

玄海原子力発電所3号炉、4号炉審査資料

資料番号

TTG-072

提出年月日

2023年12月18日

玄海原子力発電所3号炉及び4号炉

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価について

2023年12月18日

九州電力株式会社

目次 (1/3)


1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ	P. 4
2. 地下構造モデルの設定	P. 10
2.1 地下構造モデルの設定方針	P. 11
2.1.1 既許可以降に取得した地震観測記録	P. 13
2.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析	P. 14
2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針	P. 19
2.2 地盤減衰 (Q値) の設定	P. 24
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)	P. 25
(1) 地盤減衰 (Q値) の検討	P. 25
a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討	P. 26
b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討	P. 30
c. 地震波干渉法による検討	P. 34
(2) 地盤減衰 (Q値) の確認	P. 42
a. 応答スペクトルによる地盤減衰 (Q値) の確認	P. 42
b. 伝達関数による地盤減衰 (Q値) の確認	P. 53
(3) 地盤減衰 (Q値) の設定	P. 54
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)	P. 55
(1) 地盤減衰 (Q値) の検討	P. 55
a. 速度層断面による検討	P. 56
b. ボーリング孔内減衰測定による検討	P. 60
(2) 地盤減衰 (Q値) の確認	P. 64
a. 岩石コアを用いた減衰測定による確認	P. 64
(3) 地盤減衰 (Q値) の設定	P. 68
2.3 地下構造モデルの設定	P. 69

目次 (2/3)

2.4	地下構造モデルの妥当性確認	P. 70
	(1)地震観測記録の応答スペクトルによる確認	P. 71
	(2)PS検層モデルとの比較による確認	P. 82
2.5	標準応答スペクトル用モデルの設定	P. 88
2.6	標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認	P. 89
2.7	標準応答スペクトル用モデルの地震動評価への適用	P. 92
3.	模擬地震波の作成	P. 95
	3.1 模擬地震波の作成方針	P. 96
	3.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成	P. 98
	3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成	P. 101
	3.4 解放基盤表面の地震波の比較	P. 108
4.	基準地震動の策定	P. 114
5.	超過確率の参照	P. 120
6.	まとめ	P. 123

目次 (3/3)

【補足①】 深部地下構造モデルの確認	P. 128
【補足②】 地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討	P. 130
【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析	P. 139
【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討	P. 146
【補足⑤】 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討	P. 160
【補足⑥】 解放基盤表面の地震波の作成における地盤減衰 (Q値) の影響	P. 166
【補足⑦】 地震観測記録を用いた地盤減衰 (Q値) の見直しの影響検討	P. 169
【補足⑧】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認	P. 183
【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認	P. 188
【参考①】 既許可の地下構造モデル	P. 212
【参考②】 地盤減衰 (Q値) の周波数依存性及び上限に関する知見	P. 223
【参考③】 ボーリング孔内Q値に関する知見	P. 231
【参考④】 岩石コアQ値に関する知見	P. 237
【参考⑤】 友澤ほか (2021) の概要	P. 239
【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認	P. 250
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認	P. 254
【参考⑧】 友澤ほか (2021) のブロックインバージョン結果の確認	P. 291
【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差	P. 295
【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について	P. 300
【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について	P. 310
【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認	P. 316



1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 改正基準の概要

- ・ 「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（別記2）」の改正（令和3年4月21日原子力規制委員会決定）の概要を以下に示す。

（別記2）

第4条第5項第三号

上記の「震源を特定せず策定する地震動」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について得られた震源近傍における観測記録を基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定すること。
なお、上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により策定すること。

- ① 上記の「震源を特定せず策定する地震動」の策定に当たっては、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を考慮する地震動」の2種類を検討対象とすること。
- ② 上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。

- ・ 2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動
- ・ 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（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s = 2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。）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。）として次の図に示すもの

つづく

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

つづき

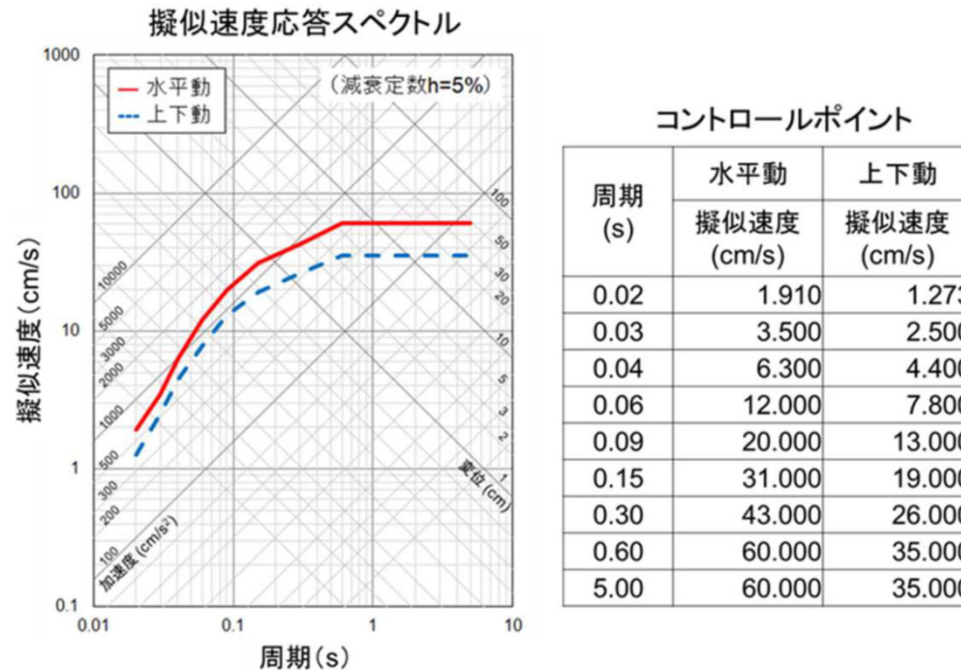
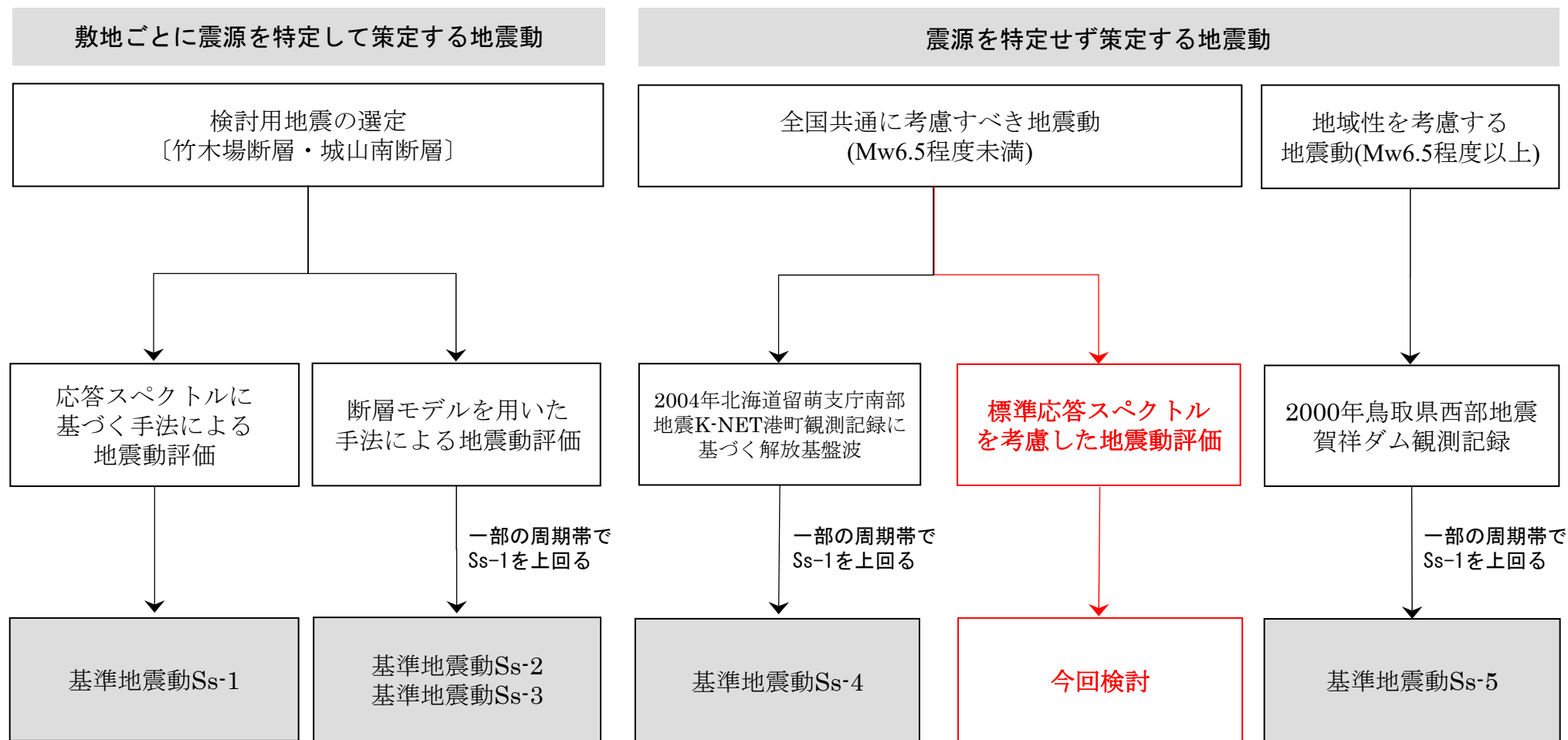


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- ③ 上記の「地域性を考慮する地震動」の検討の結果、この地震動を策定する場合にあっては、事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震について、震源近傍における観測記録を用いること。
- ④ 解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的変化等の特性を適切に考慮すること。
- ⑤ 上記の「震源を特定せず策定する地震動」について策定された基準地震動の妥当性については、最新の科学的・技術的知見を踏まえて個別に確認すること。

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 基準地震動の策定フロー



※1 Mw6.5程度未満の地震については、基準・ガイドの改正における2004年北海道留萌支庁南部地震・標準応答スペクトルの考慮及び収集対象となる14地震の例示の削除を踏まえて評価を実施。

標準応答スペクトルは加藤ほか(2004)¹⁾による応答スペクトルを上回ることから、既許可において既往の知見として考慮していた加藤ほか(2004)¹⁾は「震源を特定せず策定する地震動」の検討対象から除外する。

※2 既許可においては、Ss-4及びSs-5について、Ss-1～Ss-3を一部の周期で上回ることから基準地震動として策定していたが、今回の基準改正を受けた対応において、「震源を特定せず策定する地震動」のそれぞれについて、Ss-1と比較する方針へ見直した。なお、方針の見直しを行っても既許可時の判断に影響はなく、基準地震動Ss-4及びSs-5は既許可時と同一である。

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 現行の基準地震動（平成29年1月18日許可）の最大加速度

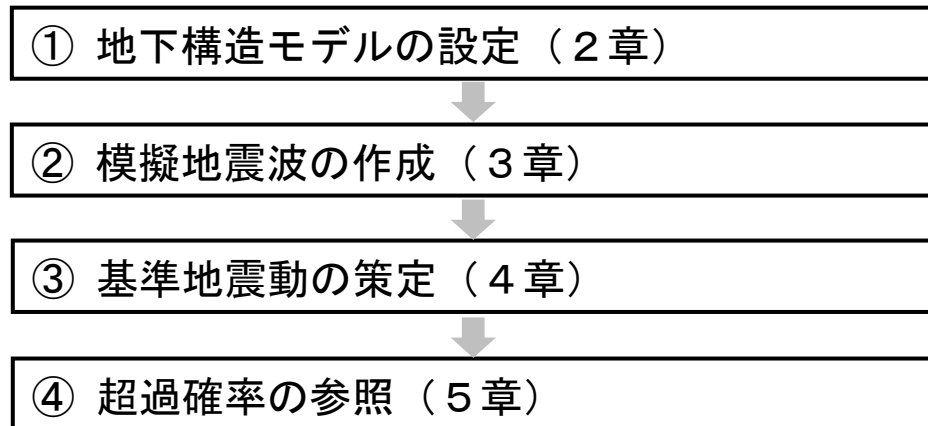
(単位：cm/s²)

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540		360
断層モデルを用いた手法	城山南断層	Ss-2	268	265	172
	竹木場断層	Ss-3	524	422	372
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
全国共通に考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-4	620		320
地域性を考慮する地震動 (Mw6.5程度以上)	鳥取県西部地震	Ss-5	528	531	485
全国共通に考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	標準応答スペクトル	今回検討			

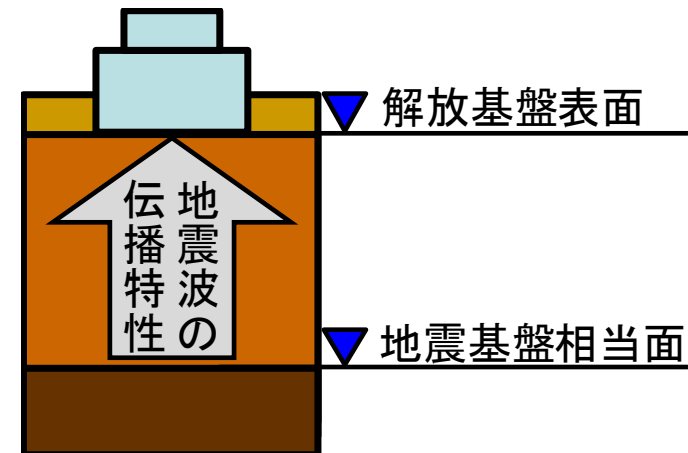
1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

- ・ 以下の流れで、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定し、現行の基準地震動Ss-1の応答スペクトルとの比較を実施し、基準地震動を策定。



標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価の流れ



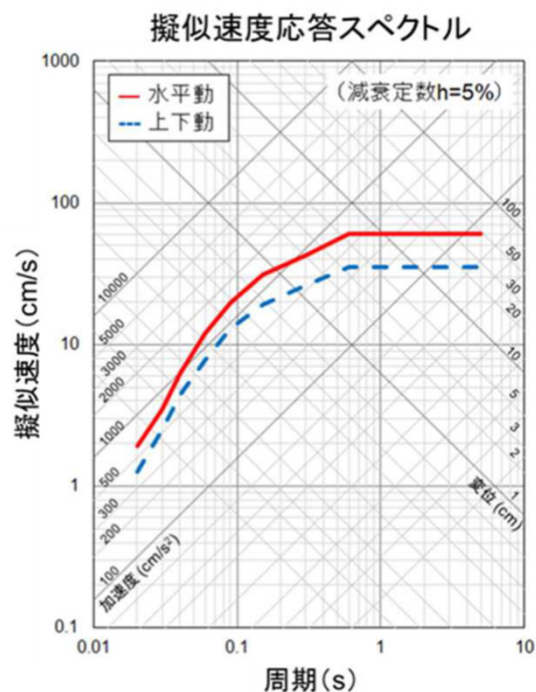
標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価のイメージ

2. 地下構造モデルの設定

2.1 地下構造モデルの設定方針

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

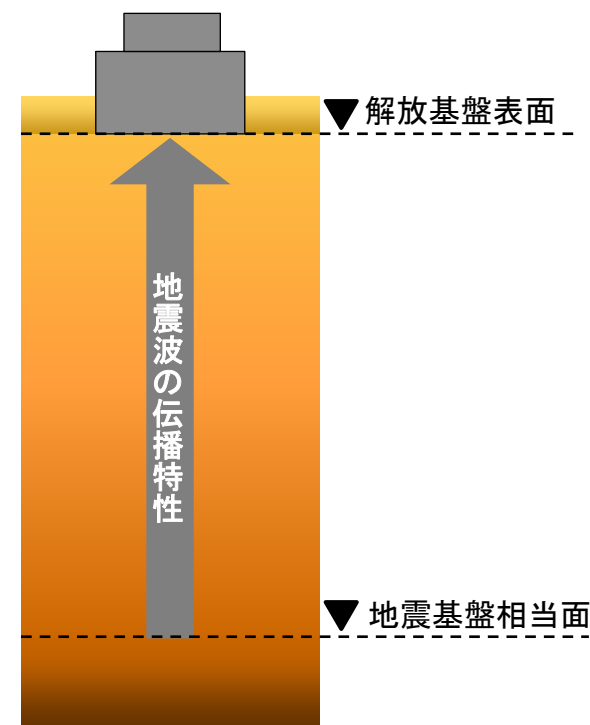
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されることを踏まえ、全ての周期帯に適用できる地下構造モデルを設定することが必要となる。
- また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されるため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを設定する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル（以下、標準応答スペクトル用モデル）の設定にあたっては、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施。
- さらに、玄海原子力発電所の地震基盤相当面については、設置許可基準規則の解釈（別記2）の記載を踏まえ、標準応答スペクトル用モデルにおける $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層上面に設定。



