

5. 一次元地下構造モデルの作成

1. 地震動評価に用いる地下構造モデルの作成の流れ
2. 地質調査及び地球物理学的調査による地下構造評価
 - 2-1 敷地周辺の重力探査の内容
 - 2-2 各種弾性波探査の内容
 - 2-2-1 各種弾性波探査及びトモグラフィ解析の流れ
 - 2-2-2 敷地周辺陸域の屈折法地震探査の内容
 - 2-2-3 敷地周辺海域の屈折法地震探査の内容
 - 2-2-4 敷地周辺の陸海連続弾性波探査の内容
 - 2-2-5 反射法地震探査及びオフセットVSP探査の内容
 - 2-2-6 各種屈折法地震探査データによるトモグラフィ解析の内容
 - 2-3 深部ボーリングの調査結果(柱状図及びコア写真)
 - 2-4 地震基盤付近のカッティングス及びスポットコアによる岩種判定
 - 2-5 デイサイトの分布について
 - 2-6 大間層の性状について
 - 2-7 三次元地下構造モデル作成範囲(30km×40km)全体の作成結果
 - 2-8 水平成層モデルの諸元
 - 2-9 検討項目とリッカー波の中心周期
 - 2-10 二次元FEMモデルの地盤物性値
 - 2-11 三次元差分法モデルによる解析結果
3. 観測記録による地下構造評価
 - 3-1 検討において対象とした周期帯について
 - 3-2 佐藤ほか(2011)の概要
 - 3-3 各観測点における基準化スペクトルの検討
 - 3-4 基盤位置における基準化スペクトルの算定に用いた地下構造モデル
 - 3-5 各観測点における表土の層厚
 - 3-6 領域ごとの異なる深度の応答スペクトル比
 - 3-7 領域ごとの異なる深度の応答スペクトル比の周期特性の評価
 - 3-8 領域ごとのKiK-net大間観測点との応答スペクトル比
 - 3-9 各観測点の常時微動のH/Vスペクトル比
4. 地下構造評価のまとめ
5. 一次元地下構造モデルの作成
 - 5-1 規制基準・審査ガイドにおける要求事項との関係について
 - 5-2 基盤の地震動を評価する位置の設定の妥当性の確認(補足)
 - 5-3 最適化地盤モデル(浅部) $V_p \cdot Q_p$ 構造
 - 5-4 観測記録の伝達関数の標準偏差
 - 5-5 観測記録とシミュレーション解析結果との比較
 - 5-6 玄武岩の上面標高
 - 5-7 頭打ちQ値モデルについて
 - 5-8 観測記録のP波部H/Vスペクトル比等の標準偏差
 - 5-9 スペクトルインバージョン解析の概要
 - 5-10 微動アレイ観測における1次高次モードの詳細について
 - 5-11 地震波干渉法による解析の概要について
 - 5-12 最大振幅法によるQ値の測定について
 - 5-13 地震基盤以深のQ値の妥当性について
 - 5-14 地盤モデルの解放基盤表面以浅の有無の影響について
 - 5-15 平成26年12月変更申請時の地下構造モデル
6. まとめ

5-1 規制基準・審査ガイドにおける要求事項との関係について (1/3)

規制基準・審査ガイドにおける要求事項

コメントNo.S3-12

第822回審査会合
資料2-2 P.5-2 一部修正

【耐震設計に関する要求事項】

【地下構造評価に関する要求事項】

規則 第四条 第3項

耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力(以下「基準地震動による地震力」という。))に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

規則の解釈 (別記2) 第4条 第5項の一

基準地震動は、(中略)解放基盤表面における(中略)地震動として(中略)策定すること。

上記の「解放基盤表面」とは、基準地震動を策定するために、基盤面上の表層及び構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう上記の「基盤」とは、おおむねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものとする。

規則の解釈 (別記2) 第4条 第5項の四

1. (中略)「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」の地震動評価においては、適用する評価手法に必要な特性データに留意の上、地震波の伝播特性に係る次に示す事項を考慮すること。
 - ① 敷地及び敷地周辺の地下構造(深部・浅部地盤構造)が地震波の伝播特性に与える影響を検討するため、敷地及び敷地周辺における地層の傾斜、断層及び褶曲構造等の地質構造を評価するとともに、地震基盤の位置及び形状、岩相・岩質の不均一性並びに地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を評価すること。なお、評価の過程において、地下構造が成層かつ均質と認められる場合を除き、三次元的な地下構造により検討すること。
 - ② 上記①の評価の実施に当たって必要な敷地及び敷地周辺の調査については、地域特性及び既往文献の調査、既存データの収集・分析、地震観測記録の分析、地質調査、ボーリング調査並びに二次元又は三次元の物理探査等を適切な手順と組合せて実施すること。

基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド I, 3.3.2 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- (3) 統計的グリーン関数法及びハイブリッド法(理論的手法と統計的あるいは経験的グリーン関数法を組み合わせたものをいう。以下同じ。)による地震動評価においては、地質・地質構造等の調査結果に基づき、各々の手法に応じて地震波の伝播特性が適切に評価されていることを確認する。
- (4) 経験的グリーン関数法、統計的グリーン関数法、ハイブリッド法以外の手法を用いる場合には、その手法の妥当性が示されていることを確認する。
- ③ 統計的グリーン関数法及びハイブリッド法による地震動評価
 - 1) 統計的グリーン関数法やハイブリッド法による地震動評価においては、震源から評価地点までの地震波の伝播特性、地震基盤からの増幅特性が地盤調査結果等に基づき評価されていることを確認する。
- ⑤ 地下構造モデルの設定
 - 2) 地震動評価において、震源領域から地震基盤までの地震波の伝播特性に影響を与える「地殻・上部マン トル構造」、地震基盤から解放基盤までの「広域地下構造」、解放基盤から地表面までの「浅部地下構造」を考慮して、地震波速度及び減衰定数等の地下構造モデルが適切に設定されていることを確認する。(中略)
 - 3) 地下構造モデルの設定においては、地下構造(深部・浅部地下構造)が地震波の伝播特性に与える影響を検討するため、地層の傾斜、断層、褶曲構造等の地質構造を評価するとともに、地震発生層の上端深さ、地震基盤・解放基盤の位置や形状、地下構造の三次元不整形性、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性が適切に評価されていることを確認する。

- 規制基準・審査ガイド(以下「規制基準等」という。)における要求事項について、耐震設計に関する事項と地下構造評価に関する事項に分類して整理した。
- 各色の要求事項に対する地下構造モデルの設定方針をP.5-3に示す。

注)本節は、本編資料5.1節に関する補足説明資料。

5-1 規制基準・審査ガイドにおける要求事項との関係について (2/3)

規制基準等における要求事項に対する地下構造モデルの設定方針

コメントNo.S3-12

第822回審査会合
資料2-2 P.5-3 一部修正

【耐震設計に関する事項】

重要な安全機能を有する施設※1に作用する地震力の評価

① 解放基盤表面の位置

- 規制基準等において、**重要な安全機能を有する施設※1は、基準地震動による地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければなりませんとされている。**
- 当該事項を踏まえ、重要な安全機能を有する施設に作用する地震力は、基準地震動に基づき評価するため、基準地震動を定義する**解放基盤表面の位置**は、ほぼ水平で相当な拡がり有し、風化が認められない大間層にて、おおむね $V_s=700\text{m/s}$ 以上となる位置に設定し、**重要な安全機能を有する施設※1の基礎地盤におけるT.P.-260mの位置とする。**

※1：重要な安全機能を有する施設とは、耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設をいう。

- 規制基準等における要求事項※2を踏まえ、解放基盤表面の位置や基盤の地震動を評価する位置の設定の考え方等について、整理した。

※2：①～⑤の各項目の**赤字**は、規制基準等の要求事項を示す。また、各項目の配色は、P.5-2に示した規制基準等の要求事項に対応させた。

- 地下構造モデルの設定方針について、模式図をP.5-4に示す。

【地下構造評価に関する事項】

鉛直アレイ地震観測地点における地震動評価に用いる地下構造モデルの作成

② 地震観測記録の活用

- 規制基準等において、**地盤の減衰特性を適切に評価するための調査として、地震観測記録の分析を実施することとされている。**
- 当該事項を踏まえ、地震波の伝播特性を適切に評価するために、地震観測記録に基づき地下構造モデルを作成することとし、**地震観測記録の得られた鉛直アレイ地震観測地点において、地下構造モデルの最適化を行う。**

③ 基盤の地震動を評価する位置

- 規制基準等において、**敷地及び敷地周辺の地下構造(深部・浅部 地盤構造)が地震波の伝播特性に与える影響を検討するため、敷地及び敷地周辺における地層の傾斜等の地質構造や地盤の減衰特性を適切に評価するとされている。**
- 当該事項を踏まえ、敷地の地質構造を評価すると、重要な安全機能を有する施設※1の基礎地盤における解放基盤表面(T.P.-260m)は、敷地全体でおおむね水平に分布する地層(大間層)にある。原子炉建屋付近では $V_s=900\text{m/s}$ 程度となる酸性凝灰岩層にあり、この層は、鉛直アレイ地震観測地点へ緩やかに傾斜して連続し、同地点のT.P.-230m位置に分布するとともに、原子炉建屋付近と同等の地震波速度($V_s=860\text{m/s}$)となっている。
- 原子炉建屋設置位置の解放基盤表面(T.P.-260m)と、鉛直アレイ地震観測地点におけるT.P.-230m位置の、地震基盤からの増幅特性は整合的である。
- 以上の敷地の地質構造および速度構造を踏まえ、鉛直アレイ地震観測地点における解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、**T.P.-230m位置を、基盤の地震動を評価する位置とする。**

④ 地下構造モデルの作成

- 規制基準等において、**震源領域から地震基盤までの「地殻・上部マントル構造」、地震基盤から解放基盤までの「広域地下構造」、解放基盤から地表面までの「浅部地下構造」を考慮して、地下構造モデルが適切に設定されていることを確認するとされている。**
- 当該事項を踏まえ、基盤の地震動を評価する位置より浅部の「浅部地下構造モデル」及び深部の「深部地下構造モデル」をそれぞれ作成する。

水平成層仮定が成り立つことの確認

⑤ 水平成層仮定が成り立つことの確認

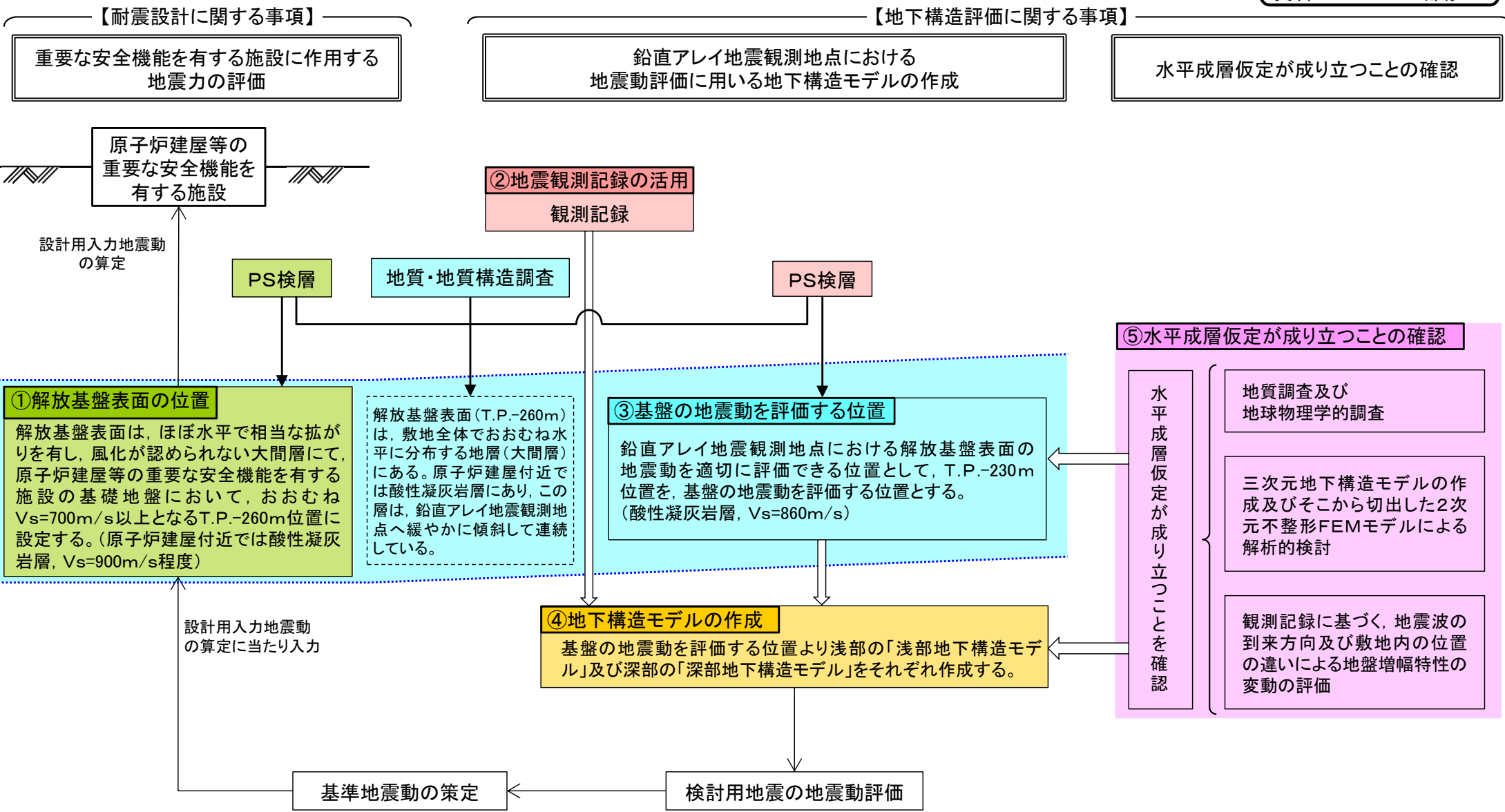
- 規制基準等において、**地下構造が成層かつ均質と認められるか確認するとされている。**
- 当該事項を踏まえ、下記の検討を行い、水平成層仮定が成り立つことを確認する。
 - 地質調査、地球物理学的調査。
 - 三次元地下構造モデルの作成及びそこから切出した二次元不整形FEMモデルによる解析的検討。
 - 観測記録に基づく、地震波の到来方向及び敷地内の位置の違いによる地盤増幅特性の変動の評価。

5-1 規制基準・審査ガイドにおける要求事項との関係について (3/3)

コメントNo.S3-12

第822回審査会合
資料2-2 P.5-4 一部修正

地下構造モデルの設定方針の模式図



• P.5-3に示す地下構造モデルの設定方針について、模式図に示す。(P.5-3に示す設定方針の各項目について、番号及び色を揃えて示す。)

5-2 基盤の地震動を評価する位置の設定の妥当性の確認(補足)

基盤の地震動を評価する位置をT.P.-260m位置とした場合との比較

コメントNo.S3-12

- 仮に鉛直アレイ地震観測地点における基盤の地震動を評価する位置をT.P.-260mとした場合の増幅特性について確認するため、本編P.5-7と同様の検討を行い、原子炉建屋設置位置の解放基盤表面(T.P.-260m)における増幅特性との比較を行った。
- 検討の結果、図2に示すとおり、鉛直アレイ地震観測地点における基盤の地震動を評価する位置をT.P.-260mとした場合の増幅特性は、原子炉建屋設置位置の解放基盤表面(T.P.-260m)における増幅特性と整合しない。

表1 原子炉建屋設置位置の深部地下構造モデル

上端標高 T.P.(m)	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	Q_s ※1
-260	18	1.85	879	50
-278	20	1.86	884	
-298	20	1.86	889	
-318	20	1.87	894	
-339	14	1.88	904	
-353	14	1.89	920	80
-367	87	2.23	1541	
-453	87	2.26	1618	
-540	87	2.30	1695	
-627	87	2.33	1772	
-713	87	2.36	1848	290
-800	944	2.45	2080	
-1744	76	2.58	2534	
-1821	76	2.59	2588	
-1897	76	2.61	2642	
-1973	76	2.62	2696	550
-2050	76	2.63	2750	
-2126	84	2.69	3148	
-2210	-	2.69	3148	

表2 鉛直アレイ地震観測地点のT.P.-260m以深の深部地下構造モデル※2

上端標高 T.P.(m)	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	Q_s
-260	70	1.6	860	50
-330	490	2.3	1700	80
-820	950	2.5	2200	290
-1770	440	2.7	2700	
-2210	-	2.7	3200	550

※1 : Q_s は表2に示す深部地下構造モデルの値を参照して設定した。

※2 : 本編資料P.5-39に示す深部地下構造モデルに基づき設定。

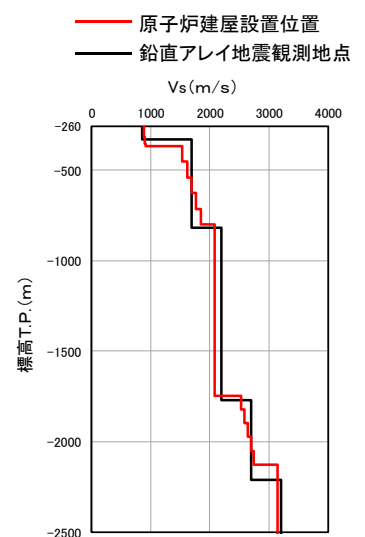


図1 原子炉建屋設置位置及び鉛直アレイ地震観測地点の速度構造(V_s)の比較

- 原子炉建屋設置位置における解放基盤表面(T.P.-260m)
- 鉛直アレイ地震観測地点における基盤の地震動を評価する位置(T.P.-230m) (本編資料 P.5-7参照)
- - - 仮に鉛直アレイ地震観測地点における基盤の地震動を評価する位置をT.P.-260mとした場合

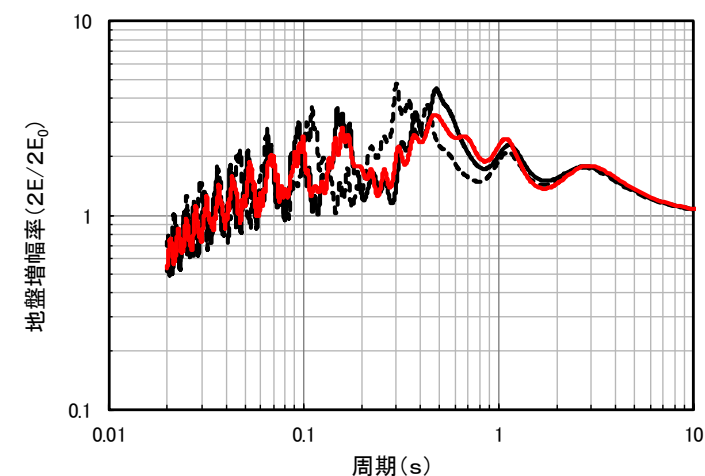


図2 原子炉建屋設置位置における解放基盤表面及び鉛直アレイ地震観測地点における基盤の地震動を評価する位置の地盤増幅率の比較 (評価位置の $2E$ /地震基盤位置の入力波 $2E_0$)



5-3 最適化地盤モデル(浅部) $V_p \cdot Q_p$ 構造 (1/5)

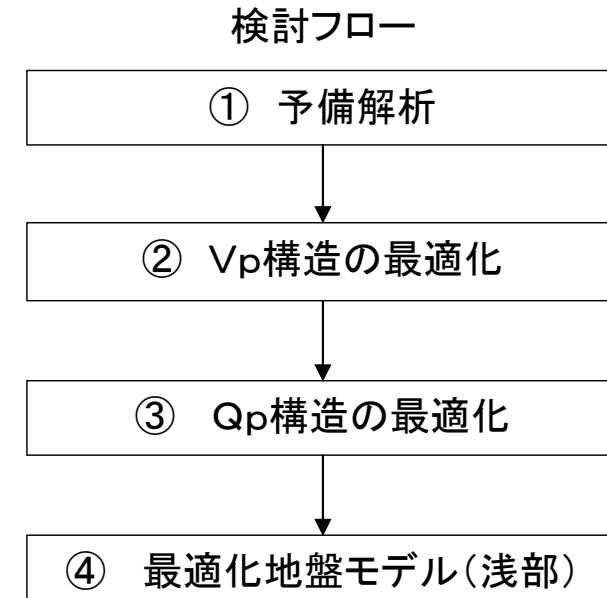
最適化地盤モデル(浅部) $V_p \cdot Q_p$ 構造の検討フロー

	層No.	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	PS検層 V_p (m/s)
T.P.+32.5m (GL±0)	1	1	1.47	270
	2	1		
	3	2		
	4	2	1.63	470
	5	6.5		
	6	20	1.95	1890
T.P.-7.5m T.P.-47.5m	7	64	2.14	2760
T.P.-77.5m T.P.-117.5m	8	68	1.60	1730
T.P.-207.5m	9	98	1.54	1730
基盤の地震動を評価する位置 T.P.-230m	10	∞	1.60	2070

