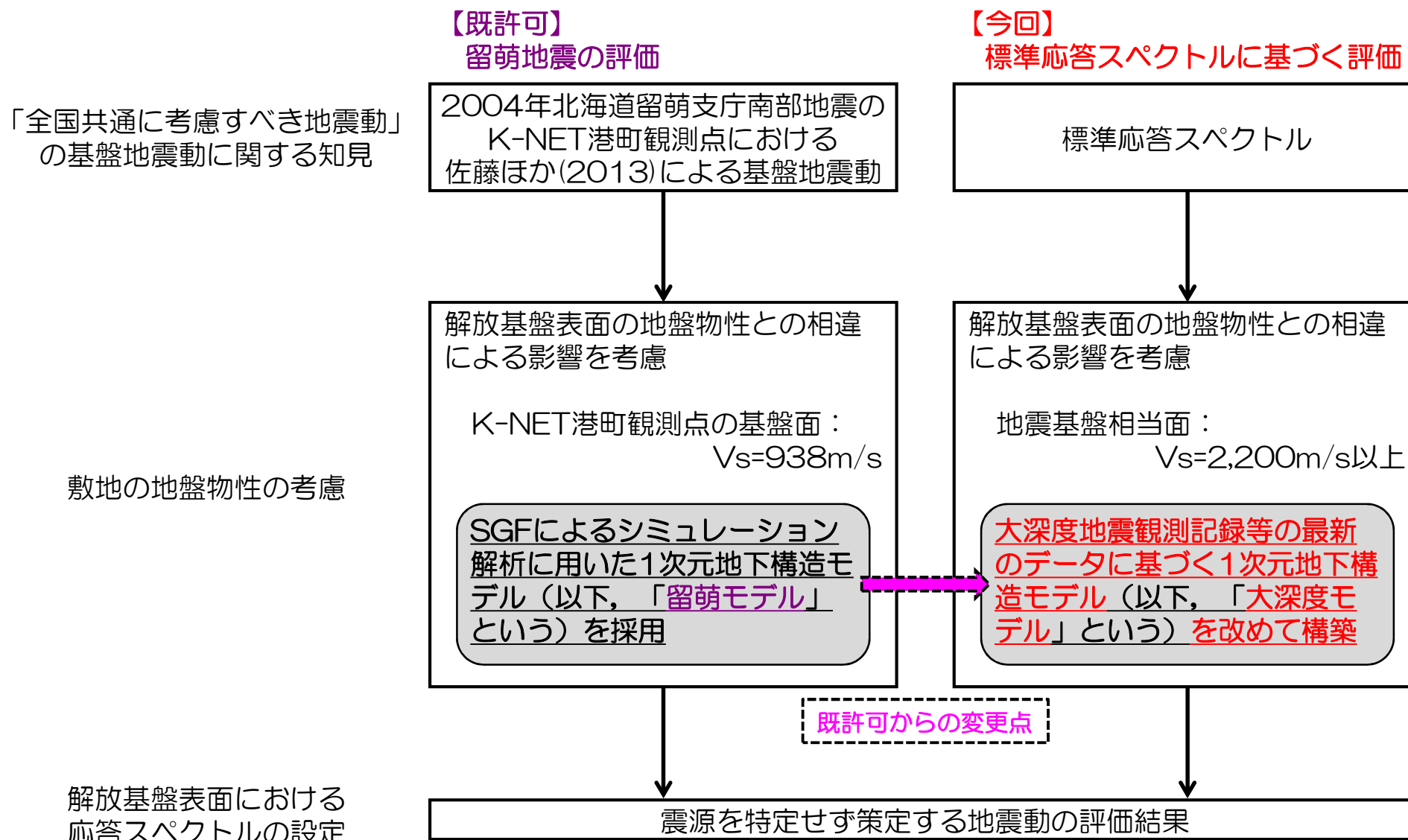
標準応答スペクトルに基づく評価に用いる
地下構造モデルの設定について

2021年6月30日
東京電力ホールディングス株式会社

1. 震源を特定せず策定する地震動の評価に用いる地下構造モデル

- 柏崎刈羽原子力発電所では、既許可以降も、敷地地盤における地震観測に継続して取り組み、データの取得に努めてきた。
- 敷地地盤の深部での増幅特性をより直接的に把握するために、大深度地震観測にも新たに取り組み、荒浜側・大湊側のそれぞれでデータの蓄積が進んでいる。
- 更なる安全性・信頼性の向上を目的に、新たに蓄積されたデータを活用し、既許可の審査に用いた1次元地下構造モデルの検証に組み込むとともに、新たに、大深度地震観測記録に整合する1次元地下構造モデルの構築にも取り組んできた。
- 今回、標準応答スペクトルが規制に取り入れられることとなり、この新たな知見に対して適切なモデルを用いて評価を行うことを念頭に、地下構造モデルの更なる精度向上・検証に関する検討を進めてきた。
- 以上の既許可以降の取り組みを踏まえ、本評価においては、最新のデータを活用して新たに構築した1次元地下構造モデルを採用する。

1. 震源を特定せず策定する地震動の評価に用いる地下構造モデル



1. 震源を特定せず策定する地震動の評価に用いる地下構造モデル

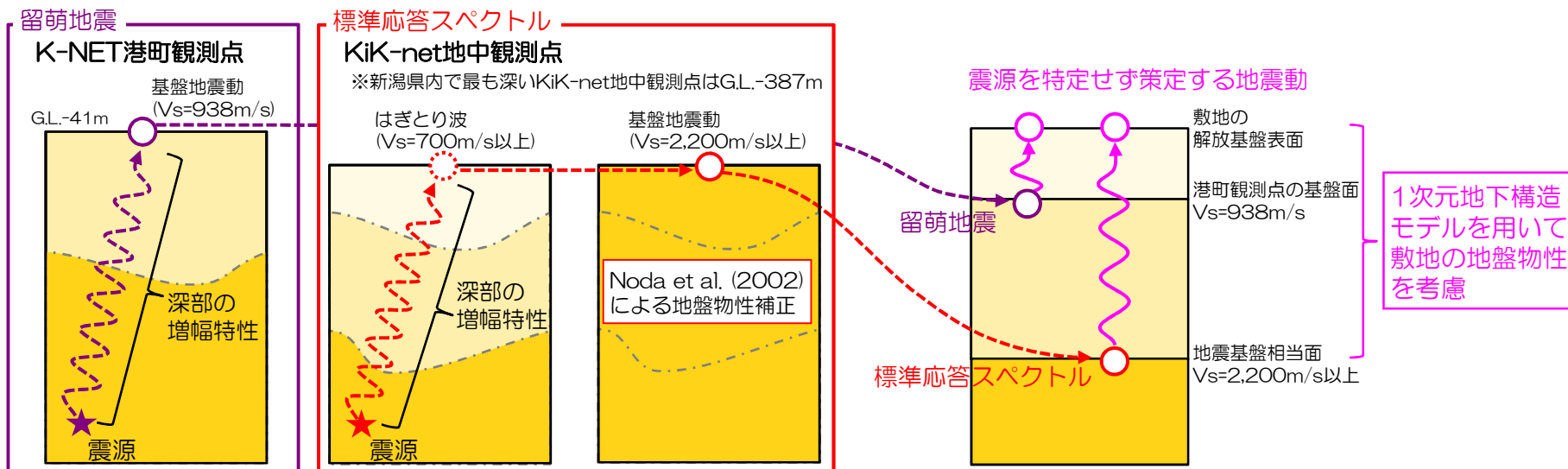
- 増幅特性の反映方針（既許可から変更無し、既許可の留萌地震と今回の標準応答スペクトルで共通）
 - 留萌地震の基盤地震動はK-NET港町観測点の $V_s=938\text{m/s}$ の基盤層、標準応答スペクトルは $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面において評価され、敷地の解放基盤表面とは地盤物性が異なる。
 - 留萌地震の基盤地震動及び標準応答スペクトルの知見には、観測点より深部の増幅特性（不整形による影響等）が含まれていると考えられる。
 - 以上を踏まえ、留萌地震の基盤地震動及び標準応答スペクトルに対し、敷地の地盤物性との相違による影響を1次元地下構造モデルを用いて考慮し、解放基盤表面における応答スペクトルを設定する。
 - なお、敷地の増幅特性に関しては、南西方向から到来する地震波では荒浜側の増幅が異なることが明らかとなっており、これは「震源を特定して策定する地震動」の評価において適切に反映している。

● 留萌地震及び標準応答スペクトル

- 敷地の解放基盤表面と異なる地盤物性で評価されている
- 基盤地震動には深部の増幅特性（不整形による影響等）が含まれる

● 震源を特定せず策定する地震動の評価

- 1次元地下構造モデルを用いて敷地の地盤物性を考慮する
- 既に深部の増幅特性が考慮された基盤地震動を用いる



2. 地下構造モデルの設定方針

2.1 地下構造モデルの設定における検討項目の整理

	留萌モデル	大深度モデル
手法とターゲット	小林ほか(2005) ・P波部H/Vスペクトル比 ・レシーバー関数	梅田・小林(2010) ・P波部H/Vスペクトル比 ・レシーバー関数 ・コーダ部H/Vスペクトル比
ターゲットに用いた地震	2004年新潟県中越地震の余震域の地震	2004年新潟県中越地震の余震域の地震
同定範囲	荒浜側：標高-250m～地震基盤 大湊側：標高-300m～地震基盤 (浅部ははぎとりモデルで固定)	荒浜側：標高-250m～地震基盤 大湊側：標高-300m～地震基盤 (浅部ははぎとりモデルで固定)
探索条件	荒浜側と大湊側で地盤物性・層厚とも等しいと仮定	荒浜側と大湊側のそれぞれで同定し、下部4層では地盤物性が等しいと仮定
探索範囲	範囲を広く設定	大深度ボーリングによるPS検層結果及び反射法地震探査等に基づく2次元地下構造モデルを参照して設定
減衰	全層で一律の値を設定	観測記録に基づき最適化された同定結果
大深度地震観測記録による妥当性検証	— (今回、比較として確認を実施)	2021年3月までに得られた大深度地震観測記録 (M3.5以上, 震央距離100km以内) ・荒浜側：12地震 ・大湊側：3地震

