

原子力規制委員会 殿

東京電力ホールディングス株式会社
代表執行役社長 小早川 智明

**柏崎刈羽原子力発電所における
基準地震動の変更が不要であることを説明する文書の提出について**

当社柏崎刈羽原子力発電所においては、標準応答スペクトルの規制への取り入れに関する改正後の解釈等^{*1}を適用しても、新規制基準に係る許可^{*2}を受けた基準地震動を変更する必要がないと考えることから、指示文書^{*3}に基づき、基準地震動の変更が不要であることを説明する文書を提出致します。

別紙：柏崎刈羽原子力発電所

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正」（標準応答スペクトル）に係る報告書

- *1：「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正について」（令和 3 年 4 月 21 日付 原規技発第 2104216 号 原子力規制委員会決定）
- *2：「柏崎刈羽原子力発電所の発電用原子炉の設置変更（6 号及び 7 号原子炉施設の変更）について」（平成 29 年 12 月 27 日付 原規規発第 1712272 号）
- *3：「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正に係る対応について（指示）」（令和 3 年 4 月 26 日付 原規規発第 2104264 号）

以 上

柏崎刈羽原子力発電所
「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の
基準に関する規則の解釈等の一部改正」（標準応答スペクトル）
に係る報告書

2021年5月18日

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

1. はじめに	1
2. 既許可の基準地震動の概要	1
3. 評価の方針	2
4. 標準応答スペクトルに基づく評価	2
5. 既許可の基準地震動との比較	3
6. 結論	3
参考文献	3

別添 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

1. はじめに

2021年4月21日、原子力規制委員会において「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正」（以下、「本件の改正」という）が決定され、震源を特定せず策定する地震動のうち全国共通に考慮すべき地震動の策定にあたっては、「震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面における標準的な応答スペクトル」（以下、「標準応答スペクトル」という）を用いることが新たに規定された。

本報告書は、柏崎刈羽原子力発電所において、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結果を示し、この結果が2017年12月27日に許可を受けた基準地震動（以下、「既許可の基準地震動」という）を下回ることを確認したことから、本件の改正に係る基準地震動の変更が不要であることを説明するものである。

2. 既許可の基準地震動の概要

柏崎刈羽原子力発電所における基準地震動は、敷地における地震波の伝播特性を踏まえ、1号炉～4号炉が位置する荒浜側、5号炉～7号炉が位置する大湊側のそれぞれについて策定している。基準地震動の最大加速度値を第2-1表に示す。

基準地震動の策定においては、S波速度が700m/s以上で著しい高低差がなく拵がりを持って分布している硬質地盤に解放基盤表面を設定することとし、荒浜側では東京湾平均海面 T.M.S.L.（以下、「標高」という）-284mの位置、大湊側では標高-134mの位置としている。

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動については、荒浜側と大湊側のそれぞれについて基準地震動 Ss-1～Ss-7 を策定した。敷地における地震波の伝播特性を適切に反映するため、地震観測記録に基づく評価を実施することとし、応答スペクトルに基づく地震動評価では観測記録に基づく補正係数を考慮した評価を、断層モデルを用いた手法による地震動評価では敷地で得られた観測記録を要素地震として用いた経験的グリーン関数法による評価を行っている。

震源を特定せず策定する地震動については、2004年北海道留萌支庁南部地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網⁽¹⁾の港町観測点における観測記録から佐藤ほか(2013)⁽²⁾により推定された基盤地震動に、港町観測点の基盤と敷地の解放基盤表面との地盤物性の相違による影響を考慮し、1次元地下構造モデルを用いた重複反射理論に基づく評価により、解放基盤表面における応答スペクトルを設定した。荒浜側の基準地震動 Ss-1～Ss-7 に対してはこの2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した震源を特定せず策定する地震動が下回ることから、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動で代表させることとし、大湊側の基準地震動 Ss-1～Ss-7 に対しては一部の周期帯で震源を特定せず策定する地震動が上回ることから、これを基準地震動 Ss-8 として策定した。

3. 評価の方針

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は、「2. 既許可の基準地震動の概要」で示した震源を特定せず策定する地震動の評価と同様にして、敷地の解放基盤表面との地盤物性の相違による影響を考慮し、1次元地下構造モデルを用いた重複反射理論に基づく評価により、解放基盤表面における応答スペクトルを設定する。但し、標準応答スペクトルは、S波速度が2,200m/s以上の地震基盤相当面で策定したとされていることから、2004年北海道留萌支庁南部地震についての港町観測点の基盤に対する検討とは条件が異なることに留意する必要がある。また、多数の観測記録に基づき策定された応答スペクトルであることから、観測記録の再現性を重視して妥当性を確認した1次元地下構造モデルを用いる必要があると考える。

柏崎刈羽原子力発電所では、敷地の荒浜側と大湊側のそれぞれで、大深度ボーリング調査を実施しPS検層結果等のデータを取得するとともに、大深度地震観測により観測記録を蓄積しており、敷地の地下構造に関して継続して新たなデータを得ている。これらの最新の知見を用いることにより、従来よりも深部まで信頼性を高めた地下構造モデルを構築可能であると考えられることから、本評価にあたっては1次元地下構造モデルを改めて構築し用いることとする。

4. 標準応答スペクトルに基づく評価

4.1 解析方針

標準応答スペクトルは、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震を検討対象地震として、震源近傍の多数の地震動記録に基づいて地震基盤相当面において策定されている。標準応答スペクトルを第4-1図に示す。解放基盤表面における応答スペクトルの評価にあたっては、1次元地下構造モデルを用いた重複反射理論に基づく評価により、標準応答スペクトルが策定された地震基盤相当面と敷地の解放基盤表面の地盤物性の相違による影響を考慮する。

4.2 地下構造モデルの設定

「3. 評価の方針」で示した通り、敷地においては、大深度ボーリング調査及び大深度地震観測を実施し、地下構造に関する新たなデータを蓄積してきており、これらの最新の知見を用いることにより、従来よりも深部まで信頼性を高めた地下構造モデルを構築可能である。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用いる1次元地下構造モデルを第4-1表に示す。この地下構造モデルは、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から、深部までの信頼性が高いことを確認しており、その詳細は、別添「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」に示す。

4.3 地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合した時刻歴波形の作成

1次元地下構造モデルを用いた重複反射理論に基づく評価においては時刻歴波形が必要となることから、第4-1図に示す標準応答スペクトルに適合した時刻歴波形を、地震動の振幅包絡線の経時的変化に基づく一様乱数の位相を有する正弦波の重ね合わせにより作成する。なお、振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al. (2002)⁽³⁾に基づき第4-2図に示す形状とし、目標とする応答スペクトルへの適合度については、応答スペクトル比が0.85以上で応答スペクトル強さの

比 (SI 比) が 1.0 以上となるように作成した。作成した時刻歴波形を第 4-3 図に示す。

4.4 解放基盤表面における応答スペクトルの評価結果

第 4-3 図に示す時刻歴波形を用いて、第 4-1 表に示す地下構造モデルの $V_s=2,350\text{m/s}$ 層の上面に入力して重複反射理論に基づく評価を実施し、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を評価した。評価結果の応答スペクトルを第 4-4 図に示す。

5. 既許可の基準地震動との比較

「4. 標準応答スペクトルに基づく評価」に示す評価結果と既許可の基準地震動を比較する。第 5-1 図に標準応答スペクトルに基づく評価結果と基準地震動の応答スペクトルを示す。

比較の結果、標準応答スペクトルに基づく評価結果は、荒浜側の基準地震動 $S_s-1\sim S_s-7$ 及び大湊側の基準地震動 $S_s-1\sim S_s-8$ を下回ることを確認した。

また、標準応答スペクトルに基づく評価結果は、大湊側の基準地震動 S_s-8 として策定している 2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトルに対し、敷地の解放基盤表面における地震動レベルとして大きな差がないことも、併せて確認した。

6. 結論

以上の通り、柏崎刈羽原子力発電所においては、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結果が、既許可の基準地震動を下回ることを確認したことから、本件の改正に係る基準地震動の変更は不要であると考ええる。

【参考文献】

- (1) 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/>
- (2) 佐藤浩章, 芝良昭, 東貞成, 功刀卓, 前田宜浩, 藤原広行(2013)：物理探査・室内試験に基づく 2004 年留萌支庁南部の地震による K-NET 港町観測点 (HKD020) の基盤地震動とサイト特性評価研究報告:N13007 電力中央研究所報告
- (3) 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

第 2-1 表 基準地震動の最大加速度値

(1) 荒浜側

(単位：cm/s²)

基準地震動				NS 方向	EW 方向	UD 方向
Ss-1	F-B 断層による地震	応答スペクトルに基づく地震動評価		2300		1050
Ss-2		断層モデルを用いた手法による地震動評価		1240	1703	711
Ss-3	長岡平野西縁断層帯による地震	応答スペクトルに基づく地震動評価	応力降下量及び断層傾斜角の不確かさをそれぞれ考慮したケースを包絡	600		400
Ss-4		断層モデルを用いた手法による地震動評価	応力降下量の不確かさ考慮	589	574	314
Ss-5		断層モデルを用いた手法による地震動評価	断層傾斜角の不確かさ考慮	553	554	266
Ss-6	長岡平野西縁断層帯～山本山断層～十日町断層帯西部の連動を考慮した地震	断層モデルを用いた手法による地震動評価	応力降下量の不確かさ考慮	510	583	313
Ss-7			断層傾斜角の不確かさ考慮	570	557	319

(2) 大湊側

(単位：cm/s²)

基準地震動				NS 方向	EW 方向	UD 方向
Ss-1	F-B 断層による地震	応答スペクトルに基づく地震動評価		1050		650
Ss-2		断層モデルを用いた手法による地震動評価		848	1209	466
Ss-3	長岡平野西縁断層帯による地震	応答スペクトルに基づく地震動評価	応力降下量及び断層傾斜角の不確かさをそれぞれ考慮したケースを包絡	600		400
Ss-4		断層モデルを用いた手法による地震動評価	応力降下量の不確かさ考慮	428	826	332
Ss-5		断層モデルを用いた手法による地震動評価	断層傾斜角の不確かさ考慮	426	664	346
Ss-6	長岡平野西縁断層帯～山本山断層～十日町断層帯西部の連動を考慮した地震	断層モデルを用いた手法による地震動評価	応力降下量の不確かさ考慮	434	864	361
Ss-7			断層傾斜角の不確かさ考慮	389	780	349
Ss-8	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を考慮した地震動評価		650		330