● :地震観測点

・層厚, ρ (密度), PS検層は, SB-042孔の調査結果による。

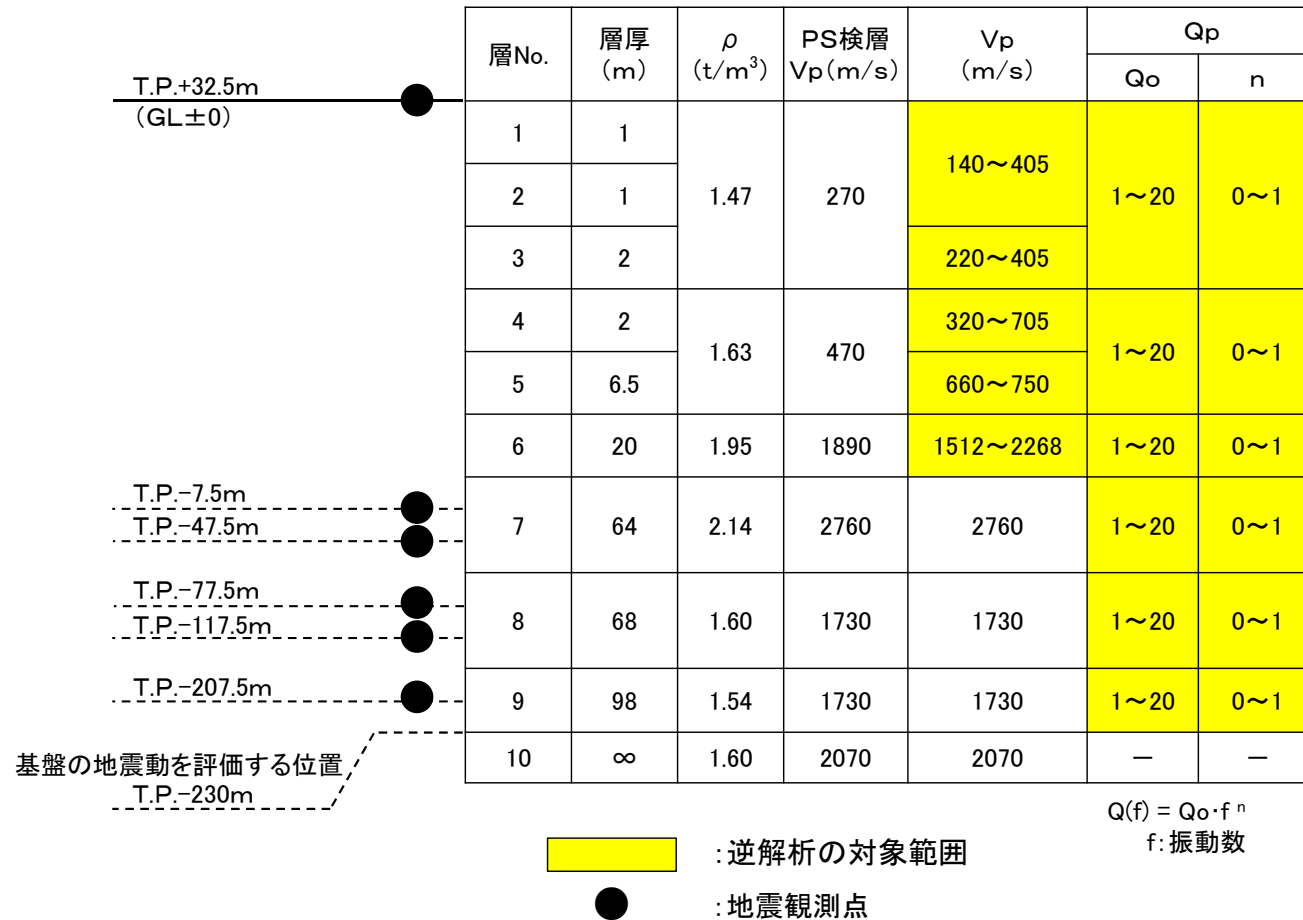
予備解析により決定した速度構造区分



- 浅部の $V_p \cdot Q_p$ 構造については, 観測記録に基づき, 以下の手順で最適化を行った。
 - 速度構造区分をPS検層値で固定した予備解析により, P波部の鉛直成分の伝達関数の観測値と理論値が整合するように, 一部の層について細分化し, 速度構造区分を決定した。
 - V_p 構造は, P波部の鉛直成分の伝達関数に基づき, GAを用いた逆解析により, 最適化を行った。
 - Q_p 構造は, 主要動のはぎとり解析に用いることを踏まえ, ②で最適化された V_p の値を固定した上で, S波部の鉛直成分の伝達関数に基づき, GAを用いた逆解析により, 最適化を行った。

5-3 最適化地盤モデル(浅部) Vp・Qp構造 (2/5)

最適化地盤モデル(浅部)の探索範囲(Vp構造の最適化)



・層厚, ρ (密度), PS検層(Vp)は, SB-042孔の調査結果による。

- 速度構造をPS検層値で固定した予備解析により, P波部の伝達関数の観測値と理論値が整合するように, 一部の層について細分化し, 速度構造区分を決定した上で, 探索範囲を設定した。



作成した最適化地盤モデル(浅部) Vp構造

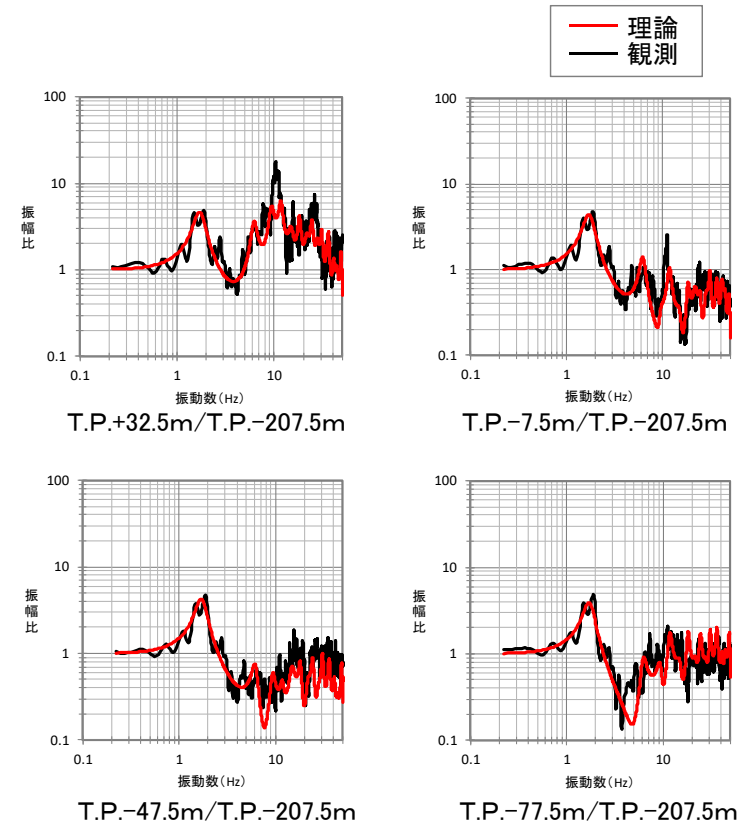
層No.	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	PS検層 Vp(m/s)	Vp (m/s)	Qp	
					Qo	n
1	1	1.47	270	180	3.47	0.000
2	1			250		
3	2			340		
4	2	1.63	470	700	10.0	0.696
5	6.5			1700		
6	20	1.95	1890	1700	4.62	0.594
7	64	2.14	2760	2760	1.02	0.562
8	68	1.60	1730	1730	1.00	0.950
9	98	1.54	1730	1730	9.40	0.989
10	∞	1.60	2070	2070	—	—

基盤の地震動を評価する位置
T.P.-230m

- : 逆解析結果
- : 地震観測点
- : 最適化したVp構造
- : Qp構造については、S波部の伝達関数に基づき、再度逆解析により最適化を行う。(P.5-9, 5-10参照)

$$Q(f) = Q_0 \cdot f^n$$

f: 振動数



最適化地盤モデルの理論伝達関数と観測記録に基づく伝達関数の比較

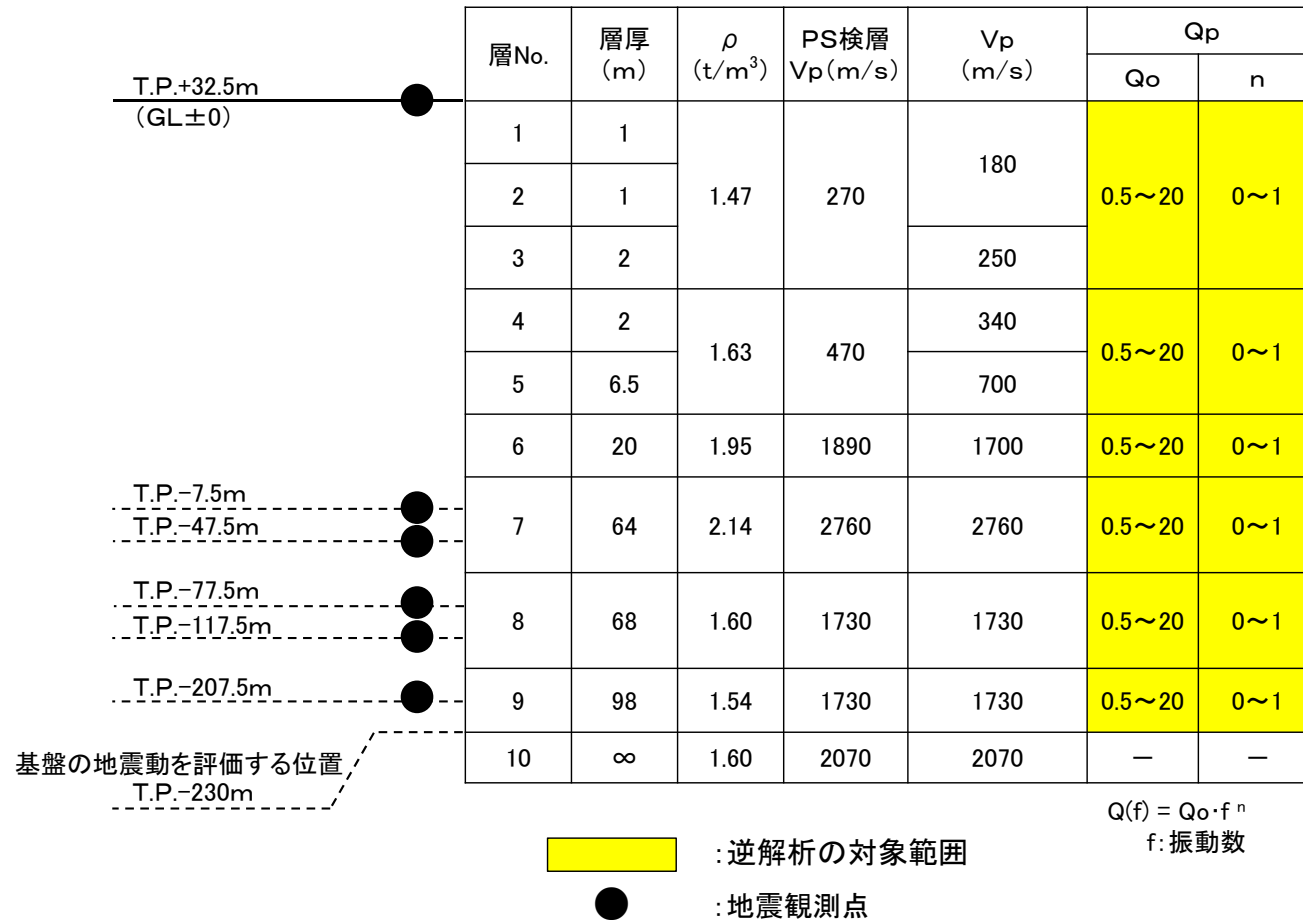
- GAを用いた逆解析により、Vp構造の最適化を行った。
- 最適化地盤モデルに基づき理論的に算定される伝達関数は、観測記録(P波部の鉛直成分)に基づく伝達関数^{※1}とよく整合している。

※1: 観測記録に基づく伝達関数の標準偏差は、P.5-12参照。



5-3 最適化地盤モデル(浅部) Vp・Qp構造 (4/5)

最適化地盤モデル(浅部)の探索範囲(Qp構造の最適化)



基盤の地震動を評価する位置
T.P.-230m

- Vp構造の最適化の結果を踏まえ、Qp構造の探索範囲を設定した。

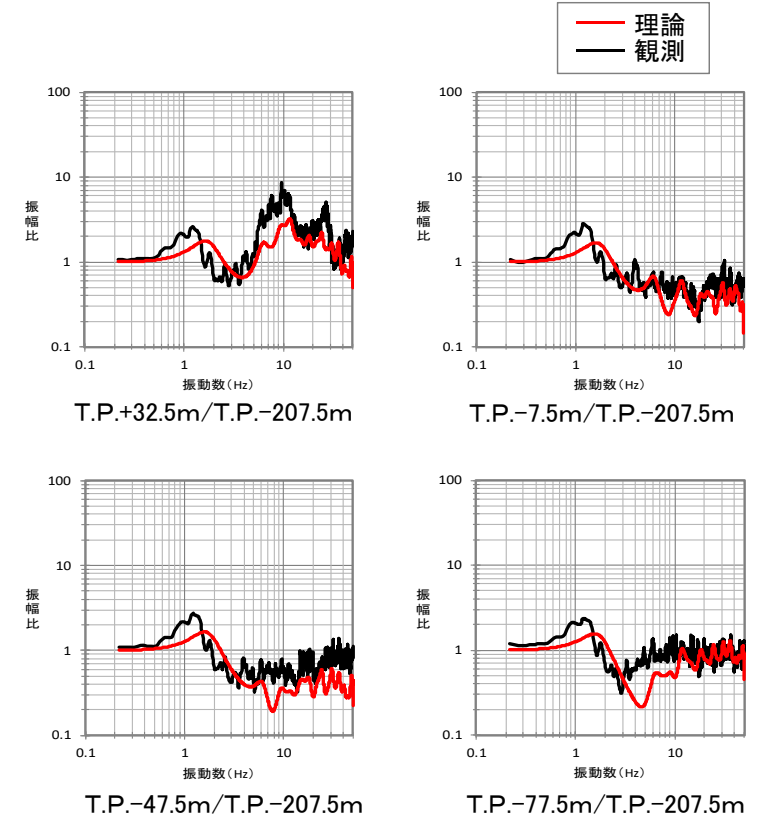
5-3 最適化地盤モデル(浅部) Vp・Qp構造 (5/5)



作成した最適化地盤モデル(浅部) Qp構造

層No.	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	PS検層 Vp(m/s)	Vp (m/s)	Qp	
					Qo	n
1	1	1.47	270	180	1.18	0.350
2	1					
3	2					
4	2	1.63	470	340	3.07	0.997
5	6.5					
6	20	1.95	1890	1700	0.630	0.641
7	64	2.14	2760	2760	0.500	0.750
8	68	1.60	1730	1730	0.503	1.000
9	98	1.54	1730	1730	1.12	1.000
10	∞	1.60	2070	2070	1.12	1.000

: 逆解析結果
 : 地震観測点
 ・第10層のQ値は、第9層のQ値と同じ値とした。



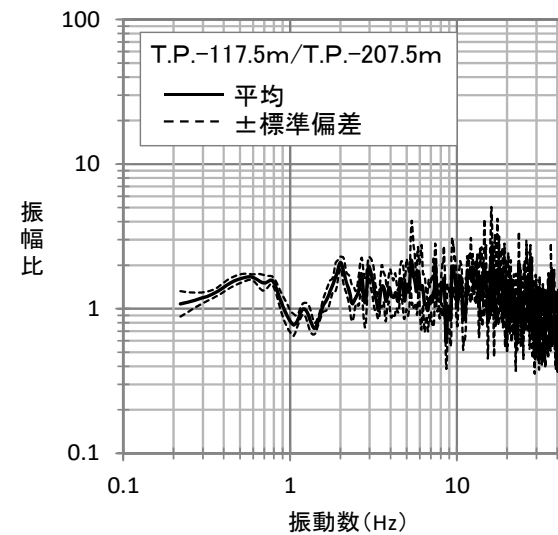
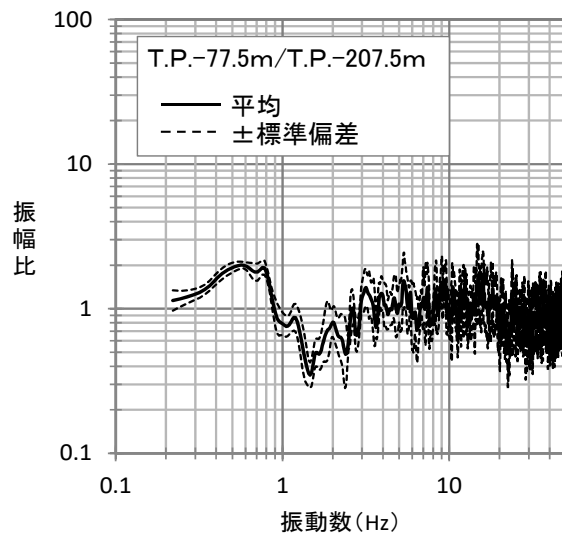
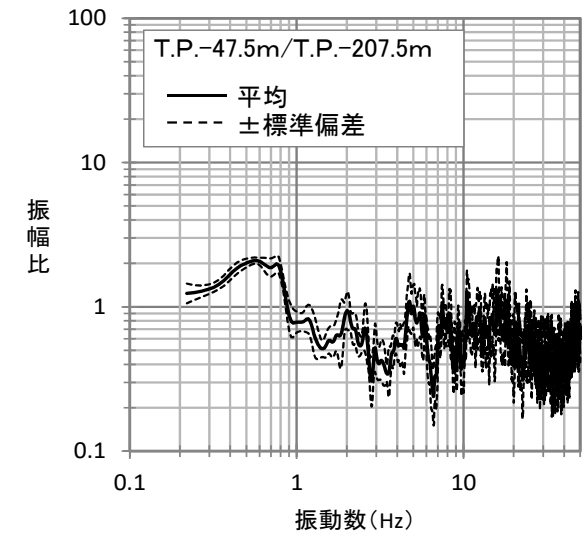
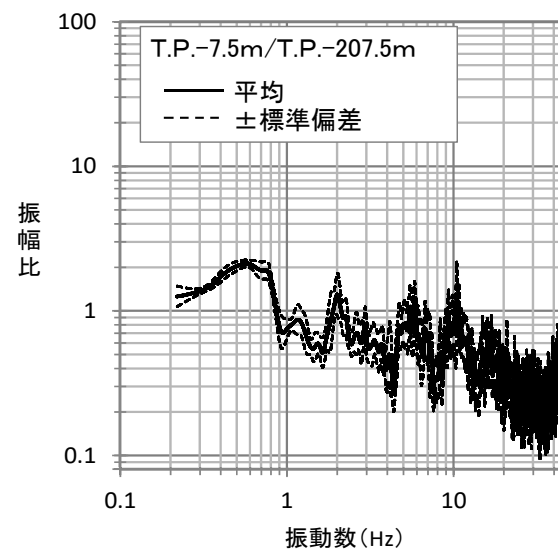
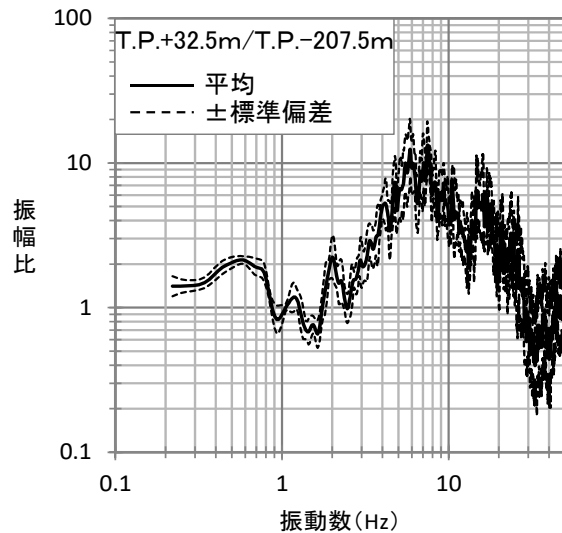
最適化地盤モデルの理論伝達関数と観測記録に基づく伝達関数の比較