□：精度向上のために検討を追加した項目

2. 地下構造モデルの設定方針

2.2 地下構造モデルの設定手順

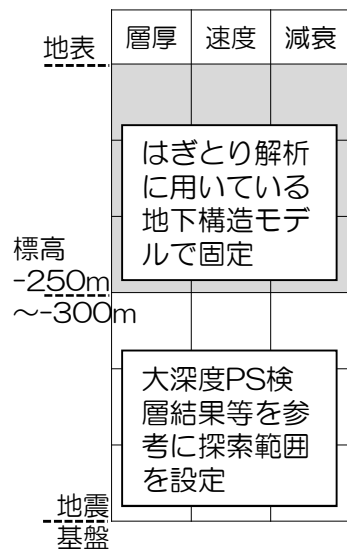
- 敷地における水平アレイ地震観測点の1次元地下構造モデルの評価で適用実績のある梅田・小林(2010)の手法に基づき、敷地の地震基盤から地表までの増幅特性の情報を含んだ地表の観測記録を用いて、P波部H/Vスペクトル比、レシーバー関数、コーダ部H/Vスペクトル比をターゲットとした同時逆解析により、地震基盤までの地下構造モデルを評価。
- 評価した地下構造モデルについて、大深度ボーリングのPS検層結果等との整合性や大深度地震観測記録の再現性を確認し、その妥当性を検証。

地下構造モデルの設定手順

3. 地下構造モデルの評価

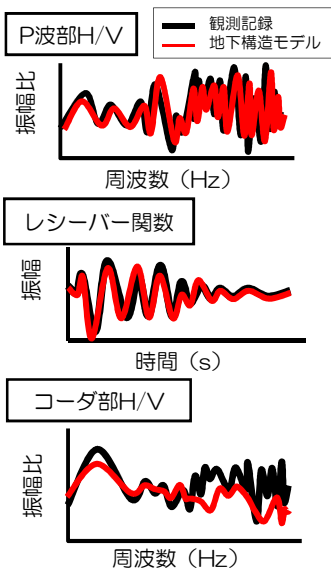
3.1 解析条件

- 探索範囲は大深度PS検層結果等を参考に設定



3.2 地下構造モデルの逆解析

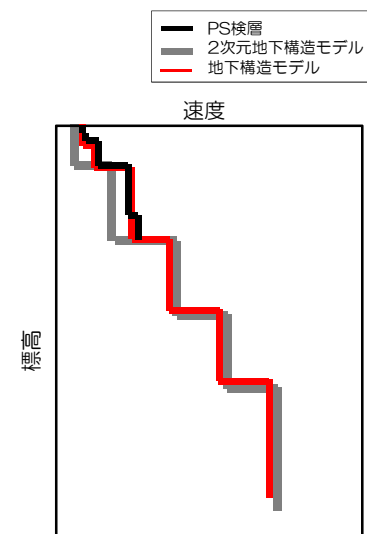
- ターゲットとした観測記録を再現する地下構造モデルを逆解析により同定



4. 地下構造モデルの妥当性検証

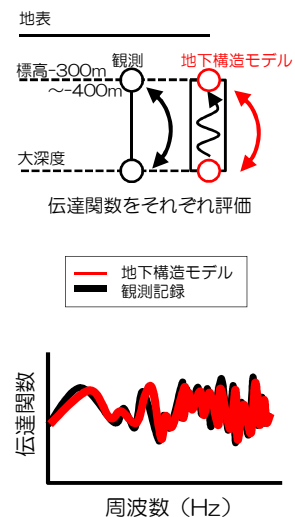
4.1 PS検層結果及び2次元地下構造モデルとの比較による検証

- 速度構造が概ね整合していることを確認

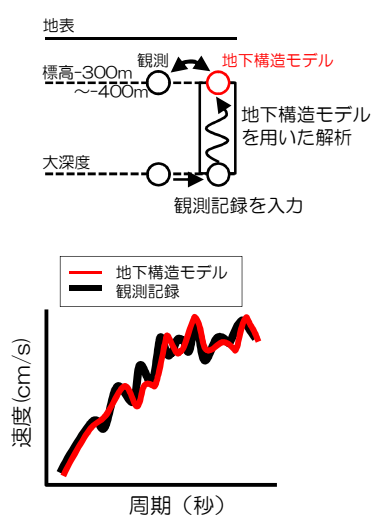


4.2 大深度地震観測記録による検証

- 地下構造モデルと観測記録の伝達関数の整合性を確認



- 地下構造モデルを用いた解析により観測記録の再現性を確認



3. 地下構造モデルの評価

3.1 解析条件 ①逆解析のターゲットに用いる観測記録

■ 検討に用いる地震は、手法の適用性を考慮して以下の観点でそれぞれ選定。敷地の地震基盤から地表までの増幅特性の情報を含んだ地表の観測記録を用いて評価。

- P波部H/Vスペクトル比, レシーバー関数の検討：S/N比が良く, P波初動が記録されており, 震央距離が同程度の地震
- コーダ部H/Vスペクトル比の検討：表面波が十分に含まれている地震

荒浜側

P波部の検討に用いる地震

発震日時	Mj	震央距離 (km)
2004/10/24 09:28	4.8	35
2004/10/25 00:28	5.3	35
2004/11/01 04:35	5.0	36

コーダ部の検討に用いる地震

発震日時	Mj	震央距離 (km)
1998/02/21 09:55	5.2	25
2004/10/23 19:36	5.3	31
2004/10/24 14:21	5.0	28
2004/11/01 04:35	5.0	36
2007/01/08 18:59	4.8	34

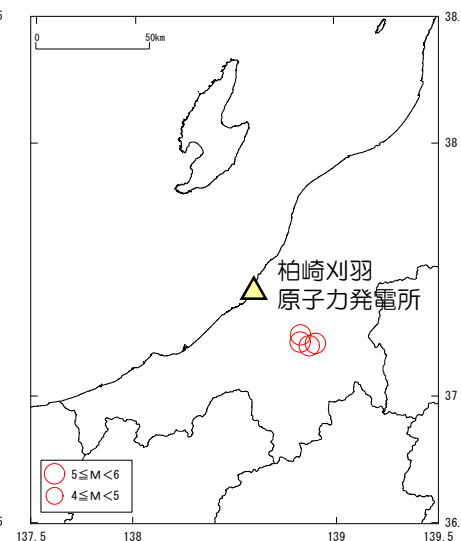
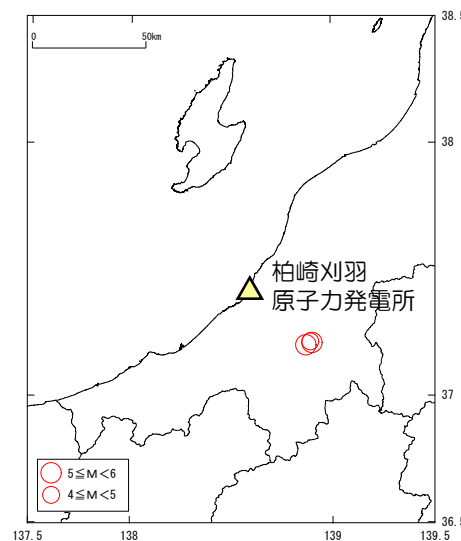
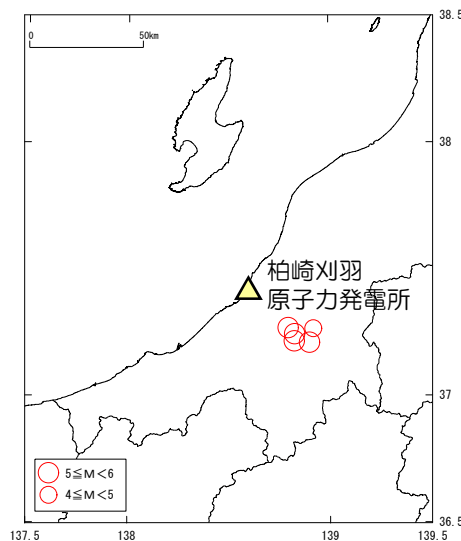
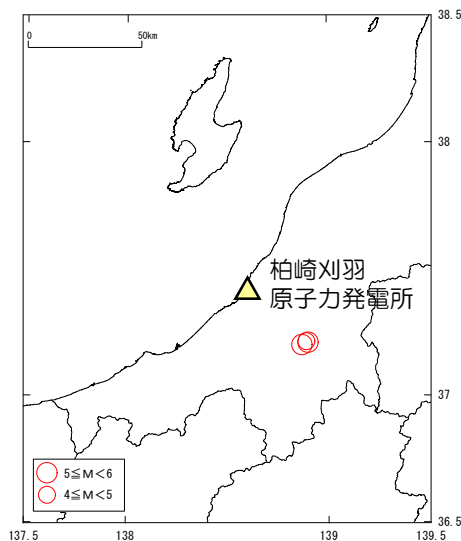
大湊側

P波部の検討に用いる地震

発震日時	Mj	震央距離 (km)
2004/10/24 09:28	4.8	35
2004/10/25 00:28	5.3	35
2004/11/01 04:35	5.0	36

コーダ部の検討に用いる地震

発震日時	Mj	震央距離 (km)
2004/10/23 19:36	5.3	31
2004/10/24 14:21	5.0	28
2004/10/25 00:28	5.3	35
2004/11/01 04:35	5.0	36



3. 地下構造モデルの評価

3.1 解析条件 ②逆解析の探索範囲

- 地下構造モデルの逆解析は、遺伝的アルゴリズムを用い、層厚、S波速度、P波速度、減衰（ Q_s , Q_p ）を未知数として探索。
- 探索範囲は、大深度ボーリングのPS検層結果や、反射法地震探査結果等に基づく2次元地下構造モデルを参考に設定。
- なお、標高-250m～標高-300m 以浅については、既許可のはざとり解析に用いている地下構造モデルで固定。