第 4-1 表 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

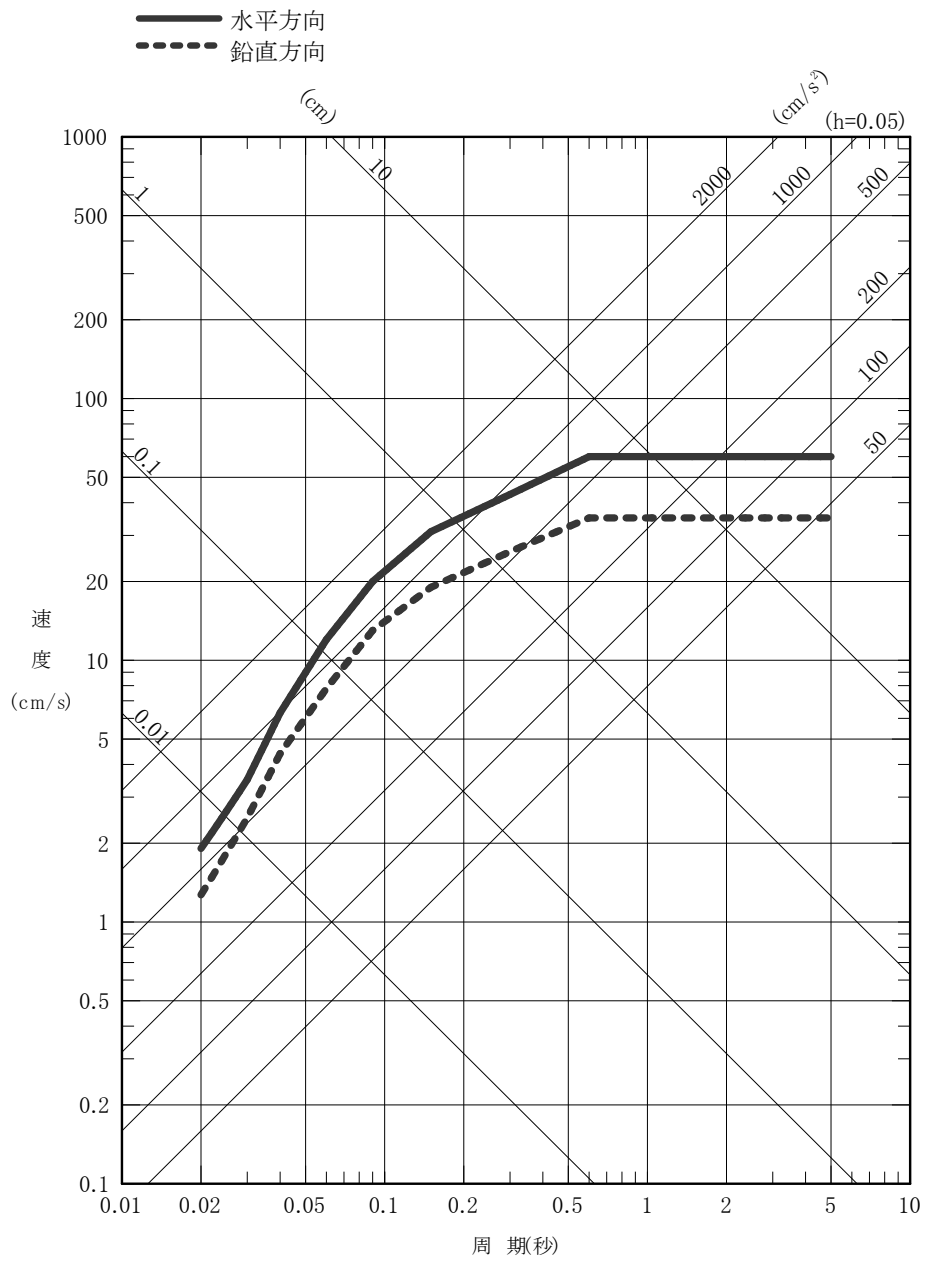
(1) 荒浜側

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)	Q _S **		Q _P **		備考
						Q ₀	n	Q ₀	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	

(2) 大湊側

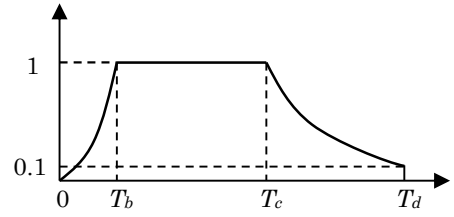
層 No.	標高 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S 波速度 (m/s)	P 波速度 (m/s)	Q _S **		Q _P **		備考
						Q ₀	n	Q ₀	n	
	-134.0									解放基盤表面
1	-149.0	15.0	2.03	730	1800	5.00	0.85	3.33	0.90	
2	-231.0	82.0	2.03	890	1900	5.00	0.85	3.33	0.90	
3	-266.0	35.0	2.03	960	1900	5.00	0.85	3.33	0.90	
4	-300.0	34.0	2.03	1000	2100	5.00	0.85	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	

※ $Q(f) = Q_0 \times f^n$ を仮定



第 4-1 図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

地震規模 M	等価震源 距離 X_{eq} (km)	振幅包絡線の経時的 変化 (秒)		
		T_b	T_c	T_d
6.9	10	3.31	15.06	28.03

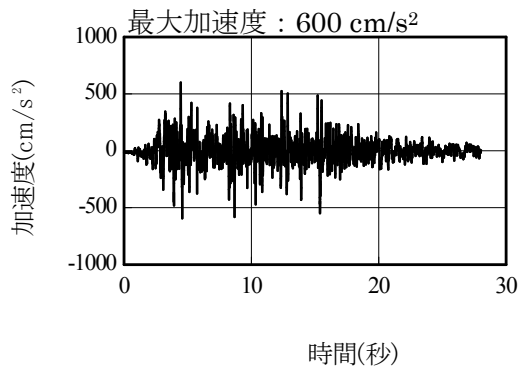


$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

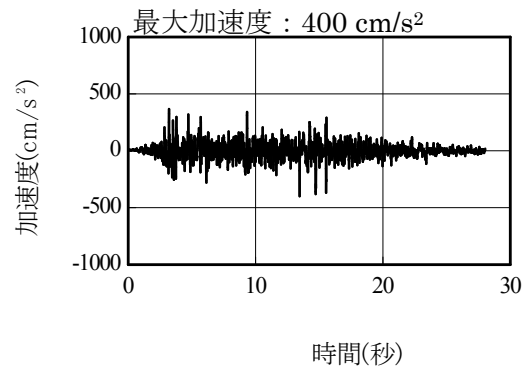
$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54 \log X_{eq}-0.6}$$