地震基盤相当面における標準応答スペクトル

コントロールポイント

周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000



標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

2.1 地下構造モデルの設定方針

① 既許可の地下構造モデル（参考①）

- 既許可では、当時の調査・観測データに基づき、基準地震動策定に適切な地下構造モデルを設定。
- 解放基盤表面からEL. -200mの範囲について、速度構造は、試掘坑内弾性波試験結果及び3号炉基礎マット範囲におけるPS検層結果に基づき設定。密度は、岩石試験結果に基づき設定。EL. -200m以深は、文献に基づき設定。
- 地盤減衰（Q値）は、長周期帯の地震動評価を目的としていたこと及び十分な観測・調査データが得られていなかったことから、慣用値（ $V_s/15 \sim V_s/10$ ）等に基づき設定。
- 鉛直アレイや微動アレイ観測により確認。

② 地震観測記録の増加（2.1.1項）

- 既許可以降、2016年熊本地震を含む80地震の観測記録を取得。（計156地震の観測記録）

③ ②を踏まえた地下構造モデルの分析（2.1.2項）

- 地盤減衰（Q値）は、既許可の地下構造モデルのQ値を大きく下回ることを確認。
- 速度構造は、既許可の地下構造モデルと同等であることを確認。

④ 標準応答スペクトル用モデル（2.1.3項）

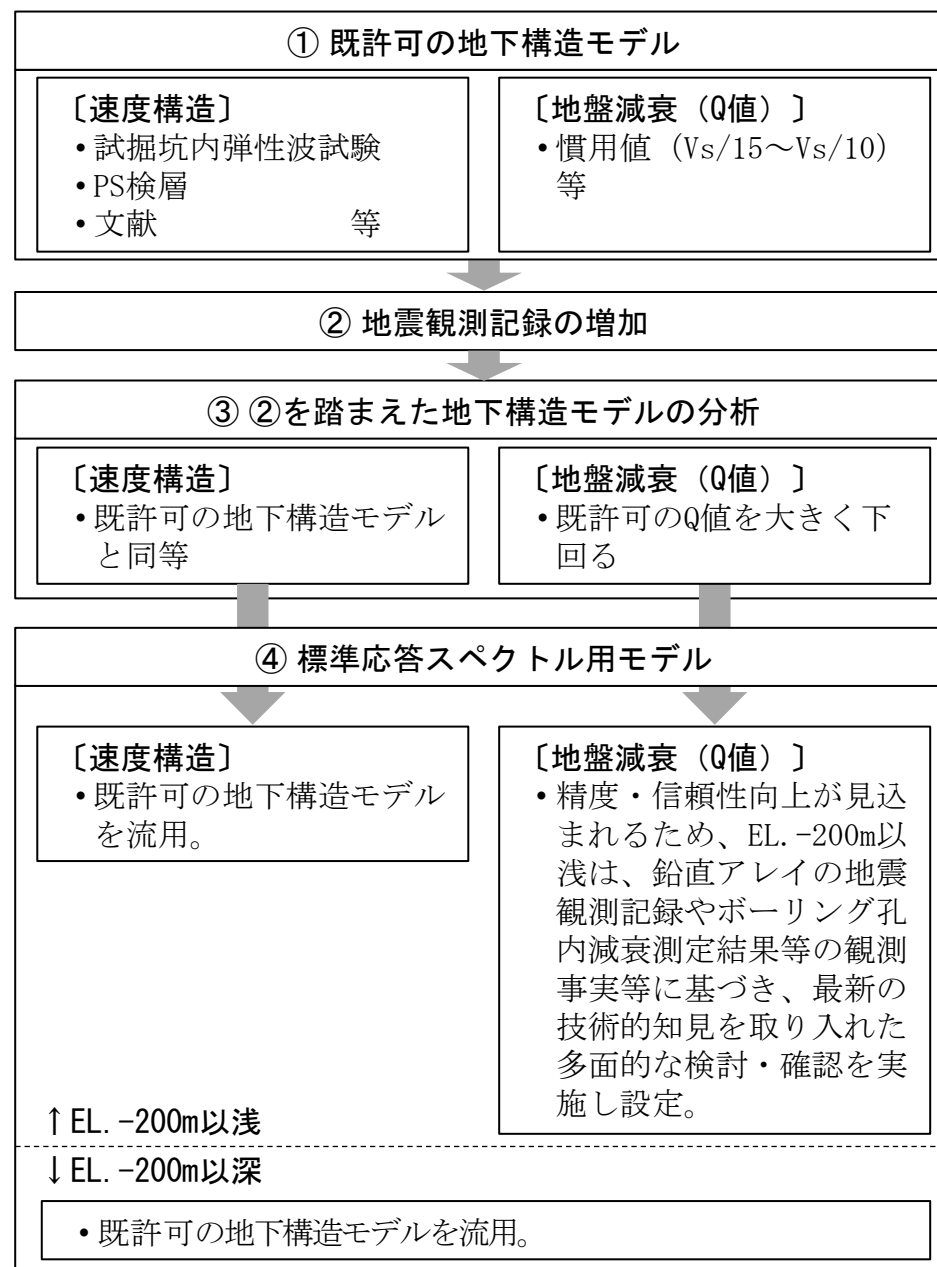
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠は長周期帯に限定したものではないため、短周期帯の地震動評価にも用いる。

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認。

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定。
- 地盤減衰（Q値）は、精度・信頼性の向上が見込まれるため、鉛直アレイの地震観測記録（19地震）やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、設定。
- 全ての周期帯における地下構造モデルの妥当性を、地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実により確認。



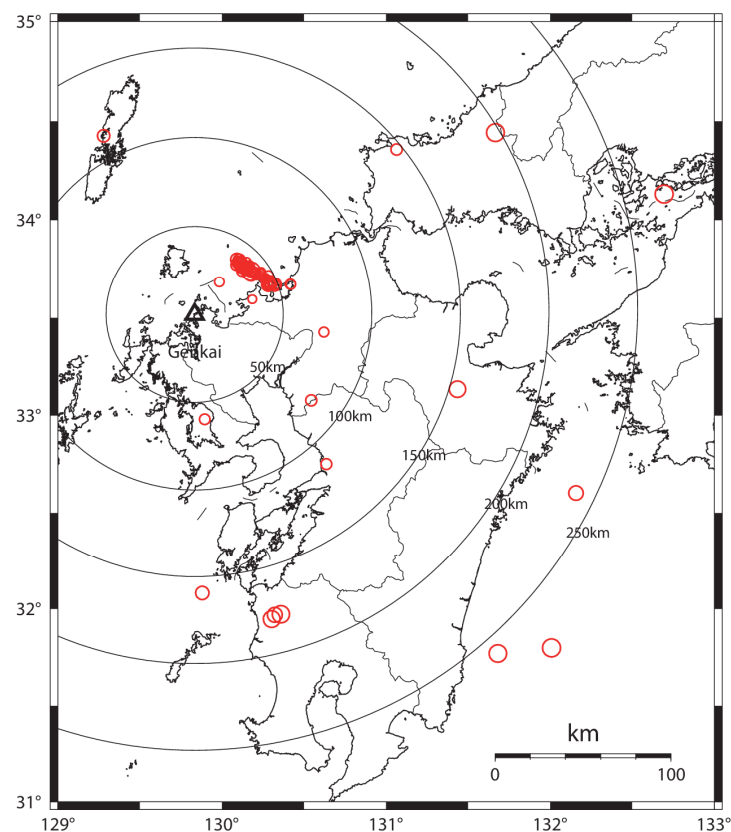
2.1.1 既許可以降に取得した地震観測記録

■ 敷地内の鉛直アレイ地震観測記録

- 既許可時審査以降、玄海原子力発電所の敷地地盤における鉛直アレイによる地震観測を継続して実施しており、新たに、2016年熊本地震を含む80地震の観測記録を取得。（計156地震の観測記録）

計76地震

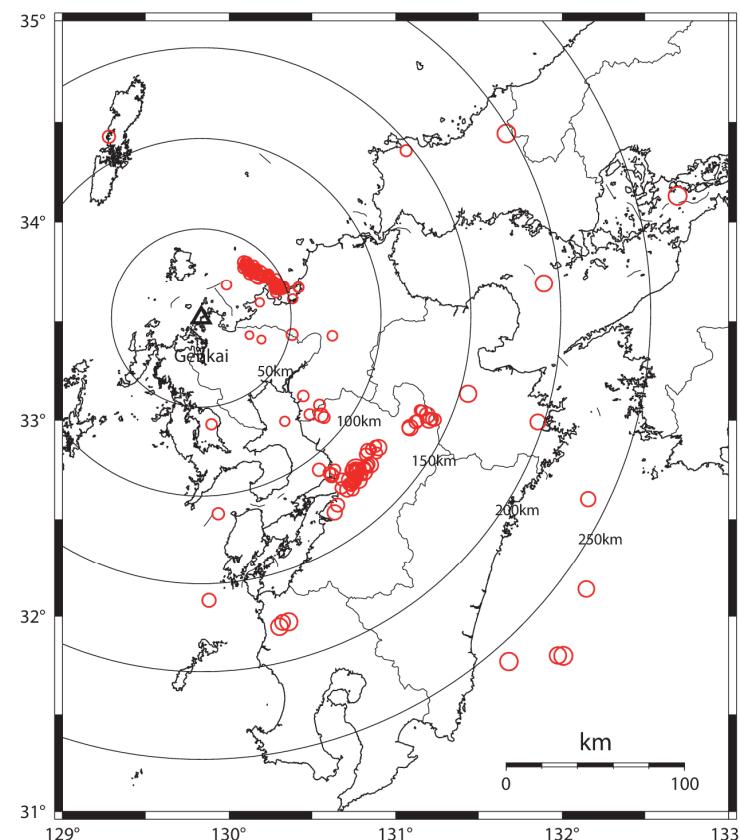
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

計156地震

※2000年鳥取県西部地震等は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

+80地震

2.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

■ 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施。

※ Noda et al. (2002)²⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震を選定

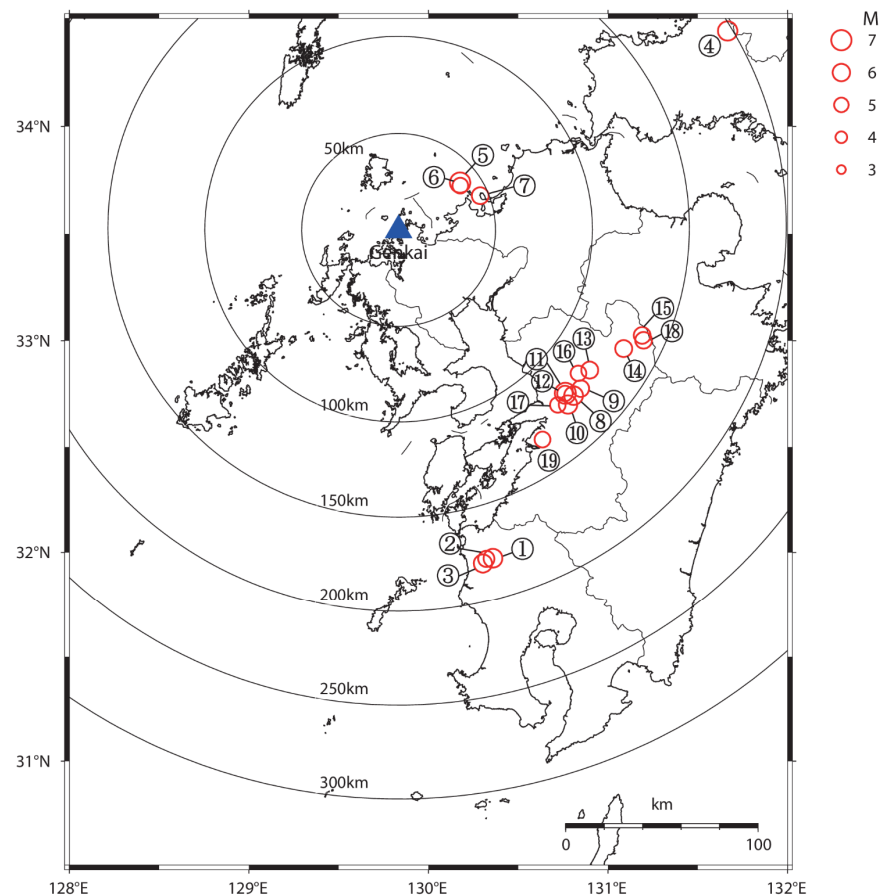
伝達関数（周波数依存型）による
地盤同定に用いた地震諸元（計19地震）

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

既許可時審査



今回新たに追加

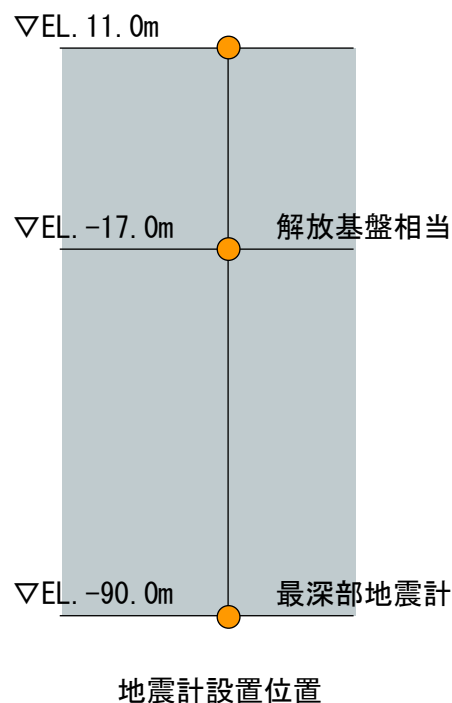


伝達関数（周波数依存型）による
地盤同定に用いた地震の震央位置（計19地震）

2.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

■ 同定における解析条件

- 伝達関数（周波数依存型）により地盤同定を行う。解析条件は以下の通り。



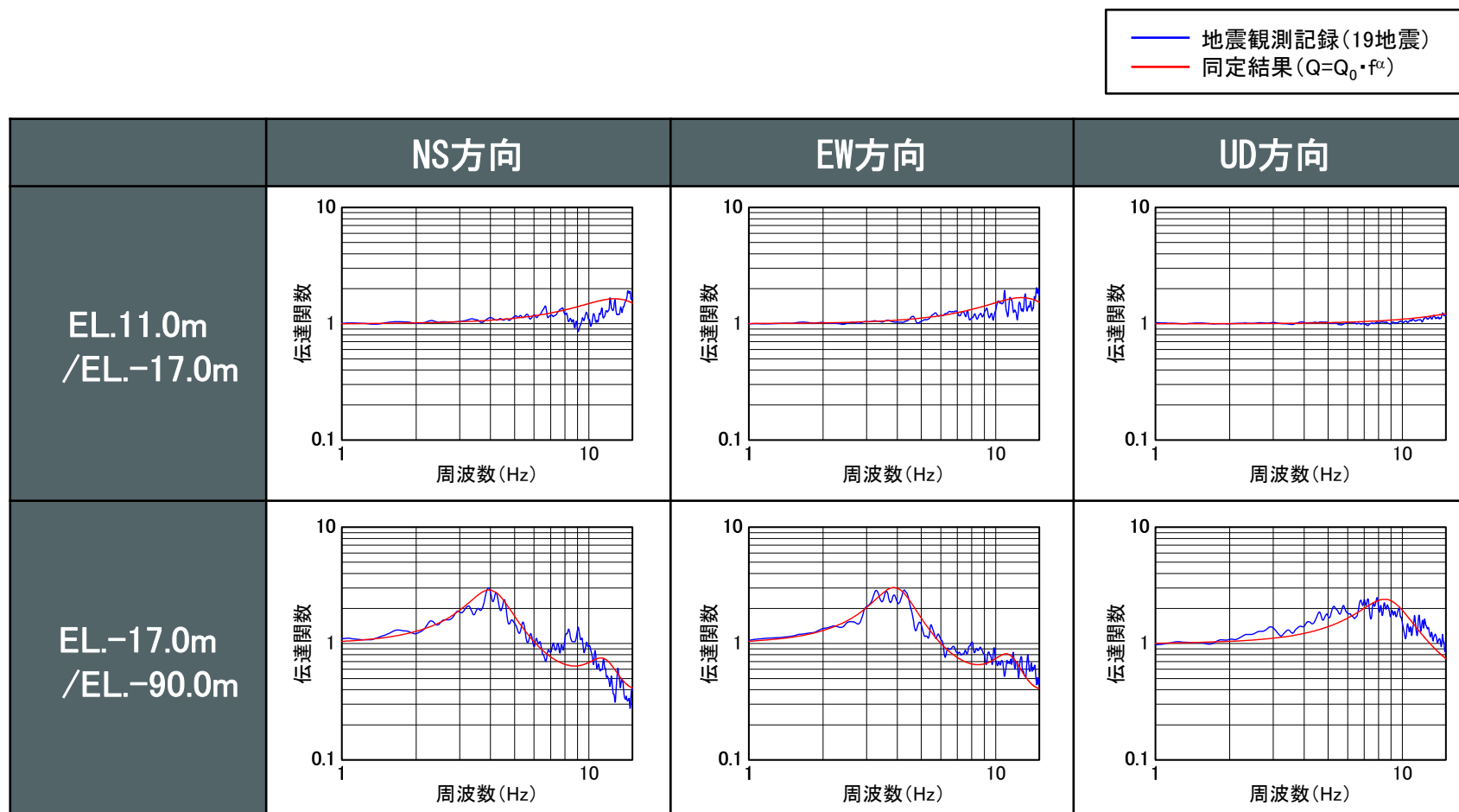
伝達関数（周波数依存型）による地盤同定における解析条件

項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） <ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度は既許可の地下構造モデルの値を参照し、S波速度Vs、P波速度Vp、地盤減衰（Q値）を同定
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