荒浜側

層No.	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	Qs ^{*2}		Qp ^{*2}	
					Qo	n	Qo	n
1	2.0	2.00	100	920	2.50	0.90	1.70	0.90
2	4.0	2.00	180	920	2.50	0.90	1.70	0.90
3	14.0	1.76	270	950	2.50	0.90	2.50	0.80
4	52.0	1.72	430	1600	2.50	0.90	2.50	0.80
5	81.0	1.72	520	1700	2.50	0.90	5.00	0.80
6	82.0	1.72	730	1700	2.50	0.90	5.00	0.80
7	20.0	1.72	820	2200	2.50	0.90	5.00	0.80
8	430~530	1.70	820~1000	2200~2300	5~50	0~1	5~50	0~1
9	470~870	2.10	1300~1500	2700~2800	5~50	0~1	5~50	0~1
10	280~680	2.30	1200~1870	2400~3470	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
11 ^{*1}	640~1040	2.40	1800~2200	3990~4410	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
12 ^{*1}	980~1380	2.50	2340~2860	4370~4830	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
13 ^{*1}	2100~2600	2.60	2790~3410	4940~5460	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
14 ^{*1}	/	2.70	3060~3500	5410~5990	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1

大湊側

: はざとり解析に用いている地下構造モデル
 : 今回評価

層No.	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	Qs ^{*2}		Qp ^{*2}	
					Qo	n	Qo	n
1	2.7	2.00	180	850	0.63	0.10	1.67	0.60
2	7.3	2.00	210	920	2.50	0.85	2.50	0.60
3	18.6	1.78	310	1300	2.50	0.85	1.25	0.60
4	16.4	1.70	420	1700	2.50	0.85	2.00	0.60
5	33.0	1.75	440	1700	2.50	0.85	2.00	0.90
6	22.0	1.75	550	1700	2.50	0.85	2.00	0.90
7	32.0	1.84	640	1700	5.00	0.85	3.33	0.90
8	29.0	2.03	730	1800	5.00	0.85	3.33	0.90
9	82.0	2.03	890	1900	5.00	0.85	3.33	0.90
10	35.0	2.03	960	1900	5.00	0.85	3.33	0.90
11	34.0	2.03	1000	2100	5.00	0.85	3.33	0.90
12	500~600	2.10	1000~1200	2100~2500	5~50	0~1	5~50	0~1
13	840~1240	2.30	1300~1450	2600~2900	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
14 ^{*1}	650~1050	2.40	1800~2200	3990~4410	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
15 ^{*1}	1000~1400	2.50	2340~2860	4370~4830	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
16 ^{*1}	2050~2550	2.60	2790~3410	4940~5460	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1
17 ^{*1}	/	2.70	3060~3500	5410~5990	5~100	0.5~1	5~100	0.5~1

※1 層厚以外の物性値は荒浜側・大湊側で共通と仮定。

※2 $Q(f) = Q_0 \times f^n$ を仮定。

3. 地下構造モデルの評価

3.2 地下構造モデルの逆解析

■ P波部H/Vスペクトル比, レシーバー関数, コーダ部H/Vスペクトル比をターゲットとした同時逆解析により, 荒浜側と大湊側のそれぞれで地下構造モデルを同定。

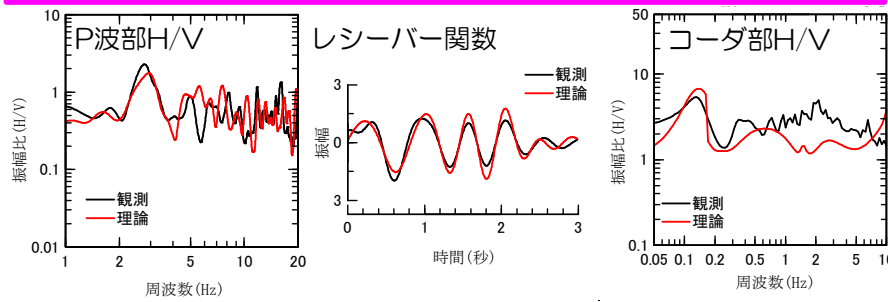
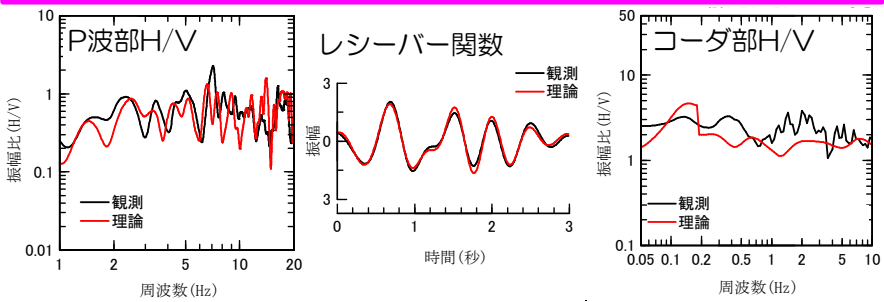
荒浜側

層No.	標高 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	Qs		Qp	
						Qo	n	Qo	n
1	5.0	2.0	2.00	100	920	2.50	0.90	1.70	0.90
2	3.0	4.0	2.00	180	920	2.50	0.90	1.70	0.90
3	-1.0	14.0	1.76	270	950	2.50	0.90	2.50	0.80
4	-15.0	52.0	1.72	430	1600	2.50	0.90	2.50	0.80
5	-67.0	81.0	1.72	520	1700	2.50	0.90	5.00	0.80
6	-148.0	82.0	1.72	730	1700	2.50	0.90	5.00	0.80
7	-230.0	20.0	1.72	820	2200	2.50	0.90	5.00	0.80
8	-250.0	514.5	1.70	997	2210	14.91	0.89	5.27	0.61
9	-764.5	477.8	2.10	1500	2700	19.37	0.75	10.22	0.85
10	-1242.3	654.0	2.30	1870	2760	11.55	0.52	9.19	0.70
11	-1896.3	895.9	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66
12	-2792.2	1289.3	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85
13	-4081.5	2388.3	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72
14	-6469.8		2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72

大湊側

■ はぎとり解析に用いている地下構造モデル
 ■ 今回評価

層No.	標高 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	Qs		Qp	
						Qo	n	Qo	n
1	12.0	2.7	2.00	180	850	0.63	0.10	1.67	0.60
2	9.3	7.3	2.00	210	920	2.50	0.85	2.50	0.60
3	2.0	18.6	1.78	310	1300	2.50	0.85	1.25	0.60
4	-16.6	16.4	1.70	420	1700	2.50	0.85	2.00	0.60
5	-33.0	33.0	1.75	440	1700	2.50	0.85	2.00	0.90
6	-66.0	22.0	1.75	550	1700	2.50	0.85	2.00	0.90
7	-88.0	32.0	1.84	640	1700	5.00	0.85	3.33	0.90
8	-120.0	29.0	2.03	730	1800	5.00	0.85	3.33	0.90
9	-149.0	82.0	2.03	890	1900	5.00	0.85	3.33	0.90
10	-231.0	35.0	2.03	960	1900	5.00	0.85	3.33	0.90
11	-266.0	34.0	2.03	1000	2100	5.00	0.85	3.33	0.90
12	-300.0	534.5	2.10	1200	2420	14.32	0.90	6.11	0.59
13	-834.5	881.7	2.30	1300	2610	15.05	0.89	6.12	0.61
14	-1716.2	897.1	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66
15	-2613.3	1331.0	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85
16	-3944.3	2148.1	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72
17	-6092.4		2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72



※ 観測及び理論ともに, 次の波形処理を同様に実施。P波部H/V: Parzen Window 0.5Hzでスムージング, レシーバー関数: P波部H/Vをフーリエ逆変換し1~2Hzのバンドパスフィルター, コーダ部H/V: Parzen Window 0.1Hzでスムージング。

■ 地下構造モデルによる理論値は, ターゲットとした観測記録を良好に再現できており, 逆解析による地下構造モデルの同定が適切に行われていることを確認。

4. 地下構造モデルの妥当性検証

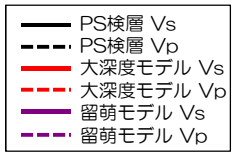
4.1 PS検層結果及び2次元地下構造モデルとの比較による検証

■ 大深度モデル及び留萌モデルの速度構造について、PS検層結果と比較。

PS検層結果との比較

荒浜側

大湊側

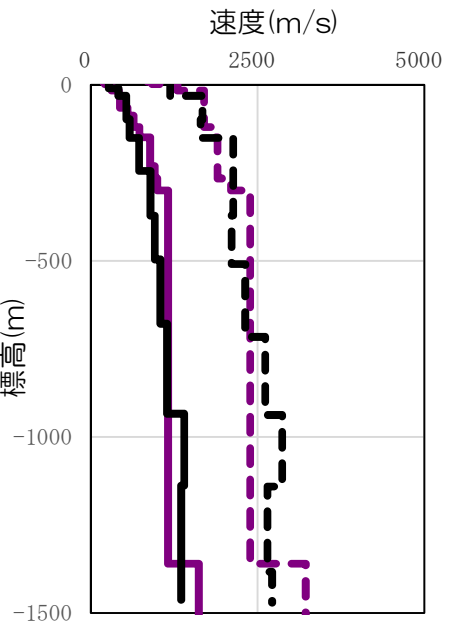
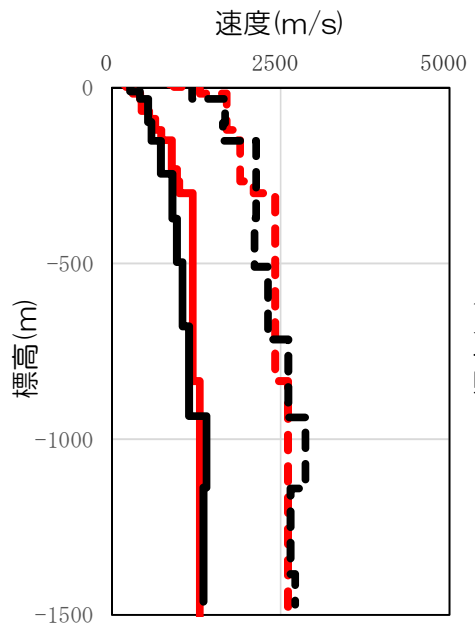
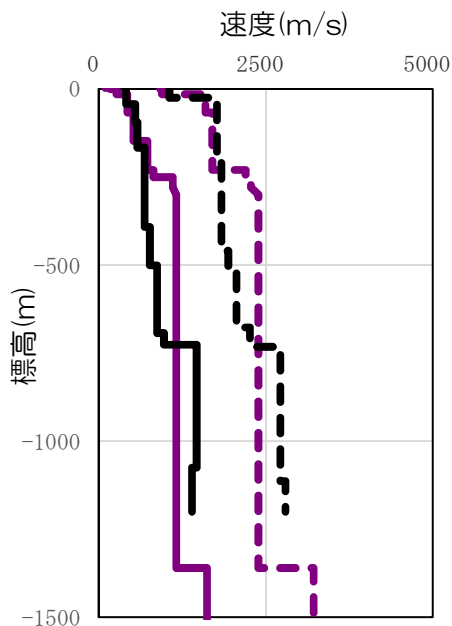
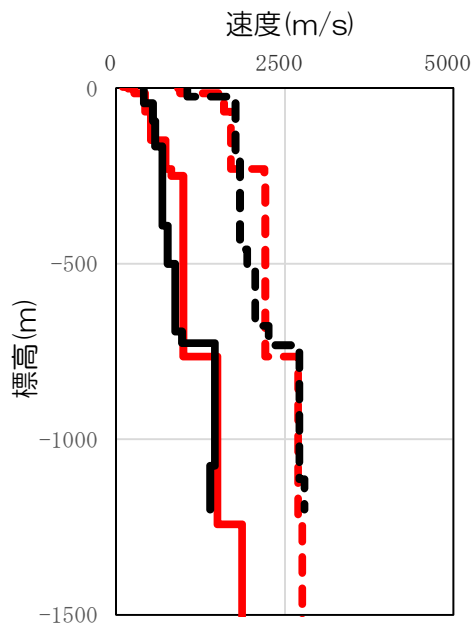