第 4-2 図 振幅包絡線の経時的変化

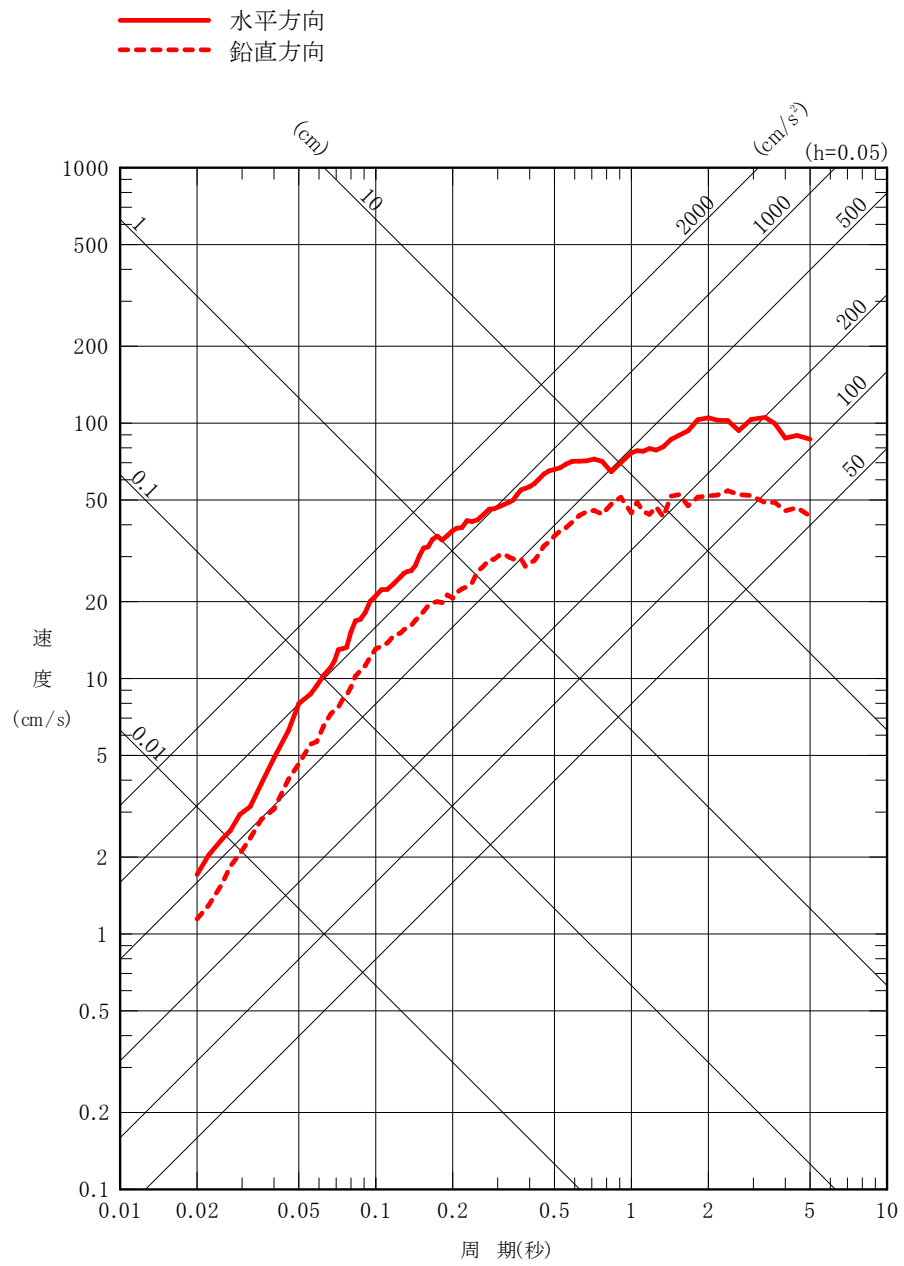


(a) 水平方向

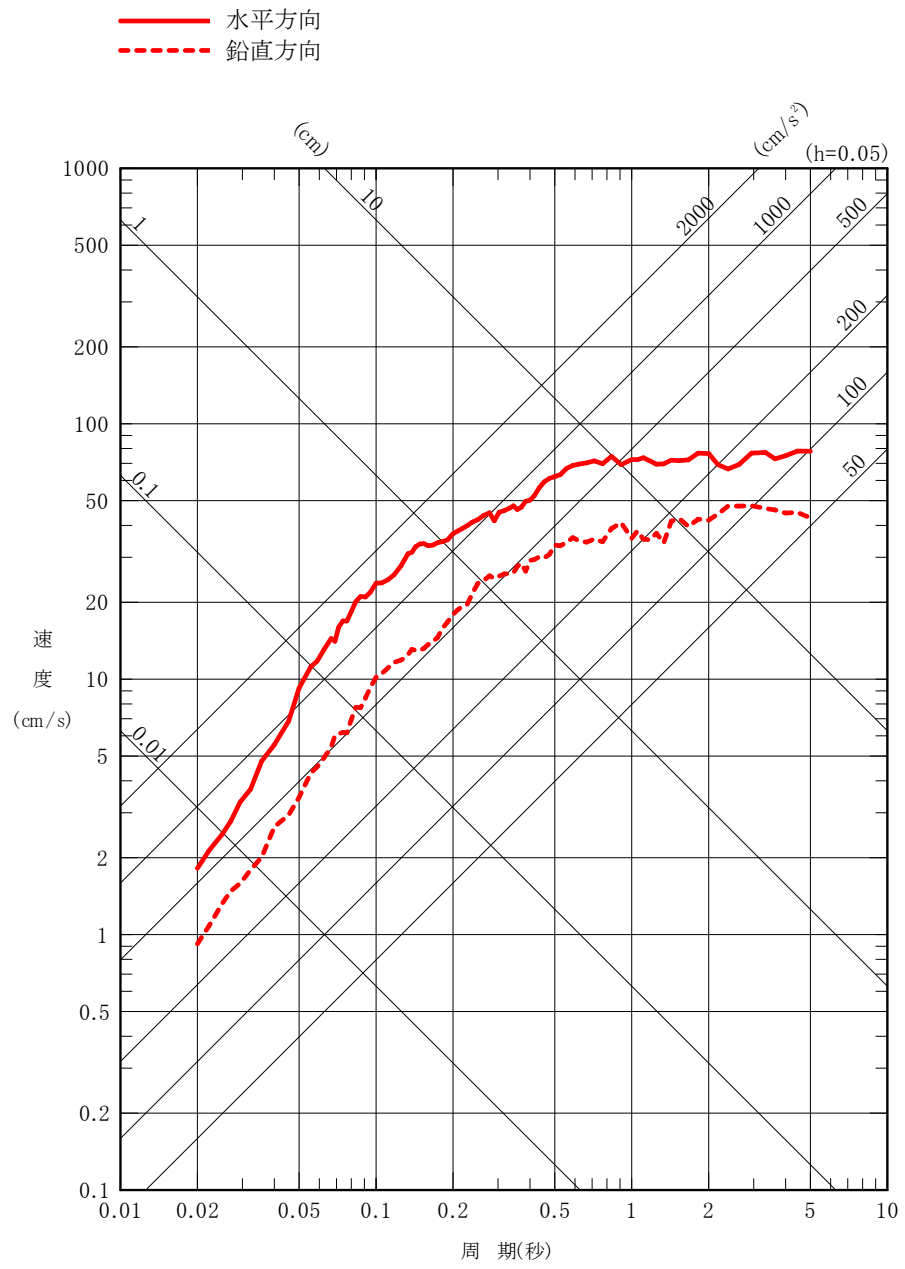


(b) 鉛直方向

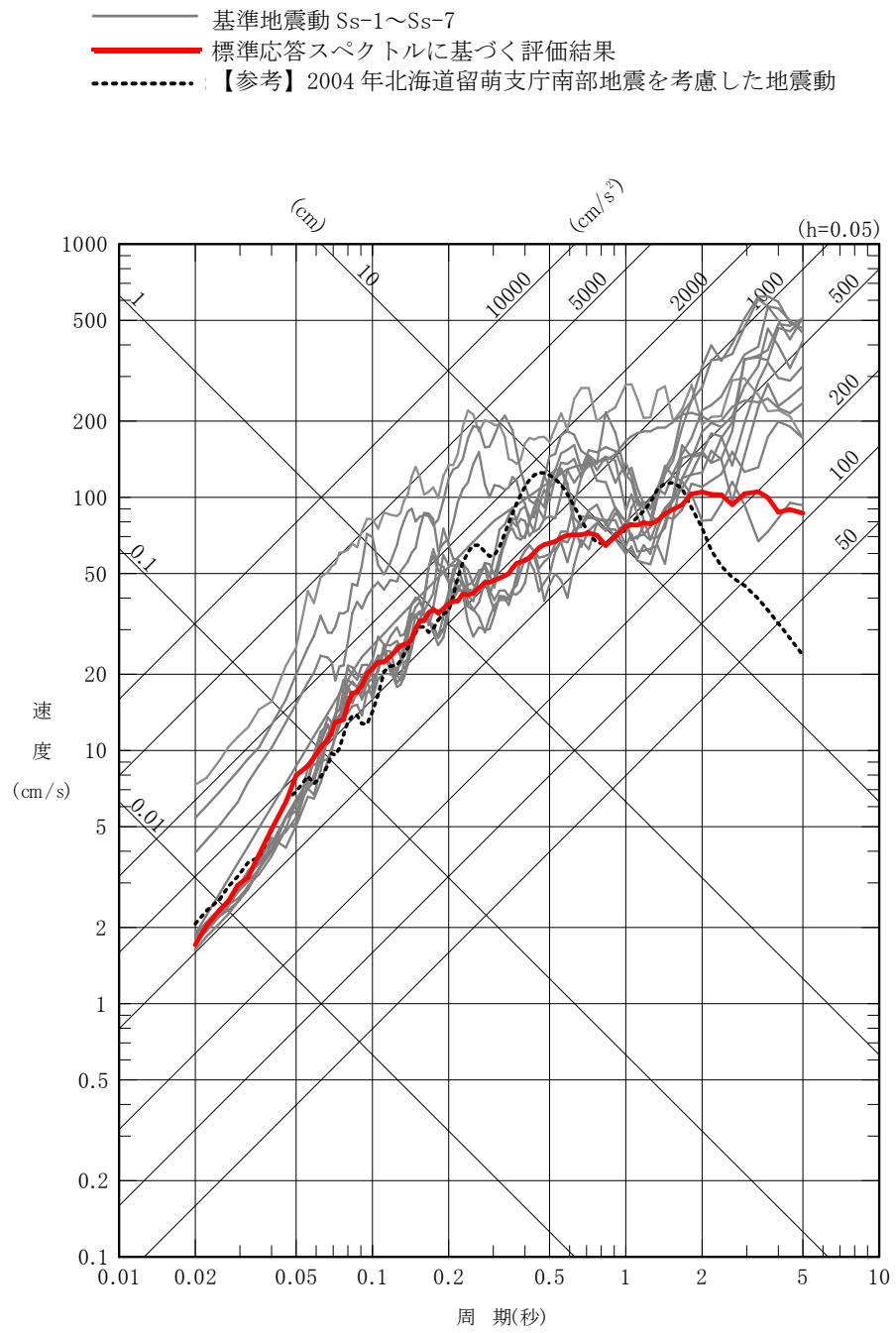
第 4-3 図 標準応答スペクトルに適合した時刻歴波形



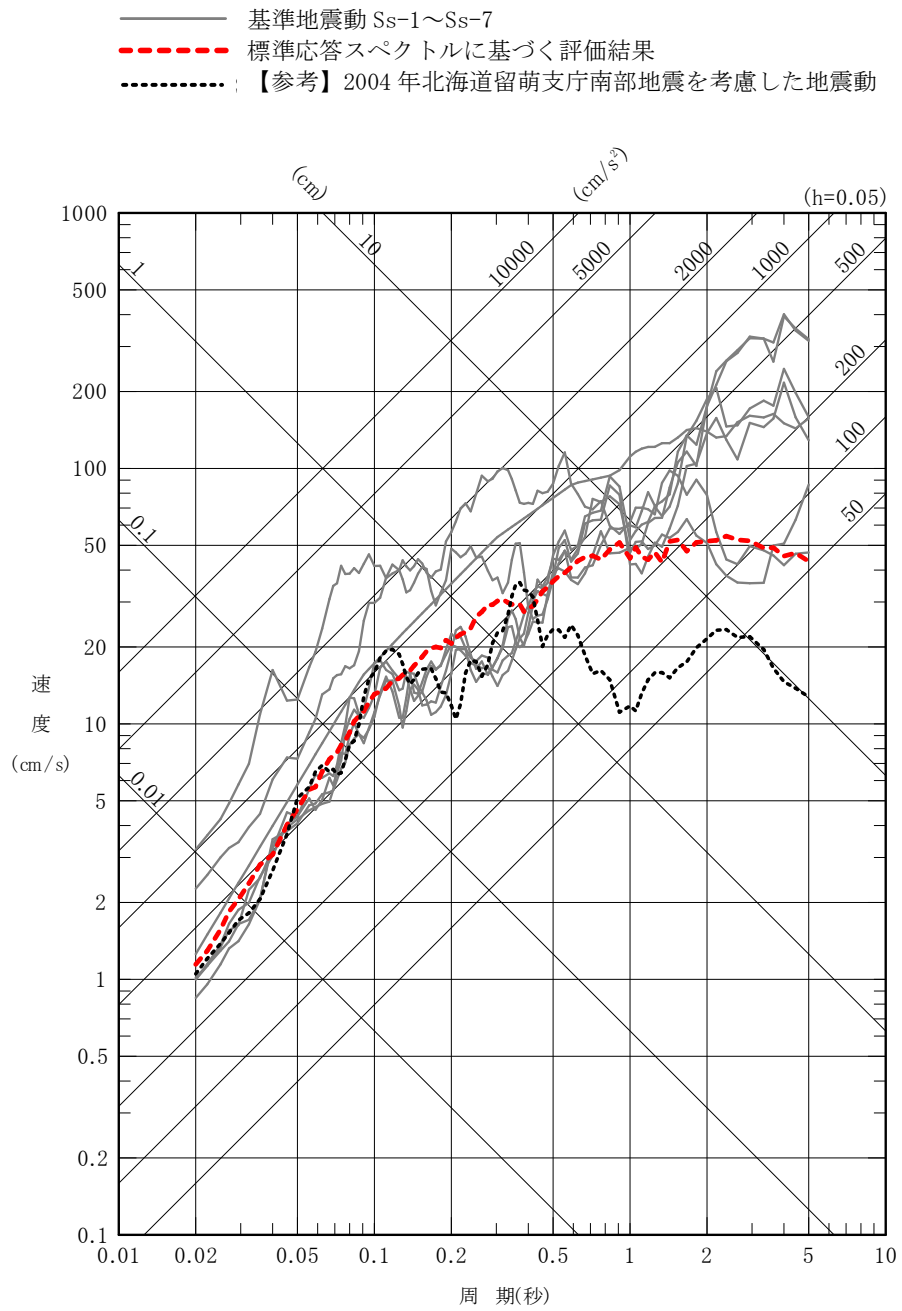
第 4-4 図(1) 標準応答スペクトルに基づく評価結果 (荒浜側)



第 4-4 図(2) 標準応答スペクトルに基づく評価結果 (大湊側)