- GAを用いた逆解析により、Qp構造の最適化を行った。
- 最適化地盤モデルに基づき理論的に算定される伝達関数は、観測記録(S波部の鉛直成分)に基づく伝達関数※1とおおむね整合している。

※1: 観測記録に基づく伝達関数の標準偏差は、P.5-13参照。

5-4 観測記録の伝達関数の標準偏差 (1/3)

S波部のTransverse成分の伝達関数



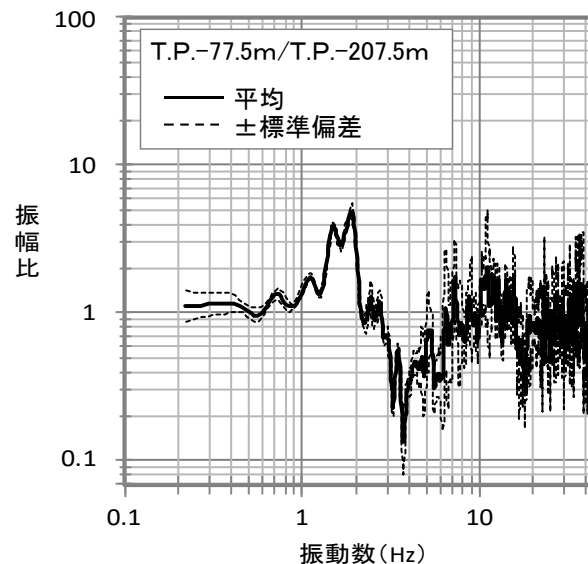
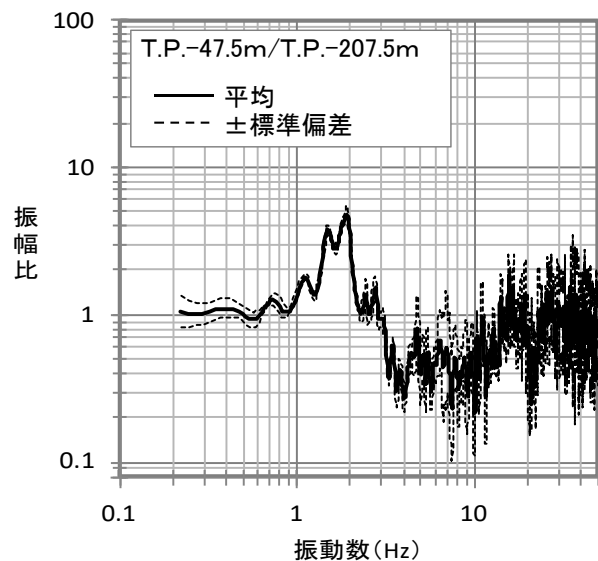
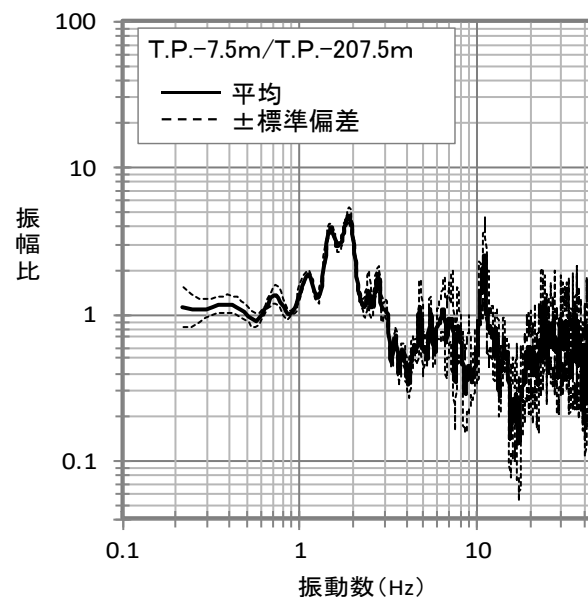
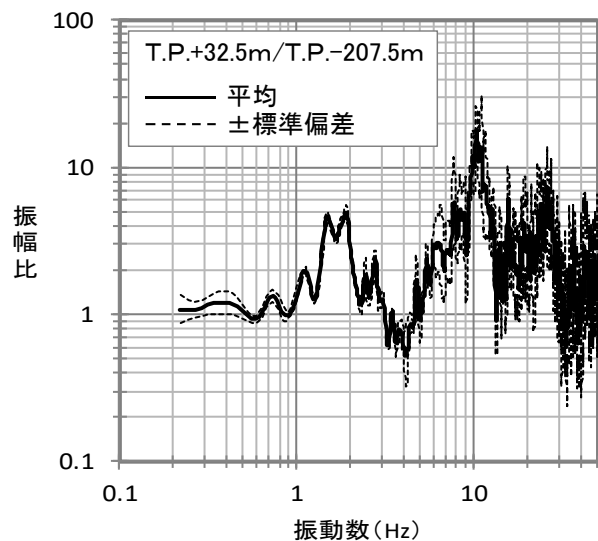
※1: 解析区間は、S波初動到達1秒前から30秒間とした。

- 観測記録^{※1}の伝達関数の標準偏差は小さい。

注) 本節は、本編資料5.2.2項に関する補足説明資料。



P波部の鉛直成分の伝達関数

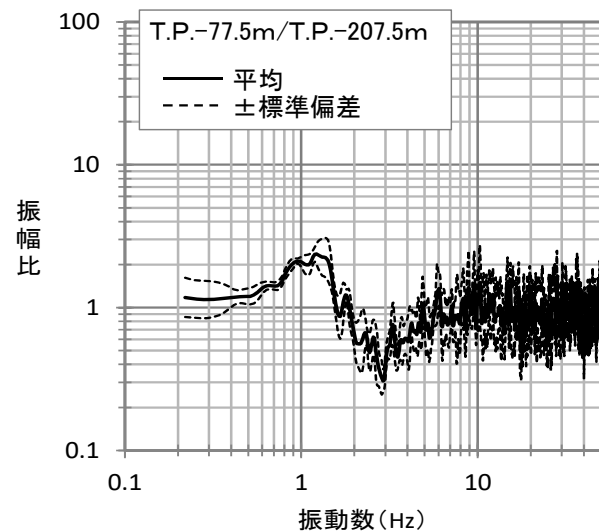
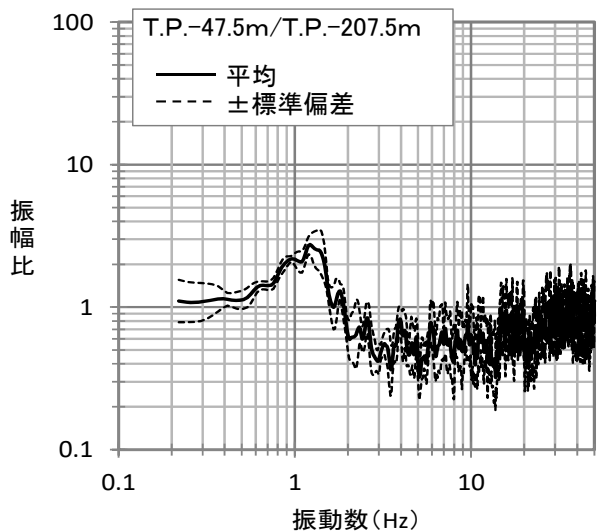
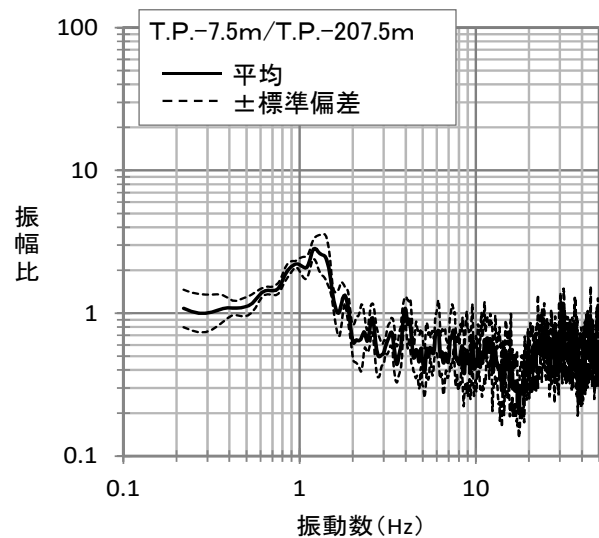
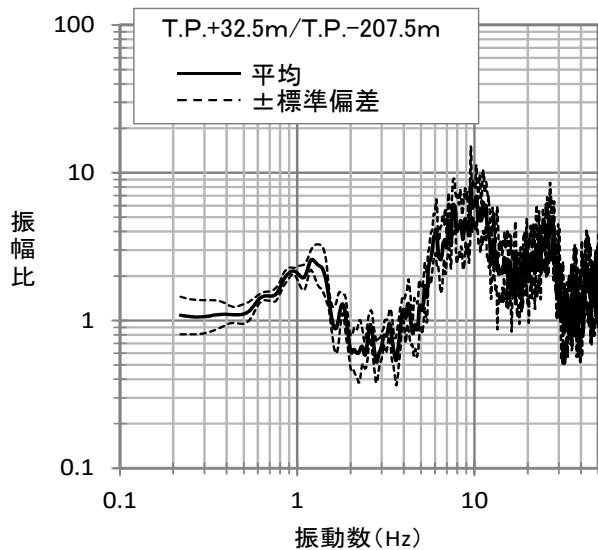


• 観測記録^{※1}の伝達関数の標準偏差は小さい。

※1: 解析区間は、P波初動到達1秒前から5秒間を基本とした。



S波部の鉛直成分の伝達関数

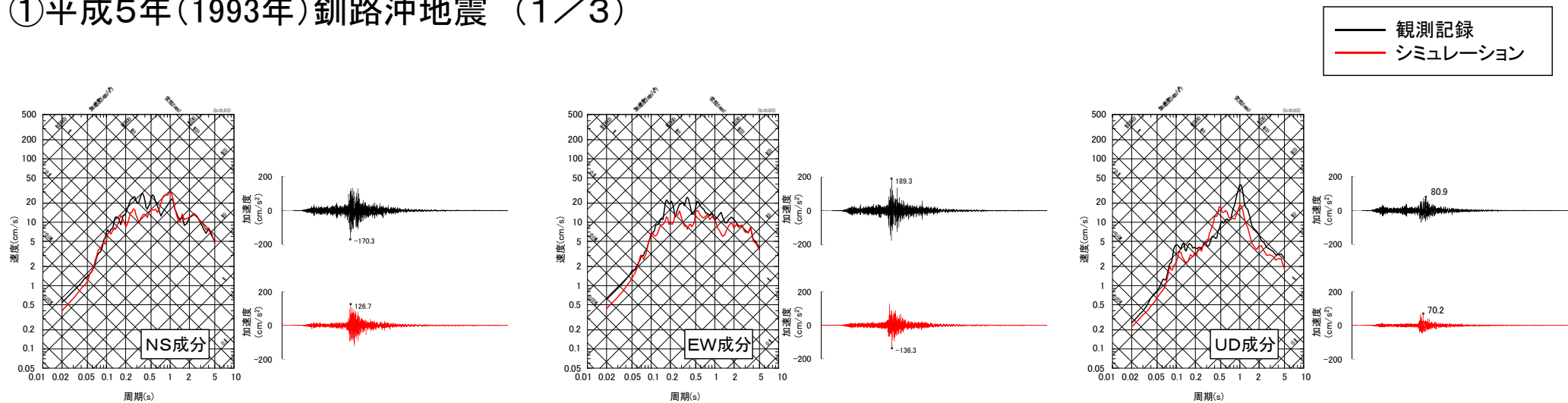


• 観測記録^{※1}の伝達関数の標準偏差は小さい。

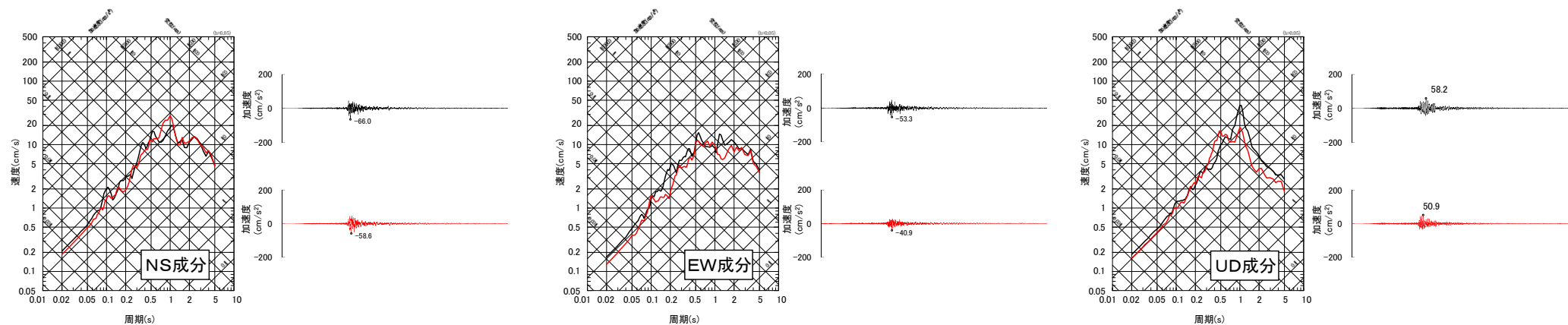
※1: 解析区間は, S波初動到達1秒前から30秒間とした。



①平成5年(1993年)釧路沖地震 (1/3)



T.P.+32.5m※



T.P.-7.5m※

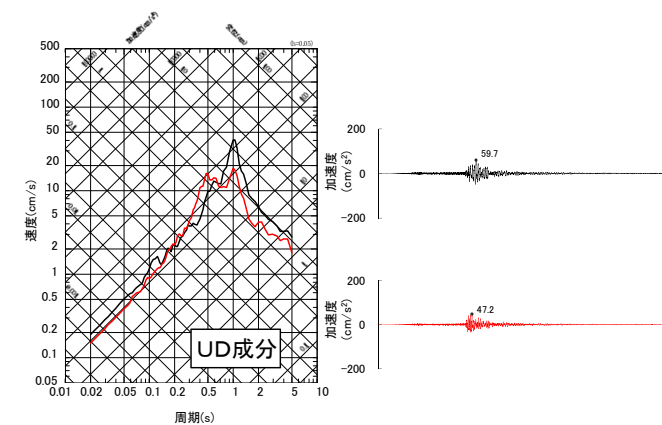
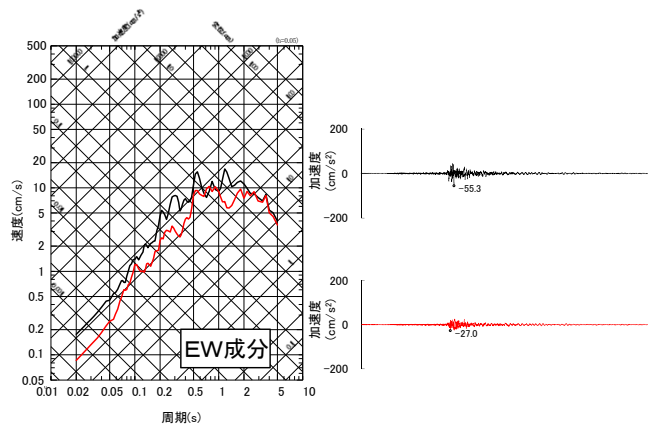
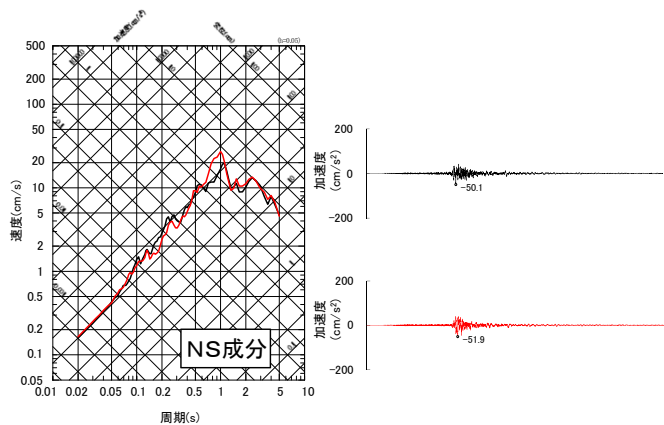
※ : 地震計の位置については、本編資料P.5-12を参照。

注) 本節は、本編資料5.2.3項に関する補足説明資料。

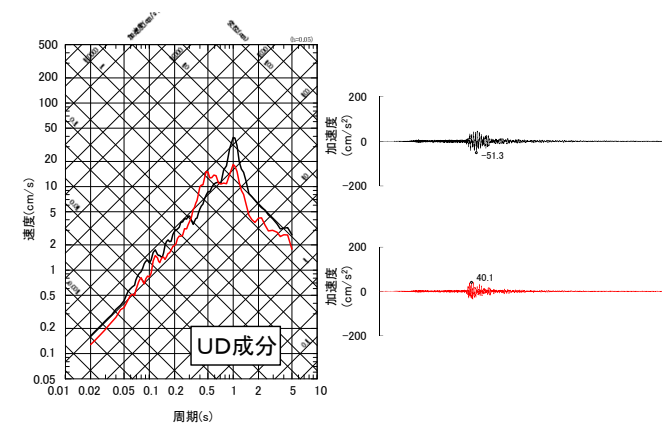
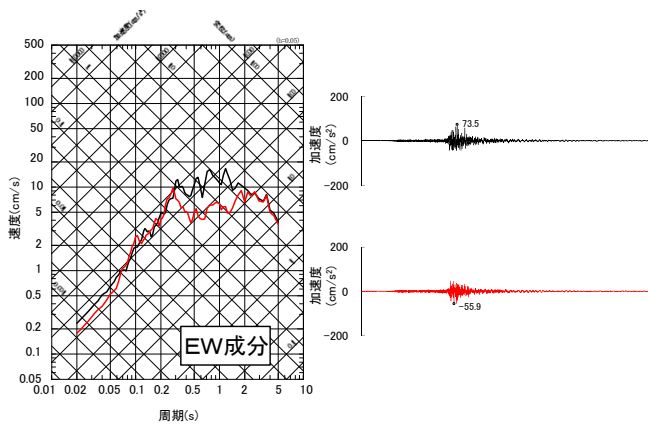
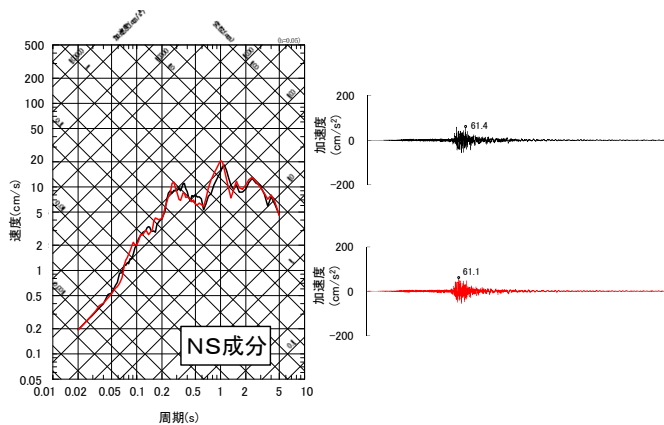


①平成5年(1993年)釧路沖地震 (2/3)