大深度モデル

留萌モデル

大深度モデル

留萌モデル



■ 留萌モデルは大深度ボーリングを実施する以前の検討でありPS検層結果との対応が十分でなかったが、大深度モデルは大深度PS検層結果の速度構造と整合していることを確認。

4. 地下構造モデルの妥当性検証

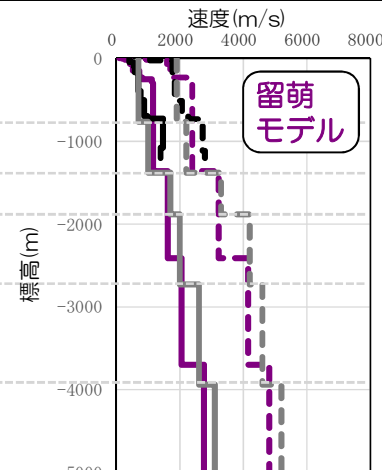
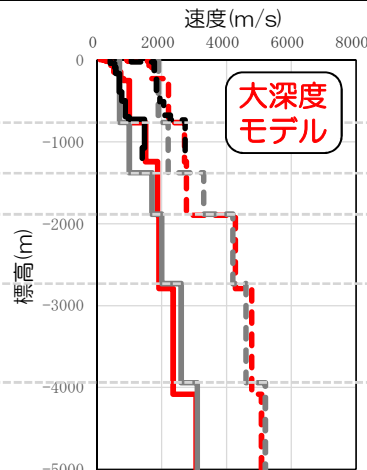
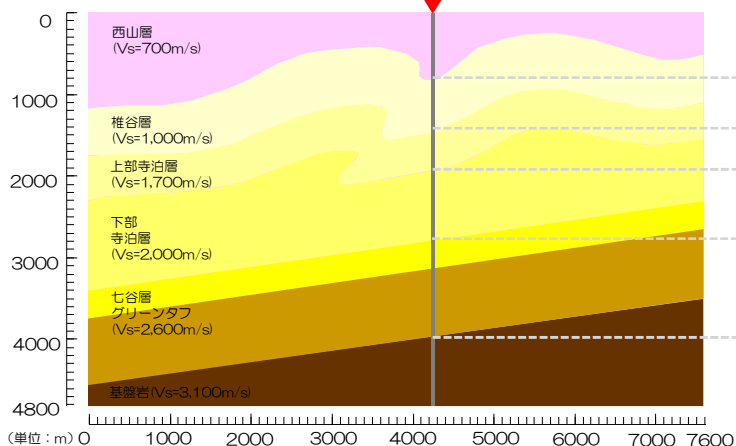
4.1 PS検層結果及び2次元地下構造モデルとの比較による検証

■ 大深度モデル及び留萌モデルの速度構造について、反射法地震探査結果等に基づく2次元地下構造モデルから鉛直アレイ地震観測点位置で抽出した速度構造と比較。

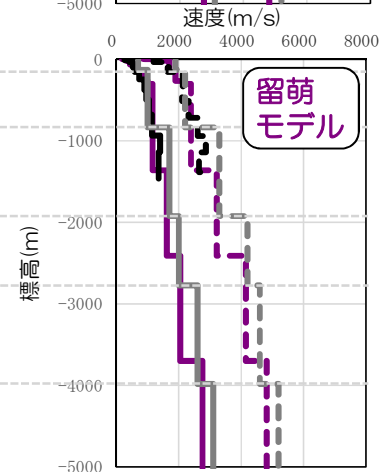
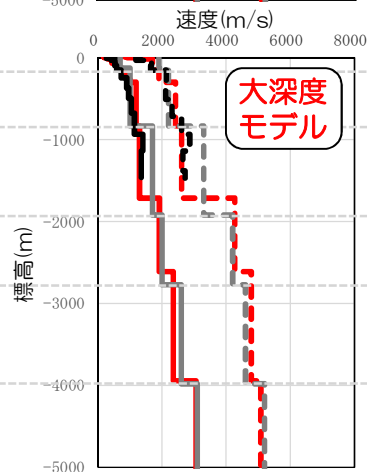
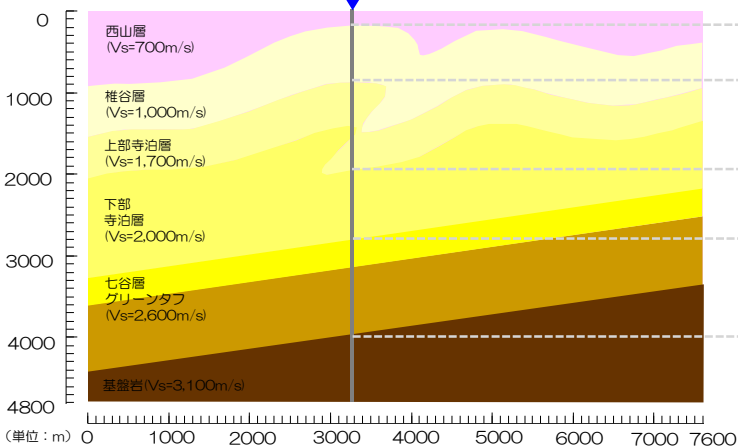
2次元地下構造モデルとの比較

— PS検層 Vs — 2次元地下構造モデル Vs — 大深度モデル Vs — 留萌モデル Vs
 - - - PS検層 Vp - - - 2次元地下構造モデル Vp - - - 大深度モデル Vp - - - 留萌モデル Vp

荒浜側



大湊側



■ 留萌モデルは荒浜側と大湊側で共通の層構造を仮定したことから2次元地下構造モデルの層境界との対応が十分でなかったが、大深度モデルは2次元地下構造モデルの速度構造と整合していることを確認。

4. 地下構造モデルの妥当性検証

4.2 大深度地震観測記録による検証 ①伝達関数

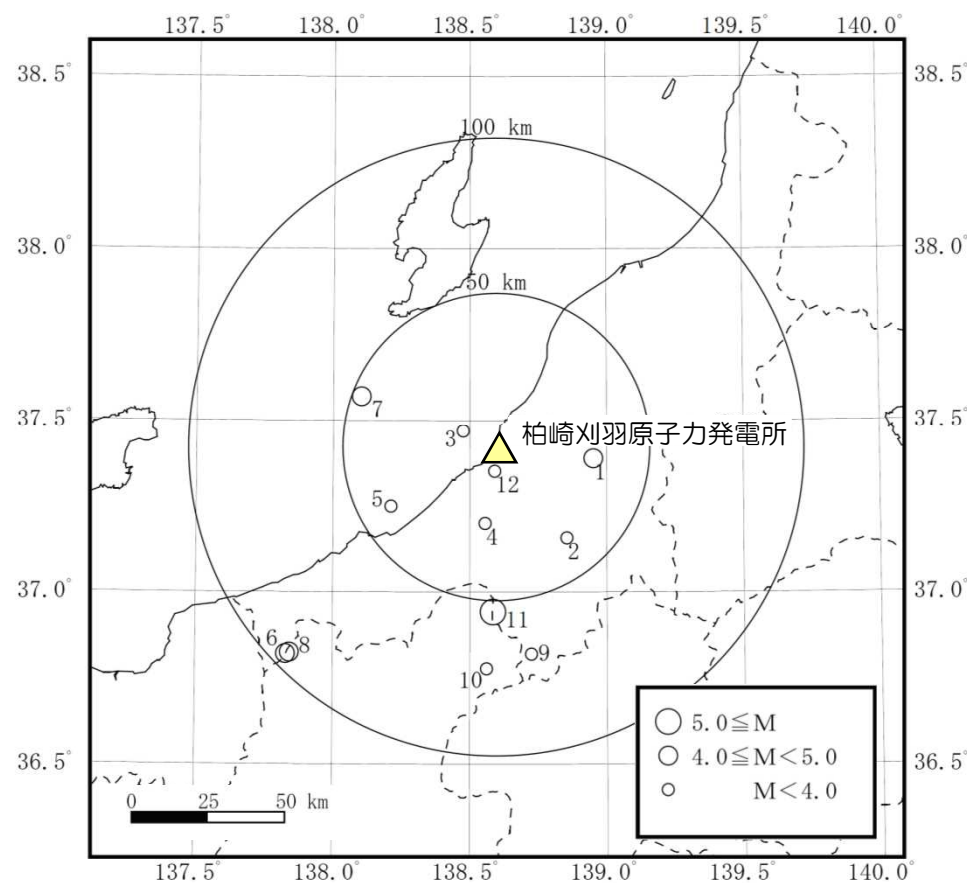
■ 地下構造モデルの理論伝達関数について、2021年3月までに敷地周辺の100km以内で発生したM3.5以上の地震を対象として、大深度地震観測記録と標高-300m～標高-400mの観測記録を用いて伝達関数を評価し比較。