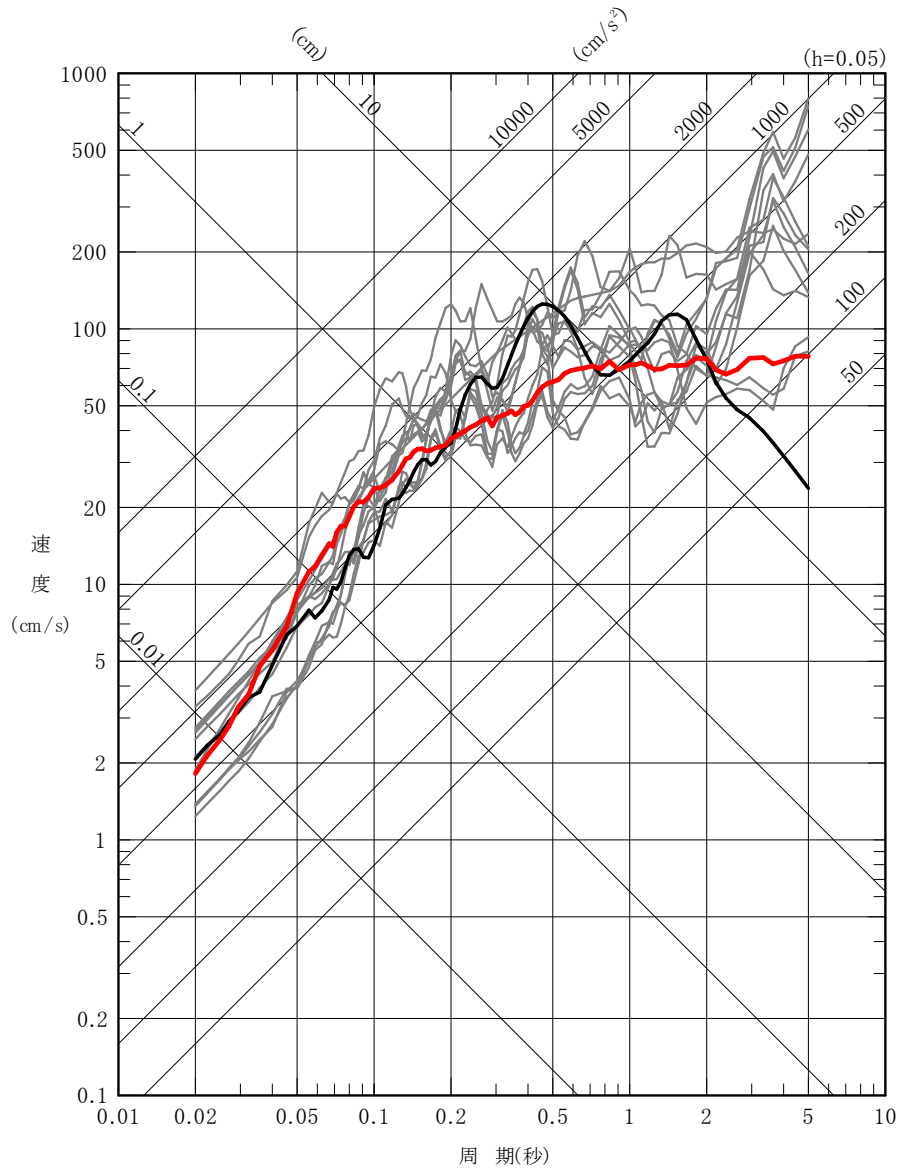


第 5-1 図(1) 標準応答スペクトルに基づく評価結果と基準地震動の応答スペクトルの比較
 (荒浜側, 水平方向)

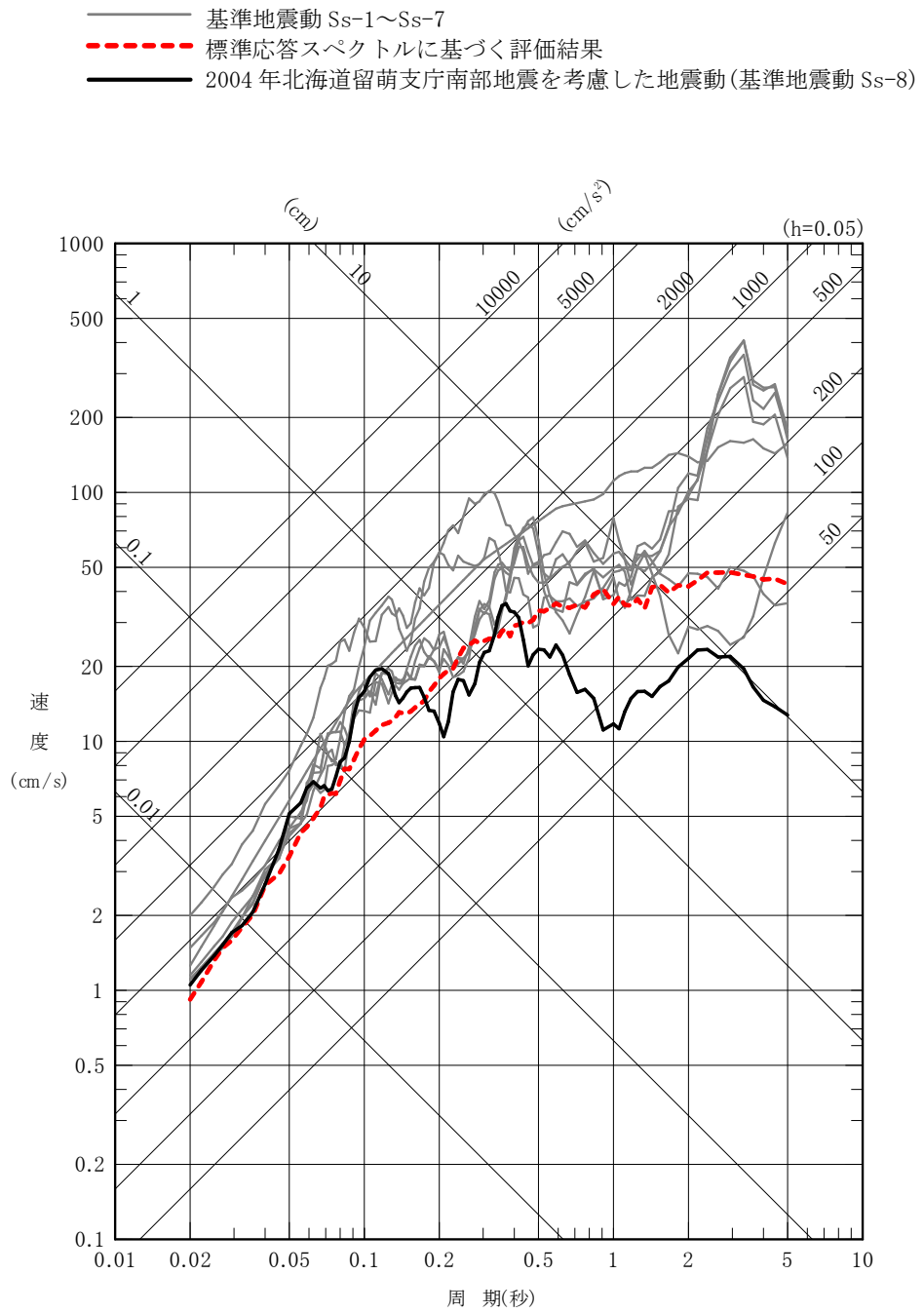


第 5-1 図(2) 標準応答スペクトルに基づく評価結果と基準地震動の応答スペクトルの比較
(荒浜側, 鉛直方向)

- 基準地震動 S_s-1～S_s-7
- 標準応答スペクトルに基づく評価結果
- 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動(基準地震動 S_s-8)



第 5-1 図(3) 標準応答スペクトルに基づく評価結果と基準地震動の応答スペクトルの比較
(大湊側, 水平方向)



第 5-1 図(4) 標準応答スペクトルに基づく評価結果と基準地震動の応答スペクトルの比較
 (大湊側, 鉛直方向)

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

目 次

1. はじめに	1
2. 大深度ボーリング調査及び大深度地震観測の概要	1
3. 地下構造モデルの設定方針	1
4. 地下構造モデルの評価	1
5. 地下構造モデルの妥当性検証	2
6. 地下構造モデルの設定	3
7. 既許可の基準地震動への影響確認	3
参考文献	3

1. はじめに

本別添は、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、その設定方法と妥当性検証について示すものである。

2. 大深度ボーリング調査及び大深度地震観測の概要

敷地においては第 2-1 図に示す位置で大深度ボーリング調査及び大深度地震観測を実施している。荒浜側及び大湊側の大深度ボーリングの PS 検層結果を第 2-2 図に示す。大深度地震観測は、荒浜側では標高-1,017m の位置で、大湊側では標高-1,488m の位置で観測を実施し記録を蓄積している。これらの地下構造に関する最新のデータを活用して、深部まで信頼性の高い地下構造モデルを構築する。

3. 地下構造モデルの設定方針

荒浜側と大湊側の地下構造モデルは、それぞれ第 3-1 図に示す手順に従い評価する。

標高-250m～標高-300m 以浅については、鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数を対象とした逆解析により同定した従来からはぎとり解析に用いてきている地下構造モデルで固定する。それ以深については、梅田・小林(2010)⁽¹⁾の手法に基づき、P 波部 H/V スペクトル比とレシーバー関数に加えコーダ部 H/V スペクトル比をターゲットとして同時逆解析することで、深部まで信頼性の高い地下構造モデルを評価する。

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、妥当性を検証する。

4. 地下構造モデルの評価

4.1 解析条件

梅田・小林(2010)⁽¹⁾の手法は、地表の観測記録を用いて地震基盤までの地下構造を推定することが可能であり、柏崎刈羽原子力発電所においては、水平アレイ地震観測点の 1 次元地下構造モデルについてもこの手法に基づき評価を行ってきている。ここでは、鉛直アレイ地震観測点の地表の観測記録を用いて評価を行う。評価に用いた地震を第 4-1 図に示す。P 波部 H/V スペクトル比とレシーバー関数の検討においては、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を、コーダ部 H/V スペクトル比の検討においては、表面波が十分に含まれている地震をそれぞれ選定した。

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した。探索範囲を第 4-1 表に示す。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した。

4.2 地下構造モデルの逆解析

逆解析により同定した地下構造モデルの評価結果を第 4-2 表に示す。また、P 波部 H/V スペクトル比、レシーバー関数、コーダ部 H/V スペクトル比について、ターゲットとした観測記録と逆解析により同定した地下構造モデルによる理論値の比較を第 4-2 図に示す。逆解析により同定し

た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、地下構造モデルが適切に同定できていることを確認した。

5. 地下構造モデルの妥当性検証

「4. 地下構造モデルの評価」において評価した地下構造モデルを用い、以下の妥当性検証を行った。

5.1 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

地下構造モデルの速度構造について、PS 検層結果及び反射法地震探査結果等に基づく2次元地下構造モデルの速度構造と比較することで妥当性を検証する。

地下構造モデルの速度構造について、PS 検層結果との比較を第5-1図に示す。評価した地下構造モデルの速度構造は、PS 検層結果と概ね整合していることを確認した。

また、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の比較を第5-2図に示す。評価した地下構造モデルの速度構造は、2次元地下構造モデルとも概ね整合していることを確認した。

5.2 大深度地震観測記録による検証

地下構造モデルの速度・減衰構造について、地下構造モデルの理論伝達関数と観測記録の伝達関数の整合性を確認した上で、地下構造モデルを用いたシミュレーション解析により観測記録の再現性を確認することで、妥当性を検証する。

観測記録の伝達関数は、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評価することとし、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た。評価に用いた地震の諸元を第5-1表に、その震央分布を第5-3図に示す。地下構造モデルの理論伝達関数と観測記録の伝達関数を比較した結果を第5-4図に示す。地下構造モデルの理論伝達関数は、観測記録の伝達関数と概ね整合していることを確認した。

次に、大深度地震観測記録を地下構造モデルに入力して、重複反射理論に基づくシミュレーション解析を実施し、観測記録の再現性を確認する。シミュレーション解析は、第5-1表に示す地震のうち、荒浜側と大湊側の両方で観測記録が得られており、規模の最も大きな地震を対象として行った。地下構造モデルを用いたシミュレーション解析結果と観測記録の応答スペクトルを比較した結果を第5-5図に示す。地下構造モデルを用いたシミュレーション解析結果は、観測記録を良好に再現できていることを確認した。

以上の「5.1 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」及び「5.2 大深度地震観測記録による検証」の結果から、地下構造モデルの速度・減衰構造は適切に評価されており、深部まで信頼性の高い地下構造モデルであることを確認した。

6. 地下構造モデルの設定

「4. 地下構造モデルの評価」において評価した地下構造モデルは、「5. 地下構造モデルの妥当性検証」で示すように、深部まで信頼性の高い地下構造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評価にあたっては、第 6-1 表に示す地下構造モデルを用いることとする。