— 観測記録
— シミュレーション



T.P.-47.5m※

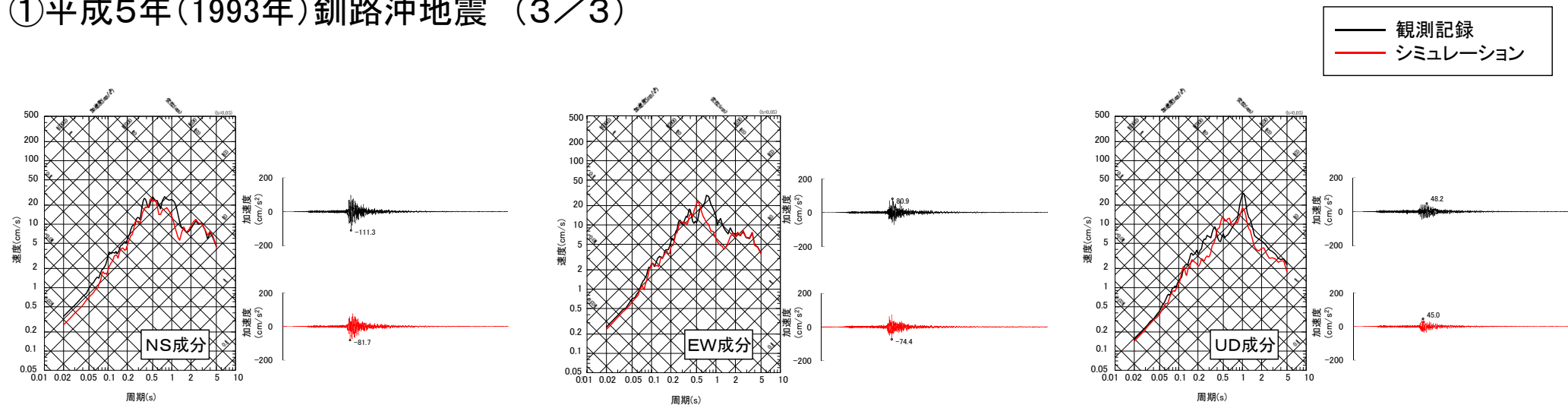


T.P.-77.5m※

※ : 地震計の位置については、本編資料P.5-12を参照。



①平成5年(1993年)釧路沖地震 (3/3)



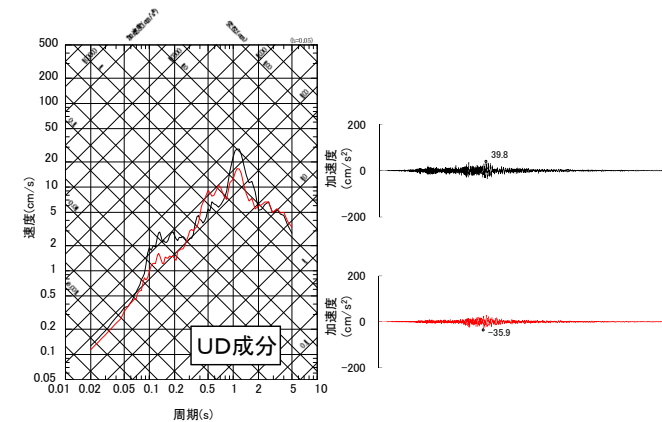
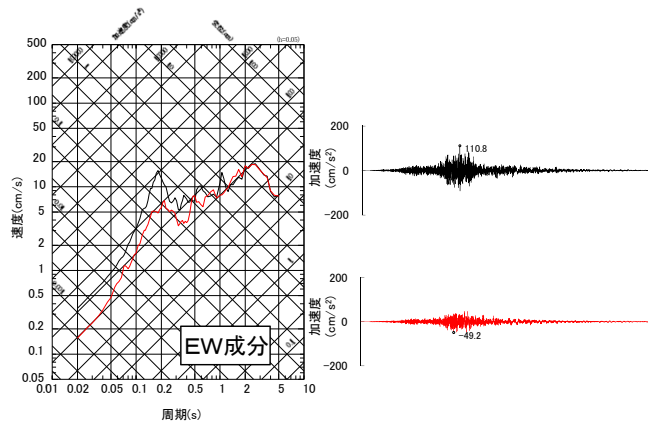
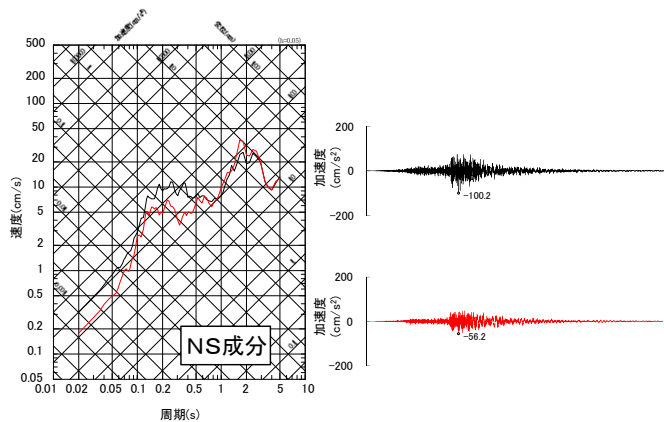
T.P.-117.5m※

※ :地震計の位置については, 本編資料P.5-12を参照。

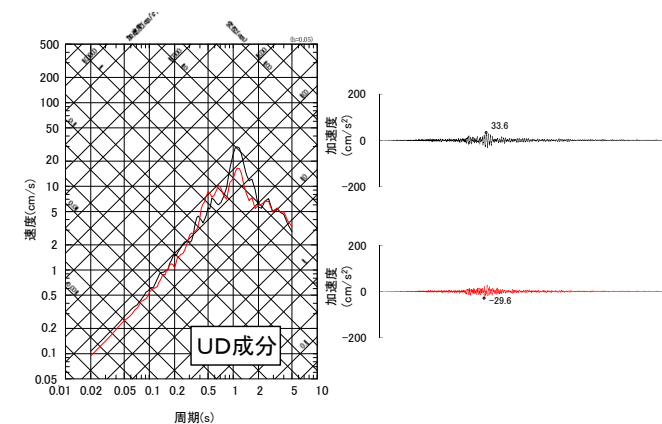
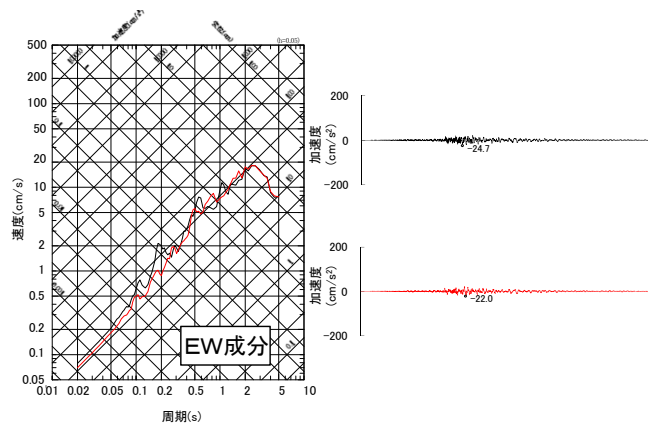
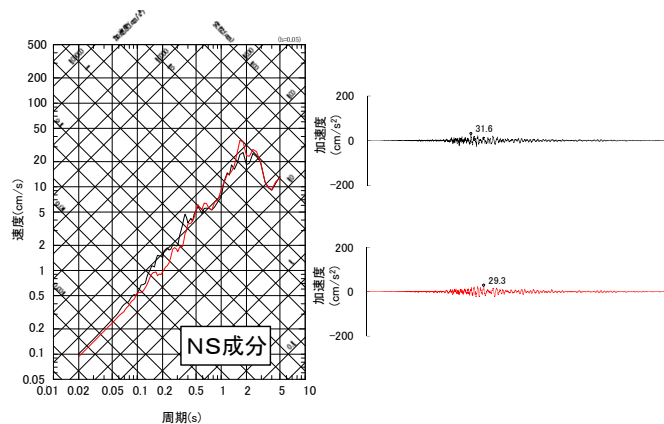


②平成15年(2003年)十勝沖地震 (1/3)

— 観測記録
— シミュレーション



T.P.+32.5m※



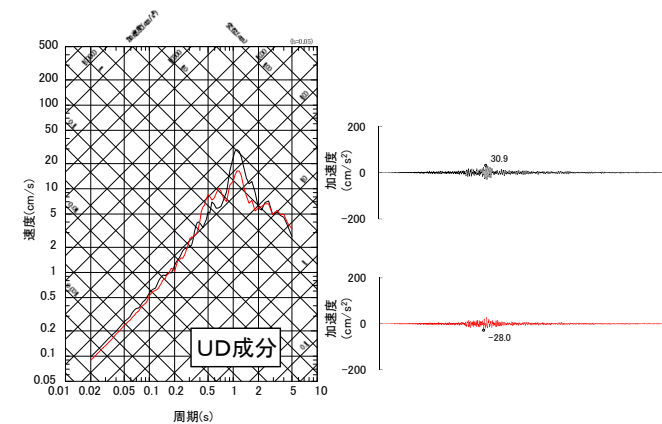
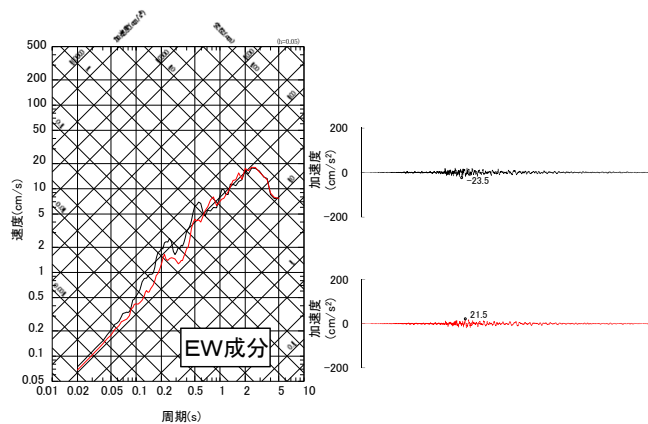
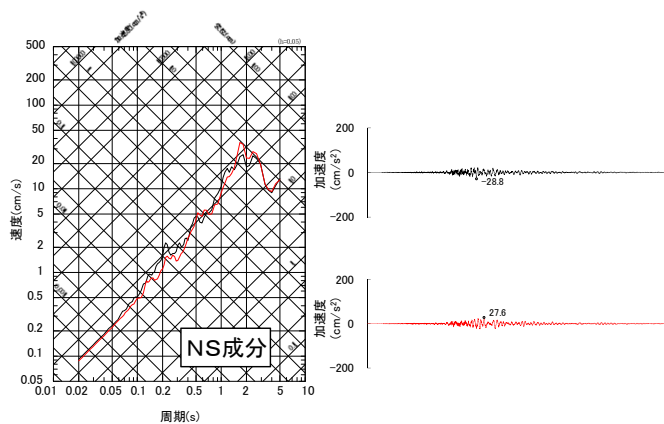
T.P.-7.5m※

※ : 地震計の位置については、本編資料P.5-12を参照。

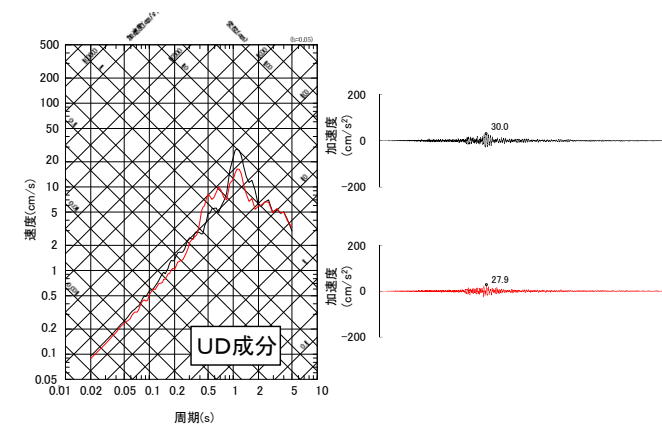
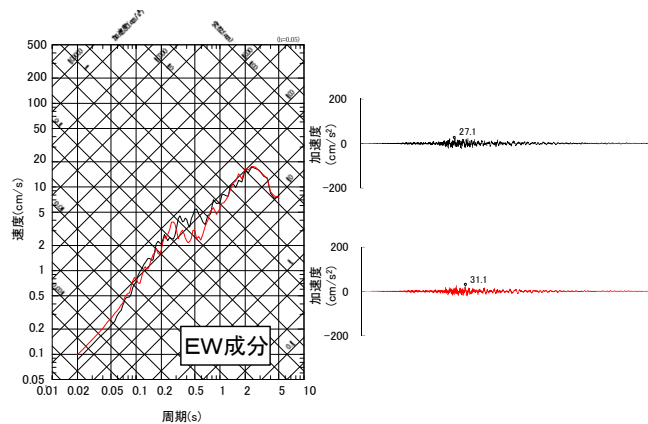
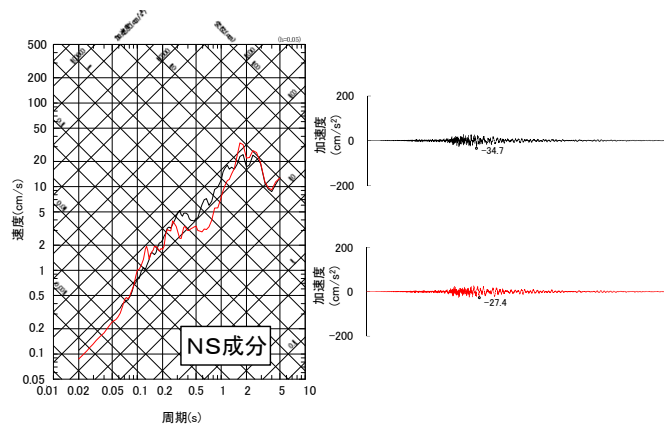


②平成15年(2003年)十勝沖地震 (2/3)

— 観測記録
— シミュレーション



T.P.-47.5m※



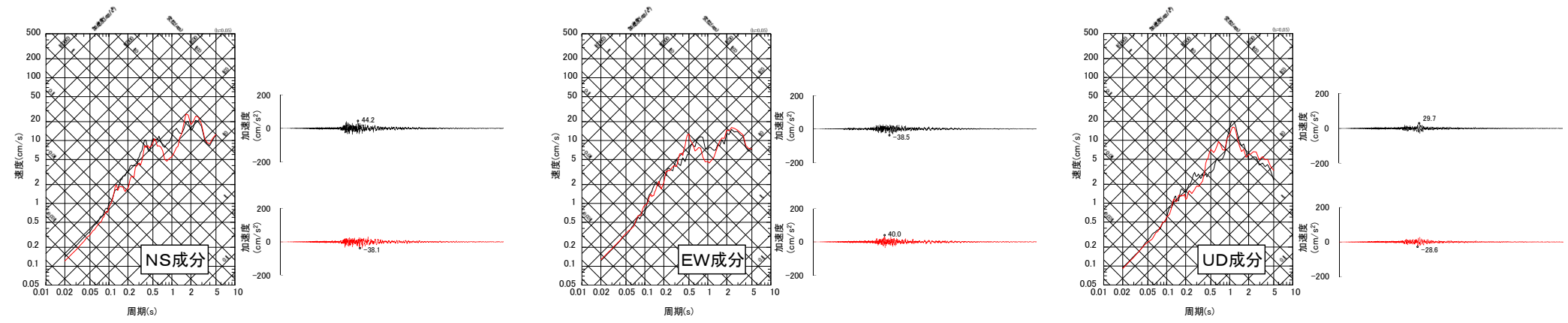
T.P.-77.5m※

※ :地震計の位置については、本編資料P.5-12を参照。



②平成15年(2003年)十勝沖地震 (3/3)

— 観測記録
— シミュレーション

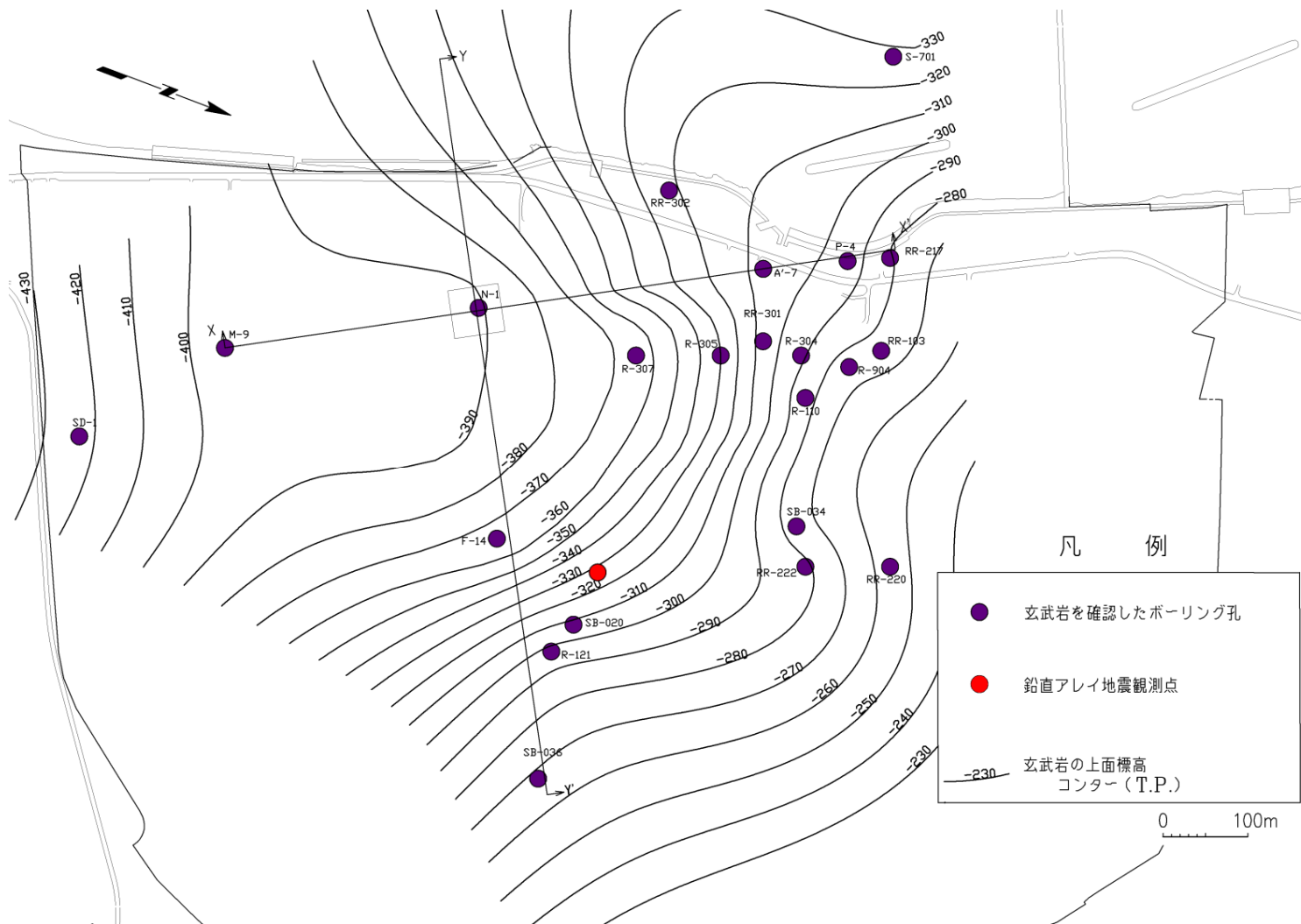


T.P.-117.5m※

※ :地震計の位置については, 本編資料P.5-12を参照。



鉛直アレイ地震観測地点における玄武岩の上面標高



• ボーリング調査結果に基づく玄武岩の上面標高コンターにより、鉛直アレイ地震観測地点における最適化地盤モデル(深部)の第2層(玄武岩)の上面標高をT.P.-330mと推定した。


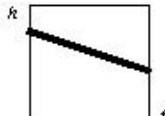
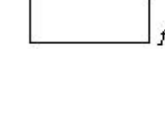

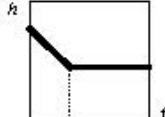
注)本節は、本編資料5.3.2項に関する補足説明資料。

5-7 頭打ちQ値モデルについて (1/3)

減衰定数の関数モデルについて

- 地盤の減衰定数については、内部減衰(材料減衰, 粘性減衰等を含む)のほか、地盤の不均質や不連続に伴う散乱減衰の影響を受けることが、各種文献にて述べられている。
- 佐藤ほか(2006)¹⁾では、下表のとおり、既往の減衰定数の関数モデルについて、比較を行っている。
- 佐藤ほか(2006)によると、No.④のモデルは、高振動数側において減衰定数の傾きが穏やかになり、振動数依存性を示さない材料減衰の値に近づいていく特徴をもち、物理的にも明快であるため、減衰特性の解釈に有効であると考えられている。
- 佐藤ほか(2006)では、既往の減衰定数が高振動数側で一定となる経験式との対応が容易な、減衰定数の下限値を考慮したNo.⑤のモデルを提案している。