2.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

■ 地盤同定結果 (Vs、Vp、Q値同定解析)

- 同定結果の伝達関数と19地震の平均伝達関数を以下に示す。



※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

2.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

■ Vs、Vpの同定結果

- 鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施した結果、既許可の地下構造モデルの速度構造と同等であることを確認。

【NS方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.35	1349	1.03	0.00
-17.0	2.35	1413	1.08	0.57
-50.0	2.35	1614	1.14	0.57

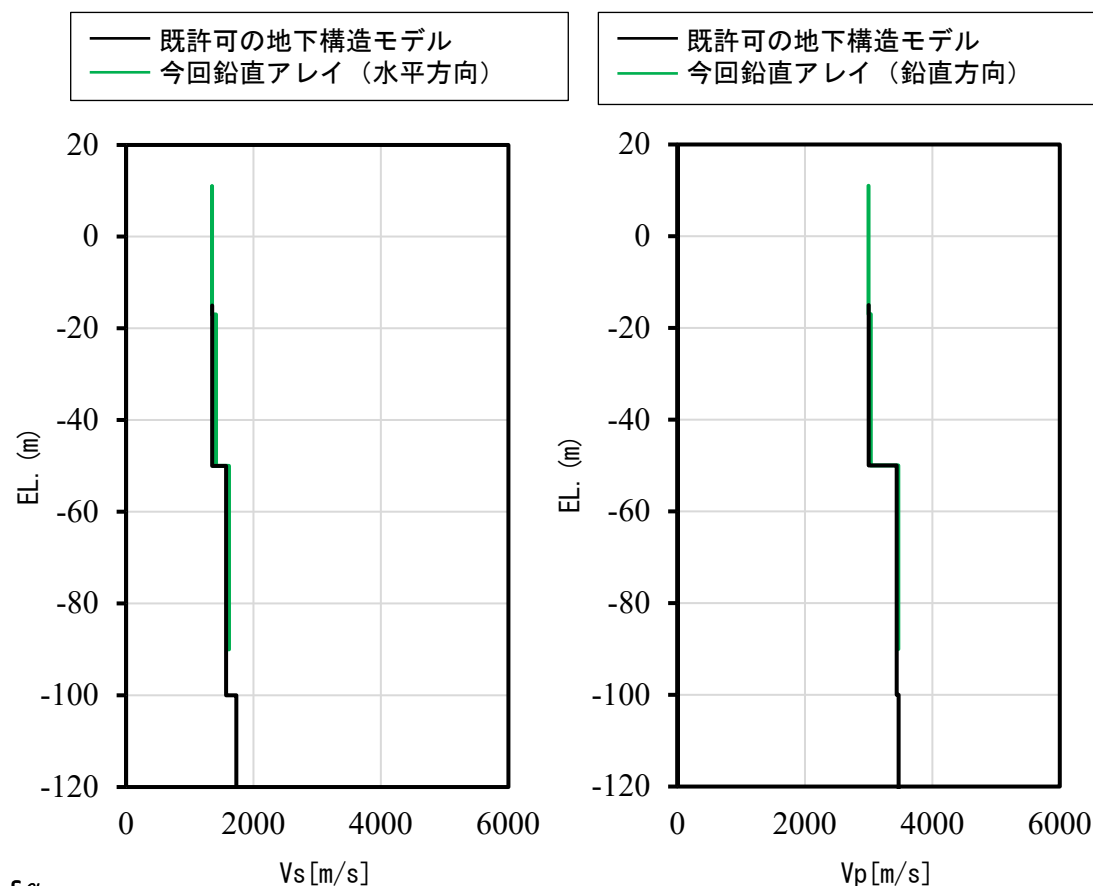
【EW方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.35	1348	1.04	0.01
-17.0	2.35	1373	1.07	0.62
-50.0	2.35	1593	1.13	0.62

【UD方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.35	2997	1.04	0.01
-17.0	2.35	3032	1.08	0.25
-50.0	2.35	3463	1.14	0.25

$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$



2.1.2 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

■ 地盤減衰（Q値）の同定結果

- 鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施した結果、既許可の地下構造モデルのQ値を大きく下回ることを確認。

【NS方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.35	1349	1.03	0.00
-17.0	2.35	1413	1.08	0.57
-50.0	2.35	1614	1.14	0.57

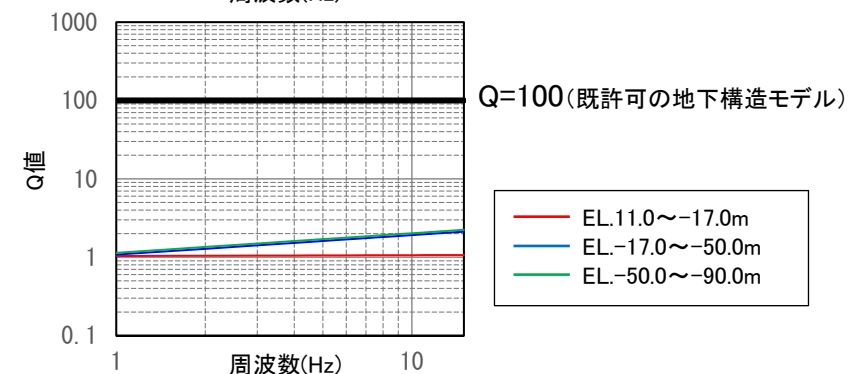
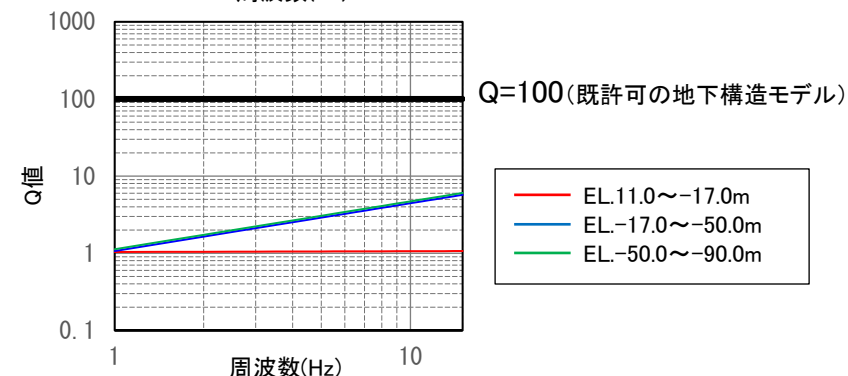
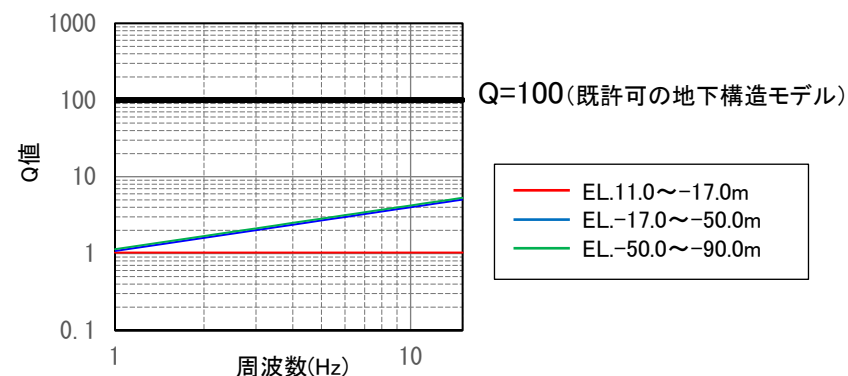
【EW方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.35	1348	1.04	0.01
-17.0	2.35	1373	1.07	0.62
-50.0	2.35	1593	1.13	0.62

【UD方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.35	2997	1.04	0.01
-17.0	2.35	3032	1.08	0.25
-50.0	2.35	3463	1.14	0.25

$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$



2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 地下構造モデルの設定方針 (1/2)

- 前項における既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた分析により、以下の結果を確認。
 - 地盤減衰 (Q値) は、既許可の地下構造モデルのQ値を大きく下回り、精度・信頼性の向上が見込まれる。
 - 速度構造は、既許可の地下構造モデルの速度構造と同等である。
- 既許可の地下構造モデルは、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、理論的手法による長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠としたPS検層結果や文献等は長周期帯に限定したものではないため、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に用いる。

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認した。
 - 設定根拠としている地震調査委員会 (2007)³⁾における地盤構造の物性値は、詳細法 (ハイブリッド合成法) による強震動計算を目的として設定されており、短周期から長周期までの全ての周期帯へ適用されている。
 - なお、既許可以降の知見である防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS (V3.2)⁴⁾の深部地盤と、地震調査委員会 (2007)³⁾の地盤構造の物性値が整合する。(補足①)

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定する。
- 地盤減衰 (Q値) は、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、設定する。
- 全ての周期帯における地下構造モデルの妥当性を、地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実により確認する。

2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

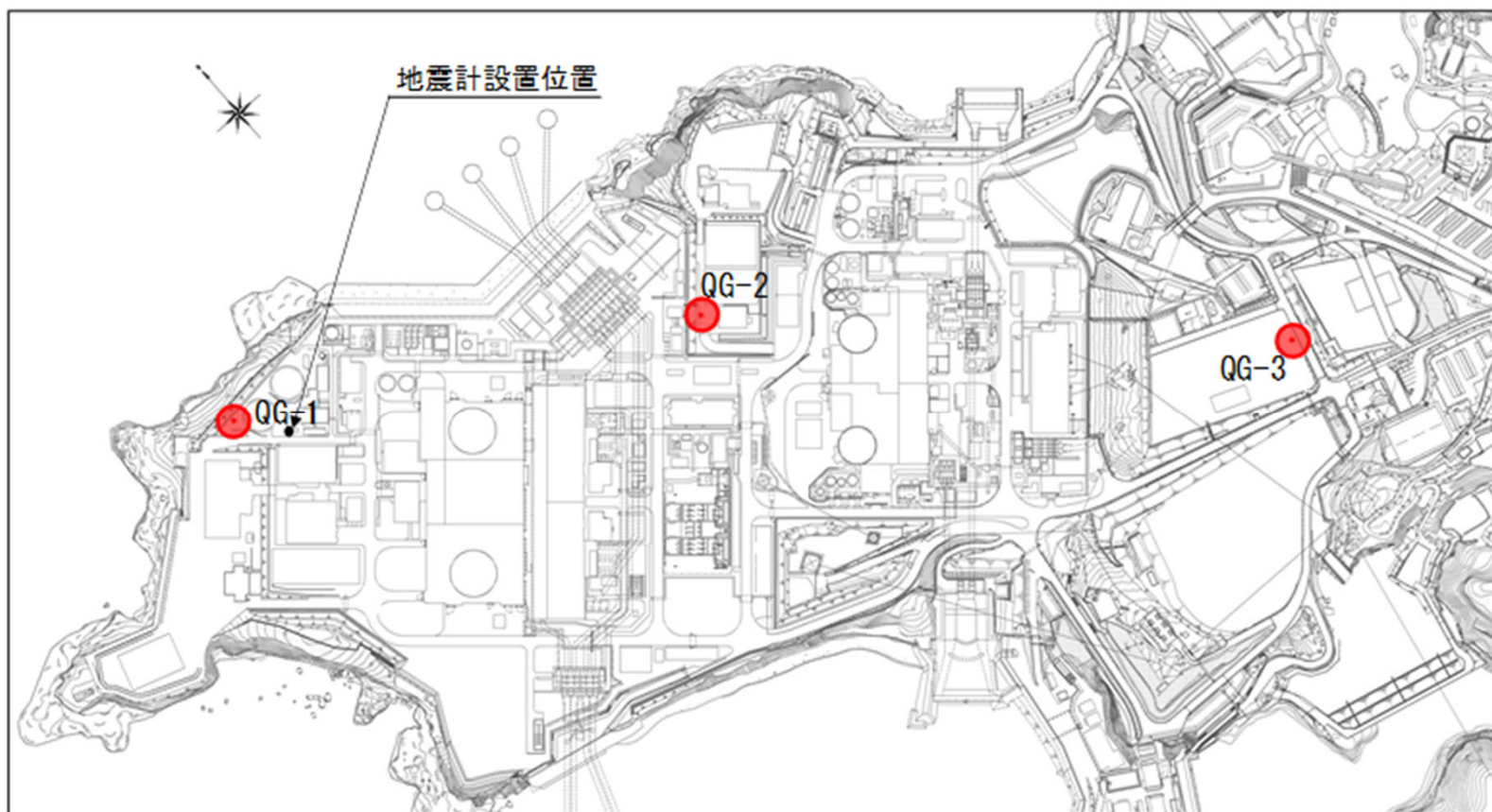
■ 地下構造モデルの設定方針 (2/2)

地表 ▼ EL. 11.0m 解放基盤表面 ▼ EL. -15.0m		地盤減衰 (Q値)	速度構造・密度
▼ EL. -50.0m 最深部地震計 ▼ EL. -90.0m	観測記録 減衰測定等 ボーリング孔内	地震観測記録を用いた検討・確認結果に基づき設定	既許可の地下構造モデルを流用 [速度構造は、試掘坑内弾性波試験結果を基に設定 密度は、岩石試験結果を基に設定]
		ボーリング孔内減衰測定結果等を用いた検討・確認結果に基づき、EL. -90m以浅と同様に設定	既許可の地下構造モデルを流用 [速度構造は、PS検層結果を基に設定 密度は、上層の岩石試験結果を基に設定]
地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m ▼ EL. -3015m		既許可の地下構造モデルを流用 [慣用値 ($V_s/15 \sim V_s/10$) 及び地震調査委員会 (2007) ³⁾ を基に設定]	既許可の地下構造モデルを流用 [地震調査委員会 (2007) ³⁾ を基に設定]

2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ ボーリング孔内減衰測定

- 発電所構内において、EL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施。
- 追加ボーリング孔内減衰測定により、地盤減衰（Q値）を測定。
- 追加ボーリング孔におけるPS検層により、速度（ V_s 、 V_p ）を測定。



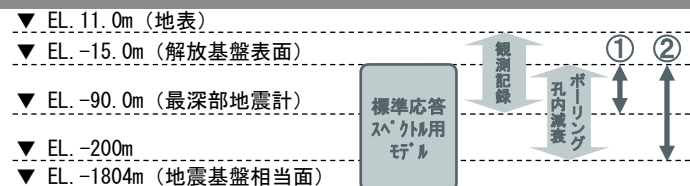
2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 今回取り入れる新たな知見や考え方

新たな知見	考え方	標準応答スペクトル用モデルの設定
敷地における地震観測記録の蓄積	蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用いた伝達関数により地盤減衰（Q値）を検討、及び応答スペクトルにより地下構造モデルの妥当性を確認	<ul style="list-style-type: none">・ 伝達関数による地盤減衰（Q値）の検討に用いる観測記録数の増加・ 地盤減衰（Q値）の検討の多面化・ 設定した地下構造モデルの妥当性確認の多面化
地震波干渉法	蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用いた地震波干渉法により、地盤減衰（Q値）を検討	<ul style="list-style-type: none">・ 地下構造モデルに依存しない手法での地盤減衰（Q値）の検討・ 地盤減衰（Q値）の検討の多面化
地盤減衰（Q値）の上限を示す評価事例の蓄積	蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用い、上限値を考慮した伝達関数による同定により、地盤減衰（Q値）を検討	<ul style="list-style-type: none">・ より広帯域での地盤減衰（Q値）の検討・ 地盤減衰（Q値）の検討の多面化
ボーリング孔内減衰測定	追加ボーリング孔内減衰測定結果から地盤減衰（Q値）を検討、及びPS検層モデルの伝達関数との比較により地下構造モデルの妥当性を確認	<ul style="list-style-type: none">・ 地盤減衰（Q値）の検討の多面化・ 設定した地下構造モデルの妥当性確認の多面化
岩石コアを用いた減衰測定	岩石コアを用いた減衰測定結果から地盤減衰（Q値）を確認	<ul style="list-style-type: none">・ 地盤減衰（Q値）の確認の多面化

2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 地盤減衰（Q値）の設定及び地下構造モデルの妥当性確認の流れ