7. 既許可の基準地震動への影響確認

柏崎刈羽原子力発電所では、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は、敷地における地震波の伝播特性を適切に反映するため、地震観測記録に基づく評価を実施することとし、断層モデルを用いた手法による地震動評価については経験的グリーン関数法による評価を行っていることから、「6. 地下構造モデルの設定」の地下構造モデルが既許可の基準地震動 Ss-1～Ss-7 に与える影響はない。一方、震源を特定せず策定する地震動の評価においては、2004 年北海道留萌支庁南部地震について佐藤ほか(2013)⁽³⁾により推定された基盤地震動に港町観測点の基盤と敷地の解放基盤表面との地盤物性の相違による影響を考慮する際に、地下構造モデルを用いた重複反射理論に基づく評価を行った上で基準地震動 Ss-8 を策定していることから、「6. 地下構造モデルの設定」の地下構造モデルを用いた場合の影響について確認する。

既許可の基準地震動での震源を特定せず策定する地震動の評価と同様にして、「6. 地下構造モデルの設定」の大湊側の地下構造モデルにおいて、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した。評価結果について、従来の評価結果及びそれに保守性を考慮して策定した基準地震動 Ss-8 と比較して第 7-1 図に示す。

評価結果は、従来の評価結果とほぼ変わらず、かつ基準地震動 Ss-8 を下回ることを確認したことから、「6. 地下構造モデルの設定」の地下構造モデルが既許可の基準地震動 Ss-8 に与える影響はないことを確認した。

【参考文献】

- (1) 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
- (2) 気象庁：地震月報（カタログ編）ほか
- (3) 佐藤浩章，芝良昭，東貞成，功刀卓，前田宜浩，藤原広行（2013）：物理探査・室内試験に基づく 2004 年留萌支庁南部の地震による K-NET 港町観測点（HKD020）の基盤地震動とサイト特性評価研究報告：N13007 電力中央研究所報告

第 4-1 表 地下構造モデルの逆解析における探索範囲

: 探索対象

(1) 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)	Q _S ^{※2}		Q _p ^{※2}	
					Q _o	n	Q _o	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

(2) 大湊側

層 No.	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S 波速度 (m/s)	P 波速度 (m/s)	Q _S ^{※2}		Q _p ^{※2}	
					Q _o	n	Q _o	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。

第 4-2 表 地下構造モデルの逆解析結果

(1) 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)	Q _s ^{**}		Q _p ^{**}	
						Q _o	n	Q _o	n
	5.0								
1	3.0	2.0	2.00	100	920	2.50	0.90	1.70	0.90
2	-1.0	4.0	2.00	180	920	2.50	0.90	1.70	0.90
3	-15.0	14.0	1.76	270	950	2.50	0.90	2.50	0.80
4	-67.0	52.0	1.72	430	1600	2.50	0.90	2.50	0.80
5	-148.0	81.0	1.72	520	1700	2.50	0.90	5.00	0.80
6	-230.0	82.0	1.72	730	1700	2.50	0.90	5.00	0.80
7	-250.0	20.0	1.72	820	2200	2.50	0.90	5.00	0.80
8	-764.5	514.5	1.70	997	2210	14.91	0.89	5.27	0.61
9	-1242.3	477.8	2.10	1500	2700	19.37	0.75	10.22	0.85
10	-1896.3	654.0	2.30	1870	2760	11.55	0.52	9.19	0.70
11	-2792.2	895.9	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66
12	-4081.5	1289.3	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85
13	-6469.8	2388.3	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72
14			2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72

(2) 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 ^{**}	
						Q _o	n	Q _o	n
	12.0								
1	9.3	2.7	2.00	180	850	0.63	0.10	1.67	0.60
2	2.0	7.3	2.00	210	920	2.50	0.85	2.50	0.60
3	-16.6	18.6	1.78	310	1300	2.50	0.85	1.25	0.60
4	-33.0	16.4	1.70	420	1700	2.50	0.85	2.00	0.60
5	-66.0	33.0	1.75	440	1700	2.50	0.85	2.00	0.90
6	-88.0	22.0	1.75	550	1700	2.50	0.85	2.00	0.90
7	-120.0	32.0	1.84	640	1700	5.00	0.85	3.33	0.90
8	-149.0	29.0	2.03	730	1800	5.00	0.85	3.33	0.90
9	-231.0	82.0	2.03	890	1900	5.00	0.85	3.33	0.90
10	-266.0	35.0	2.03	960	1900	5.00	0.85	3.33	0.90
11	-300.0	34.0	2.03	1000	2100	5.00	0.85	3.33	0.90
12	-834.5	534.5	2.10	1200	2420	14.32	0.90	6.11	0.59
13	-1716.2	881.7	2.30	1300	2610	15.05	0.89	6.12	0.61
14	-2613.3	897.1	2.40	1920	4270	14.35	0.75	9.46	0.66
15	-3944.3	1331.0	2.50	2350	4780	20.71	0.57	17.80	0.85
16	-6092.4	2148.1	2.60	3060	5080	66.23	0.78	37.72	0.72
17			2.70	3490	5440	66.23	0.78	37.72	0.72

※ $Q(f) = Q_0 \times f^n$ を仮定。

第 5-1 表 観測記録の伝達関数の評価に用いた地震の諸元

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	○	○

※地震の諸元は気象庁⁽²⁾による

第 6-1 表 設定した地下構造モデル

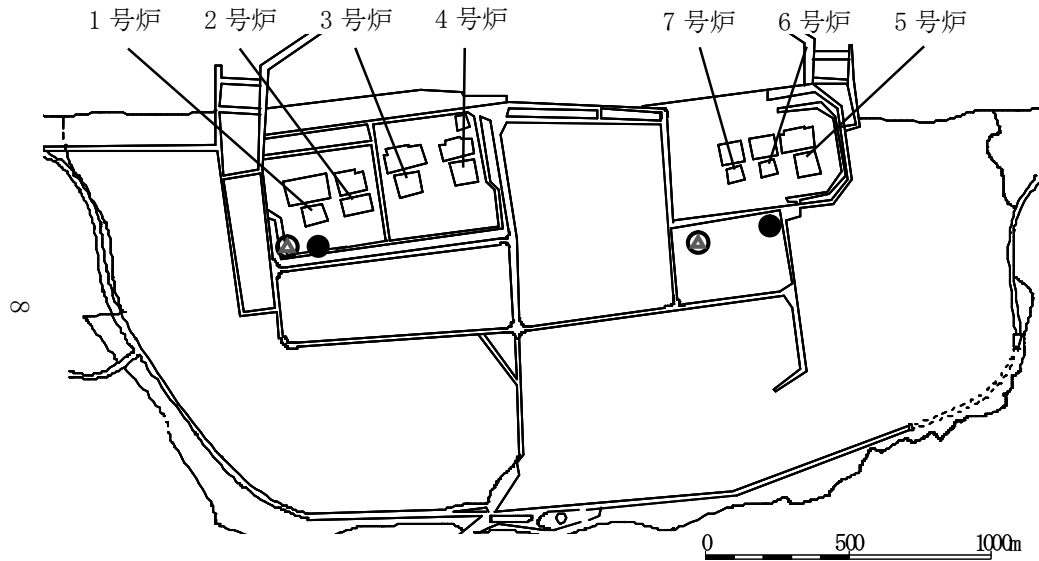
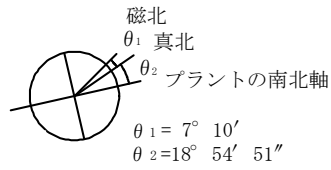
(1) 荒浜側

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)	Q _S **		Q _P **	
						Q ₀	n	Q ₀	n
	-284.0								
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
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

(2) 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 **	
						Q ₀	n	Q ₀	n
	-134.0								
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
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

※ $Q(f) = Q_0 \times f^n$ を仮定。

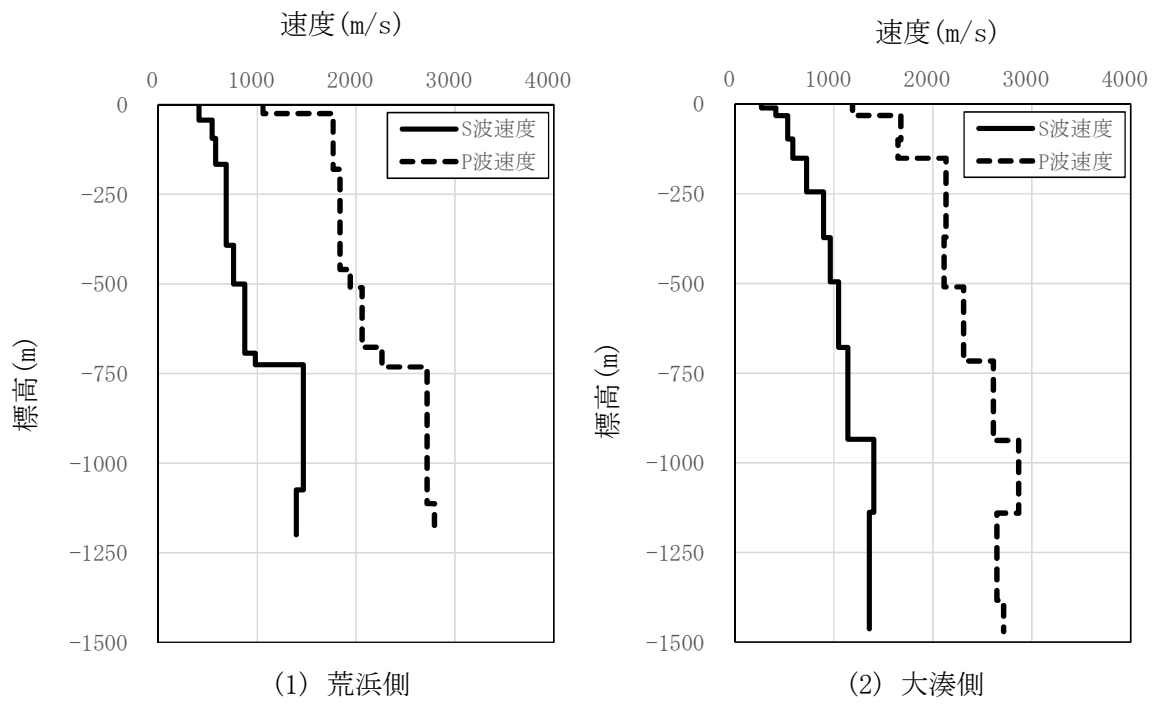


●, ○ : 鉛直アレイ地震観測点
 ▲ : 大深度ボーリング調査点

※1 : 1982年4月観測開始
 ※2 : 1982年4月観測開始～2007年11月観測終了
 ※3 : 2009年3月観測開始
 ※4 : 2013年9月観測開始
 ※5 : 1985年9月観測開始
 ※6 : 2017年3月観測開始

標高	荒浜側 鉛直アレイ	大湊側 鉛直アレイ
+12.0m		▽G.L.
+9.3m	▽G.L.	●※5 ○※6
+5.0m	●※1 ○※4	
-24.0m		●※5
-40.0m	●※1	
-100m		●※5
-122m	●※1	
-180m		●※5
-250m	●※2	
-300m		●※5
-400m	○※3	
-1017m	○※4	
-1488m		○※6