佐藤ほか(2006)に基づく減衰定数の関数モデルの比較

No.	減衰定数の関数モデル	関数モデルの形状	文献	解説
①	$h = h_0$		太田(1975) ²⁾ 等	<ul style="list-style-type: none"> • 振動数に依存しないモデル。 • 減衰定数として材料減衰のみを仮定しており、高振動数での観測スペクトル比との適合に限界がある。
②	$h(f) = h_0 \cdot f^{-\alpha}$		武村ほか(1993) ³⁾ 等	<ul style="list-style-type: none"> • 減衰定数が振動数の負のべき乗に比例するモデル。 • 観測スペクトル比に対する理論伝達関数の説明性が、特に高振動数側で大きく向上するが、振動数に依存しない材料減衰の特性を考慮できないという課題がある。
③	$h(f) = (n/V_S) \cdot f^{-\alpha}$		Kobayashi et al.(1992) ⁴⁾ 等	<ul style="list-style-type: none"> • S波速度依存性を仮定したモデル。
④	$h(f) = h_0 \cdot f^{-\alpha} + h_i$ or $h(f) = 1/V_S \cdot (a \cdot f^{-\alpha} + b)$		小林ほか(1999) ⁵⁾ 梅田ほか(2014) ⁶⁾ 等 (小林ほか(1999)では $\alpha=1$ としている)	<ul style="list-style-type: none"> • 減衰定数が、材料減衰と散乱減衰の和で表すことができるという観点によりモデル化された多項式のモデル。 • S波速度依存性を仮定したモデルも提案されている。
⑤	$h(f) = h_0 f^{-\alpha} \quad (f \leq f_0)$ $h(f) = h_0 f_0^{-\alpha} \quad (f > f_0)$		佐藤ほか(2006)	<ul style="list-style-type: none"> • 減衰定数がある振動数を境に、低振動数側では振動数に依存し、高振動数側では一定となることを表現したモデル。

注)本節は、本編資料5.3.2項に関する補足説明資料。



佐藤ほか(2006)の概要

- 佐藤ほか(2006)では、減衰定数の下限値を考慮した以下の減衰定数モデル(P.5-21 No.⑤と同じ)を仮定し、国内の2観測点(OBS-A, OBS-B)において得られた地震観測記録を用いて、それぞれの地点の地盤構造及び減衰特性の同定を行っている。

$$h(f) = h_0 f^{-n} \quad (f \leq f_0), \quad h(f) = h_0 f_0^{-n} \quad (f > f_0)$$

- 上記モデルは、減衰定数が高振動数側で一定となるモデル、すなわち特定の振動数(f_0)以上で減衰定数の振動数依存性が無くなるようなモデルとなっている。
- 同定対象としている2地点の地盤は、それぞれ $V_s=200\text{m/s} \sim 2,400\text{m/s}$ 程度及び $V_s=990\text{m/s} \sim 2,610\text{m/s}$ 程度の地盤であり、敷地の地下構造を構成する V_s とおおむね適合した地盤における評価となっている。
- 結果的に、上記モデルを用いて同定されたQ値による伝達関数の計算値は、地震観測記録による伝達関数とよく対応していることが確認された。
- 以上より、佐藤ほか(2006)によれば、減衰定数の関数モデルとしては、減衰定数の下限値を考慮したモデルの方が従来の振動数に依存したモデルよりも適しているとされている。これは、小林ほか(1999)や梅田ほか(2014)のモデルと、考え方は同じものである。

OBS-Aにおける地盤構造と同定結果

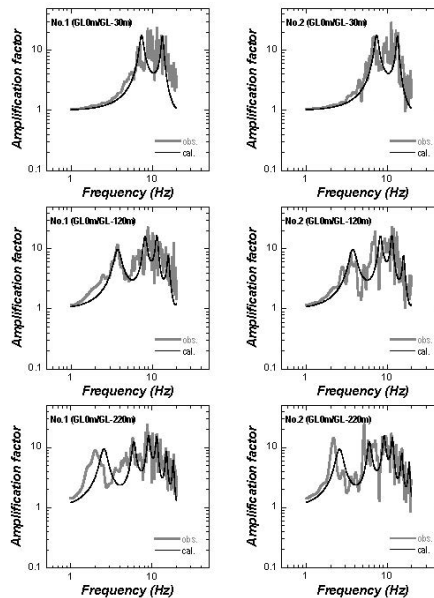
Layer	Thickness (m)	Density (g/cm ³)	Vs (m/s)	Damping			Incident angle (deg.)		
				h ₀	α	f ₀ (Hz)	A-1	A-2	
PS-log. identified									
1	5	2.20	250 (100-400)	205	0.33	0.94	13.4	0.2	15.1
2	20	2.00	600 (400-1200)	935					
3	35	2.37	1430 (1000-1800)	1280	0.29	0.97	12.5		
4	68	2.37	1750 (1600-2000)	2000					
5	92	2.38	1960 (1800-2400)	2397	0.15	1.39	9.1		
6	-		-	-	-	-	-		

() : search limits for SA inversion

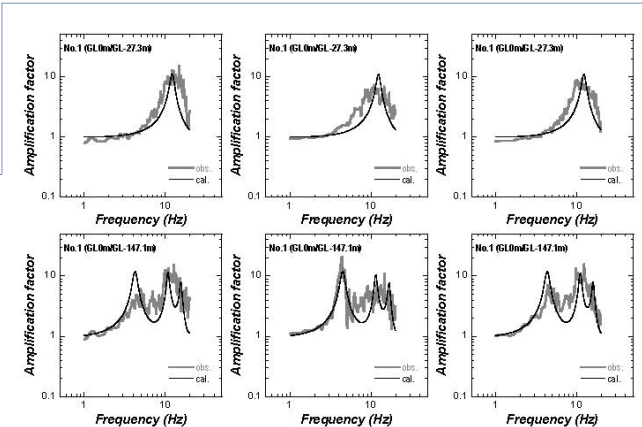
OBS-Bにおける地盤構造と同定結果

Layer	Thickness (m)	Density (g/cm ³)	Vs (m/s)	Damping			Incident angle (deg.)			
				h ₀	α	f ₀ (Hz)	B-1	B-2	B-3	
PS-log. identified										
1	1.7	2.1	990 (792-1188)	1016	0.68	1.25	7.0	12.8	28.8	19.3
2	17	2.1	1510 (1208-1812)	1812						
3	8.6	2.55	2010 (1608-2412)	2358	0.45	1.50	13.3	-	-	-
4	9.6	2.55	2210 (1768-2652)	1811						
5	18	2.66	2610	2610	-	-	-	-	-	-
6	25	2.7	2610	2610	-	-	-	-	-	-
7	27	2.68	2610	2610	-	-	-	-	-	-
8	40.2	2.68	2610	2610	-	-	-	-	-	-
9	-	2.68	2610	2610	-	-	-	-	-	-

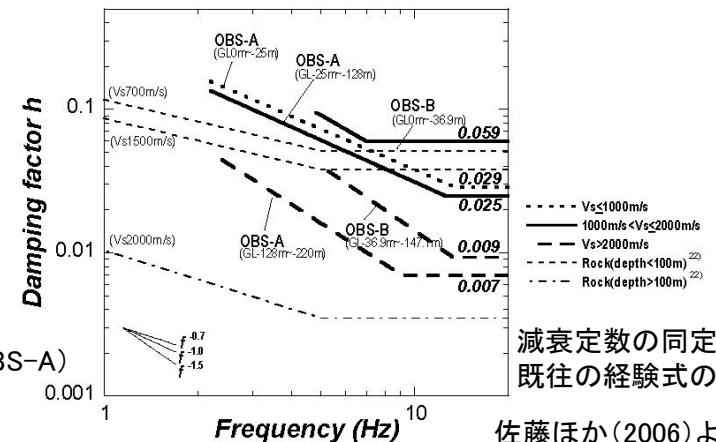
() : search limits for SA inversion



観測スペクトル比と同定結果による伝達関数の比較(OBS-A)



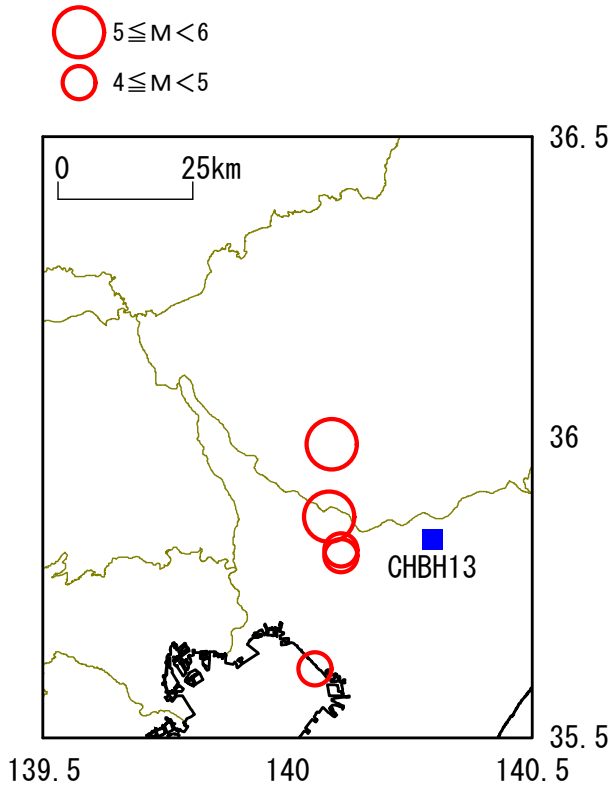
観測スペクトル比と同定結果による伝達関数の比較(OBS-B)



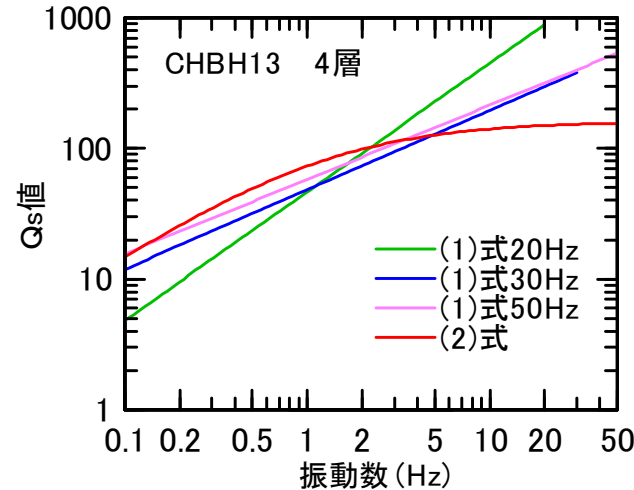
減衰定数の同定結果と既往の経験式の比較

佐藤ほか(2006)より抜粋

梅田ほか(2014)の概要



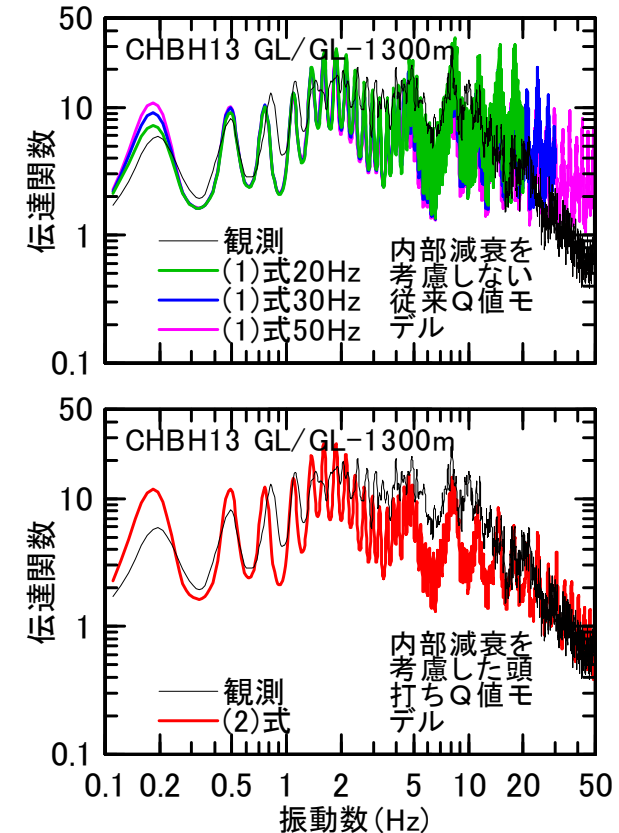
検討に用いた震央分布(CHBH13)



$$Q(f) = Q_0 \cdot f^n \quad (1)$$

$$1/Q(f) = 1/(Q_0 \cdot f^n) + 1/Q_i \quad (2)$$

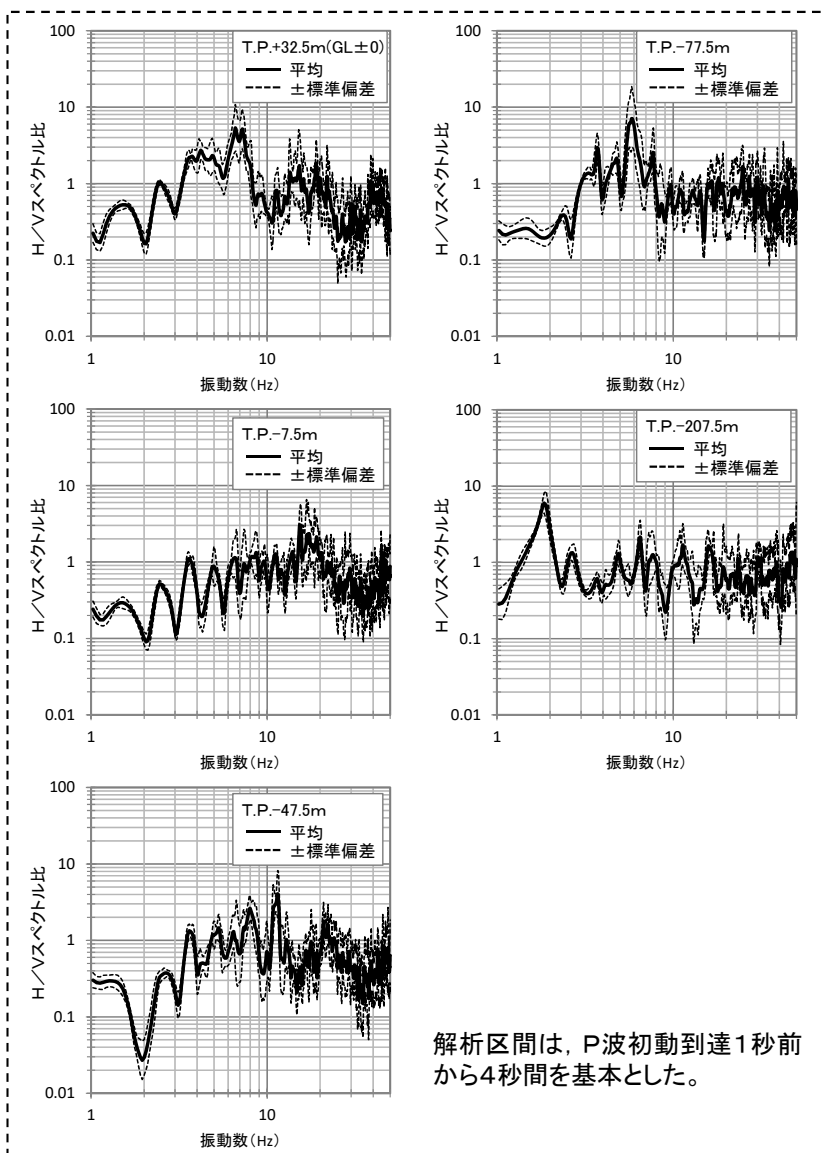
逆解析Q値の一例(CHBH13)
[(1)式は内部減衰を考慮しない従来Q値モデル, (2)式は考慮した頭打ちQ値モデルであり, (1)式の数値は解析振動数の上限を表す]



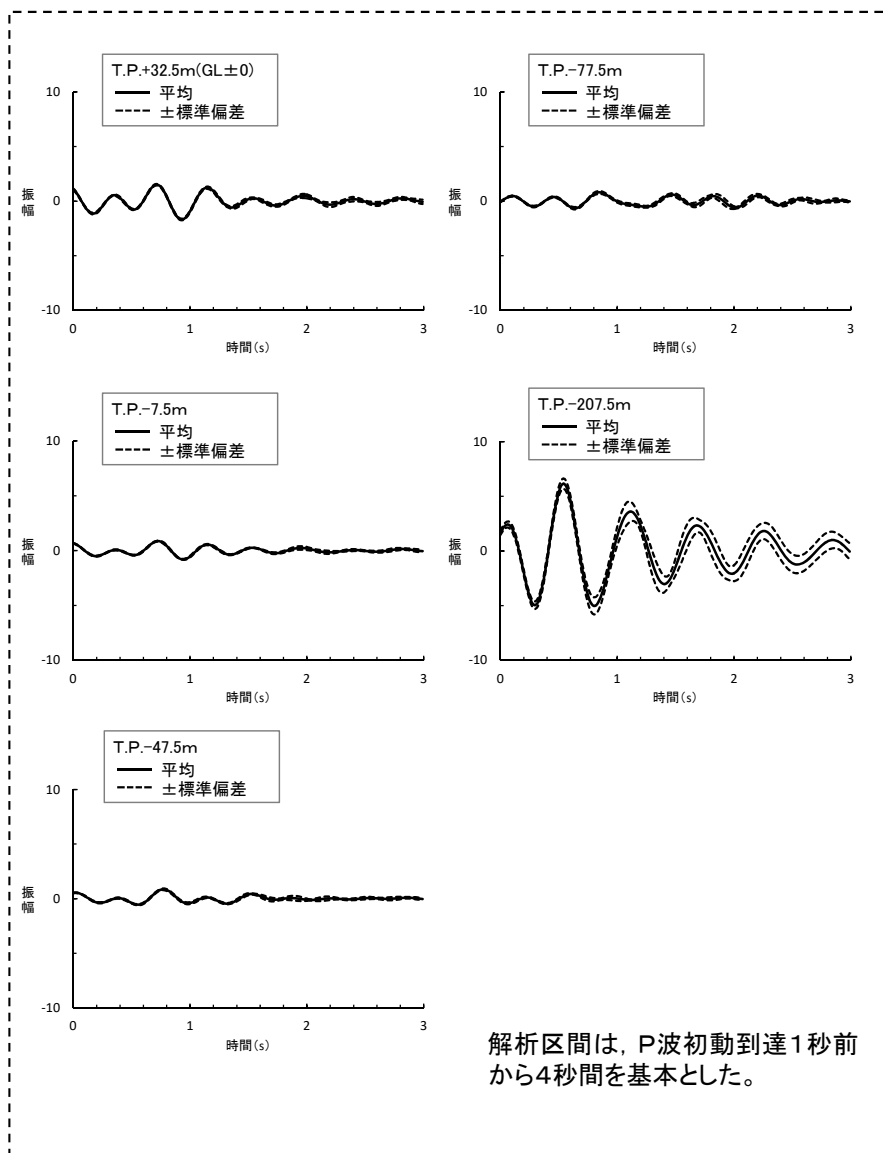
伝達関数の観測値と理論値の比較(CHBH13)