最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）の設定【2.2.1項】

発電所敷地で取得した地震観測記録に基づき、解放基盤表面から最深部地震計（EL. -90.0m）までの範囲の地盤減衰（Q値）を複数の手法により検討。

- 伝達関数（周波数依存型）による検討（Q=8.7程度）
- 伝達関数（バイリニア型）による検討（Q=3.7程度）
- 地震波干渉法による検討（Q=8.6程度）

検討結果を踏まえ、保守的にQ=12.5とした地盤減衰（Q値）を確認。

- 応答スペクトルによる確認
- 伝達関数による確認

地盤減衰（Q値）は、保守的にQ=12.5と設定

最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の設定【2.2.2項】

最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）が最深部地震計以浅と同等であることを複数の手法により検討。

- 速度層断面による検討
 - 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認。
- ボーリング孔内減衰測定による検討
 - ボーリング孔内測定による地盤減衰（Q値）が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認。

検討結果を踏まえ、最深部地震計以浅と同じQ=12.5とした地盤減衰（Q値）を確認。

- 岩石コアを用いた減衰測定による確認
 - 岩石コアを用いた測定による岩石の減衰（Q値）が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認。

EL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じQ=12.5と設定

地下構造モデル

地下構造モデルの設定【2.3節】

- 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における地盤減衰（Q値）をQ=12.5に設定。
- 速度構造・密度及びEL. -200m以深の地盤減衰（Q値）は、既許可の地下構造モデルを流用。

地下構造モデルの妥当性確認【2.4節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲について、全ての周期帯における設定した地下構造モデルの妥当性を以下の観点で確認。

- 設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る（①）〔解放基盤表面～EL. -90m〕
- 設定した地下構造モデルの理論伝達関数が、ボーリング孔内減衰測定結果等を踏まえたPS検層モデルの理論伝達関数に対して同等もしくは上回る（②）〔解放基盤表面～EL. -200m〕

2.2 地盤減衰（Q値）の設定

■ 地盤減衰（Q値）の設定方針

- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた評価により、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性の向上が見込まれるため、地盤減衰（Q値）を対象に評価を実施。

解放基盤表面 ▼ EL. -15.0m	地盤減衰（Q値）
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>地表 ▼ EL. 11.0m</p> <p>▼ EL. -50.0m</p> <p>最深部地震計 ▼ EL. -90.0m</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>観測記録</p> <p>ボーリング孔内減衰測定等</p> </div> </div>	<p>地震観測記録を用いた以下の検討・確認結果に基づき設定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・伝達関数（周波数依存型）による検討 ・伝達関数（バイリニア型）による検討 ・地震波干渉法による検討 ・応答スペクトルによる確認 ・伝達関数による確認
▼ EL. -200m	<p>以下の検討・確認結果に基づき、EL. -90m以浅と同様に設定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・速度層断面による検討 ・ボーリング孔内減衰測定による検討 ・岩石コアを用いた減衰測定による確認
<p>地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m</p> <p>▼ EL. -3015m</p>	<p>既許可の地下構造モデルを流用</p> <p>〔慣用値（$V_s/15 \sim V_s/10$）及び地震調査委員会（2007）³⁾を基に設定〕</p>

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

(1) 地盤減衰 (Q値) の検討

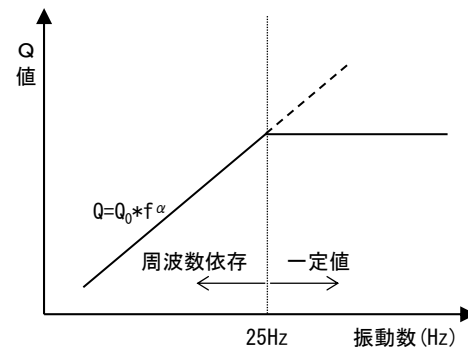
地盤減衰 (Q値) の検討方針

- 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) について、既許可以降に取得した鉛直アレイ地震観測記録を基に、以下のとおり、多面的な検討を実施。
 - a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討：

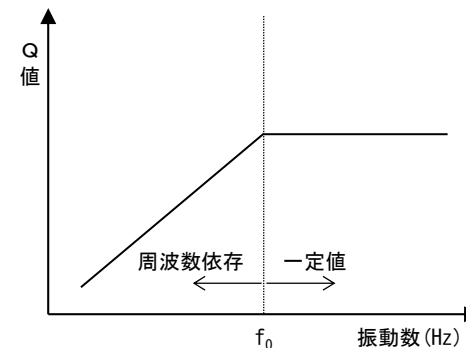
地盤減衰 (Q値) が周波数のべき乗に比例する関数モデル ($Q=Q_0*f^\alpha$) を仮定し、地盤減衰 (Q値) を同定。既往の知見^{5) ~10)}によると、地盤減衰 (Q値) は20Hz程度までのある周波数で上限が存在することから、安全側に考慮し、25Hz以上の値を上限値として採用。
 - b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討：

低周波数側では地盤減衰 (Q値) が周波数のべき乗に比例 ($Q=Q_0*f^\alpha$) し、ある周波数 f_0 (Hz) より高周波数側では、上限値で頭打ち ($Q=Q_0$) するバイリニア型関数モデルを仮定し、地盤減衰 (Q値) を同定。 f_0 は探索パラメータとして地盤減衰 (Q値) と同時に同定。
 - c. 地震波干渉法による検討：

上記伝達関数による検討では、地盤減衰 (Q値) の関数モデルの設定に速度構造を加えた地下構造モデルが必要であるが、地下構造モデルを用いず、地盤減衰 (Q値) を推定。
- 複数の手法による検討結果に、不確かさを考慮した地盤減衰 (Q値) を検討。



(a) 伝達関数 (周波数依存型)



(b) 伝達関数 (バイリニア型)

各手法における減衰モデルのイメージ

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

a. 伝達関数 (周波数依存型) による検討

■ 同定に用いる地震諸元

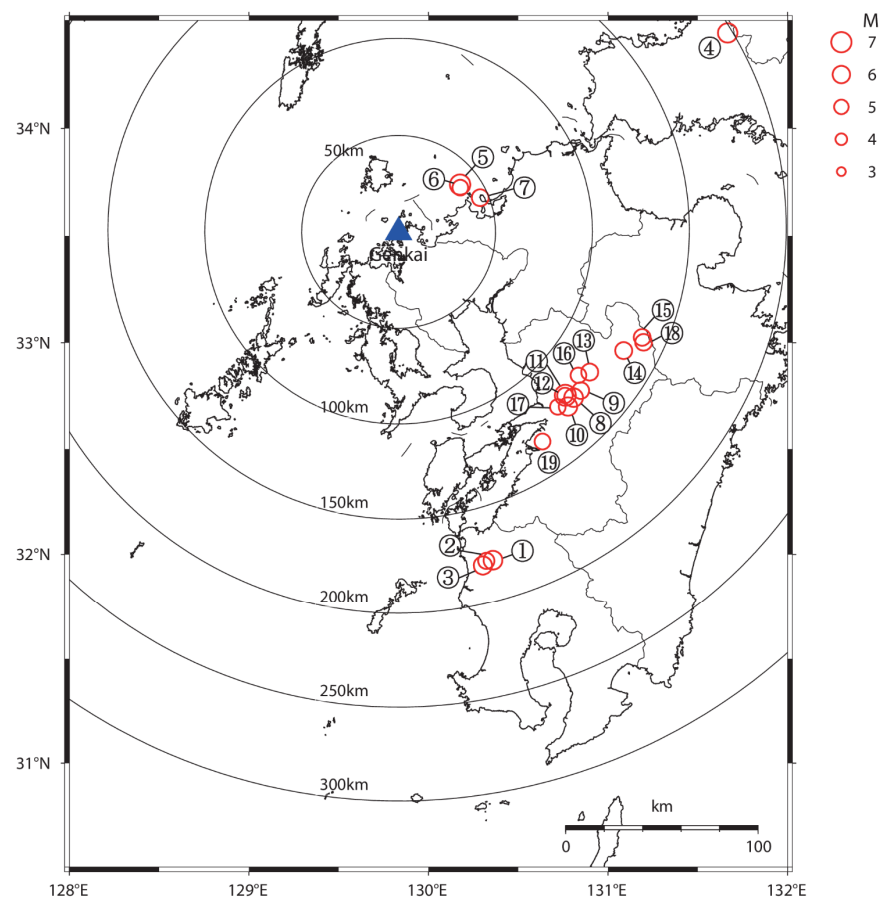
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤減衰の同定を実施。

※ Noda et al. (2002)²⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震を選定

伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震諸元 (計19地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

既許可時審査
↑
今回新たに追加

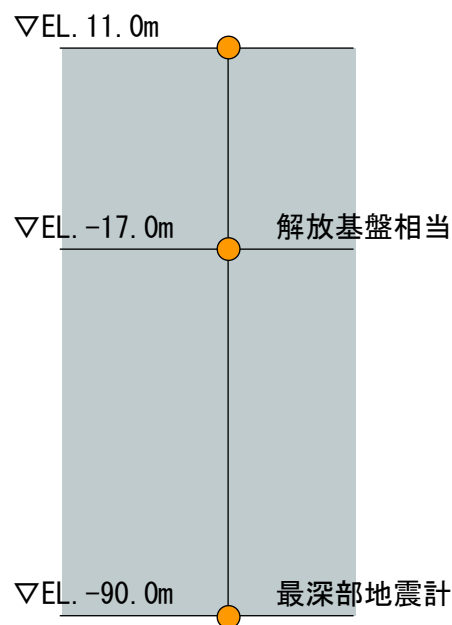


伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

■ 同定における解析条件

- ・ 伝達関数（周波数依存型）により地盤減衰の同定を行う。解析条件は以下の通り。



地震計設置位置

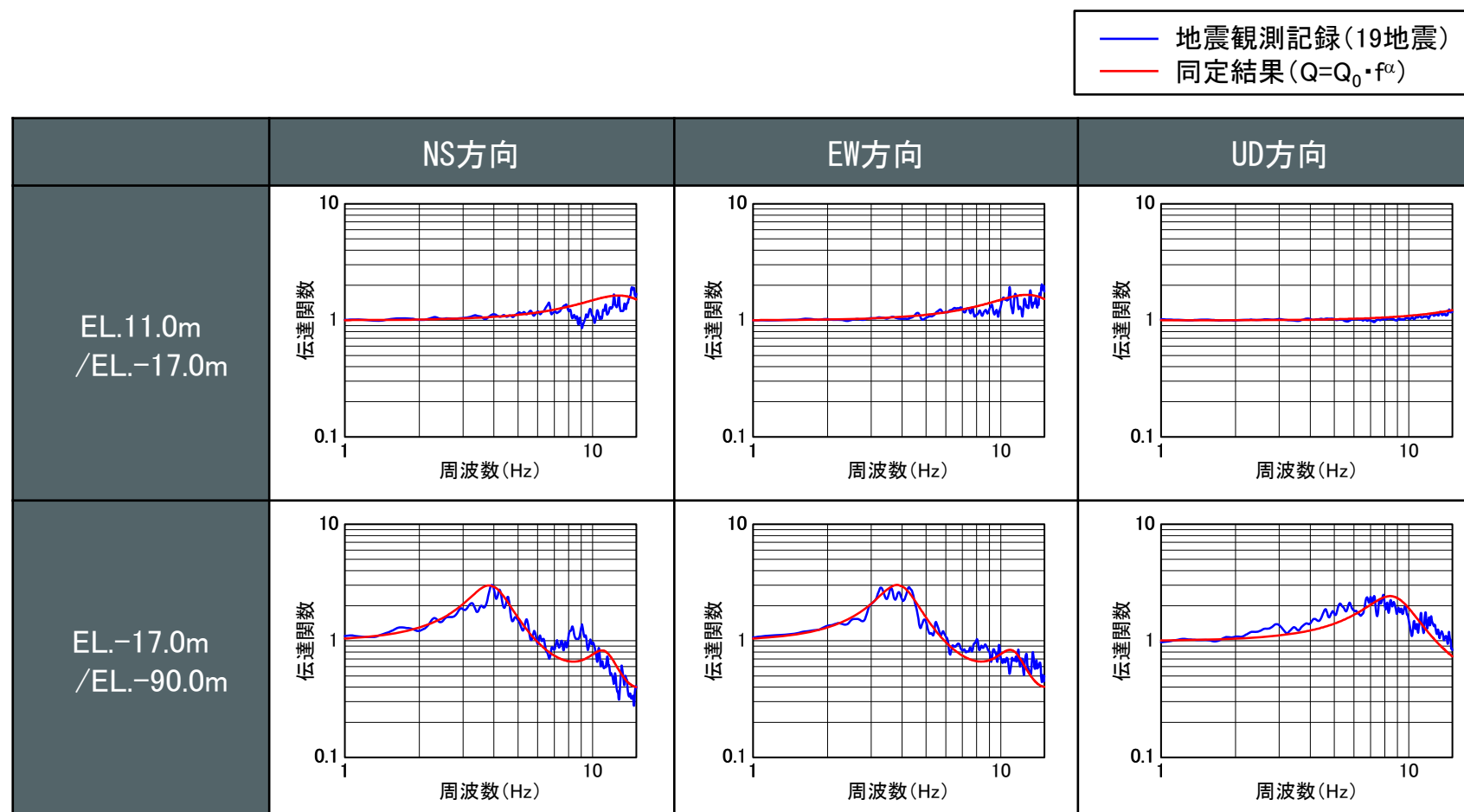
伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定における解析条件

項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） <ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰（Q値）を同定
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 同定結果の伝達関数と19地震の平均伝達関数を以下に示す。



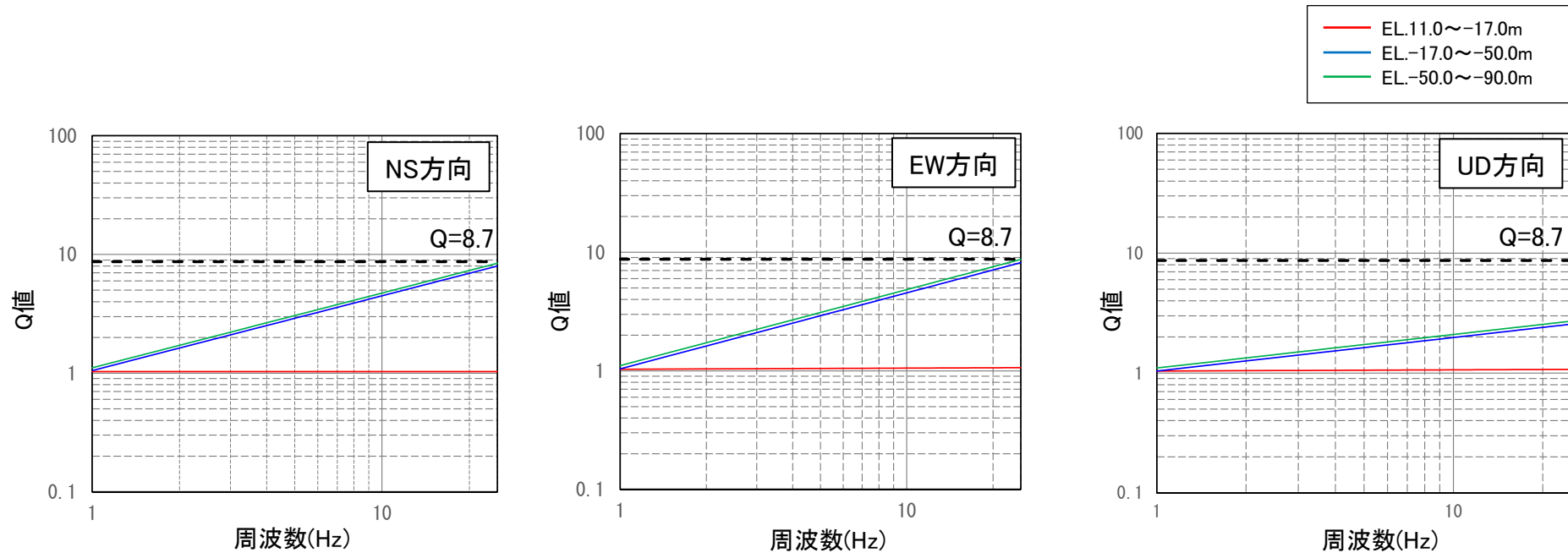
※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

※観測記録の伝達関数との整合性については、補足②に記載

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 伝達関数 (周波数依存型) により同定された地盤減衰 (Q値) の上限値は、 $Q=8.7$ 程度。



伝達関数 (周波数依存型) により同定された地盤減衰 (EL. 11.0m~EL. -90.0m)

同定結果による地盤減衰 (Q値)

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	減衰-NS		減衰-EW		減衰-UD	
				Q_0	α	Q_0	α	Q_0	α
11.0	2.35	1350	3000	1.03	0.00	1.03	0.01	1.04	0.01
-17.0	2.35	1350	3000	1.05	0.63	1.04	0.64	1.04	0.28
-50.0	2.35	1570	3440	1.11	0.63	1.11	0.64	1.10	0.28

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討

■ 既往知見の整理

- 地盤減衰 (Q値) の周波数依存性及び上限に関する知見は以下の通り。(参考②)