第2-1図 敷地における鉛直アレイ地震観測点

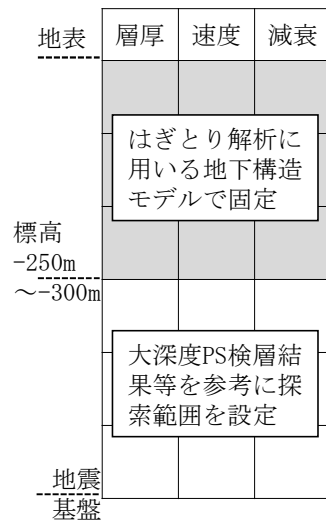


第 2-2 図 大深度ボーリングの PS 検層結果

4. 地下構造モデルの評価

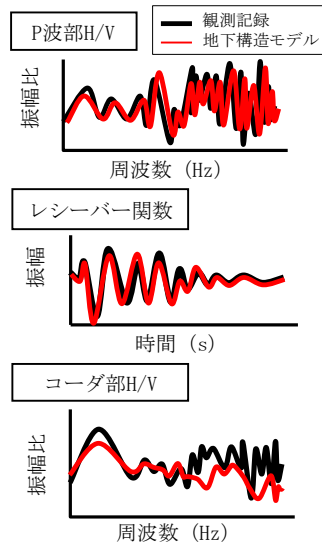
4.1 解析条件

- 探索範囲は大深度PS検層結果等を参考に設定



4.2 地下構造モデルの逆解析

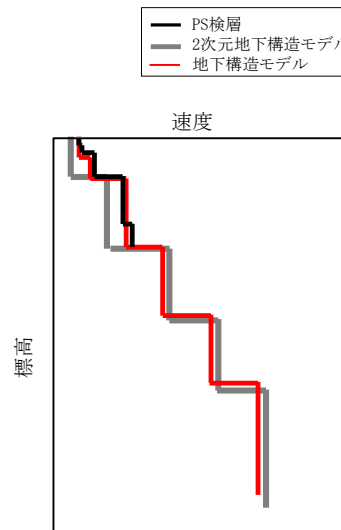
- ターゲットとした観測記録を再現する地下構造モデルを逆解析により同定



5. 地下構造モデルの妥当性検証

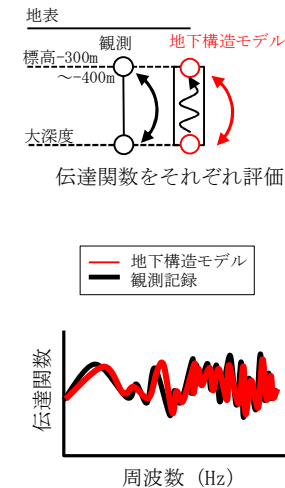
5.1 PS検層結果及び2次元地下構造モデルとの比較による検証

- 速度構造が概ね整合していることを確認

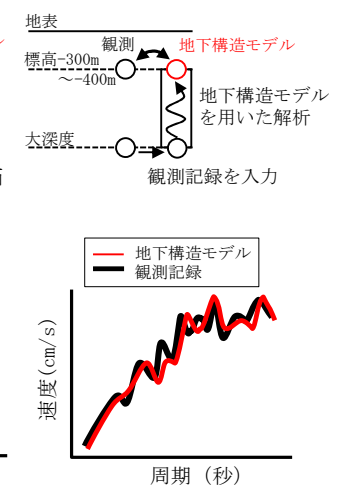


5.2 大深度地震観測記録による検証

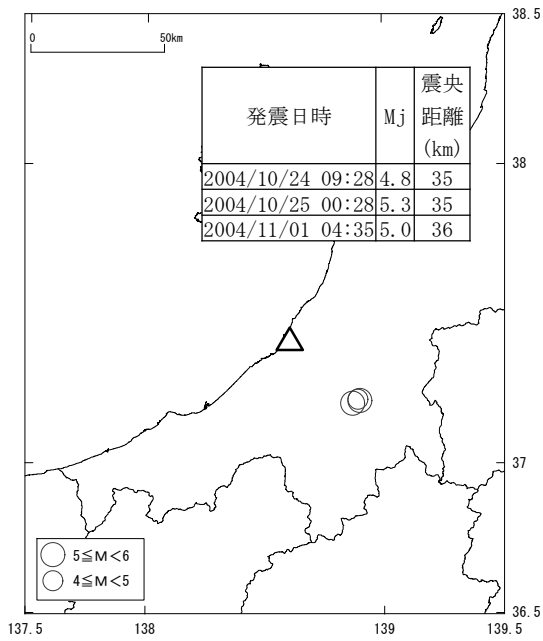
- 地下構造モデルと観測記録の伝達関数の整合性を確認



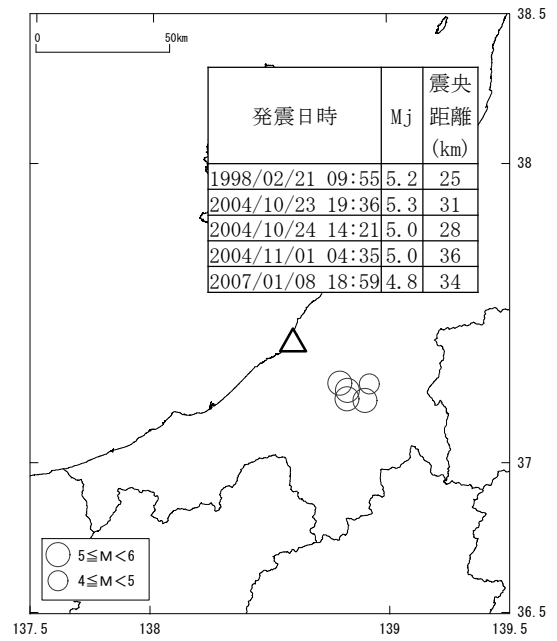
- 地下構造モデルを用いた解析により観測記録の再現性を確認



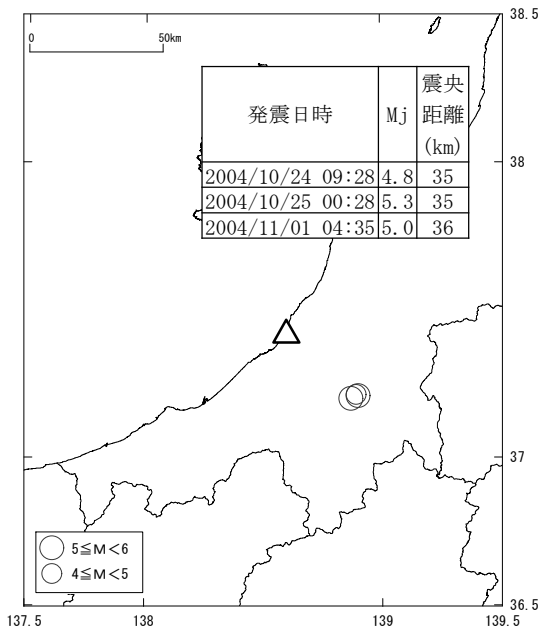
第3-1図 地下構造モデルの評価手順



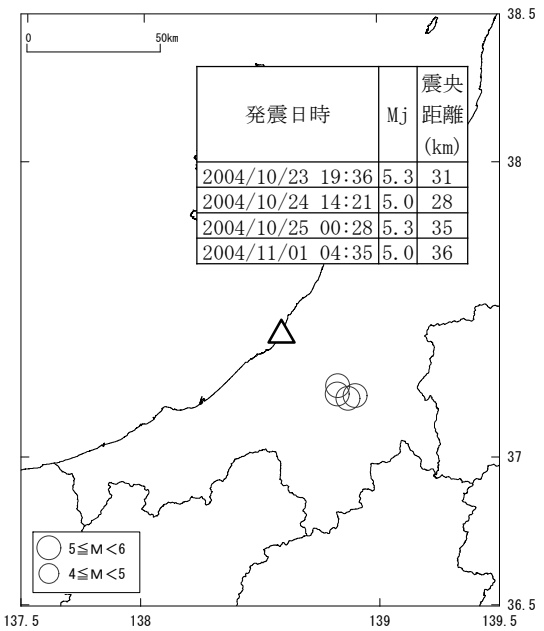
(a) P波部の検討に用いた地震(荒浜側)



(b) コーダ部の検討に用いた地震(荒浜側)

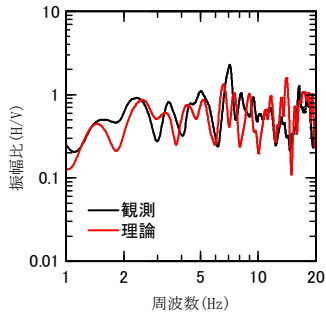


(c) P波部の検討に用いた地震(大湊側)

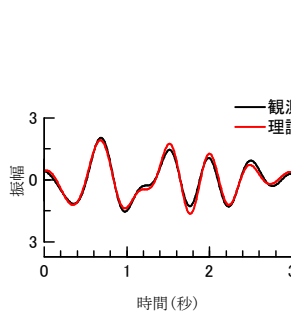


(d) コーダ部の検討に用いた地震(大湊側)

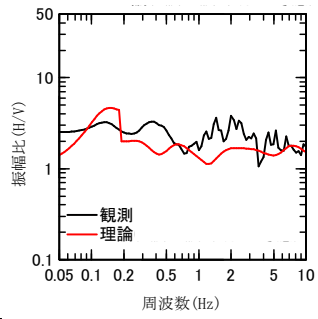
第 4-1 図 地下構造モデルの逆解析に用いた地震
 ※地震の諸元は気象庁⁽²⁾による