梅田ほか(2014)に一部加筆・修正

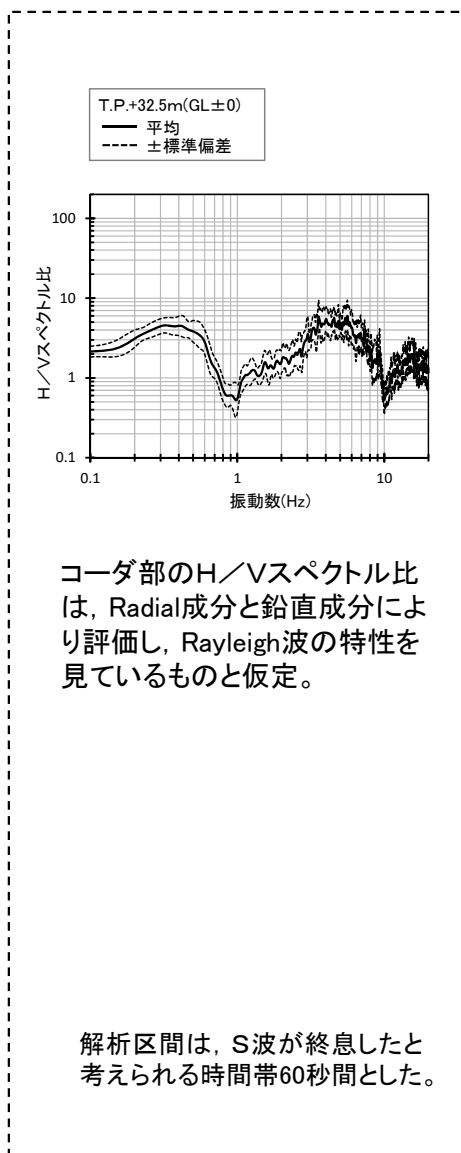
- 梅田ほか(2014)では, 内部減衰と散乱減衰を考慮した頭打ちQ値モデルと, 振動数のべき乗に比例する従来Q値モデルを用いて, 遺伝的アルゴリズム(GA)に基づいた探索法で, KiK-netのCHBH13(成田)とGIFH09(羽島)のQ値構造の逆解析を実施している。
- 頭打ちQ値モデルは従来Q値モデルと比較して, より高振動数まで観測伝達関数を説明できることが確かめられている。



解析区間は、P波初動到達1秒前から4秒間を基本とした。



解析区間は、P波初動到達1秒前から4秒間を基本とした。



コーダ部のH/Vスペクトル比は、Radial成分と鉛直成分により評価し、Rayleigh波の特性を見ているものと仮定。

解析区間は、S波が終息したと考えられる時間帯60秒間とした。

P波部H/Vスペクトル比*

P波部レシーバ関数*

コーダ部H/Vスペクトル比

• P波部H/Vスペクトル比, P波部レシーバ関数及びコーダ部H/Vスペクトル比とも、標準偏差は小さい。

※ : T.P.-117.5mの観測記録は、感度劣化が見られる期間があることから使用していない。
注)本節は、本編資料5.3.2項に関する補足説明資料。

検証方法

①解析手法

- 岩田・入倉(1986)⁷⁾の方法によるスペクトルインバージョン解析を行い、下式で表されるS波の振幅スペクトルを震源特性・伝播経路特性・地盤特性に分離した。

$$O_{ij}(f) = R_{ij}^{-1} \cdot S_i(f) \cdot G_j(f) \cdot \exp\left(-\frac{\pi f R_{ij}}{Q_s(f) V_s}\right)$$

$O_{ij}(f)$: 地震 i による観測点 j におけるS波の振幅スペクトル

$S_i(f)$: 震源スペクトル, $Q_s(f)$: 伝播経路のQ値, $G_j(f)$: 観測点 j における地盤増幅特性,

R_{ij} : 地震 i から観測点 j までの震源距離, V_s : 伝播経路のS波速度

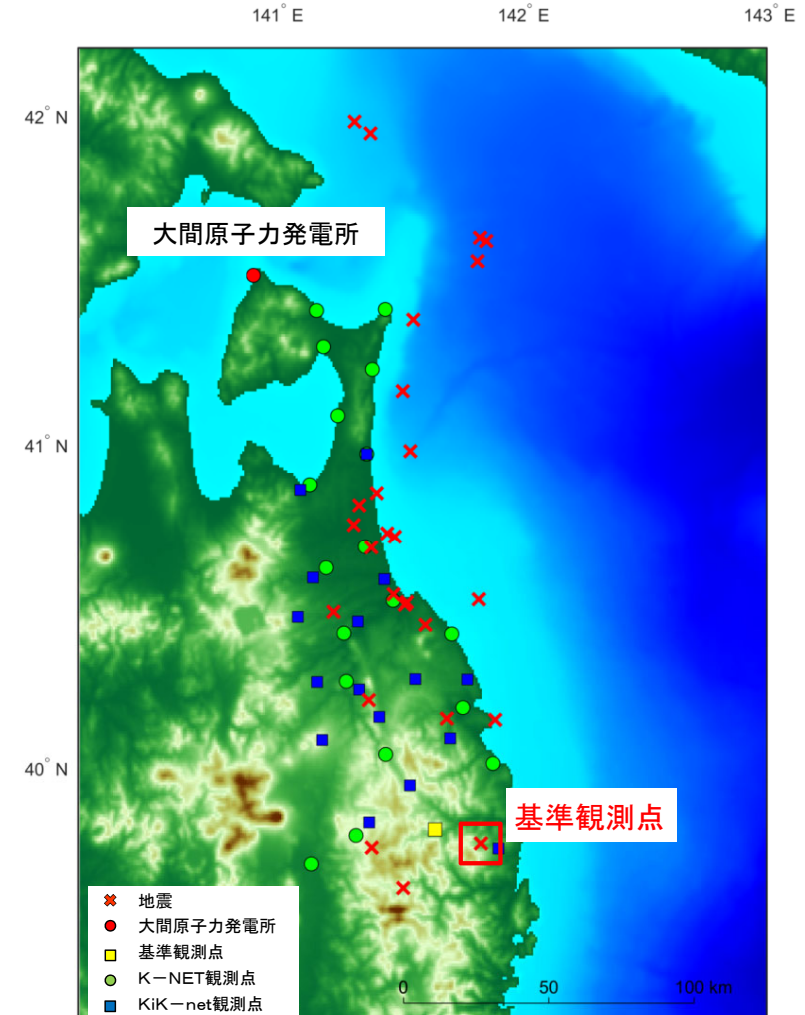
- スペクトルインバージョン解析で必要となる拘束条件は、基準観測点の増幅特性とした。

②解析対象とした観測点と地震

- 観測点は、火山フロントを境とした減衰構造の変化を極力避けるため、火山フロントより東側の観測点を選定した。
- 解析対象地震は、観測点付近の26地震を選定した。
(震源深さ50km以深, M3.5~M5.5, 観測期間2001年7月~2012年4月)

③基準観測点

- 地中の地震計が地震基盤と同等の岩盤 ($V_s=2,800\text{m/s}$) に設置されている, IWTH03岩泉観測点とした。
- IWTH03岩泉観測点 (GL±0m/GL-100m) の観測記録の逆解析により、最適化地盤モデルを設定し、地震基盤における基盤波を推定した。



スペクトルインバージョン解析に使用した観測点と震源の分布

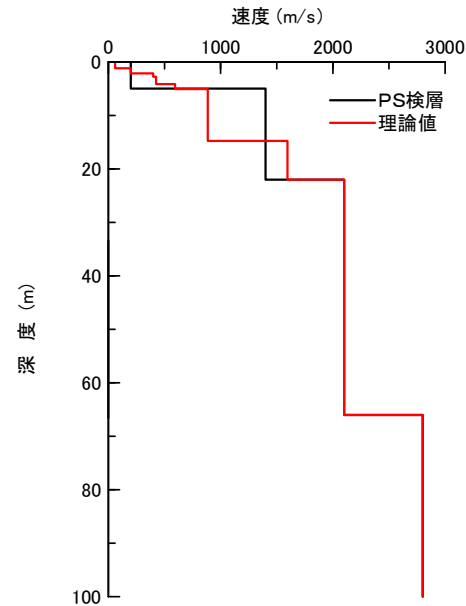


基準観測点の最適化地盤モデル

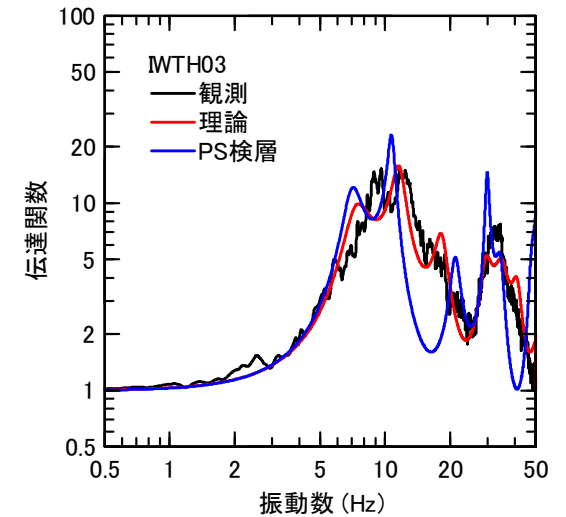
IWTH03の最適化地盤モデル

層No.	深度 (m)	層厚 (m)	Vs (m/s)	ρ (t/m ³)	Qs		
					Qo	n	Qi
	0						
1	-1.1	1.1	59	1.56	5.36	0.561	10.7
2	-2.1	1.0	200	1.70	18.4	0.752	125
3	-2.8	0.7	400	1.82	13.9	0.662	281
4	-4.1	1.3	420	1.84	8.22	0.730	63.9
5	-5.0	0.9	600	1.92	14.6	0.858	141
6	-14.7	9.7	880	2.03	31.1	0.793	155
7	-22.0	7.3	1600	2.25	21.4	0.866	133
8	-66.0	44	2100	2.37	1.07	0.535	208
9	-100.0	34	2800	2.52	27.1	0.767	13.9
10	∞						

$$1/Q_s(f) = 1/(Q_o \cdot f^n) + 1/Q_i$$



PS検層結果との比較



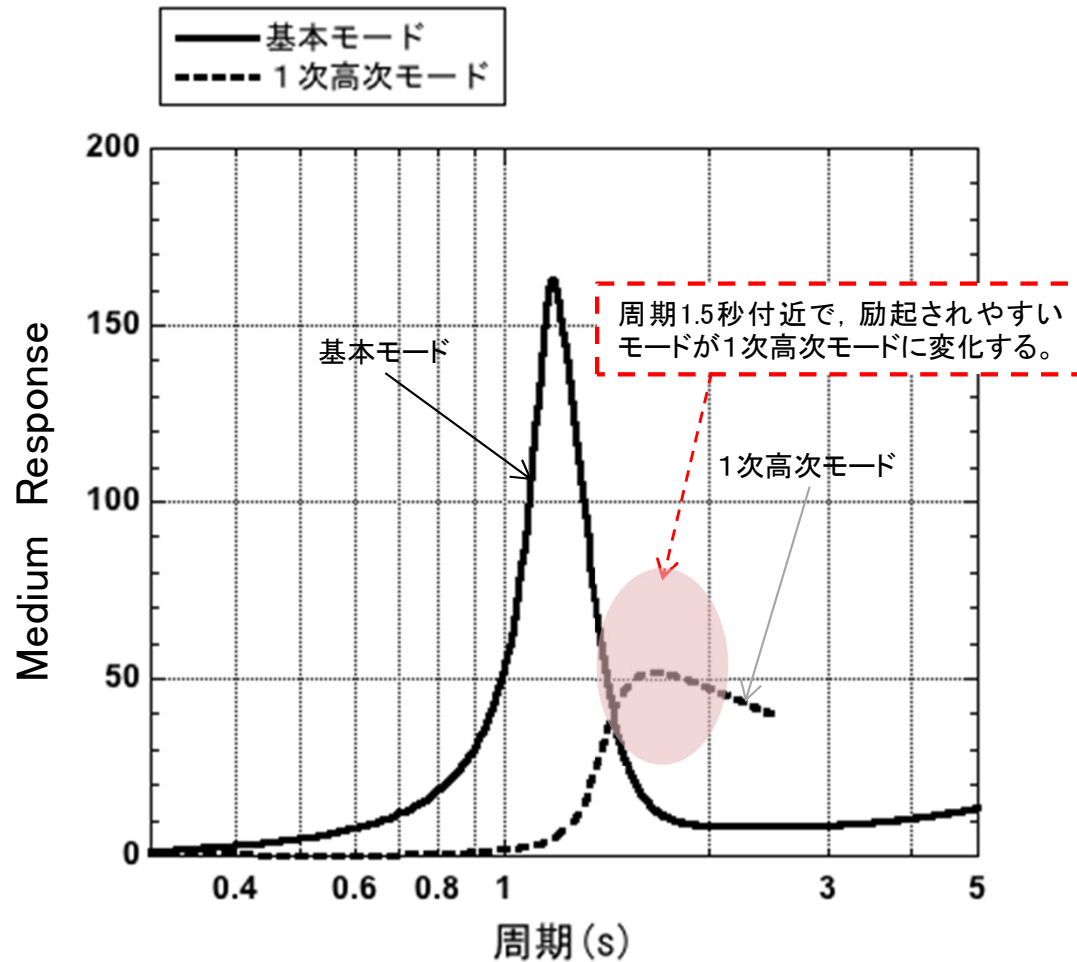
逆解析結果と観測記録の
伝達関数の比較

最適化地盤モデルの作成

- 基準観測点の最適化地盤モデルは、地表 (GL±0m) 及び地中 (GL-100m) の観測記録の伝達関数 (フーリエ振幅スペクトル比) を用いた逆解析により作成した。
- 逆解析には遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。
- 作成した最適化地盤モデルの理論伝達関数は、観測記録の伝達関数とよく整合している。

5-10 微動アレイ観測における1次高次モードの詳細について

第822回審査会合
資料2-2 P.5-26 再掲



最適化地盤モデルの理論的なRayleigh波の
Medium Response (励起特性)

Medium Responseについて

- Medium Responseは、地下構造モデルに固有の量であり、表面波のMedium Responseは、地表加振に対する表面波の応答を表す。
- Medium Responseは、各モードごと・振動数ごとに決まる相対的な表面波振幅の一種と考えられるため、Medium Responseの大きなモードの波は、他のモードの波よりも振幅が卓越することが予想される。

- Medium Responseの1次高次モードが卓越する地下構造モデルは、その卓越する周期帯域では1次高次モードの位相速度も卓越するものと考えられることができる。
- Rayleigh波のMedium Responseによると、最適化地盤モデルは、周期約1.5秒から約2秒付近で、1次高次モードが励起されやすい特徴を有している。



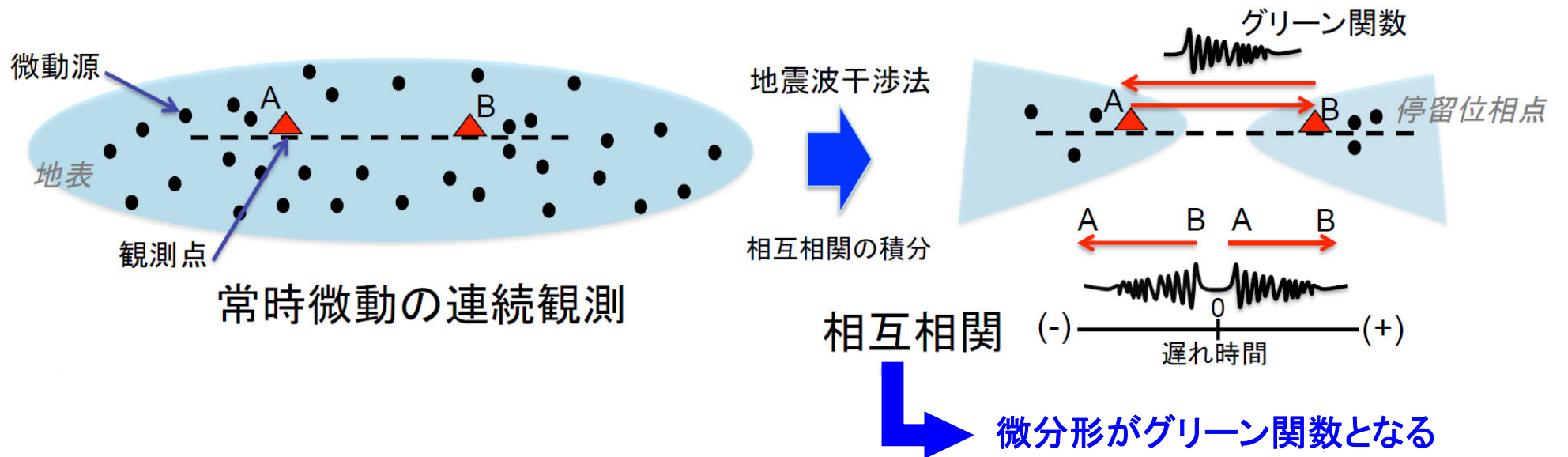
地震波干渉法の原理

地表の2点間で観測された波動場の相互相関によって、一方の観測点にインパルス信号を与え、もう一方の観測点で観測した際の記録(グリーン関数)を合成できる。
(Wapenaar(2004)⁸⁾)



常時微動への適用
Shapiro and Campillo(2004)⁹⁾

無数の振源で囲まれた領域中の2点間で微動を計測し、各振源による相互相関をすべて積分すると、停留位相点と呼ばれる領域以外の成分は打ち消し合い、2点間のグリーン関数のみが残る。

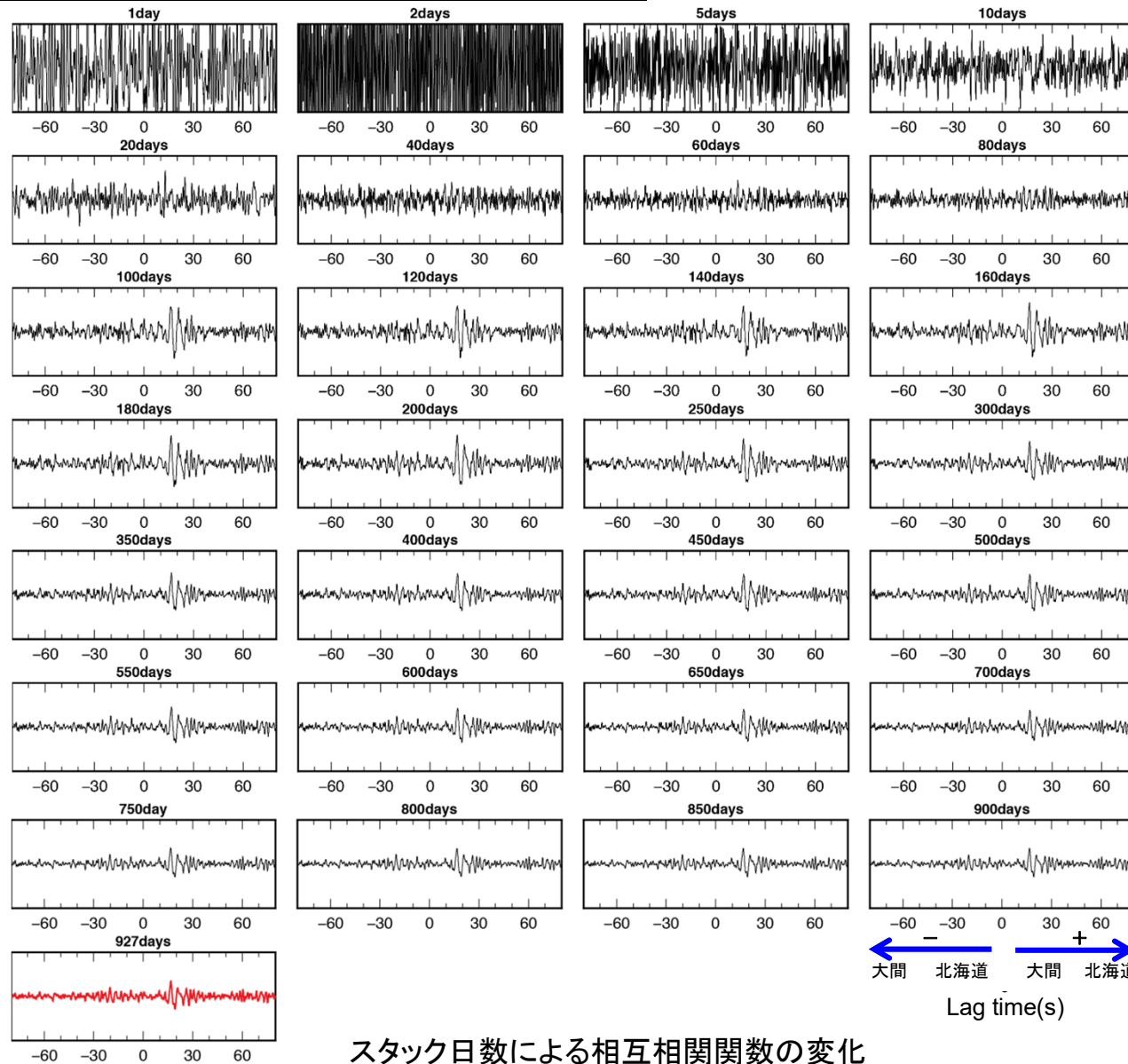


注)本節は、本編資料5.3.3項に関する補足説明資料。



スタック日数による相互相関関数の変化

(ZZ)