文献	概要
武村ほか(1993) ⁵⁾	<ul style="list-style-type: none">• Q値の周波数に対する単調増加の傾向 (周波数依存性) が見られる。• 高周波数側でのQ値の頭打ちが見られる。
福島・翠川(1994) ⁶⁾	<ul style="list-style-type: none">• 周波数帯域 (0.5Hz~5Hz) において周波数依存性を考慮したモデルの提案• 5Hz以上の高周波数帯域については、既往研究結果 (武村ほか(1993)⁵⁾ 等) を踏まえ、減衰定数を一定として設定
木下・大池(2002) ⁷⁾	<ul style="list-style-type: none">• 0.5~2Hzでは減衰定数が周波数とともに減少することを示している。• 一方で、2~16Hzにおいてほぼ一定の値となることを示している。
Fukushima et al. (2016) ⁸⁾	<ul style="list-style-type: none">• Q^{-1}値は約2~3Hzまでの振動数で減少するが、それより高い振動数ではほぼ一定になることを示している。
佐藤ほか(2006) ⁹⁾	<ul style="list-style-type: none">• 減衰定数がある周波数を境に、低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したモデルの提案がなされている。
佐藤(2012) ¹⁰⁾	<ul style="list-style-type: none">• バイリニア型周波数依存モデルを用いた評価から「10Hz付近での変移」の存在を明らかにしており、10~20Hzで周波数一定とすると既往の研究と調和的な結果• 低周波数側の減衰を、単純に高周波数側に拡張することはできないとする指摘 (Abercrombie(1998)¹¹⁾) とも整合している。

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 同定に用いる地震諸元及び解析条件

- 佐藤 (2012)¹⁰⁾ による、ある周波数を境に低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したバイリニア型周波数依存モデルを用いて伝達関数により地盤減衰 (Q値) を同定。

伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定における解析条件

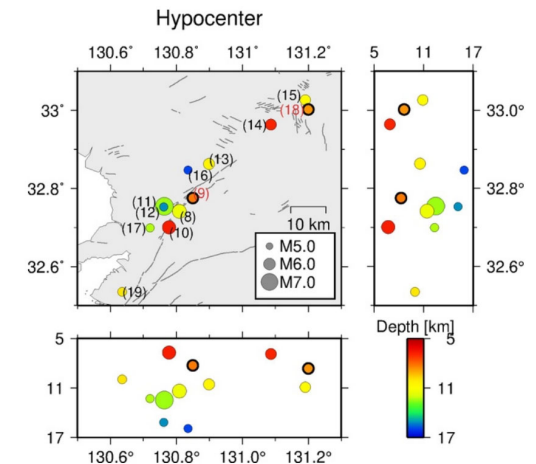
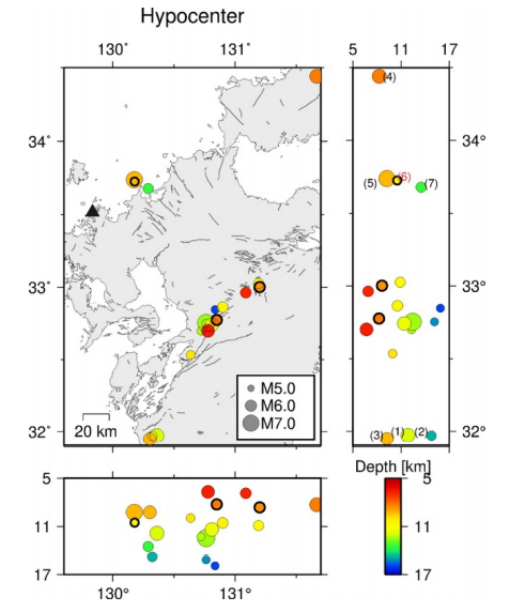
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震のうち、 <u>平均的な特徴を有する地震</u> ※1
対象地震数	3地震
ターゲットとする観測伝達関数	3地震の伝達関数 (Transverse成分) <ul style="list-style-type: none"> EL. 11.0m/EL. -17.0m EL. 11.0m/EL. -90.0m EL. -17.0m/EL. -90.0m S波を含む10秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、入射角、地盤減衰 (Q値) を同定
Q値	$Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha \quad (f < f_0)$ $Q(f)=Q_0 \quad (f \geq f_0)$

※1：19地震平均伝達関数と同様な傾向の伝達関数を有する地震を選定

※下線部は伝達関数 (周波数依存型) による同定における解析条件からの変更点

伝達関数 (バイリニア型) による地盤減衰の同定に用いた地震諸元 (計3地震)

地震名	発生日	M	震央距離(km)
熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126
熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140
九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39



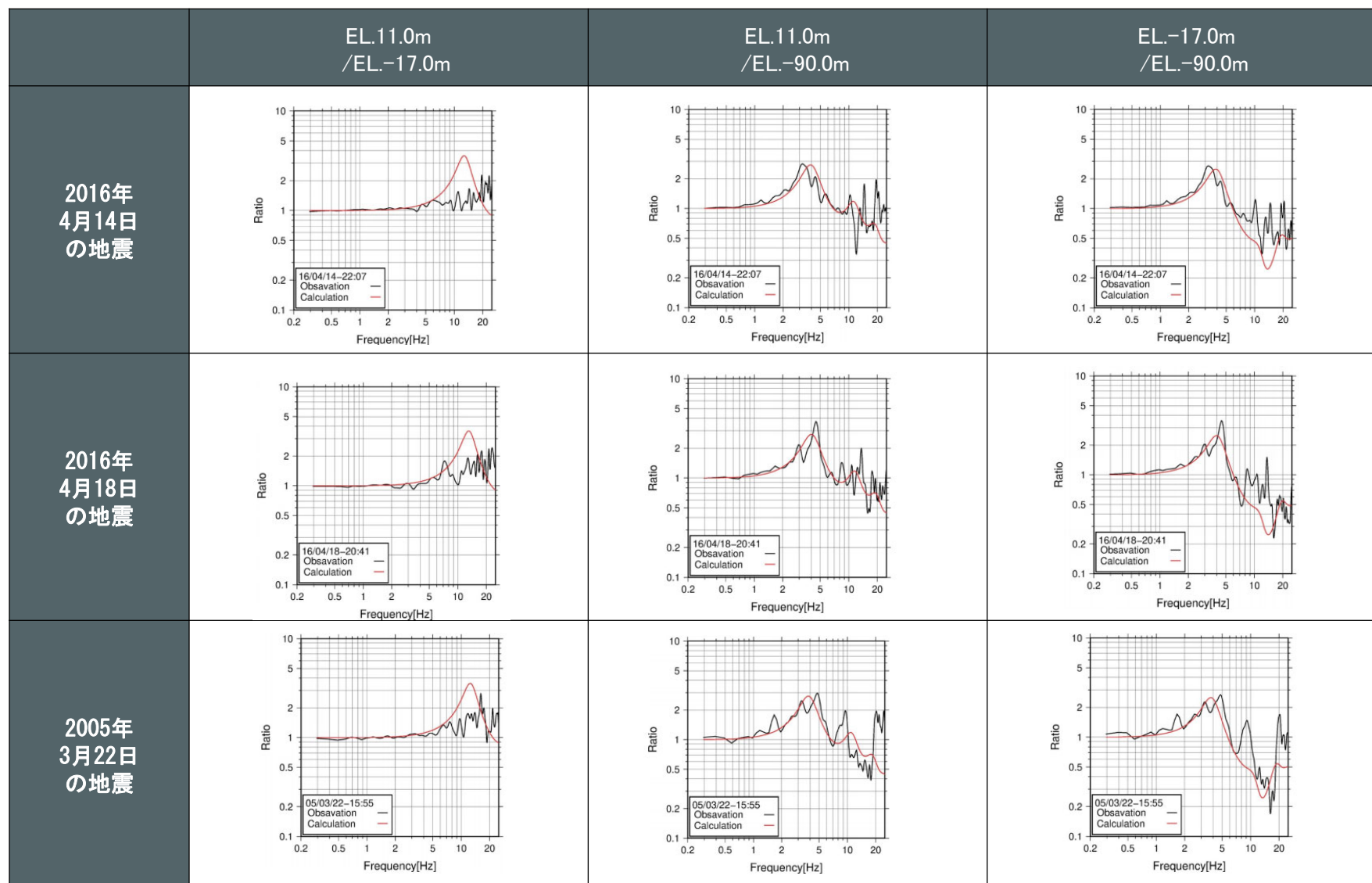
熊本付近(熊本地震)

伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定に用いた地震の震央位置(太枠、計3地震)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果 (Transverse成分)

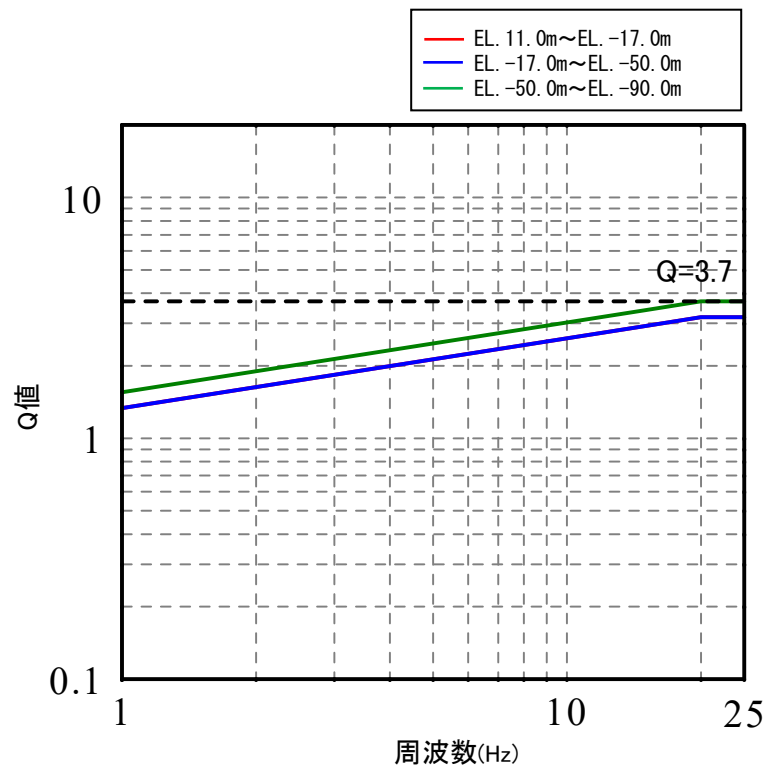
- 同定結果の伝達関数と観測記録の伝達関数を以下に示す。



2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 伝達関数 (バイリニア型) により同定された地盤減衰 (Q値) の上限値は、 $Q=3.7$ 程度。



伝達関数(バイリニア型)により同定された
地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	減衰-TR		
				Q_0	α	f_0
11.0	2.35	1350	3000	1.34	0.29	19.98
-17.0	2.35	1350	3000	1.34	0.29	19.98
-50.0	2.35	1570	3440	1.56	0.29	19.98

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

c. 地震波干渉法による検討

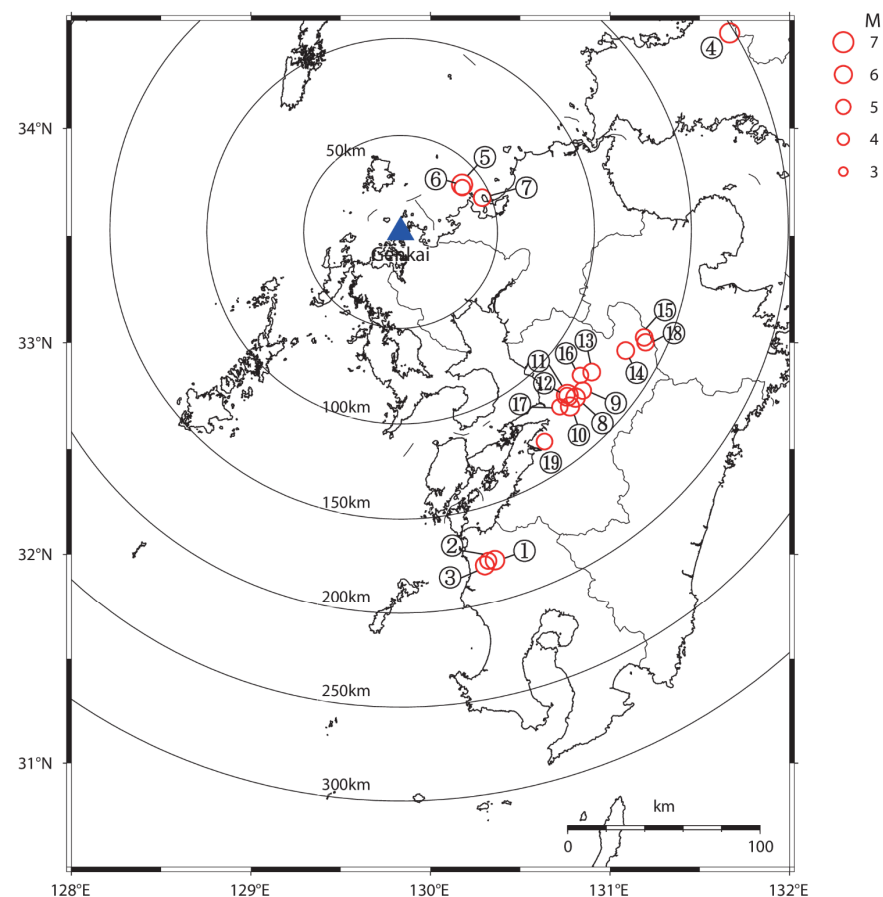
■ 同定に用いる地震諸元

- 地震波干渉法による地盤減衰 (Q値) の推定は、伝達関数 (周波数依存型) による検討と同様の観点※で計19地震の観測記録を対象として実施。

※ Noda et al. (2002)²⁾ の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震を選定

地震波干渉法による地盤減衰の
同定に用いた地震諸元 (計19地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23



地震波干渉法による地盤減衰の
同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

■ 同定における解析条件

- 地震波干渉法により地盤減衰の同定を行う。解析条件は以下の通り。

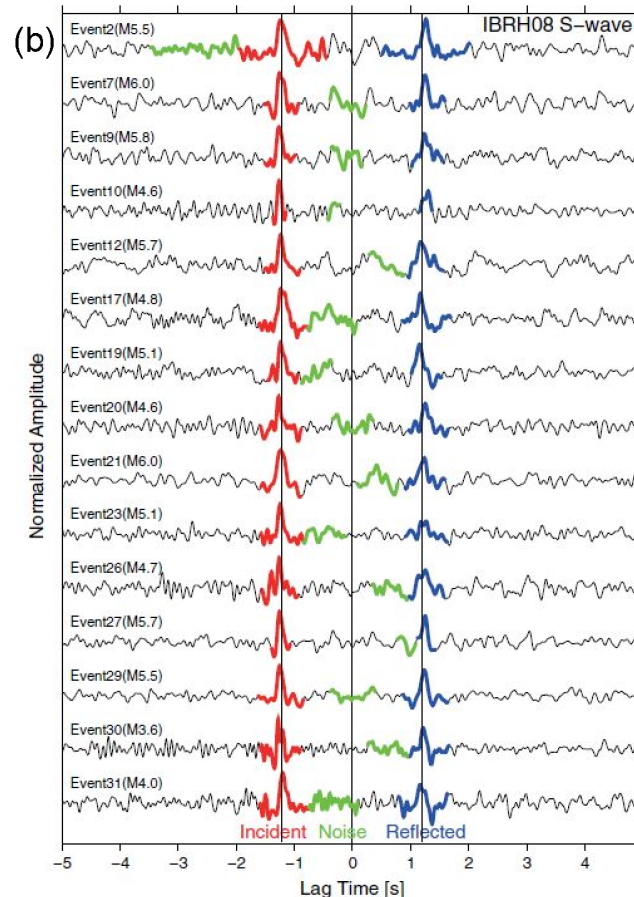
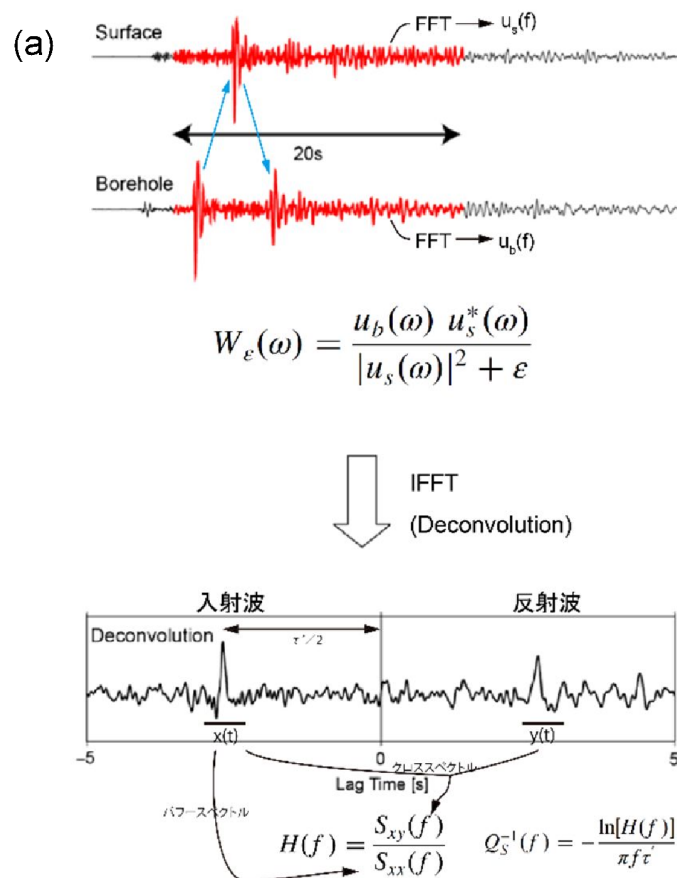
地震波干渉法による地盤減衰の同定における解析条件