(a) P 波部 H/V スペクトル比

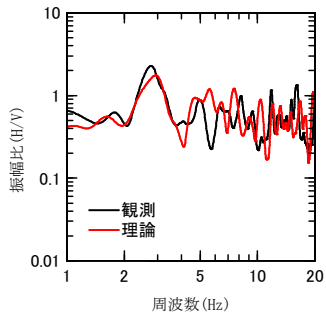


(b) レシーバー関数

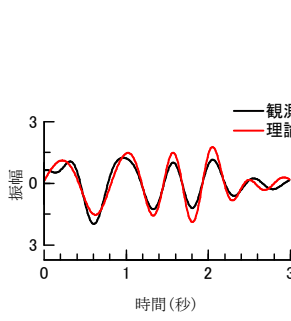


(c) コーダ部 H/V スペクトル比

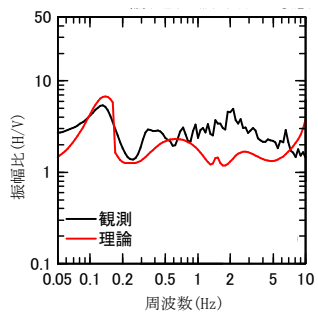
(1) 荒浜側



(a) P 波部 H/V スペクトル比



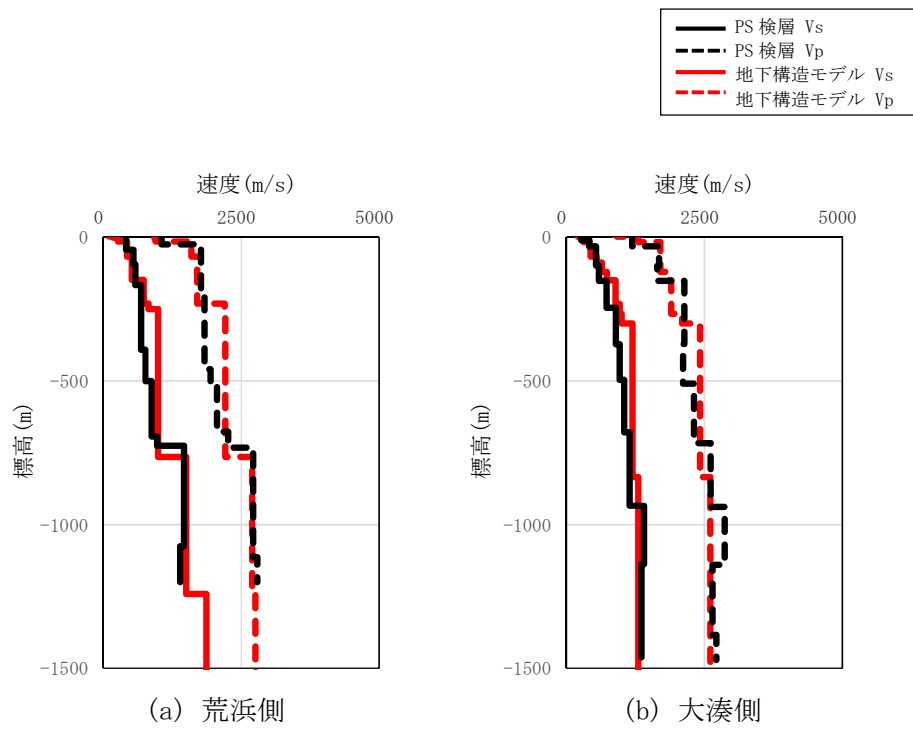
(b) レシーバー関数



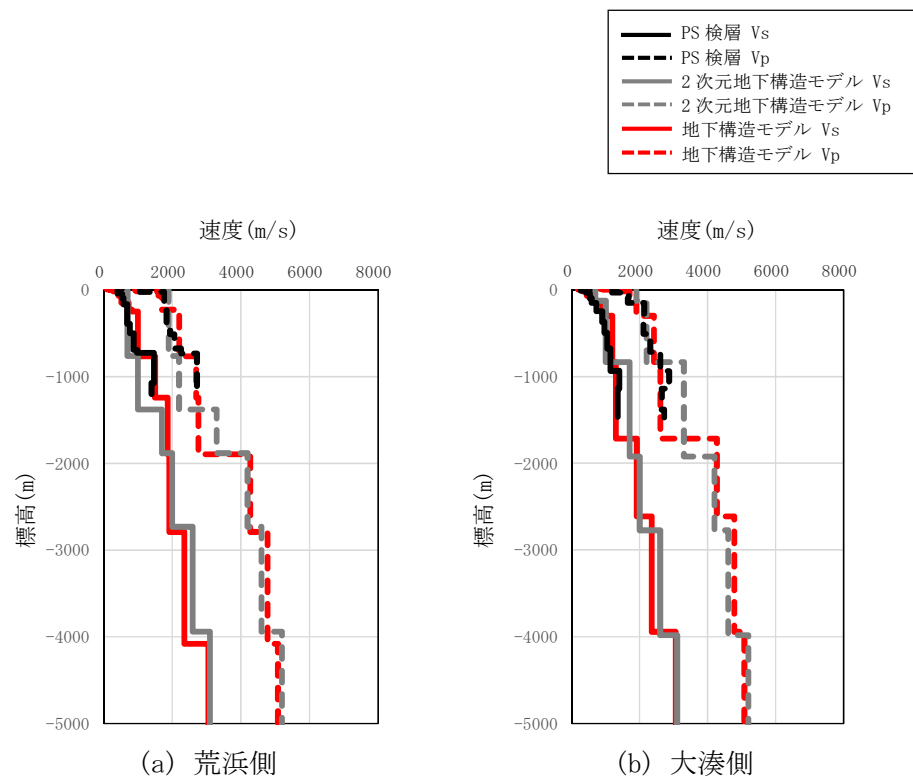
(c) コーダ部 H/V スペクトル比

(2) 大湊側

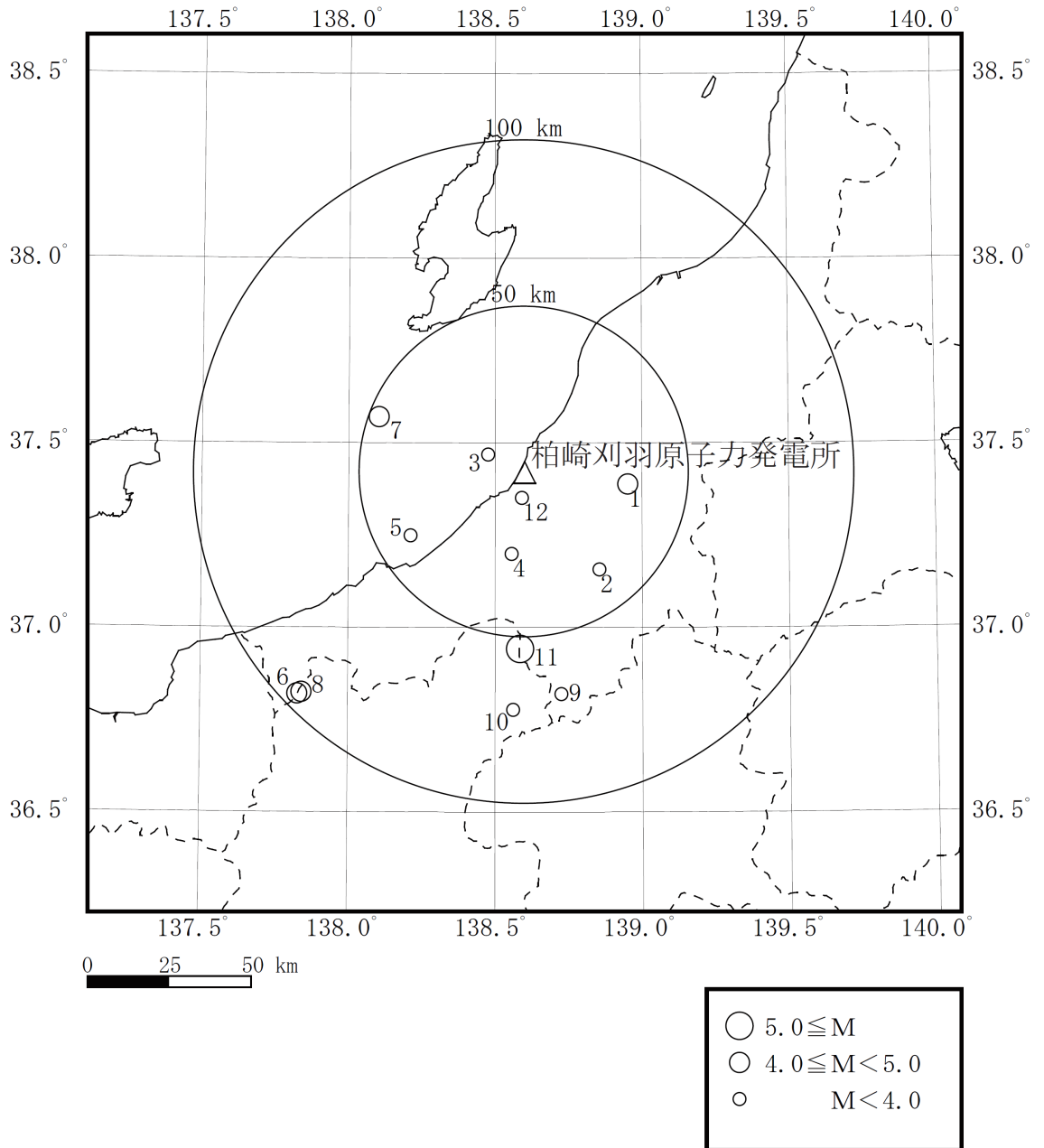
第 4-2 図 ターゲットとした観測記録と逆解析により同定した地下構造モデルによる理論値の比較