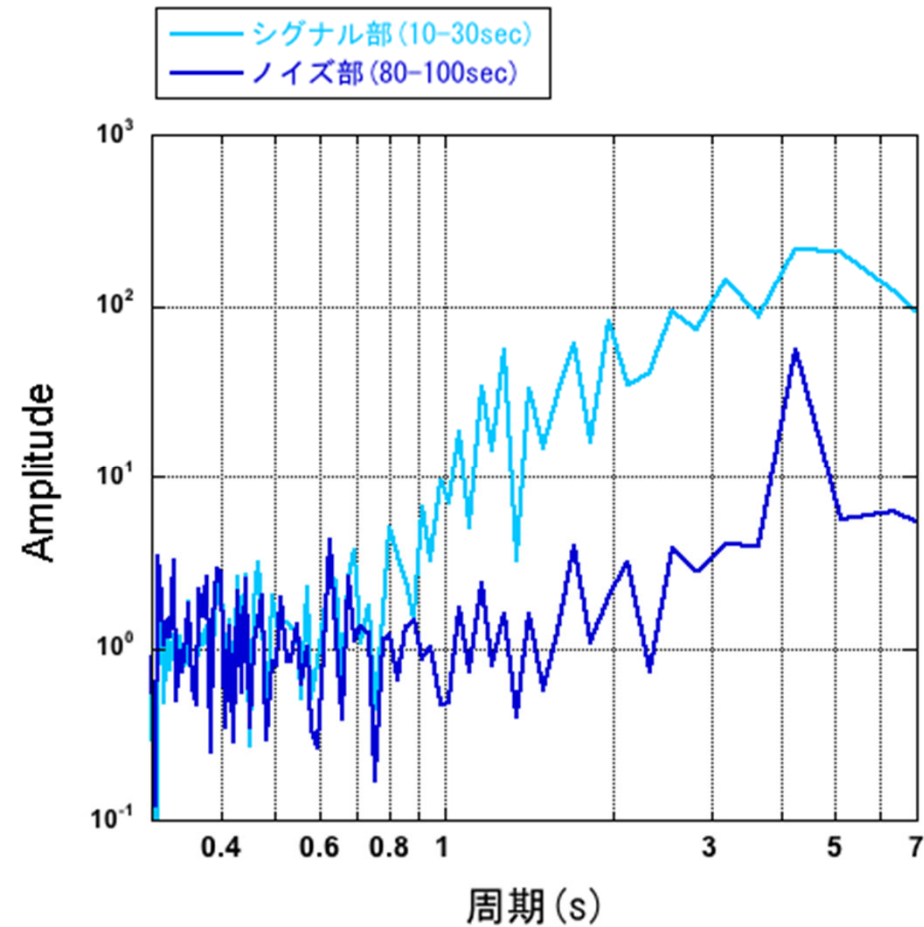
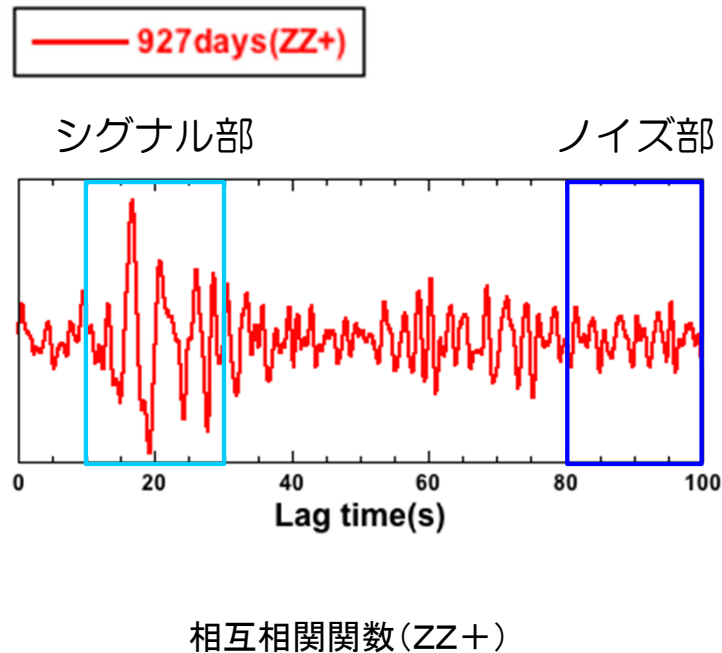


スタック日数による相互相関関数の変化

- UD成分の正側(ZZ+)の相互相関関数において、スタック日数100日目以降、シグナルと思われるものが見え始め、解析には927日分のデータを用いた。



シグナルの検出



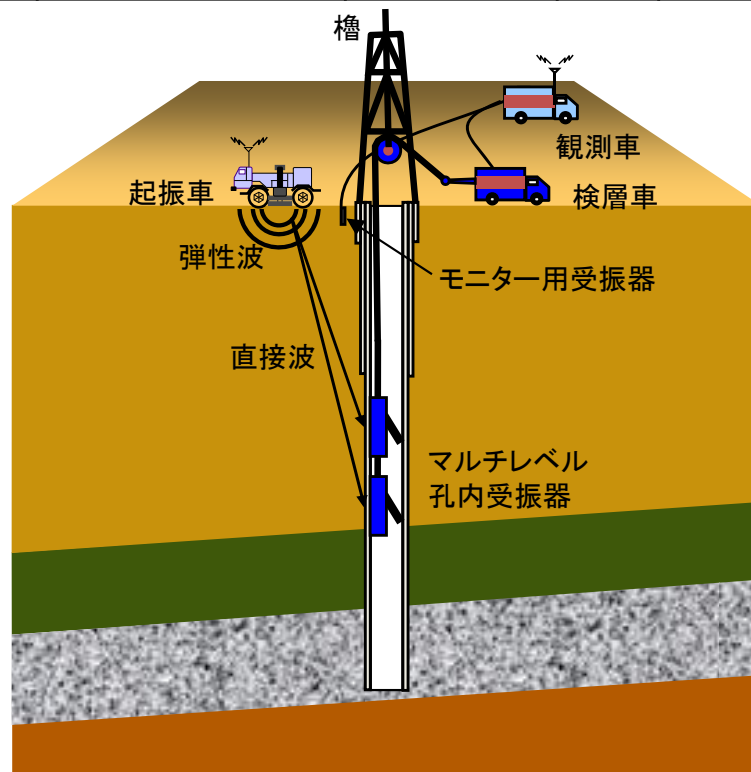
シグナル部とノイズ部のフーリエ振幅スペクトルの比較

- UD成分の正側(ZZ+)の相互相関関数について、シグナル部とノイズ部のフーリエ振幅スペクトルを比較すると、シグナル部の周期約0.8秒以上の成分で違いが見られ、ノイズ部よりもおおむね大きくなっていることから、グリーン関数が得られているものと解釈した。

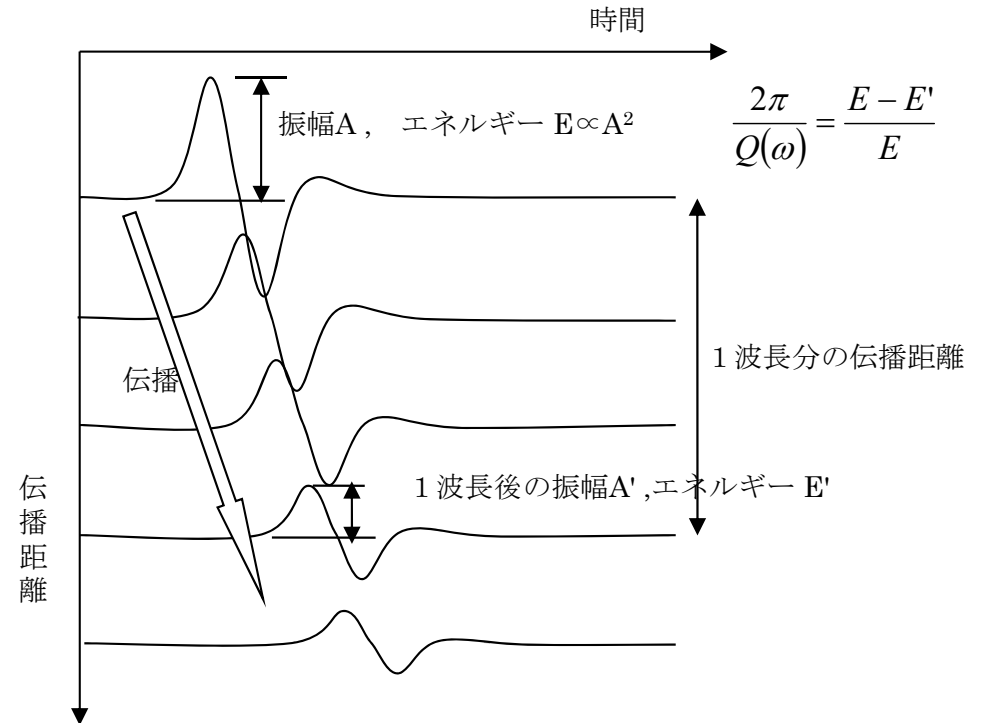
最大振幅法によるQ値の測定方法

PS検層(ダウンホール法)の調査仕様

発振源		孔内受振系		
		測定範囲	間隔	受振器
P波	大型バイブレータ1台	T.P.+10m~	5m	3成分受振器
S波	S波バイブレータ1台	T.P.-2,450m		



PS検層(ダウンホール法)での波動伝播と減衰の概念図



Q値は、蓄えられる最大のエネルギーEと、1波長(1サイクル)で消費されるエネルギーΔE(=E-E')により、

$$\frac{1}{Q(\omega)} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad \text{で定義される。}$$

- 深部ボーリングSD-1孔でのPS検層(ダウンホール法)で得られる波形記録による伝播距離と振幅との関係からQ値を算出した。
- 各起振ごとの起振力のばらつきを補正するために、測定孔のそばの地表のモニター用受振器を固定観測点とし、孔内の受振器と同時に記録を取得した。

5-12 最大振幅法によるQ値の測定について(2/2)

最大振幅法によるQ値の測定結果

最大振幅法によるQ値(S波)

標高 T.P.(m)	層No.※	卓越振動数 (Hz)	Q値 (Q _s)	減衰定数 h(%)
4 ~ -424	1	30	29	1.72
-429 ~ -824	2	30	29	1.72
-829 ~ -2,454	3~5	30	109	0.46

最大振幅法によるQ値(P波)

標高 T.P.(m)	層No.※	卓越振動数 (Hz)	Q値 (Q _p)	減衰定数 h(%)
4 ~ -424	1	30	59	0.85
-429 ~ -824	2	30	9	5.56
-829 ~ -2,454	3~5	30	74	0.68

※ : 層No.は、本編資料P.5-31に示す最適化地盤モデル(深部)の層No.に対応する。

- 深部ボーリングSD-1孔での最大振幅法によるQ値の測定結果を上表に示す。
- 最適化地盤モデル(深部)の各層に対しQ値を求めた。

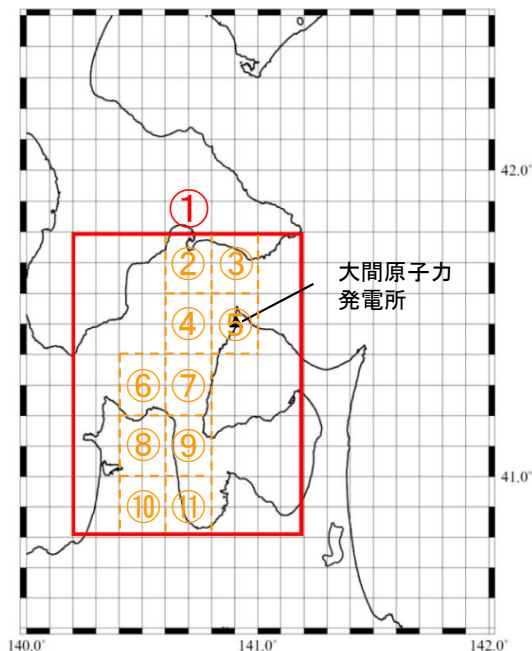
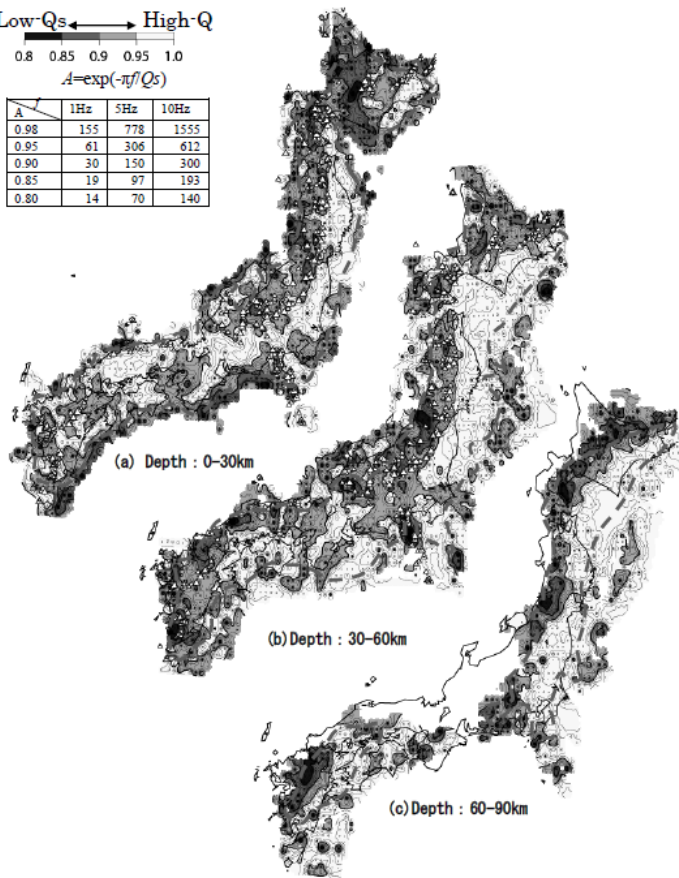


三次元Q値に基づく敷地周辺のQ値との比較

Low-Qs ← High-Q

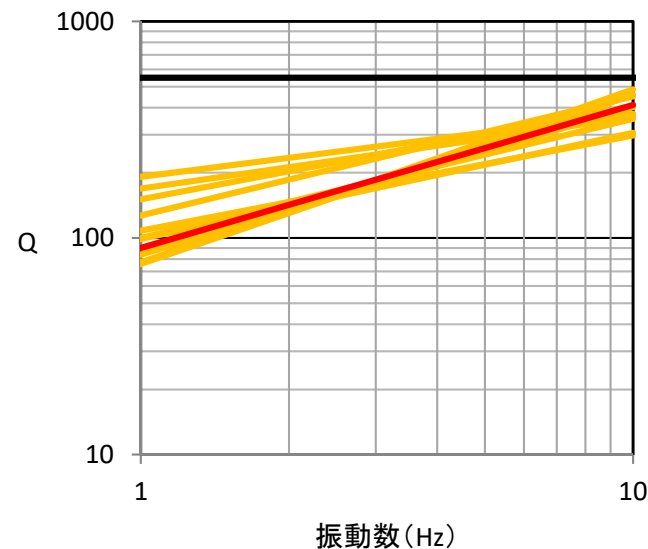
$A = \exp(-\pi f / Q_s)$

A	1Hz	5Hz	10Hz
0.98	155	778	1555
0.95	61	306	612
0.90	30	150	300
0.85	19	97	193
0.80	14	70	140



平均Q値の評価範囲

— 深部地下構造モデルの地震基盤以深のQ値
 — 中村・植竹(2012)に基づく平均Q値(領域①)
 — 中村・植竹(2012)に基づく平均Q値(領域②~⑪)



中村・植竹(2012)に基づく平均Q値及び
深部地下構造モデルにおける設定値との比較

Fig.4. Comparison of the attenuation structure in the different depths at 10 Hz. The gray dashed curve denote are well recreated the checkerboard resolution test patterns. The large and small triangles are denote the active volcanoes (Japan Meteorological Agency,2005) and the Quaternary volcanoes (Committee for Catalog of Quaternary

中村・植竹(2012)による地殻・上部マントルのQ構造 (10Hz)

- 中村・植竹(2012)¹⁰⁾において、トモグラフィ手法を用いて、地殻・上部マントルのQ値が評価されている。
- 中村・植竹(2012)によるQ構造に基づく敷地付近の平均Q値に対して、深部地下構造モデルの地震基盤以深のQ値の方が大きく、地震動評価上保守的な設定となっていることを確認した。

注)本節は、本編資料5.3.4項に関する補足説明資料。

5-14 地盤モデルの解放基盤表面以浅の有無の影響について (1/4)

吉田ほか(2005)の概要

第822回審査会合
資料2-2 P.5-33 再掲

表1 地盤モデル⁵⁾

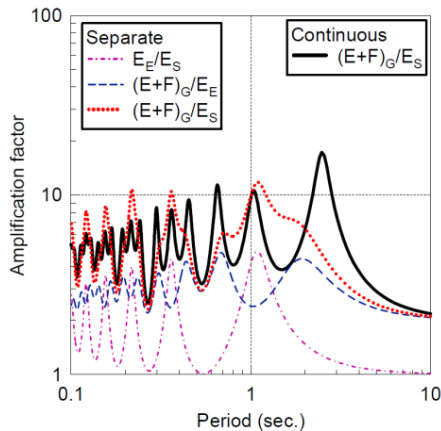
地表	No.	h (m)	V_s (m/s)	ρ (t/m ³)	Q	備考
	1	2.0	107	1.80	14	
	2	4.0	176	1.80	13	
	3	6.5	201	1.90	12	
	4	9.0	193	1.90	12	
	5	15.5	239	1.70	12	
	6	22.0	234	1.70	9	
	7	32.0	248	1.80	7	
	8	40.0	309	1.80	7	
	9	50.0	378	1.80	7	EB2
工学的基盤①	10	180.0	379	1.70	100	
	11	360.0	690	2.00	100	EB1
	12	380.0	1100	2.10	100	
	13		2800	2.50	200	SB

一体モデル 分割モデル

表1 地盤モデル⁵⁾

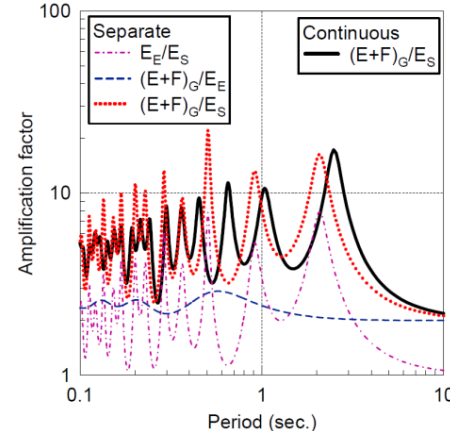
地表	No.	h (m)	V_s (m/s)	ρ (t/m ³)	Q	備考
	1	2.0	107	1.80	14	
	2	4.0	176	1.80	13	
	3	6.5	201	1.90	12	
	4	9.0	193	1.90	12	
	5	15.5	239	1.70	12	
	6	22.0	234	1.70	9	
	7	32.0	248	1.80	7	
工学的基盤②	8	40.0	309	1.80	7	
	9	50.0	378	1.80	7	EB2
	10	180.0	379	1.70	100	
	11	360.0	690	2.00	100	EB1
	12	380.0	1100	2.10	100	
	13		2800	2.50	200	SB