地震の諸元

※地震の諸元は気象庁による

No.	発震日時	Mj	震央距離 (km)	記録の取得状況	
				荒浜側	大湊側
1	2014/04/08 05:07	4.4	32	○	観測 開始前
2	2015/04/24 03:27	3.9	38	○	
3	2015/06/16 13:42	3.8	11	○	
4	2015/07/20 22:56	3.5	25	○	
5	2016/05/01 00:41	3.5	39	○	
6	2016/06/25 13:51	4.8	96	○	
7	2016/06/27 13:36	4.6	46	○	
8	2016/07/01 08:04	4.6	94	○	
9	2017/04/14 23:01	3.9	68	○	○
10	2017/08/11 16:46	3.8	72	○	起動なし
11	2018/05/25 21:13	5.2	54	○	○
12	2020/07/24 21:38	3.5	8	○	○

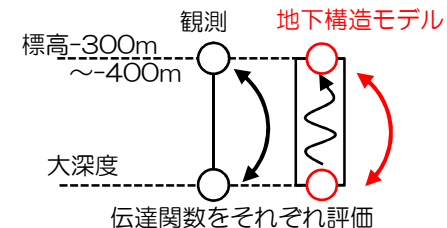
震央分布



4. 地下構造モデルの妥当性検証

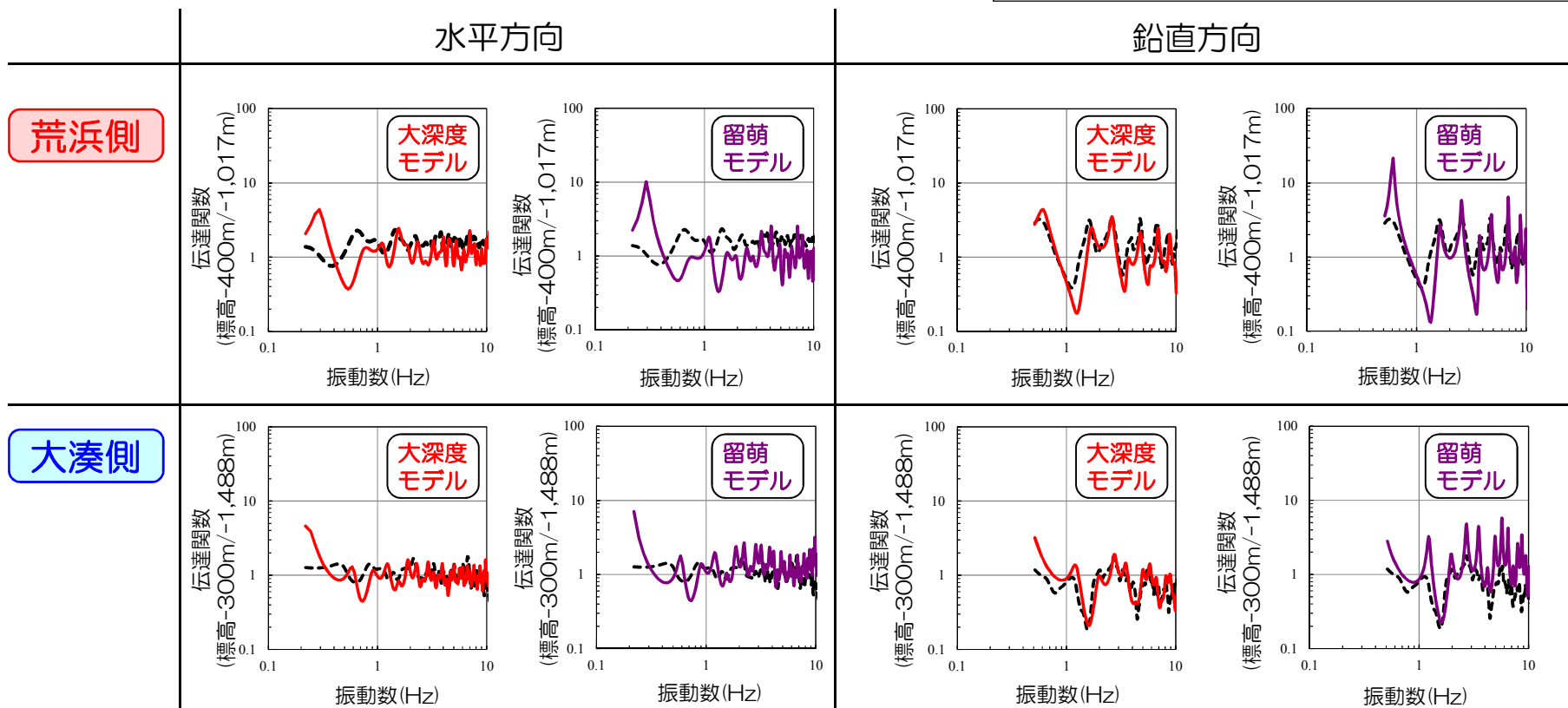
4.2 大深度地震観測記録による検証 ①伝達関数

■ 大深度モデル及び留萌モデルの理論伝達関数について、観測記録の伝達関数と比較。



伝達関数の比較

----- 観測記録 ———— 大深度モデル ———— 留萌モデル



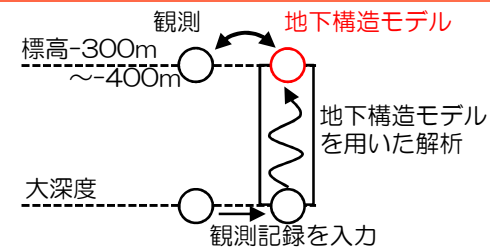
※ 観測はParzen Window 0.2Hzでスムージング，理論はスムージングしていない。

■ 大深度モデルの理論伝達関数は、留萌モデルよりも観測記録の伝達関数と整合していることを確認。

4. 地下構造モデルの妥当性検証

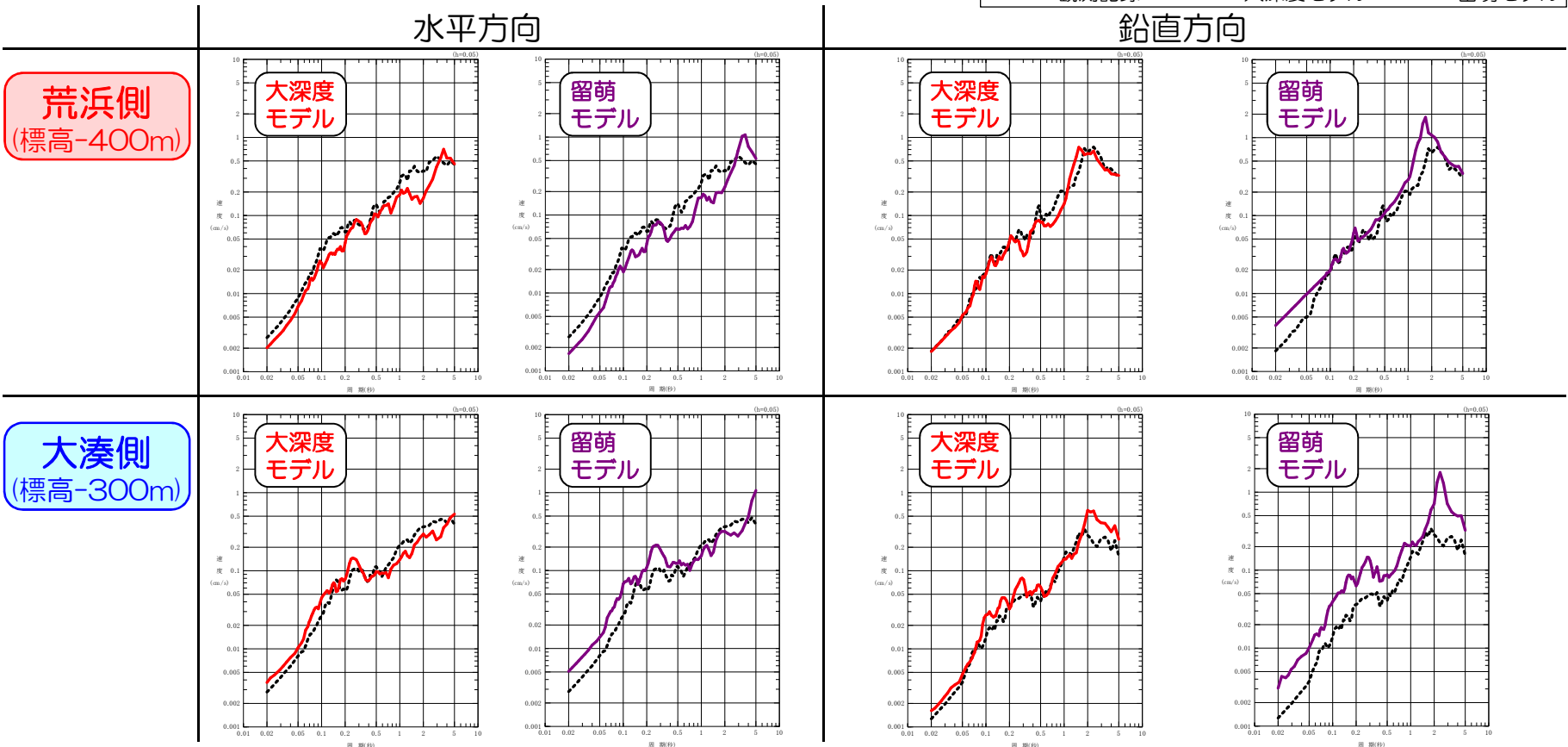
4.2 大深度地震観測記録による検証 ②シミュレーション解析

■ 大深度モデル及び留萌モデルを用いたシミュレーション解析による観測記録の再現性について、大深度地震観測記録が得られている規模の最も大きな地震を対象として、重複反射理論に基づく評価を実施し、観測記録と比較。