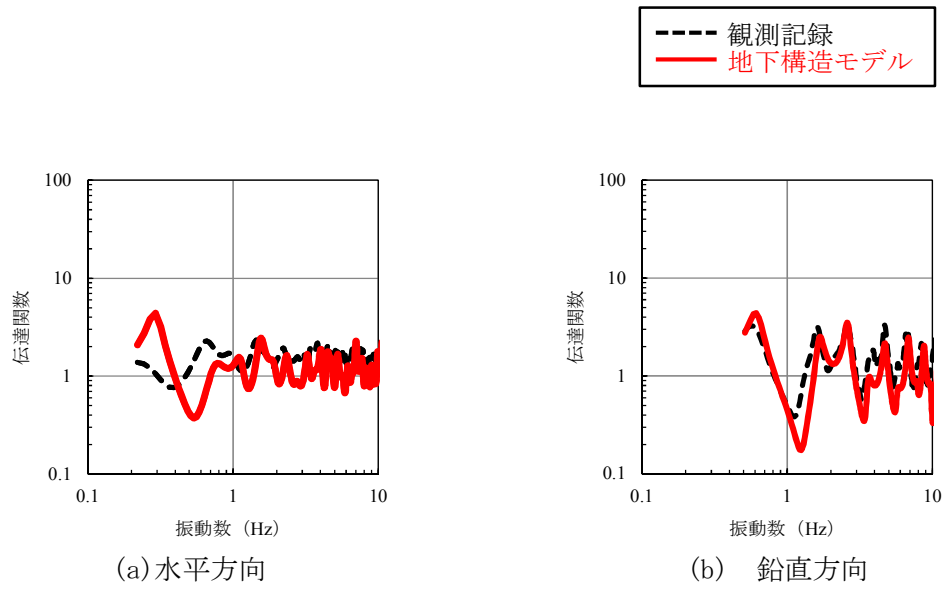
第 5-1 図 PS 検層結果と地下構造モデルの速度構造の比較



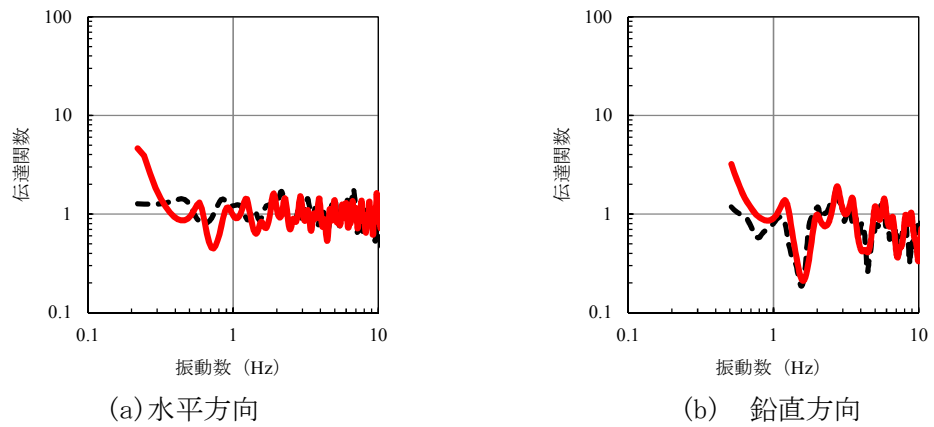
第 5-2 図 2次元地下構造モデルと地下構造モデルの速度構造の比較



第 5-3 図 観測記録の伝達関数の評価に用いた地震の震央分布

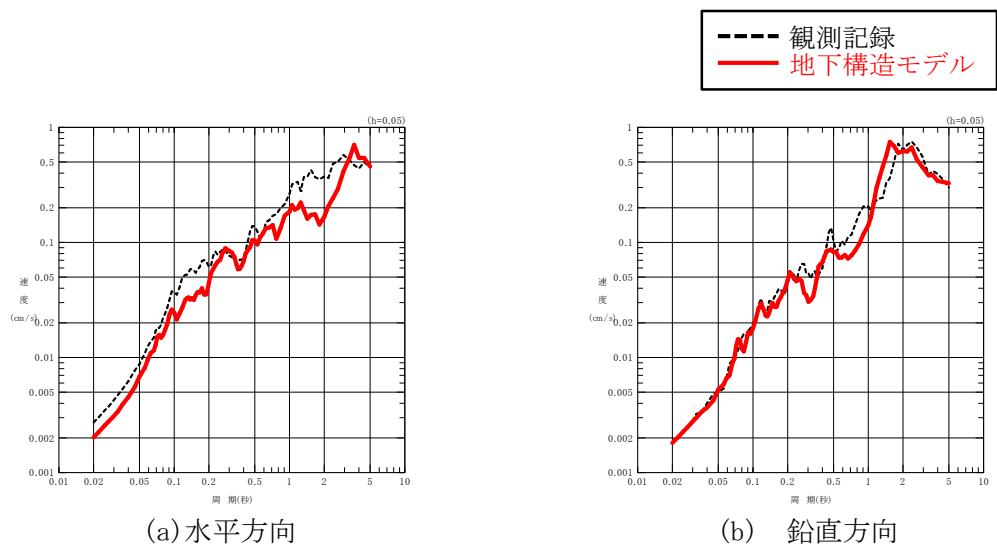


(1) 荒浜側：標高-400m/-1017m

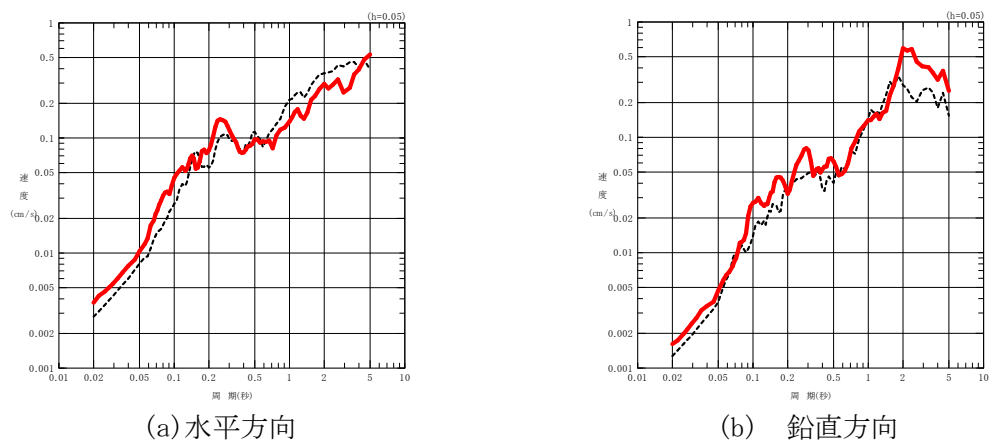


(2) 大湊側：標高-300m/-1488m

第 5-4 図 観測記録の伝達関数と地下構造モデルの理論伝達関数の比較

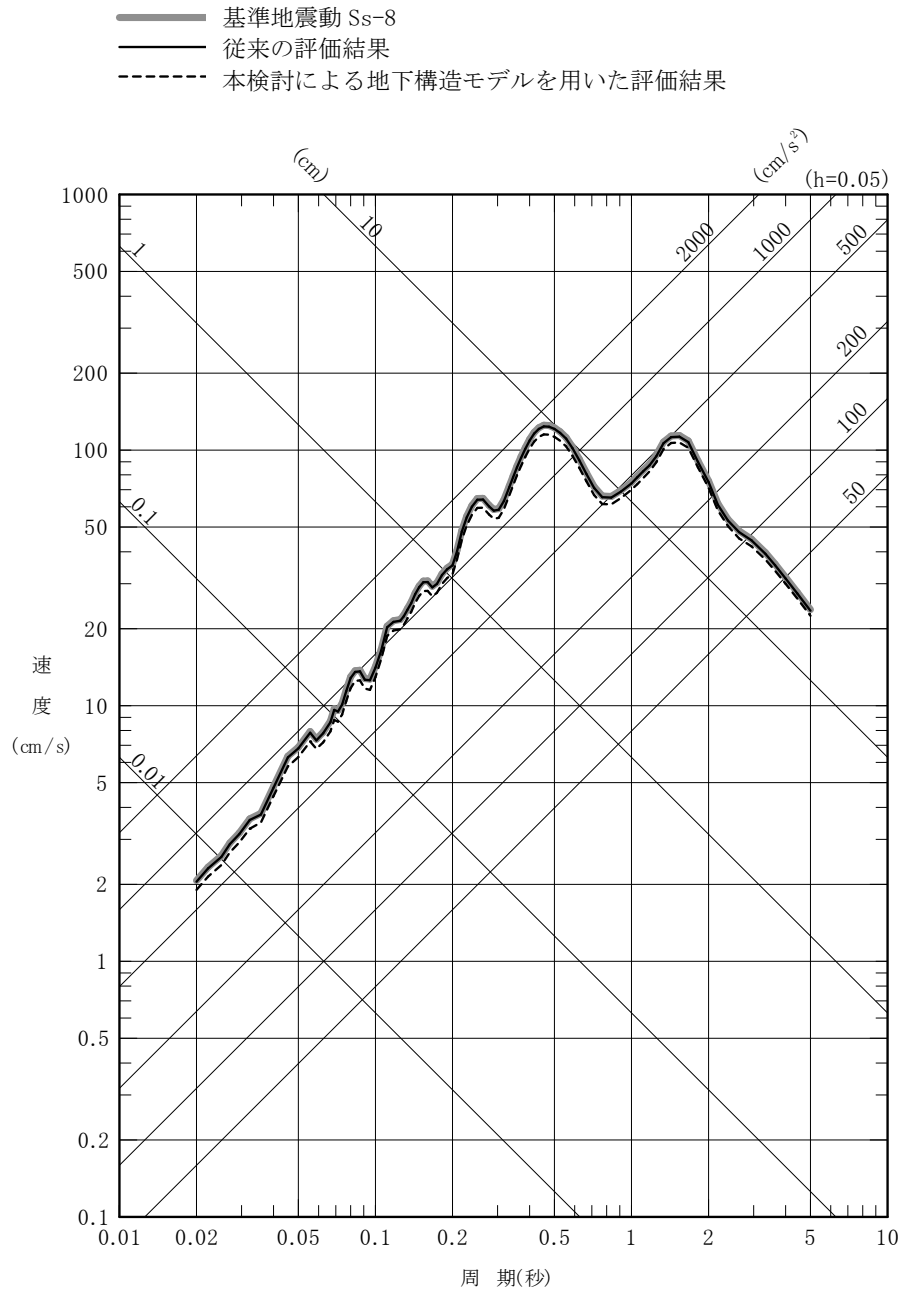


(1) 荒浜側 標高-400m

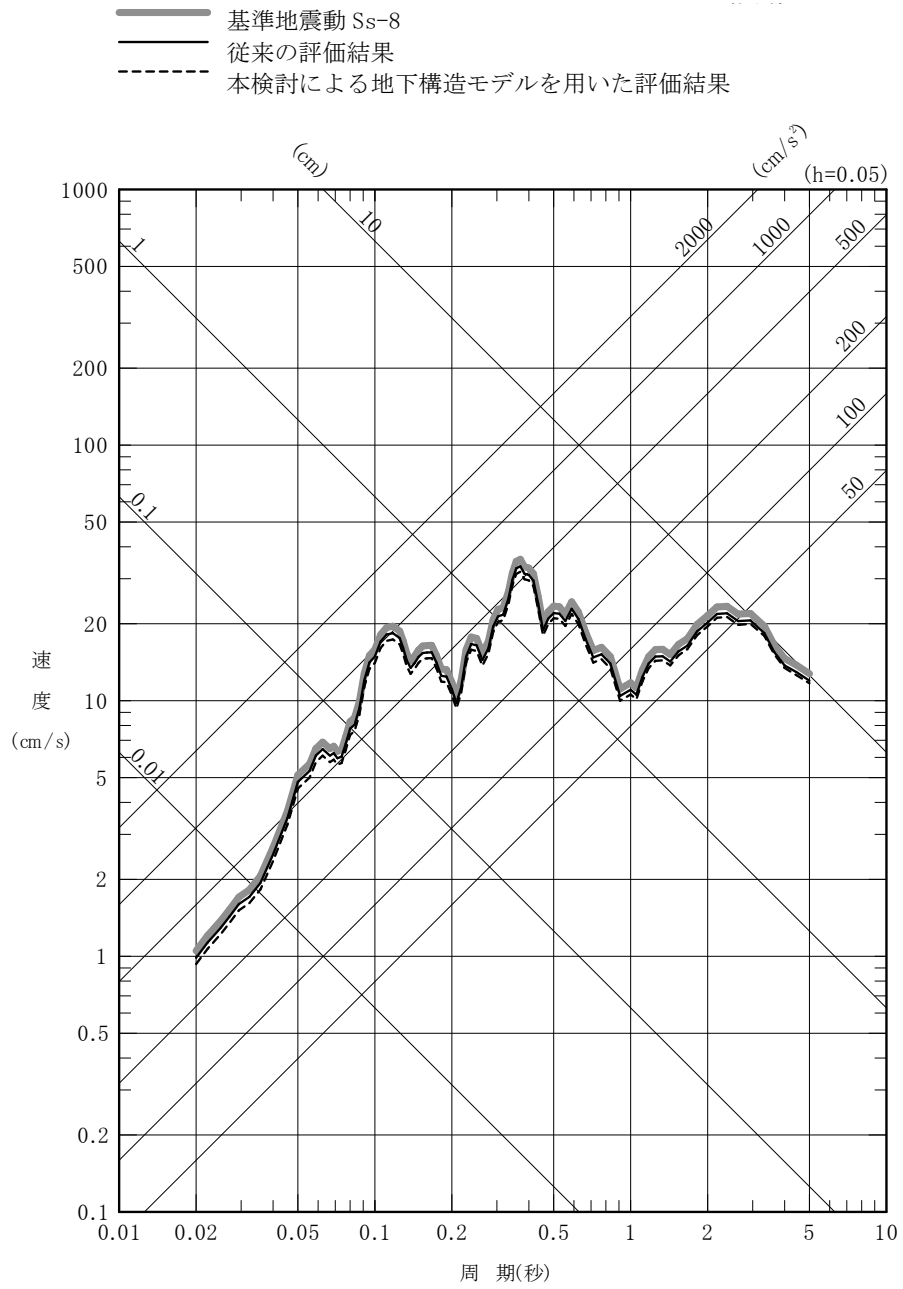


(2) 大湊側 標高-300m

第 5-5 図 地下構造モデルを用いたシミュレーション解析結果と観測記録の比較 (2018/05/25 21:13, M5.2 の地震)



第 7-1 図(1) 2004 年北海道留萌支庁南部地震の評価結果 (大湊側, 水平方向)



第 7-1 図(2) 2004 年北海道留萌支庁南部地震の評価結果 (大湊側, 鉛直方向)