項目		条件
デコンボリューション	対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
	対象地震数	19地震
	解析成分	Transverse成分
	解析区間	S波を含む20秒
	テーパー	コサインテーパー（両端に1秒）
Q値推定	対象地震の選定条件	スタックしたデコンボリューション波形と一致度が高い（ $C^* > 8$ ）地震
	対象地震数	16地震
	解析区間	ピーク時間 × 2
	スムージング	対数型Parzenウィンドウ Band幅は中心周波数fに対して $f/1.3 \sim 1.3f$

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の推定方法

- 既許可時審査以降の最新の技術的知見として、地震波干渉法^{8), 12)}により、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から地盤減衰 (Q値) を直接推定。
- 地中の地震観測記録には、鉛直下方から入射された波動が地表で反射し、反射波が記録されるため、地表の観測記録に対して地中記録をデコンボリューションすると、入射波 (負側) と反射波 (正側) が分離。
- 複数の地震観測記録をスタックしたデコンボリューション波形を用いて、入射波に対する反射波の振幅の比率に基づき、地盤減衰 (Q値) を推定。

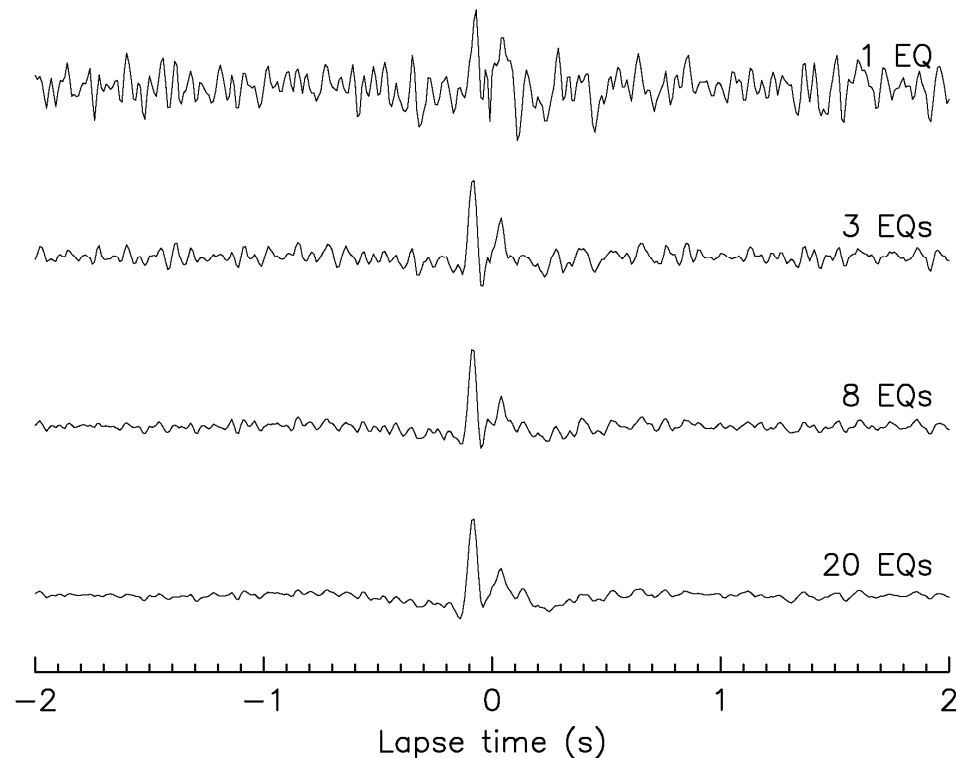


Fukushima et al.(2016)⁸⁾より抜粋

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の推定精度

- デコンボリューション波形を精度よく求めるためには、多くの地震観測記録のデコンボリューション波形をスタックする必要がある。
 - スタックする地震観測記録が多くなると、ノイズが除去され、シグナルが明瞭になる。
 - スタックする地震観測記録が少なく、シグナルが不明瞭なデコンボリューション波形を用いると、地盤減衰 (Q値) を適切に推定できない。



地震観測記録数によるデコンボリューション波形の違い

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ GOFによる波形の抽出方法

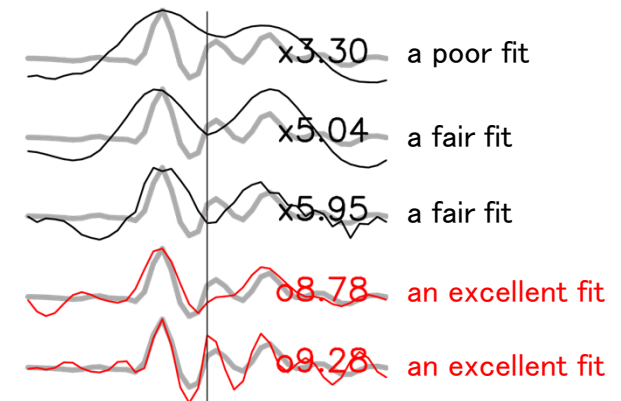
- 対象とした19地震の観測記録から、Anderson(2004)¹³⁾による指標 (GOF : Goodness Of Fit) に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形の一致度が高いものを抽出。
 - Anderson(2004)¹³⁾では、2つの波形の一致度などを表す適合度指標を提案。
 - これらのうち2つの波形の相関を表す指標 (GOF) として、コヒーレンスを10倍した値を採用し、その値に応じた以下の適合度が示されている。

a poor fit : ~4	a good fit : 6~8
a fair fit : 4~6	an excellent fit : 8~
- 本検討では、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形のGOFを求め、an excellent fit (8~) の波形を抽出。

2つの波形の相関を表す指標 (GOF)

Number	Symbol	Name: Similarity of	Definition ¹
C10	C*	Cross Correlation	$C^* = 10 \max[C(a_1(t), a_2(t)), 0]$ where $C(a_1, a_2) = \frac{\int a_1(t)a_2(t)dt}{\left[\int a_1^2(t)dt\right]^{1/2} \left[\int a_2^2(t)dt\right]^{1/2}}$

Anderson(2004)¹³⁾より抜粋

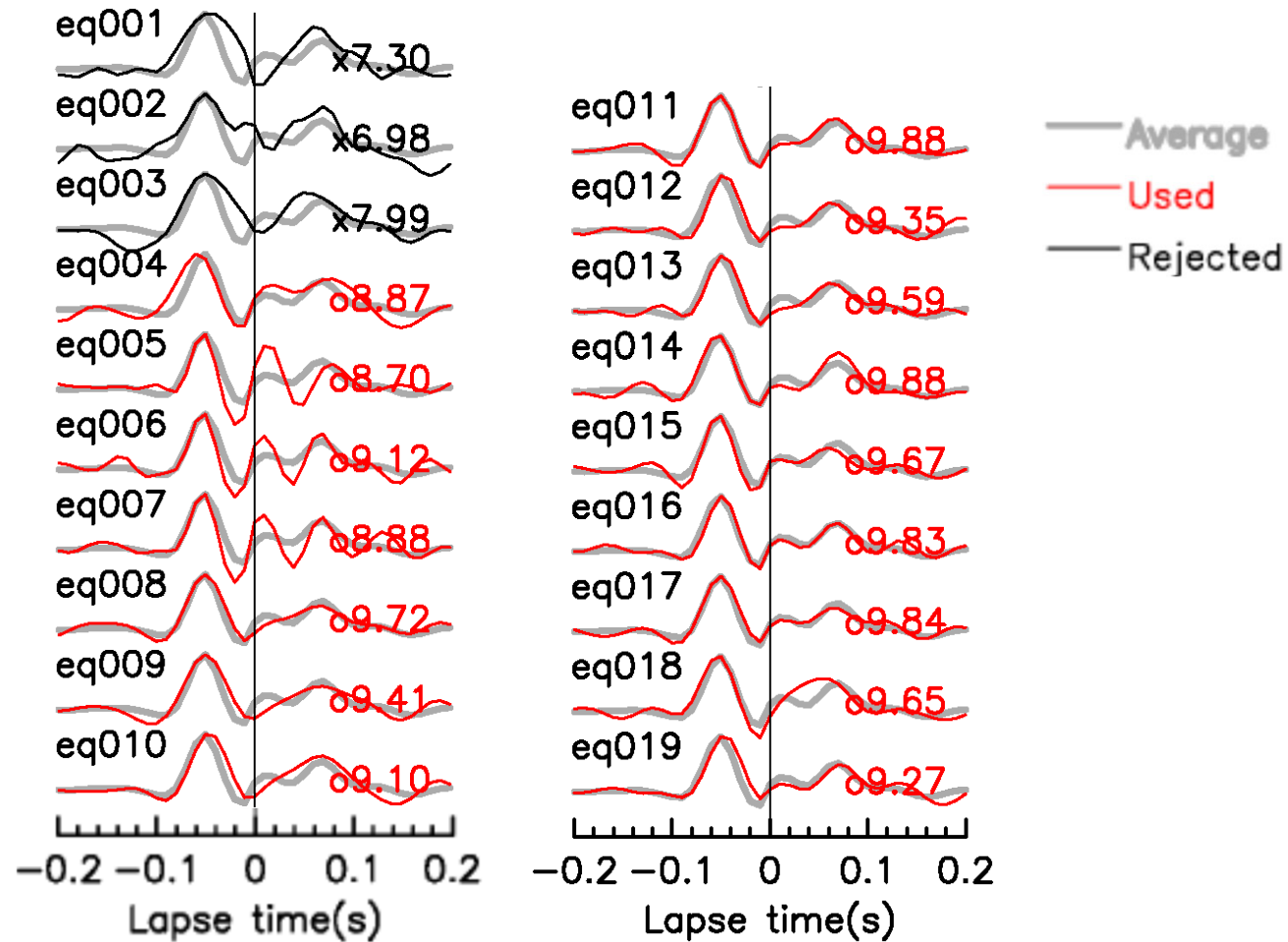


GOFの例
(赤線を抽出、黒線を除外)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ GOFによる波形の抽出結果

- Anderson (2004)¹³⁾の指標に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震の波形の一致度が高い16地震の波形を抽出。

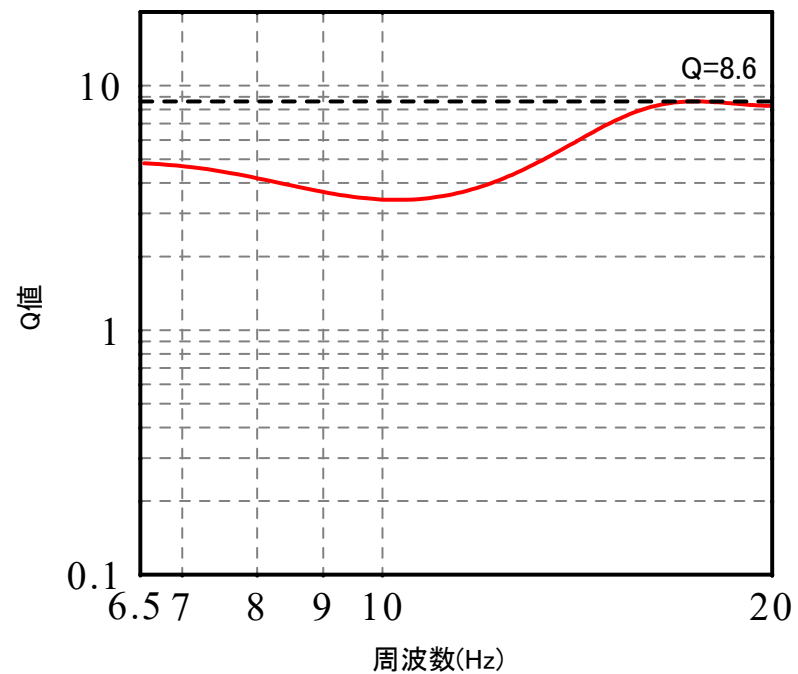


スタックした波形と各地震の波形の相関

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果

- 地震波干渉法により推定された地盤減衰 (Q値) の上限値は $Q=8.6$ 程度。



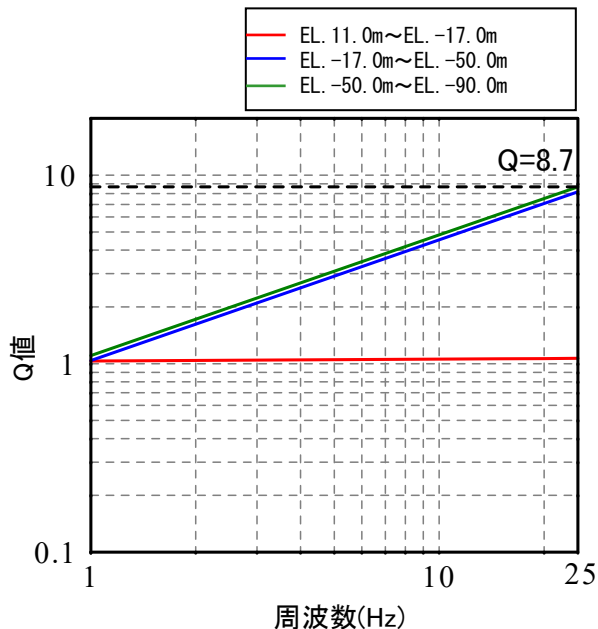
地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

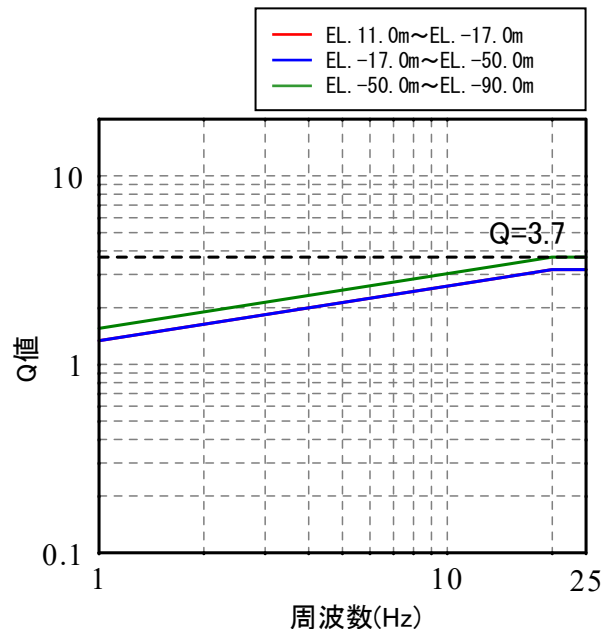
■ 複数の手法による検討結果を踏まえた地盤減衰 (Q値)

- 地盤減衰 (Q値) の検討における解析に含まれる不確かさについては、複数の手法による多面的な検討を実施することにより考慮。
- 地盤減衰 (Q値) は、地震観測記録に基づき検討を実施。地震は自然現象であり、これまでに取得している地震観測記録は限られていることから、不確かさを考慮し、周波数に依存せず、保守的に $Q=12.5$ とする。
- なお、鉛直方向のQ値は、29頁に示した通り、水平方向に比べ小さい傾向であるが、水平方向及び鉛直方向ともに同一のQ値としており、水平方向に比べ十分な保守性を有している。

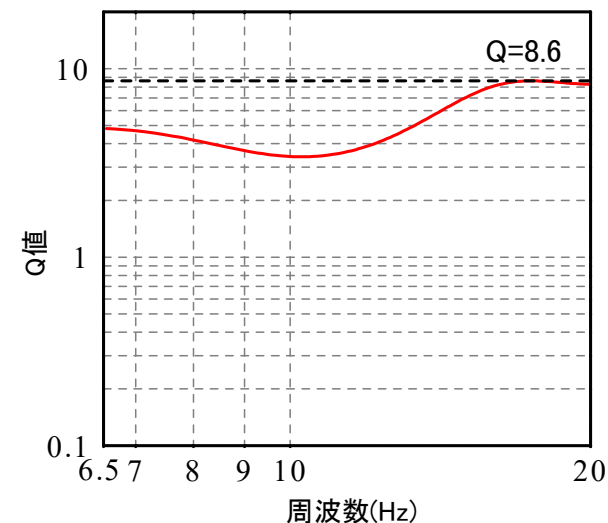
検討手法	伝達関数による検討 (周波数依存型)	伝達関数による検討 (バイリニア型)	地震波干渉法による検討
検討結果 (上限値)	Q=8.7程度	Q=3.7程度	Q=8.6程度