シミュレーション解析結果と観測記録の比較 (No11 2018/05/25 21:13, M5.2の地震)

--- 観測記録 — 大深度モデル — 留萌モデル



■ 大深度モデルを用いた解析結果は、留萌モデルよりも観測記録を良好に再現できていることを確認。

5. 地下構造モデルの設定

- 以上より、大深度モデルが、より観測記録を再現可能なモデルであることを確認したことから、標準応答スペクトルに基づく解放基盤表面における応答スペクトルの評価においては、このモデルを採用する。
- 今回、このモデルを採用することによる既許可への影響は、以下の通り整理される。
 - 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動については、経験的グリーン関数法による評価を行っており、地下構造モデルを用いた評価は行っていないことから、既許可での評価に変更は生じない。
 - 震源を特定せず策定する地震動については、留萌モデルを用いて敷地の地盤物性との相違による影響を考慮しているため、大深度モデルを用いた場合に変更が生じる可能性が考えられることから、確認を行う。

荒浜側

層No.	標高 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波 速度 (m/s)	P波 速度 (m/s)	Qs*		Qp*		備考
						Qo	n	Qo	n	
	-284.0									解放基盤表面
1	-764.5	480.5	1.70	997	2210	14.91	0.89	5.27	0.61	
2	-1242.3	477.8	2.10	1500	2700	19.37	0.75	10.22	0.85	
3	-1896.3	654.0	2.30	1870	2760	11.55	0.52	9.19	0.70	
4	-2792.2	895.9	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66	入力位置
5	-4081.5	1289.3	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85	
6	-6469.8	2388.3	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72	
7			2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72	

※Q(f)=Qo×fnを仮定。

大湊側

層No.	標高 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波 速度 (m/s)	P波 速度 (m/s)	Qs*		Qp*		備考
						Qo	n	Qo	n	
	-134.0									解放基盤表面
1	-149.0	15.0	2.03	730	1800	5.00	0.85	3.33	0.90	
2	-231.0	82.0	2.03	890	1900	5.00	0.85	3.33	0.90	
3	-266.0	35.0	2.03	960	1900	5.00	0.85	3.33	0.90	
4	-300.0	34.0	2.03	1000	2100	5.00	0.85	3.33	0.90	
5	-834.5	534.5	2.10	1200	2420	14.32	0.90	6.11	0.59	
6	-1716.2	881.7	2.30	1300	2610	15.05	0.89	6.12	0.61	
7	-2613.3	897.1	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66	入力位置
8	-3944.3	1331.0	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85	
9	-6092.4	2148.1	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72	
10			2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72	

※Q(f)=Qo×fnを仮定。

6. 既許可の基準地震動への影響確認

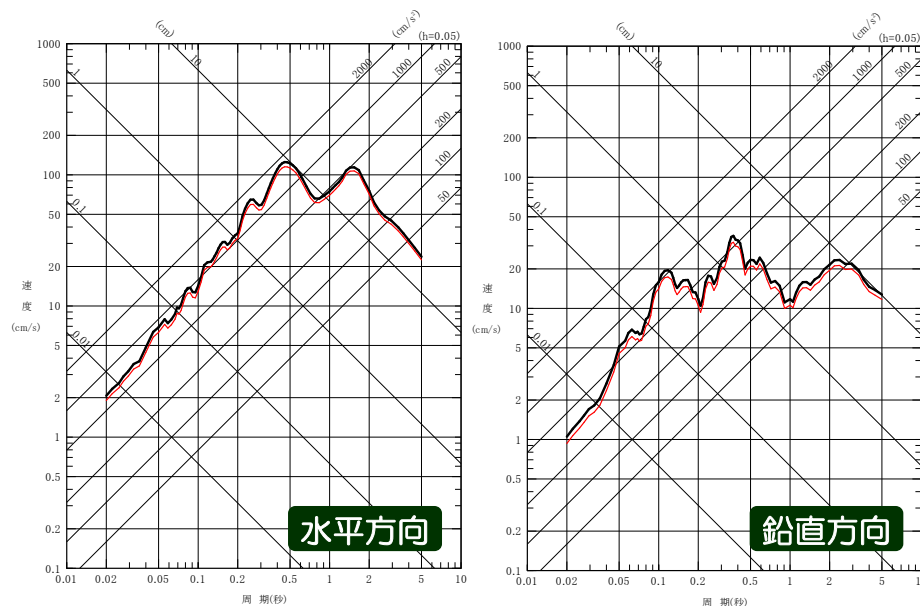
- 既許可での評価と同様にして、大湊側の大深度モデルにおいて、港町観測点の基盤層の $V_s=938\text{m/s}$ に近い $V_s=960\text{m/s}$ 層の上面に、不確かさを考慮した港町観測点の基盤地震動を入力し、重複反射理論により解放基盤表面の応答スペクトルを評価。
- 既許可の基準地震動 S_s-8 は、評価結果に保守性を加えて策定したものであることから、これと大深度モデルを用いた場合の評価結果を比較。
- 大深度モデルを用いた場合の評価結果は、 S_s-8 を下回ることを確認したことから、既許可の基準地震動 S_s-8 に変更はない。

大湊側

層No.	標高 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	S波 速度 (m/s)	P波 速度 (m/s)	Q_s^*		Q_p^*		備考
						Q_0	n	Q_0	n	
1	-134.0									解放基盤表面
2	-149.0	15.0	2.03	730	1800	5.00	0.85	3.33	0.90	入力位置
3	-231.0	82.0	2.03	890	1900	5.00	0.85	3.33	0.90	
4	-266.0	35.0	2.03	960	1900	5.00	0.85	3.33	0.90	
5	-300.0	34.0	2.03	1000	2100	5.00	0.85	3.33	0.90	
6	-334.5	534.5	2.10	1200	2420	14.32	0.90	6.11	0.59	
7	-381.7	881.7	2.30	1300	2610	15.05	0.89	6.12	0.61	
8	-471.6	897.1	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66	
9	-561.3	1331.0	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85	
10	-654.3	2148.1	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72	
	-7092.4		2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72	

※ $Q(f)=Q_0 \times f^n$ を仮定。

— 基準地震動 S_s-8 (水平方向： 650cm/s^2 ，鉛直方向： 330cm/s^2)
 — 大深度モデルの評価結果(水平方向： 598cm/s^2 ，鉛直方向： 293cm/s^2)

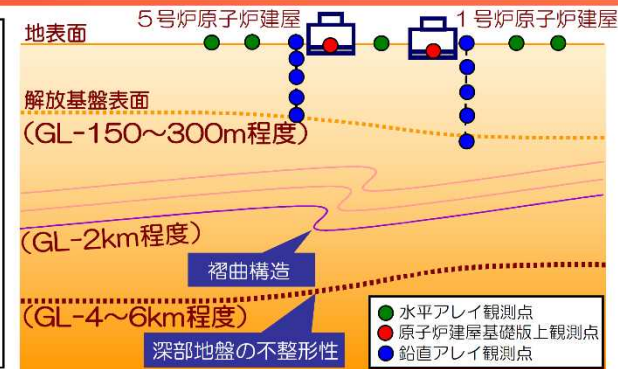


【参考】既許可における地震波の増幅特性の評価

柏崎刈羽原子力発電所
6号及び7号炉審査資料
(2017年12月)より抜粋

5.3 地震波の増幅特性

- 中越沖地震では、敷地の増幅特性に関して、地震観測記録の分析、解析的検討により、褶曲構造及び深部地盤における不整形性の影響が確認されている。
5.3.1(1), 5.3.1(2)a 及び 5.3.2(1), 5.3.2(2)
- これらに加え、解放基盤表面以浅の影響に関する検討及び原子炉建屋基礎版上の観測記録・水平アレイ観測記録の分析を実施することにより、敷地内全体の増幅特性を把握することができているものと考えられる。
5.3.1(2)b, 5.3.1(3), 5.3.1(4)



解放基盤表面以浅の影響	5.3.1(2)b.鉛直アレイ観測記録（小規模地震） 地表観測点/地中観測点のスペクトル比を到来方向別に分析し、解放基盤以浅においては不整形等による特異な増幅はない		5.3.1(3)原子炉建屋基礎版上の観測記録	5.3.1(4)水平アレイ観測記録 5号炉周辺の観測点を基準としてスペクトル比を到来方向別にとり、地震動特性の差異を確認 南西から到来する地震動のみ、地震波の顕著な増幅が認められる領域が確認され、1号炉周辺の観測点で著しく大きくなる 補足説明資料 各地点で推定した地下構造モデルによると解放基盤表面相当～地表までの増幅率は荒浜側と大湊側で顕著な差異がない。
褶曲構造の影響	5.3.1(1)中越沖地震の地震観測記録 耐専スペクトル※との比率に違いがあり荒浜側の方が大きい	5.3.1(2)a.鉛直アレイ観測記録（中規模地震） 【海域】耐専スペクトル※との比率に違いがあり荒浜側の方が大きい（中越沖地震と同じ傾向） 【陸域】耐専スペクトル※との比率は荒浜側と大湊側で同程度	5.3.1(2)b.鉛直アレイ観測記録（小規模地震） 荒浜側、大湊側の解放基盤波をそれぞれ推定し、スペクトル比を到来方向別に分析	5.3.2(2)敷地近傍の地下構造モデルを用いた解析的検討 敷地の褶曲構造を反映した2次元地下構造モデルを用いた検討により、敷地の南西方向からの地震に対して荒浜側が大湊側と比較して大きな増幅となることを確認
深部地盤における不整形性の影響	5.3.1(1)中越沖地震の地震観測記録 耐専スペクトル※との比率が荒浜側、大湊側ともに1を上回る	5.3.1(2)a.鉛直アレイ観測記録（中規模地震） 【海域】耐専スペクトル※との比率が荒浜側、大湊側ともに1を上回る 【陸域】耐専スペクトル※との比率が荒浜側、大湊側ともに1秒より短い周期帯で1を下回る	敷地の南西側で発生した地震で著しい違いを示すことを確認	5.3.2(1)広域の地下構造モデルを用いた解析的検討 3次元地下構造モデルを用いた有限差分法により、南西方向で発生した地震においては、敷地より西側の領域より敷地近傍において増幅傾向にあることを確認