一体モデル 分割モデル



工学的基盤～地表の厚さが、地震基盤～工学的基盤と同程度である場合、地表における地震波のピークが異なる結果となる。

黒実線：地盤を一体として計算した増幅比
赤点線：地盤を分割して計算した増幅比



工学的基盤～地表の厚さが、地震基盤～工学的基盤と比較して十分小さい場合、地表における地震波のピークの変化は小さい結果となる。

黒実線：地盤を一体として計算した増幅比
赤点線：地盤を分割して計算した増幅比

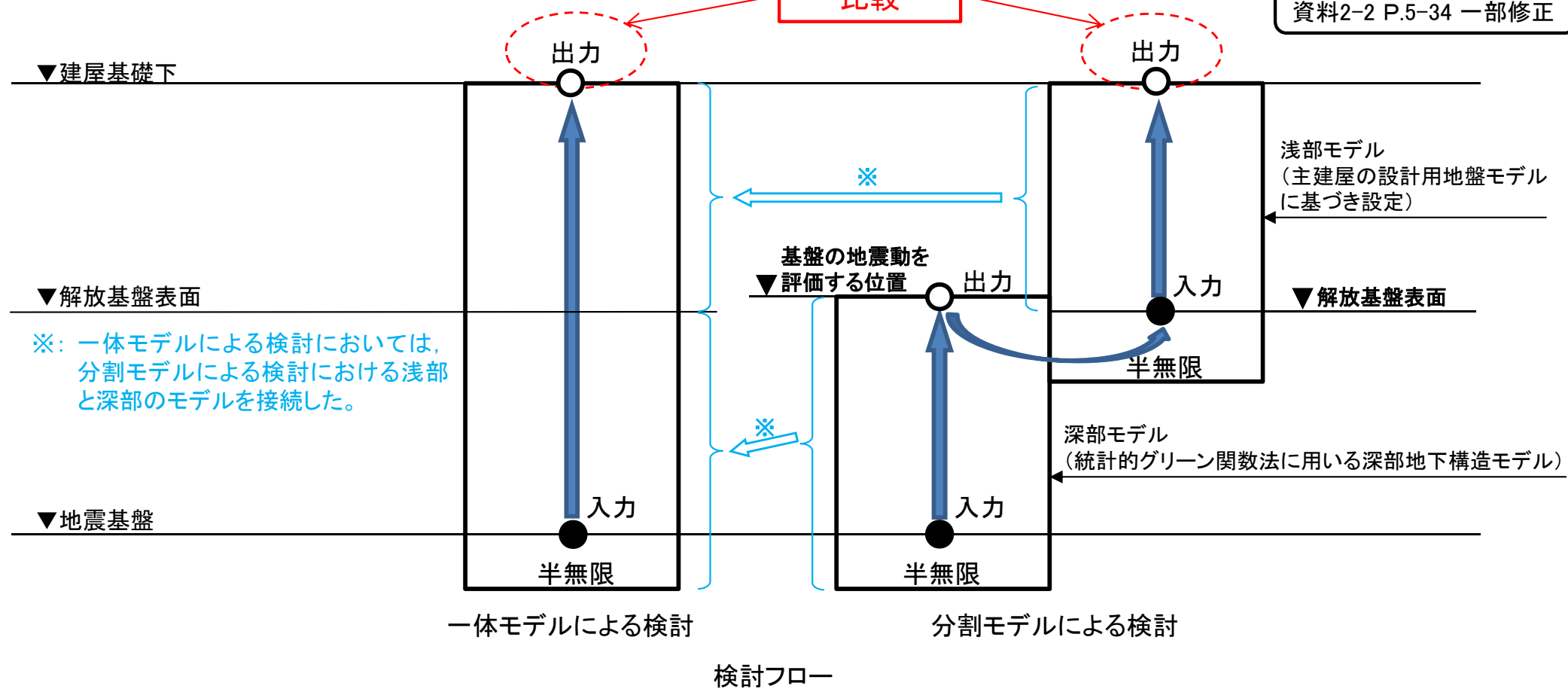
吉田ほか(2005)より抜粋

- 吉田ほか(2005)¹¹⁾は、地震基盤から地表までの地盤を工学的基盤で分離し、別々に解析を行う方法の妥当性について検討した結果として、以下の内容をまとめている。
- 地盤を分離すると、個々の振動特性は全体系の一部とは異なるため、分離したものは全体系と同じにはならない。
- 分離した一方が他方に比べて十分小さい場合、分離した影響は小さくなる。例えば、表層が薄い場合や、地震基盤が浅い場合がこれに当てはまる。

5-14 地盤モデルの解放基盤表面以浅の有無の影響について (2/4)

検討方法

コメントNo.S3-12

第822回審査会合
資料2-2 P.5-34 一部修正

- 原子力発電所の耐震設計では、解放基盤表面において基準地震動を定義した上で、建屋への入力地震動を算定している。
- 吉田ほか(2005)の知見を踏まえ、地震基盤から建屋基礎下位置までを一体とした「一体モデル」と、解放基盤表面で分割した「分割モデル」を作成し、地震基盤で入力した際の建屋基礎下位置での応答を比較した。
- 入力波には、F-14断層による地震の地震動評価結果※を用いた。

5-14 地盤モデルの解放基盤表面以浅の有無の影響について (3/4)

検討に用いる地盤モデル

コメントNo.S3-12

第822回審査会合
資料2-2 P.5-35 一部修正

一体モデル

	標高T.P. (m)	層厚 (m)	ρ ※1 (t/m ³)	Vs (m/s)	Qs
▼建屋基礎下	-13.7	14.0	1.85	820	25
	-27.7	95.8	2.05	1120	25
	-123.5	40.6	1.48	560	25
▼解放基盤表面	-164.1	95.9	1.53	660	25
	-260	100.0	1.6	860	50
	-360	490.0	2.3	1700	80
	-850	950.0	2.5	2200	290
▼地震基盤	-1800	440.0	2.7	2700	290
	-2240	∞	2.7	3200	550

※1 : ρ は、平均密度とする。

※2 : 一体モデルによる検討においては、分割モデルによる検討における浅部と深部のモデルを接続した。

分割モデル

浅部モデル

	標高T.P. (m)	層厚 (m)	ρ ※1 (t/m ³)	Vs (m/s)	Qs
▼建屋基礎下	-13.7	14.0	1.85	820	25
	-27.7	95.8	2.05	1120	25
	-123.5	40.6	1.48	560	25
▼解放基盤表面	-164.1	95.9	1.53	660	25
	-260	∞	1.6	860	50

深部モデル

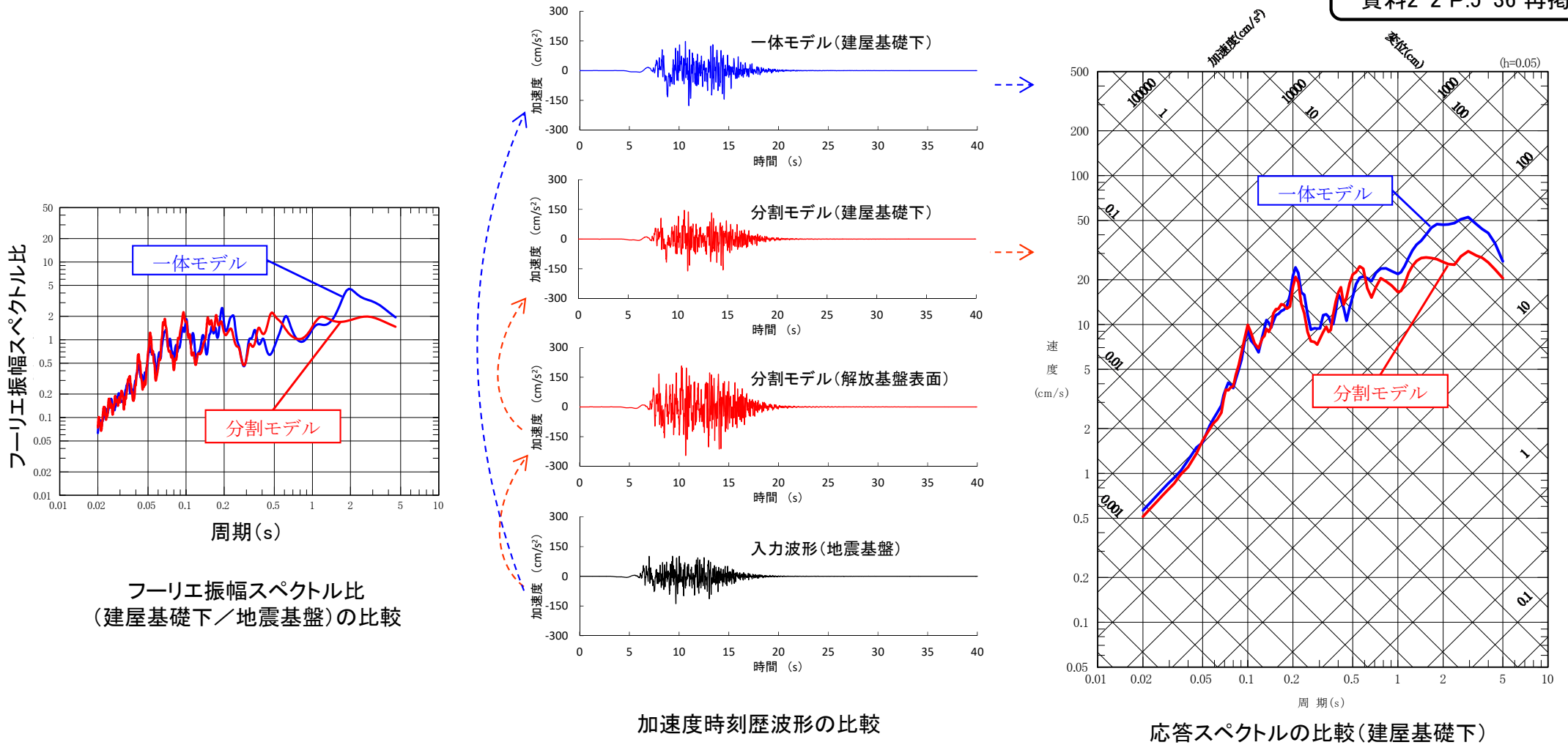
	標高T.P. (m)	層厚 (m)	ρ ※1 (t/m ³)	Vs (m/s)	Qs
基盤の地震動を ▼評価する位置	-230	100.0	1.6	860	50
	-330	490.0	2.3	1700	80
	-820	950.0	2.5	2200	290
▼地震基盤	-1770	440.0	2.7	2700	290
	-2210	∞	2.7	3200	550

- 地震基盤から解放基盤表面までの深部モデルは、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルとした。
- 解放基盤表面から建屋基礎下位置までの浅部モデルは、主建屋の設計用地盤モデルに基づき設定した。

5-14 地盤モデルの解放基盤表面以浅の有無の影響について (4/4)

検討結果

第822回審査会合
資料2-2 P.5-36 再掲



- 一体モデル及び分割モデルについて、地震基盤に地震波を入力した場合の、建屋基礎下における地震動を比較した結果、重要施設の主要周期帯となる短周期域について、フーリエスペクトル比(建屋基礎下/地震基盤)及び建屋基礎下における応答スペクトルの差は小さい。



5-15 平成26年12月変更申請時の地下構造モデル (1/2)

浅部地下構造モデル

平成26年12月変更申請時における
はぎとり解析に用いる浅部地下構造モデル

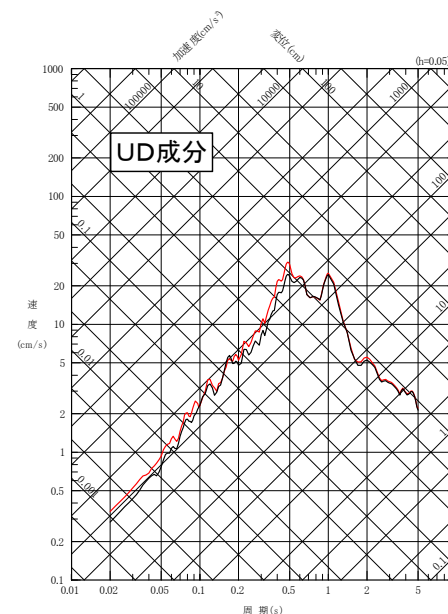
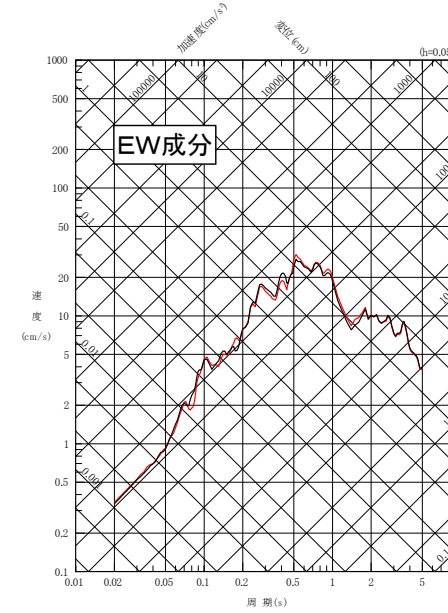
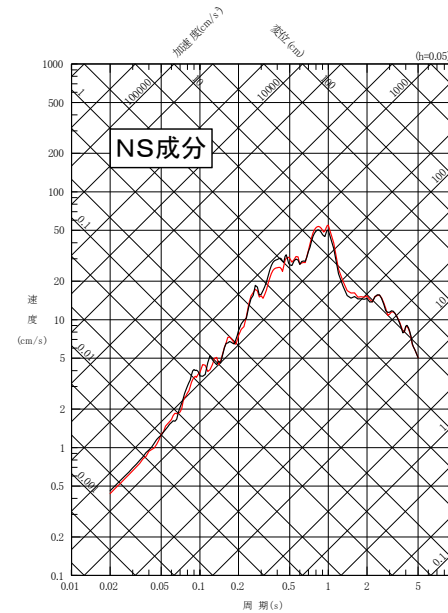
層厚 (m)	ρ (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Qs(f) (hs(f))		Qp(f) (hp(f))	
				Qo (ho(f))	n (α)	Qo (ho(f))	n (α)
10	1.59	220	470	4.35 (0.115)	0.68 (0.68)	1.25 (0.40)	0.84 (0.84)
15	1.90	700	1890				
75	2.06	1000	2440				
70	1.51	510	1700				
70	1.52	690	1700				
∞	1.61	850	2200				

基盤の地震動を
評価する位置
T.P.-207.5m
▼

$$Q(f) = Q_0 \cdot f^n$$

$$h(f) = h_0 \cdot f^{-\alpha}, \quad h(f) = 1/2Q(f)$$

- 鉛直アレイ地震観測地点の任意の2点間による観測記録の伝達関数(フーリエ振幅スペクトル比)を用いた逆解析により、最適化地盤モデルを作成し、はぎとり解析に用いる浅部地下構造モデルとして設定した。
- 平成5年(1993年)釧路沖地震について、平成26年12月変更申請時と今回説明の浅部地下構造モデルの基盤の地震動を評価する位置におけるはぎとり波を比較するとよく整合しており、地下構造モデルの変更によるはぎとり波への影響は見られない。



— 平成26年12月変更申請時の
浅部地下構造モデル
— 今回説明の浅部地下構造モデル
(本編資料P.5-19参照)

観測記録の基盤の地震動を評価する位置のはぎとり波の比較
(平成5年(1993年)釧路沖地震)



5-15 平成26年12月変更申請時の地下構造モデル (2/2)

深部地下構造モデル

平成26年12月変更申請時における
統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデル

層厚 (m)	ρ (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Qs(f)			Qp(f)		
				Qo	n	Qi	Qo	n	Qi
150	1.6	880	2380	31.5	1.10	338	15.3	1.04	338
390	2.1	1210	2830	28.1	1.02	409	26.8	1.05	419
310	2.3	1720	3530	21.3	1.22	463	31.5	1.04	387
∞	2.6	3160	5520						

$$1/Q(f) = 1/(Q_o \cdot f^n) + 1/Q_i$$

平成26年12月変更申請時における
理論計算に用いる深部地下構造モデル

層厚 (m)	ρ (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q(f)		
				Qo	n	Qi
150	1.6	880	2380	31.5	1.10	338
390	2.1	1210	2830	28.1	1.02	409
310	2.3	1720	3530	21.3	1.22	463
1910	2.6	3160	5520	300	0.00	
4500	2.6	3410	5900			
5000	2.6	3520	6100			
7500	2.6	3710	6420			
12000	2.8	3850	6660			
33000	3.2	4360	7550			
33000	3.2	4380	7590			
33000	3.2	4490	7780			
∞	3.2	4490	7780			

$$1/Q(f) = 1/(Q_o \cdot f^n) + 1/Q_i$$

- 鉛直アレイ地震観測地点で得られた観測記録によるP波部のH/Vスペクトル比を用いた逆解析により、最適化地盤モデルを作成した。
- 最適化地盤モデルを、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルとして設定した。
- 理論計算に用いる地下構造モデルについては、地震基盤以深の速度構造、密度、Q値について、佐藤ほか(1989)¹²⁾及び福山ほか(1998)¹³⁾に基づき設定した。

地震基盤
T.P.約-1100m
▼

- 2章**
- 1) 地質調査総合センター:数値地質図P-2 日本重力データベース DVD版, 独立行政法人産業技術総合研究所, 2013
 - 2) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会:「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル説明資料, 2017
 - 3) 片岡卓也・永野正行:大阪平野における東大阪地域の浅部地盤モデルの高精度化と浅部・深部地盤を考慮した三次元構造による地盤増幅特性, 日本地震工学会論文集, 第20巻, 第1号(特集号), pp.51-62, 2020
 - 4) 新色隆二・山中浩明:表層地盤の3次元的影響を考慮した2003年宮城県北部地震の震源域における地震動のシミュレーション, 物理探査, 第66巻, 第3号, pp.139-152, 2013
 - 5) 上林宏敏・川辺秀憲・内田治:不整形地盤に起因する短周期地震動の空間変動, 第38回地盤震動シンポジウム, pp.77-84, 2010
 - 6) 盛川仁・山中浩明:地盤と地盤震動 観測から数値解析まで, 2019
- 3章**
- 1) Kobayashi, K., T.Uetake, M.Mashimo and H.Kobayashi: ESTIMATION OF DEEP UNDERGROUND VELOCITY STRUCTURES BY INVERSION OF SPECTRAL RATIO OF HORIZONTAL TO VERTICAL COMPONENT IN P-WAVE PART OF EARTHQUAKE GROUND MOTION, 12WCCE2000, 2658, 2000
 - 2) 佐藤吉之・小林喜久二・平原謙司・坂本大輔・横野敬二: S波主要動部の水平/上下スペクトル振幅比による地震動の異方性評価, 日本地震工学会大会梗概集, pp.464-465, 2011
 - 3) Sawada, Y., Y.Tazawa, H.Yajima, S.Sasaki and S.Noguchi: INVESTIGATION ABOUT DIRECTIONAL DEPENDENCE OF EARTHQUAKE AMPLIFYING CHARACTERISTICS BASED ON HIGH-DENSITY SEISMIC OBSERVATION, 5th IASPEI/IAEE International Symposium, 2016
- 5章**
- 1) 佐藤浩章・金谷守・大鳥靖樹:減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案—岩盤における鉛直アレイ記録への適用と減衰特性の評価—, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp.55-62, 2006
 - 2) 太田裕:地震工学への最適化法の適用 1. 八戸港湾SMAC設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp.35-41, 1975
 - 3) 武村雅之・池浦友則・高橋克也・石田寛・大島豊:堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, pp.1-11, 1993
 - 4) Kobayashi, K., F.Amai and Y.Abe: ATTENUATION CHARACTERISTICS OF SOIL DEPOSITS AND ITS FORMULATION, International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Vol.1, pp.269-274, 1992
 - 5) 小林喜久二・久家英夫・植竹富一・真下貢・小林啓美:伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定 その3 Q値の基本式に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造II, pp.253-254, 1999
 - 6) 梅田尚子・佐藤吉之・小林喜久二:逆解析による地盤のQ値モデルの適用性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.401-402, 2014
 - 7) 岩田知孝・入倉孝次郎:観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震, 第2輯, 第39巻, pp.579-593, 1986
 - 8) Wapenaar, K.: Retrieving the Elastodynamic Green's Function of an Arbitrary Inhomogeneous Medium by Cross Correlation, PHYSICAL REVIEW LETTERS, doi:10.1103/PhysRevLett.93.254301, 2004
 - 9) Shapiro, N. M. and M.Campillo: Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491, 2004
 - 10) 中村亮一・植竹富一:地殻・上部マントルでの減衰—トモグラフィ手法によるQ値評価とその利用—, 物理探査, 第65巻, 第1&2号, pp.67-77, 2012
 - 11) 吉田望・篠原秀明・澤田純男・中村晋:設計用地震動の設定における工学的基盤の意義, 土木学会地震工学論文集, 第28巻, Paper No.170, 2005
 - 12) 佐藤魂夫・中山耕治・田中和夫・長谷見晶子:東北地方北部の三次元P波速度構造, 地震, 第2輯, 第42巻, pp.419-437, 1989
 - 13) 福山英一・石田瑞穂・Douglas S.DREGER・川井啓廉:オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズム決定, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.149-156, 1998