伝達関数(周波数依存型)により同定された地盤減衰(EW:EL.11.0m~EL.-90.0m)



伝達関数(バイリニア型)により同定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)



地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

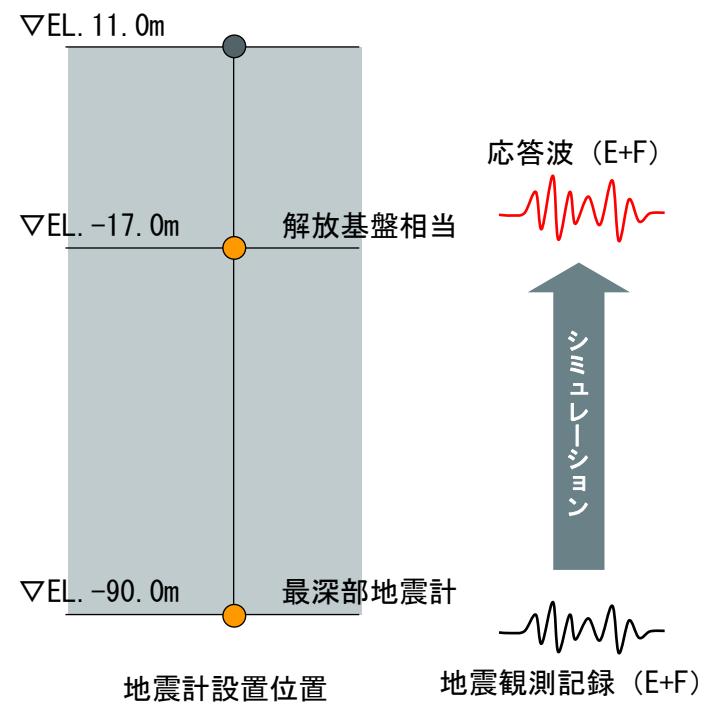
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

(2) 地盤減衰 (Q値) の確認

a. 応答スペクトルによる地盤減衰 (Q値) の確認

- 最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録を入力※とし、1次元波動論に基づき、推定した応答波 (EL. -17.0m) ※の応答スペクトルと同位置の地震計で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施し、地盤減衰 ($Q=12.5$) について以下の点を確認した。(43~52頁参照)
 - 伝達関数 (周波数依存型) の同定結果による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等。
 - $Q=12.5$ の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。

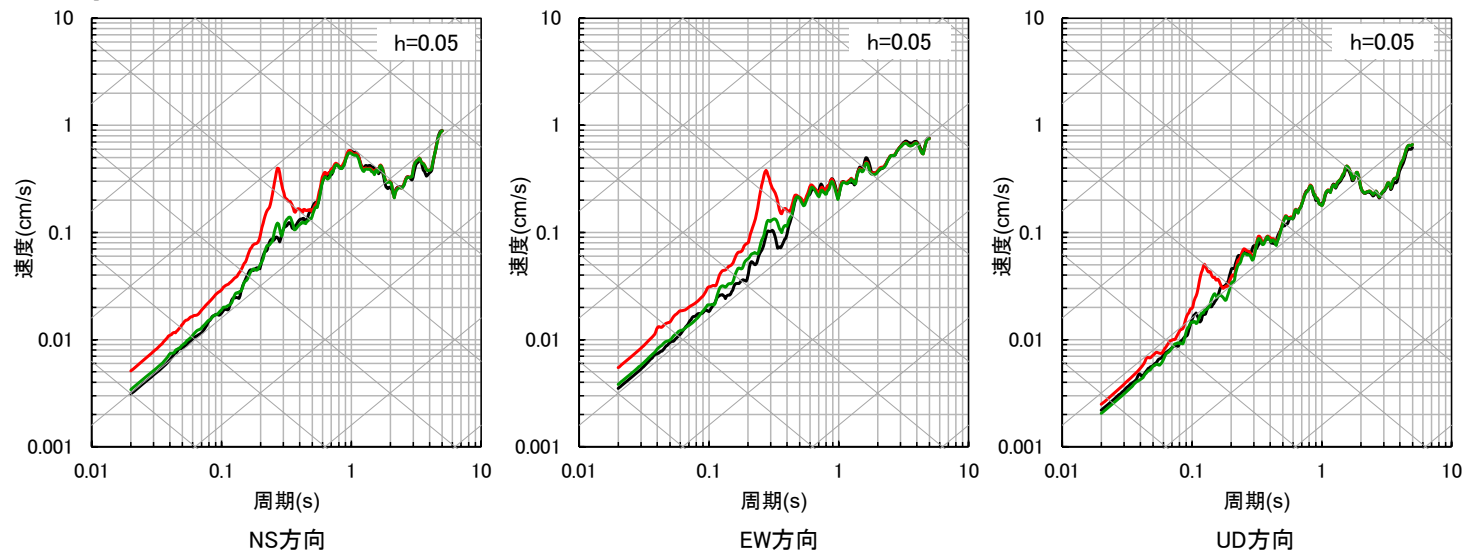
※入力の最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当 (EL. -17.0m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価



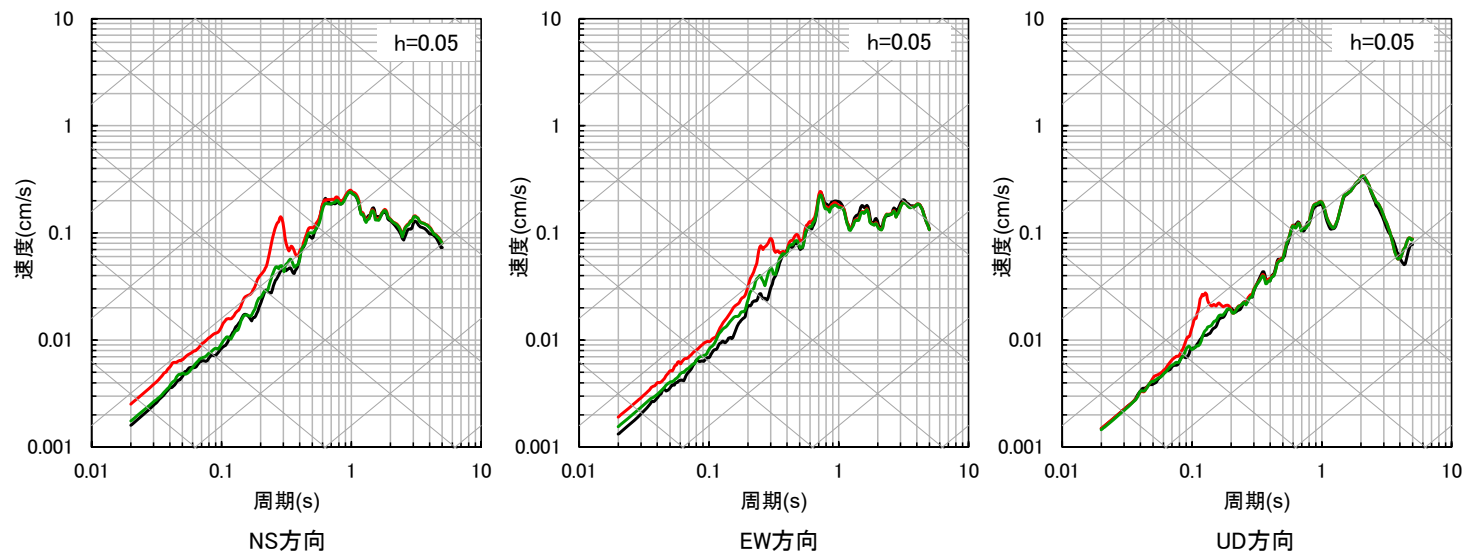
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



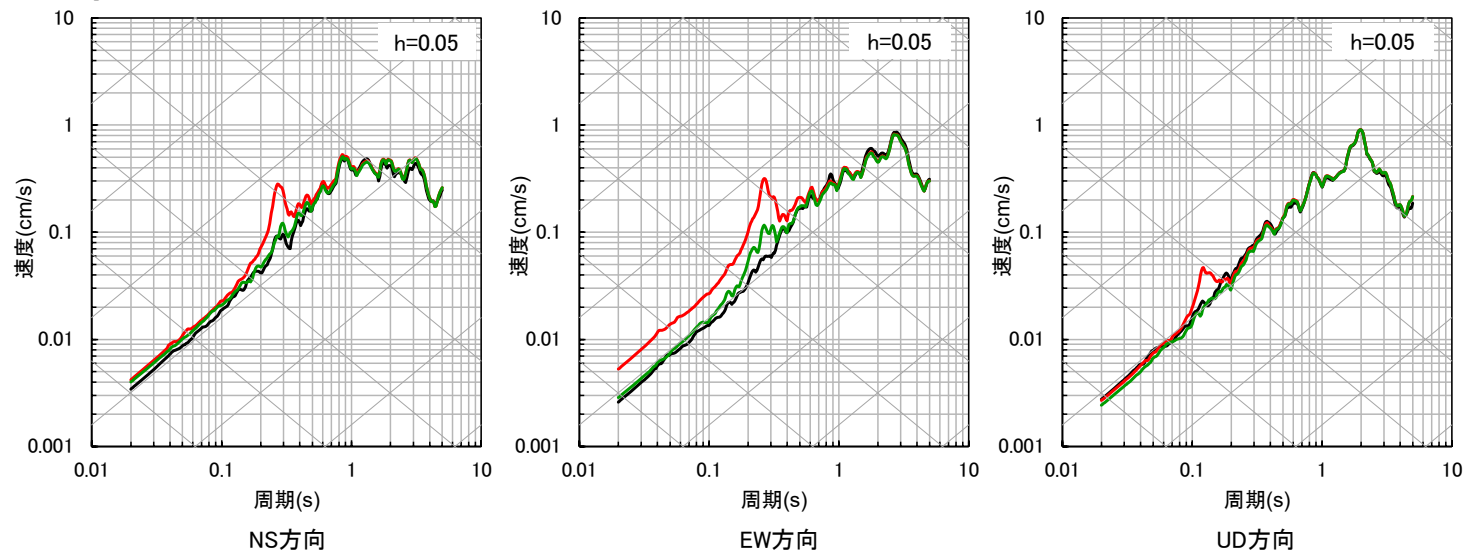
② 鹿児島県北西部



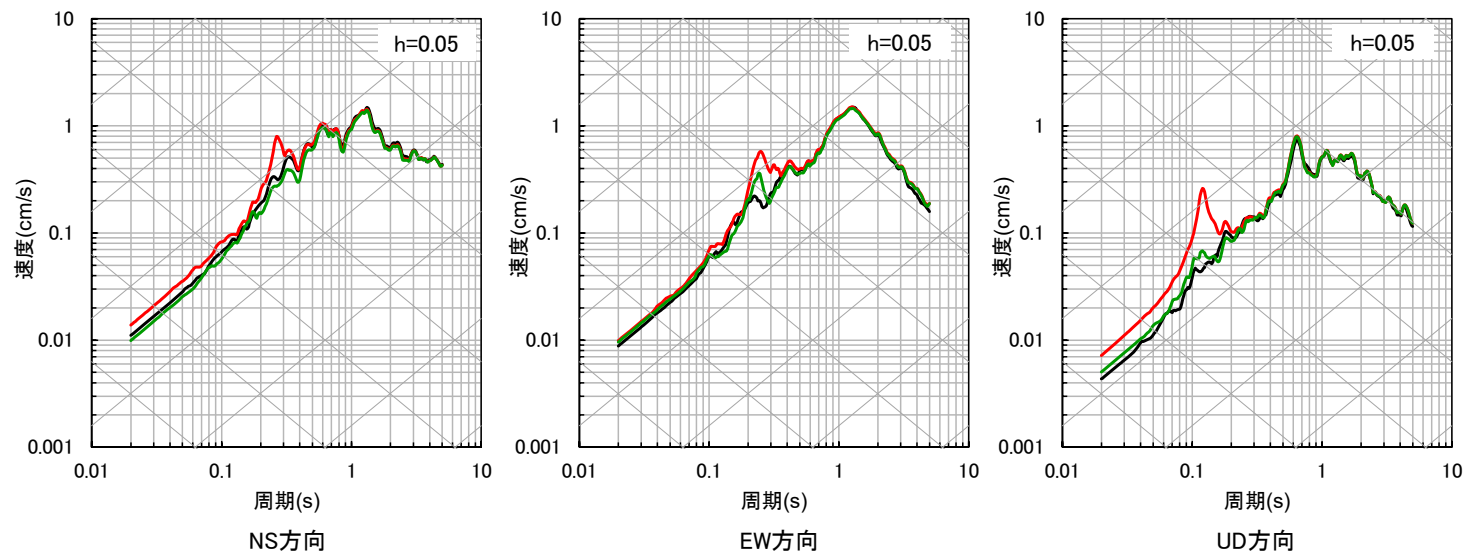
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



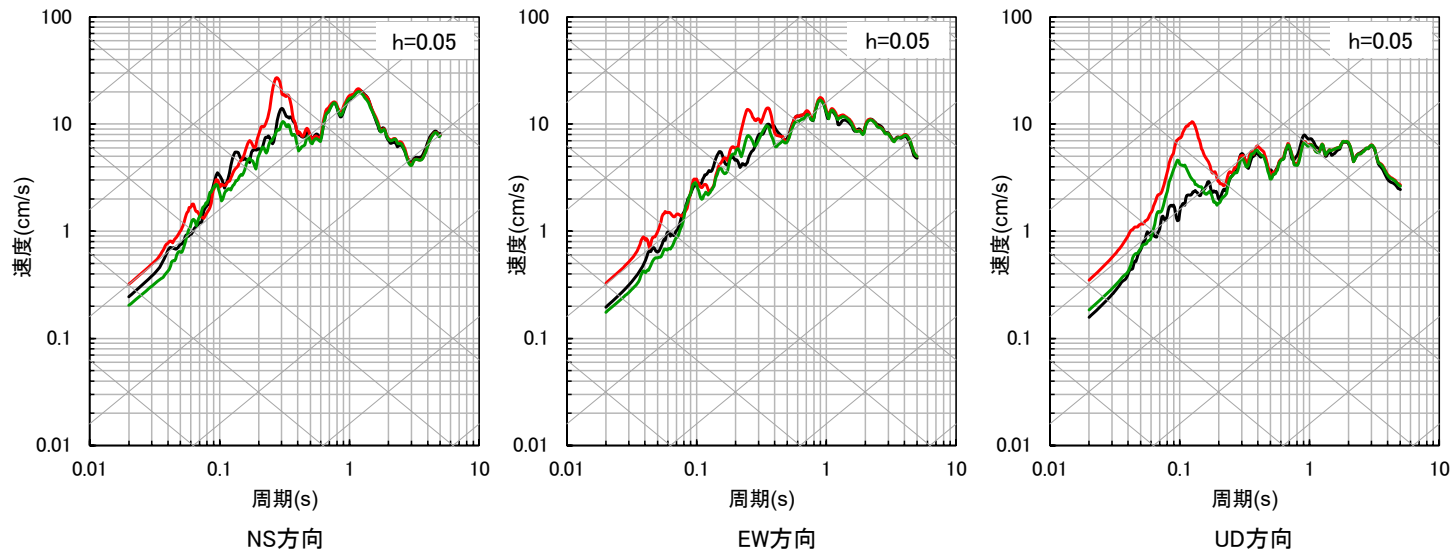
④ 山口県



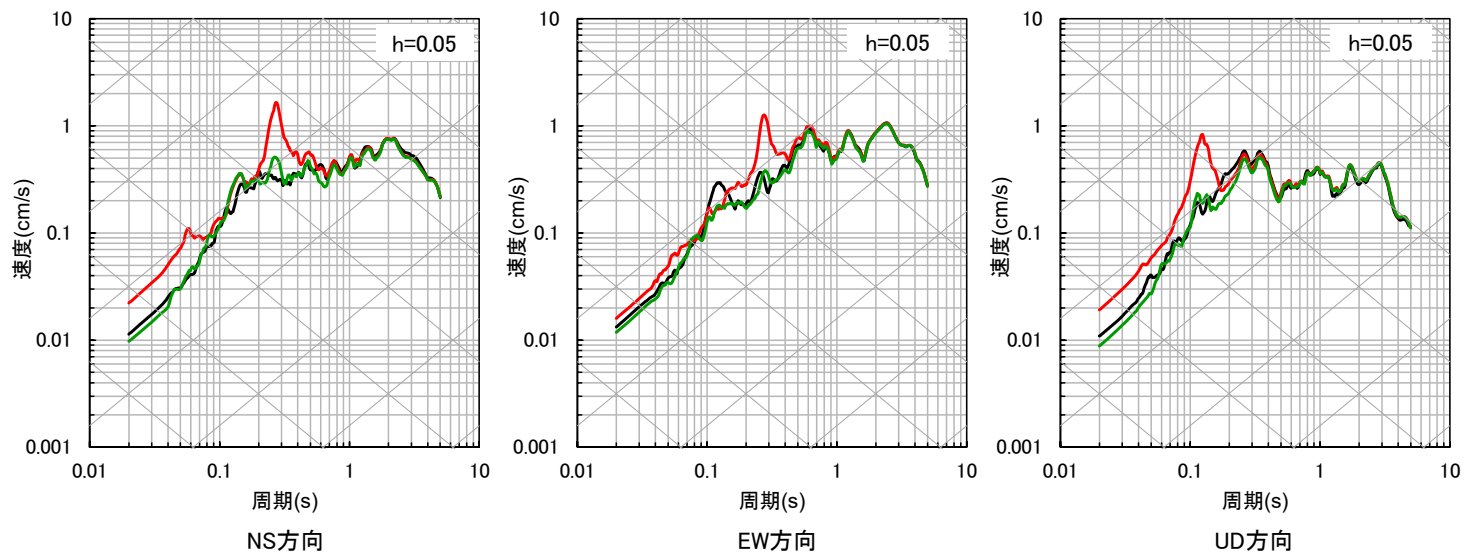
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