※耐専スペクトル：Noda et al.(2002)による応答スペクトル

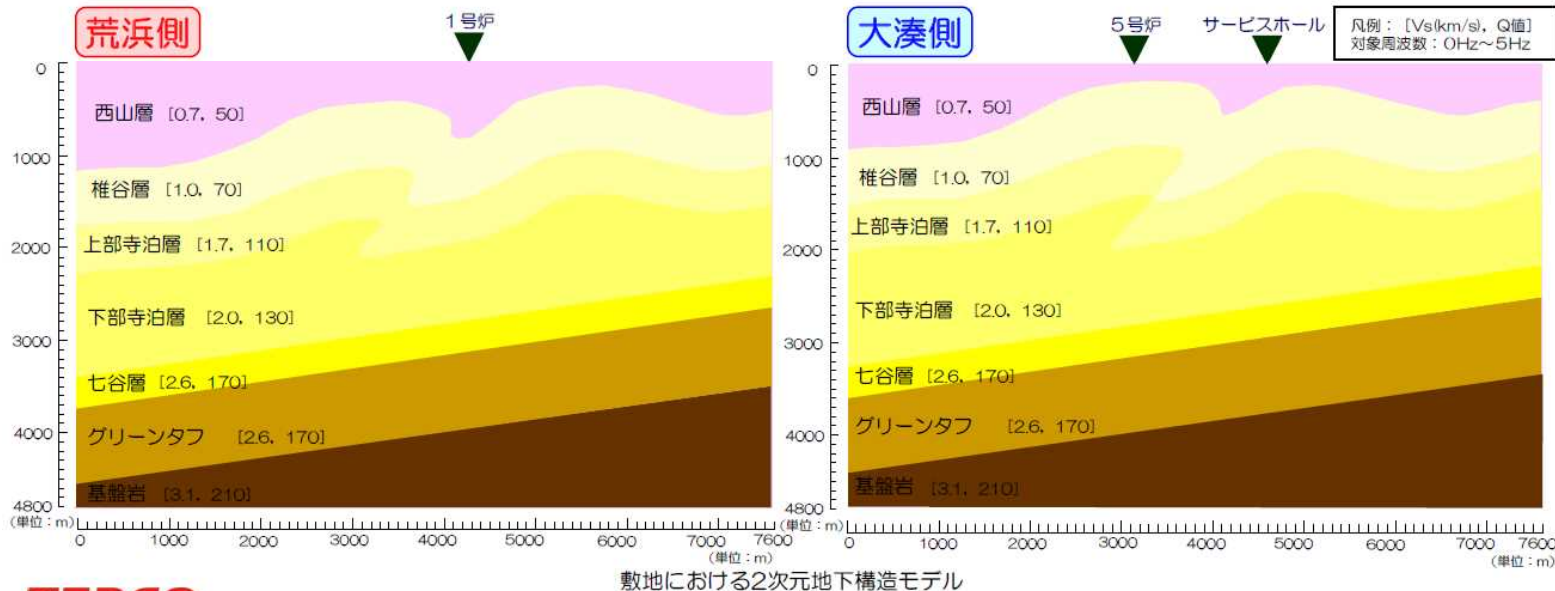
□：新規基準への適合審査にて追加検討した事項



5.3 地震波の増幅特性

5.3.2 地下構造モデルを用いた解析的検討 まとめ

- 敷地における地下構造の特徴を踏まえ以下の検討を実施した結果、2次元地下構造モデルにより敷地における地震波の増幅特性をおおむね再現できることを確認した。
 - ・ 地下構造調査から敷地における地下構造の特徴を分析し、2次元地下構造モデルを作成。
 - ・ パラメータスタディ、中越沖地震のシミュレーション解析、水平アレイ等による1次元地下構造モデルとの比較により、作成した2次元地下構造モデルの妥当性を検証。
 - ・ 到来方向別の増幅特性について解析的検討を実施したところ、南西から到来する地震波については、真殿坂向斜軸上で増幅する傾向があり、観測記録に見られる傾向を再現できることを確認。
- 上記のとおり、地震観測記録の分析・解析的検討から敷地における地震波の増幅特性を把握した上で、敷地においては地震動評価に適用可能な地震観測記録が得られていることを踏まえ、経験的グリーン関数法を用いて地震動評価を実施する。



敷地における2次元地下構造モデル

5.3 地震波の増幅特性

5.3.3 地震動評価への反映事項

5.3.1 地震観測記録の分析

- ① 海域で発生した地震は、Noda et al.(2002)による応答スペクトルと比較して大きく、一方、陸域で発生した地震は、小さい。
- ② 敷地の南西で発生した地震については、1号炉周辺において顕著に増幅する傾向が認められる。

【補足説明資料】

地下構造の把握

- ① 敷地周辺の地下構造は、深部に傾斜が認められる。
- ② 敷地近傍の地下構造は、褶曲構造の存在により特徴付けられる。

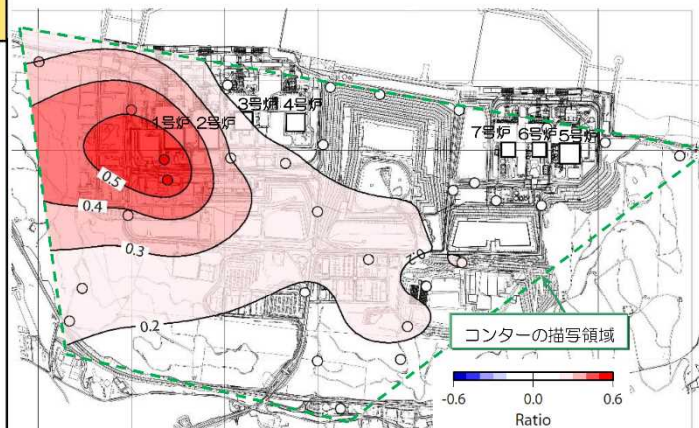
5.3.2 解析的検討

- ① 海域から到来する地震波は深部構造の影響により増幅される傾向にある。
- ② 敷地の南西から到来する地震波は、敷地近傍の褶曲構造の影響により、荒浜側は大湊側より大きな増幅特性を示す。

5.3.3 地震動評価への反映事項

観測記録に基づき地震動評価を実施

- 海域と陸域の活断層に分類して評価を実施。
- 地震波の顕著な増幅が認められる領域においては、著しい増幅が認められる1号炉を、地震波の顕著な増幅が認められない領域については、各号炉で顕著な相異がないことを確認した上で5号炉を代表として基準地震動を策定する。
- 応答スペクトルに基づく地震動評価では、海域の地震と陸域の地震に分類して、それぞれ観測記録に基づく補正係数を考慮。
- 断層モデルを用いた手法による地震動評価では、経験的グリーン関数法を用い、海域と陸域の地震動特性を反映した適切な要素地震を採用。
- なお、施設の耐震安全性評価においては、右図等による各施設の設置位置における地震波の増幅特性を参照し、荒浜側又は大湊側で策定した適切な基準地震動を採用する。



水平アレイ観測記録に基づく

敷地南西側から到来する地震波が増幅する領域

注) コンターは観測点間で補間しており、観測点がない端部は外挿となるため緑点線以内の領域を描写している。

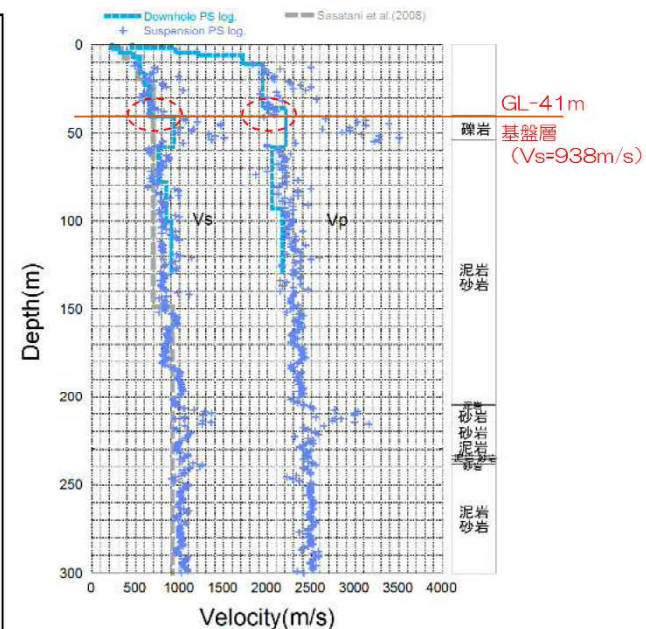
6. 震源を特定せず策定する地震動

6.2 M_w 6.5未満の地震 6.2.1 北海道留萌支庁南部地震 基盤地震動の検討

検討⑤：柏崎刈羽原子力発電所の地盤物性の影響を考慮した基盤地震動（水平・鉛直方向）評価

- 柏崎刈羽原子力発電所における地盤物性の影響を評価。
- 佐藤ほか(2013)によるHKD020港町観測点の基盤地震動は、地表観測記録に基づきGL-41mの $V_s=938\text{m/s}$ の基盤層において評価されている。柏崎刈羽原子力発電所における解放基盤表面のS波速度は荒浜側・大湊側ともに $V_s=700\text{m/s}$ と設定しているため、これらの地盤物性の影響を評価する。

- 一方、地震基盤から解放基盤表面までの増幅特性に関しては、柏崎刈羽原子力発電所の敷地周辺及び敷地内の地下構造の影響により地震波の到来方向により異なることが明らかとなっている。しかし、HKD020港町観測点のやや深部の増幅特性に関しては十分に明らかとなっていないものと考えられる。
- そこで「震源を特定せず策定する地震動」の候補としては、HKD020港町観測点の増幅特性が含まれたままの佐藤ほか(2013)による基盤地震動を重視し、これに対する不確かさ等を考慮した検討結果を参照して設定することとする。
- さらには、はぎとり解析の不確かさ等を考慮して最大加速度値を示すケースを考慮することにより保守的に設定することとする。
- なお、柏崎刈羽原子力発電所の敷地周辺及び敷地内の地下構造の影響については、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価において適切に反映している。



HKD020(港町)におけるPS検層結果と既往の研究によるS波速度構造モデル

【参考】既許可における震源を特定せず策定する地震動の評価

柏崎刈羽原子力発電所
6号及び7号炉審査資料
(2017年12月)より抜粋

6. 震源を特定せず策定する地震動

6.2 M_w 6.5未満の地震 6.2.1 北海道留萌支庁南部地震 基盤地震動の検討

検討⑤：柏崎刈羽原子力発電所の地盤物性の影響を考慮した基盤地震動（水平・鉛直方向）評価

- 敷地において解放基盤表面までモデル化された1次元地下構造モデルにより地盤物性の影響を評価する。
- 荒浜側の1次元地下構造モデルは、褶曲構造の影響により評価精度が低いと考えられるため、大湊側の1次元地下構造モデルを参照する。なお、荒浜側の1次元地下構造モデルにおいては解放基盤表面のVsは1,100m/sであるため、これによると地盤物性による補正の必要はないものと考えられる。
- 補正にあたり、HKD020港町観測点の基盤層のVs=938m/sに近いVs=960m/s層の上面に、はぎとり解析の不確かさ等を考慮した基盤地震動（水平：609m/s²、鉛直：306m/s²）を入力し、Vs=730m/sの解放基盤表面の応答を評価した。

地下構造モデル

※SGFによる評価に用いた地下構造モデル

荒浜側

層No.	T. M. S. L. (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q (-)
	284					
1	-300	16	2.11	1110	2280	50f
2	-1360	1060	2.12	1160	2390	50f
3	-2410	1050	2.25	1620	3220	50f
4	-3700	1290	2.36	2050	4150	50f
5	-5880	2180	2.51	2760	4820	50f
6	-	-	2.59	3170	5230	-

地震基盤

大湊側

層No.	T. M. S. L. (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q (-)
	-134					
1	-149	15	2.03	730	1800	50f
2	-180	31	2.03	890	1900	50f
3	-231	51	2.03	890	1900	50f
4	-266	35	2.03	960	1900	50f
5	-300	34	2.03	1000	2100	50f
6	-1360	1060	2.12	1160	2390	50f
7	-2410	1050	2.25	1620	3220	50f
8	-3700	1290	2.36	2050	4150	50f
9	-5880	2180	2.51	2760	4820	50f
10	-	-	2.59	3170	5230	-

地震基盤

入力位置

【参考】既許可における震源を特定せず策定する地震動の評価

柏崎刈羽原子力発電所
6号及び7号炉審査資料
(2017年12月)より抜粋

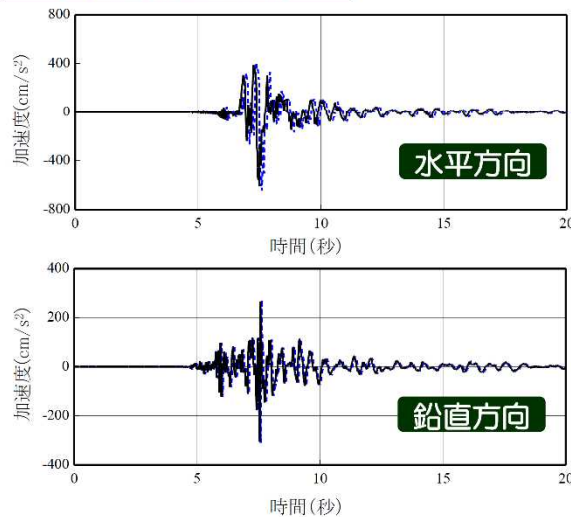
6. 震源を特定せず策定する地震動

6.2 M_w 6.5未満の地震 6.2.1 北海道留萌支庁南部地震 基盤地震動の検討

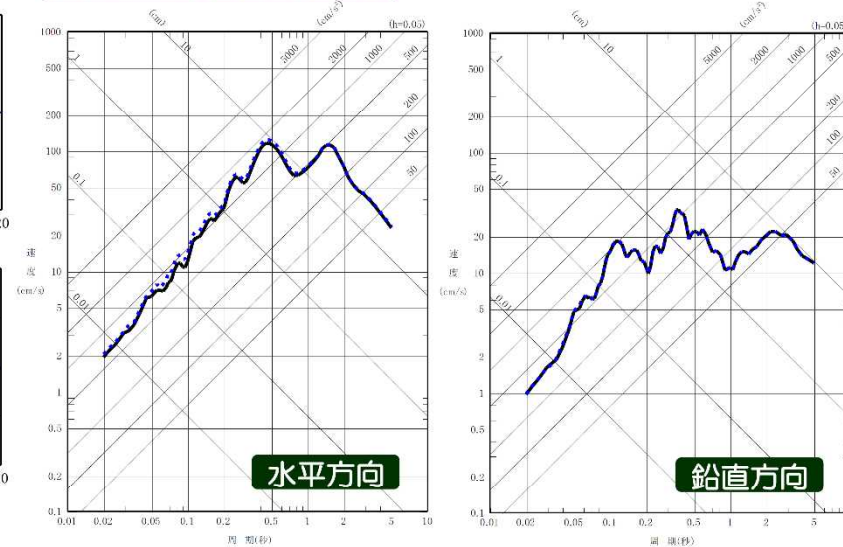
■ 敷地における地盤物性を考慮したところ、解放基盤表面の地震動は、水平方向：643 cm/s^2 、鉛直方向：310 cm/s^2 と評価された。

— 佐藤ほか(2013)の検証結果の最大ケース
(水平方向:609 cm/s^2 、鉛直方向:306 cm/s^2)
- - - 敷地の地盤物性を考慮
(水平方向:643 cm/s^2 、鉛直方向:310 cm/s^2)

加速度時刻歴波形



擬似速度応答スペクトル



検討⑥のまとめ

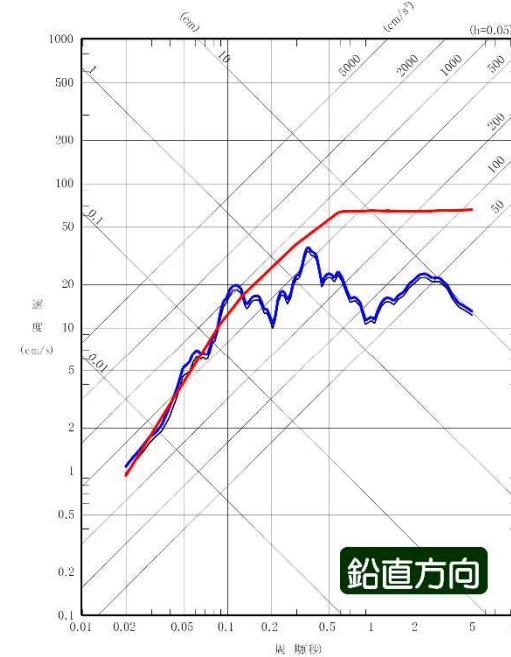
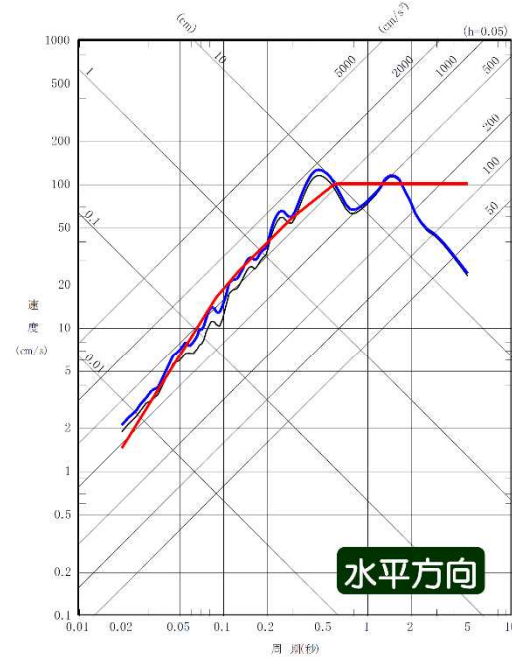
- HKD020港町観測点の基盤地震動の推定位置と敷地の解放基盤表面の地盤物性の違いを考慮した基盤地震動を評価。
- 検証①～④の最大ケースを入力とし、敷地の解放基盤表面の応答を評価した結果（水平：643 cm/s^2 、鉛直：310 cm/s^2 ）と、佐藤ほか(2013)による基盤地震動（水平：585 cm/s^2 、鉛直：296 cm/s^2 ）と比較して大きくなっている。

7. 震源を特定せず策定する地震動

■ 2004年北海道留萌支庁南部地震HKDO20港町観測点の基盤地震動に基づき震源を特定せず策定する地震動を策定する。はぎとり解析の不確かさ及び敷地の地盤物性の影響を考慮した結果、水平方向：643cm/s²、鉛直方向：310cm/s²と評価され、これに対して保守性を考慮して、水平方向：650cm/s²、鉛直方向：330cm/s²の地震動を震源を特定せず策定する地震動として設定する。

擬似速度応答 スペクトル

— 佐藤ほか(2013)の推計結果 (水平方向:585cm/s², 鉛直方向:296cm/s²)
 — 震源を特定せず策定する地震動 (水平方向:650cm/s², 鉛直方向:330cm/s²)
 — 【参考】加藤ほか(2004)による応答スペクトル (水平方向:S波速度=700m/s, 鉛直方向:P波速度=2,000m/s)



【参考文献】

- 小林喜久二, 植竹富一, 土方勝一郎(2005) : 地震動の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定法の標準化に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造Ⅱ
- 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 : 強震観測網(K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 梅田尚子, 小林喜久二(2010) : 地震記録の逆解析による地下構造推定手法の適用性検討, 第13回地震工学シンポジウム論文集
- Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe(2002) : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering, Oct.16-18, Istanbul
- 気象庁 : 地震月報 (カタログ編) ほか