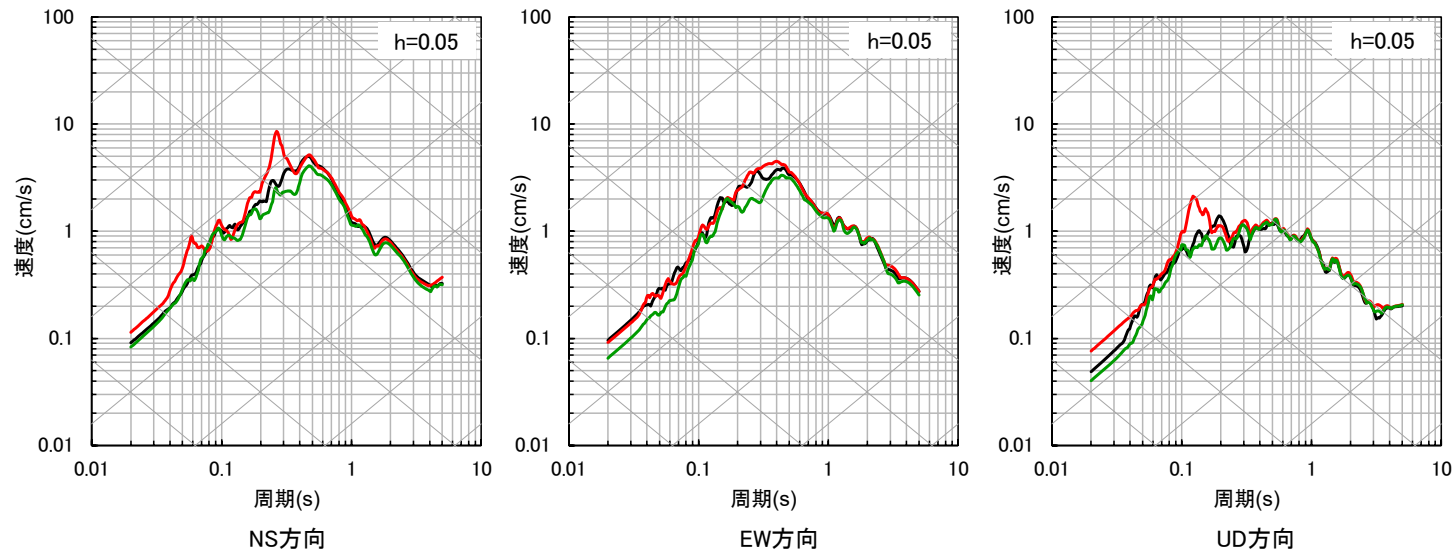
⑥九州北西沖



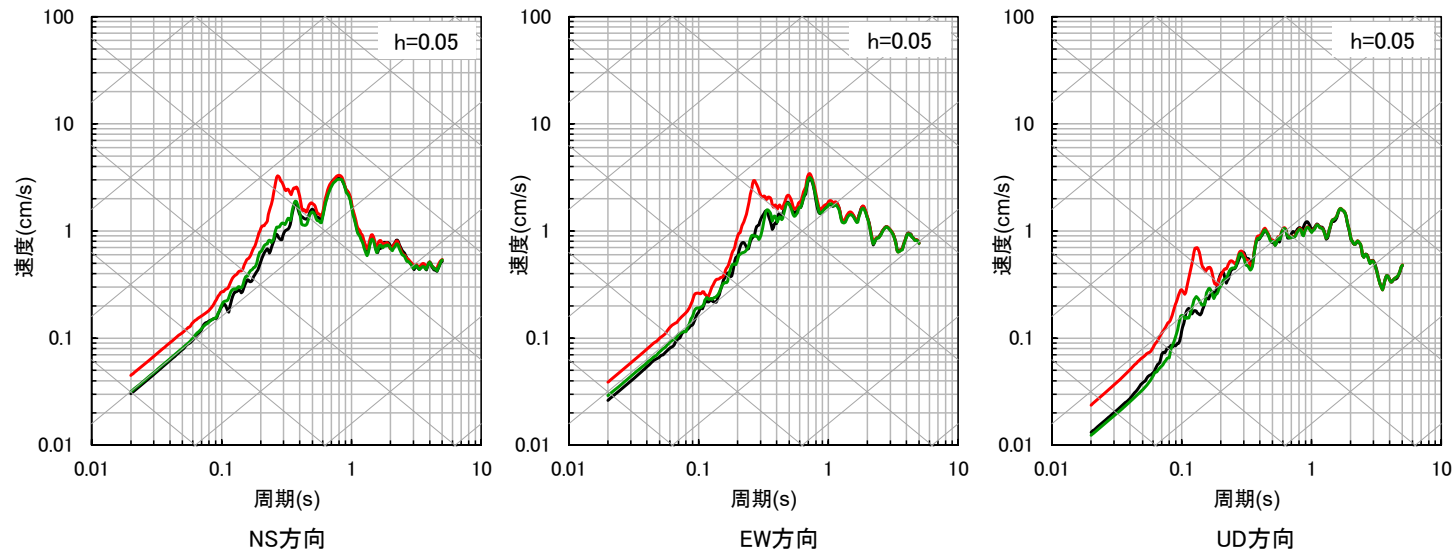
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



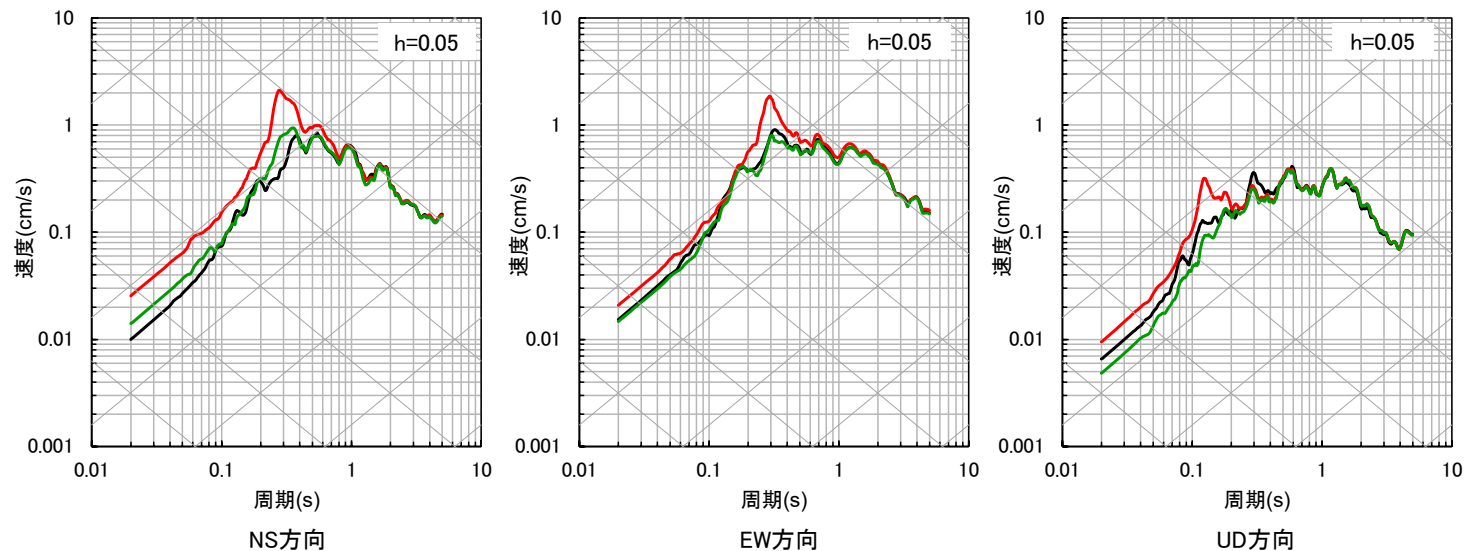
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



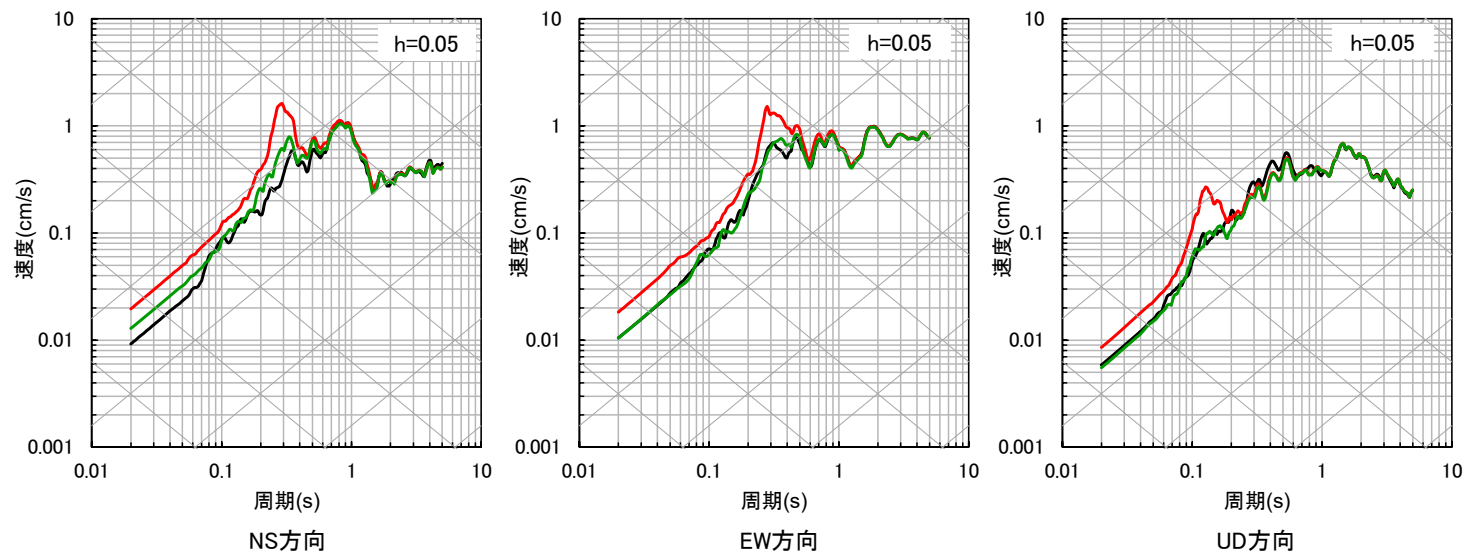
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



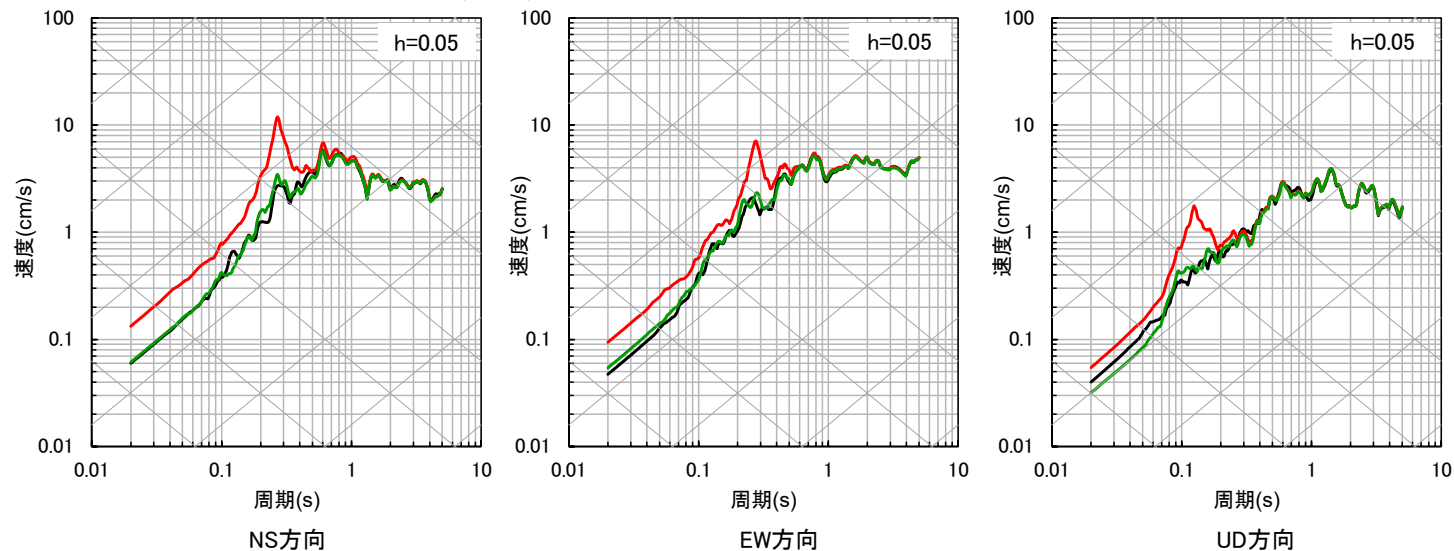
⑩ 熊本県熊本地方



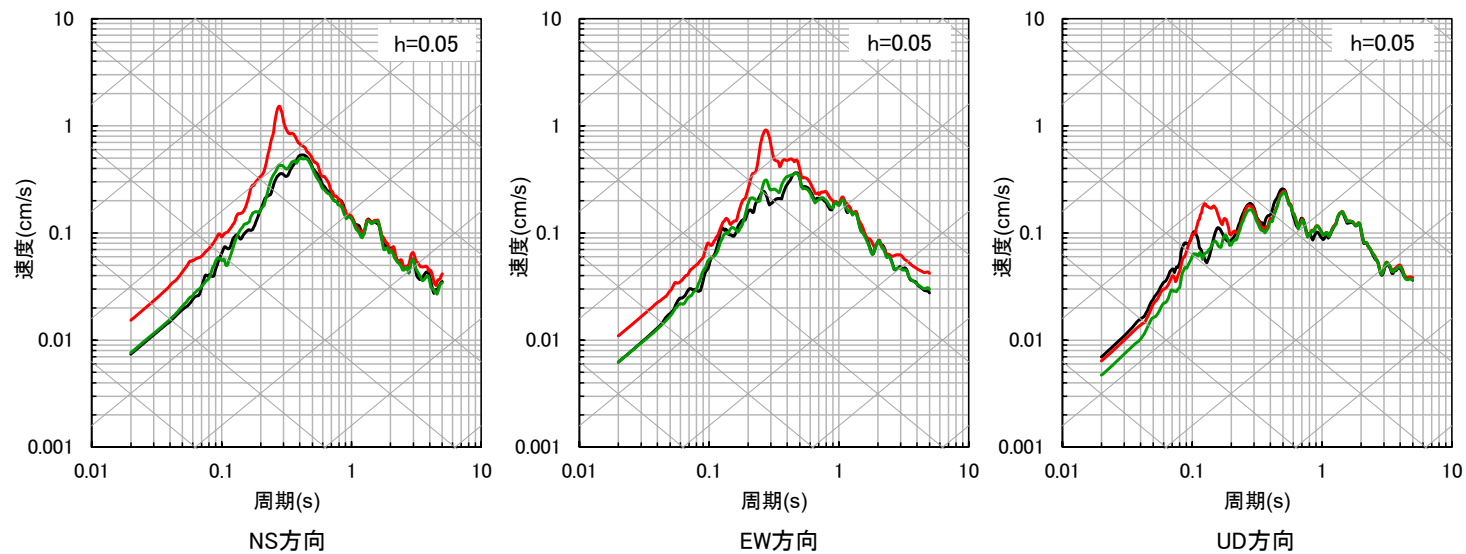
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



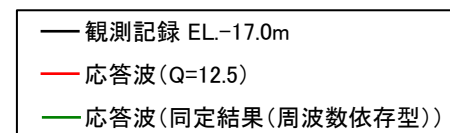
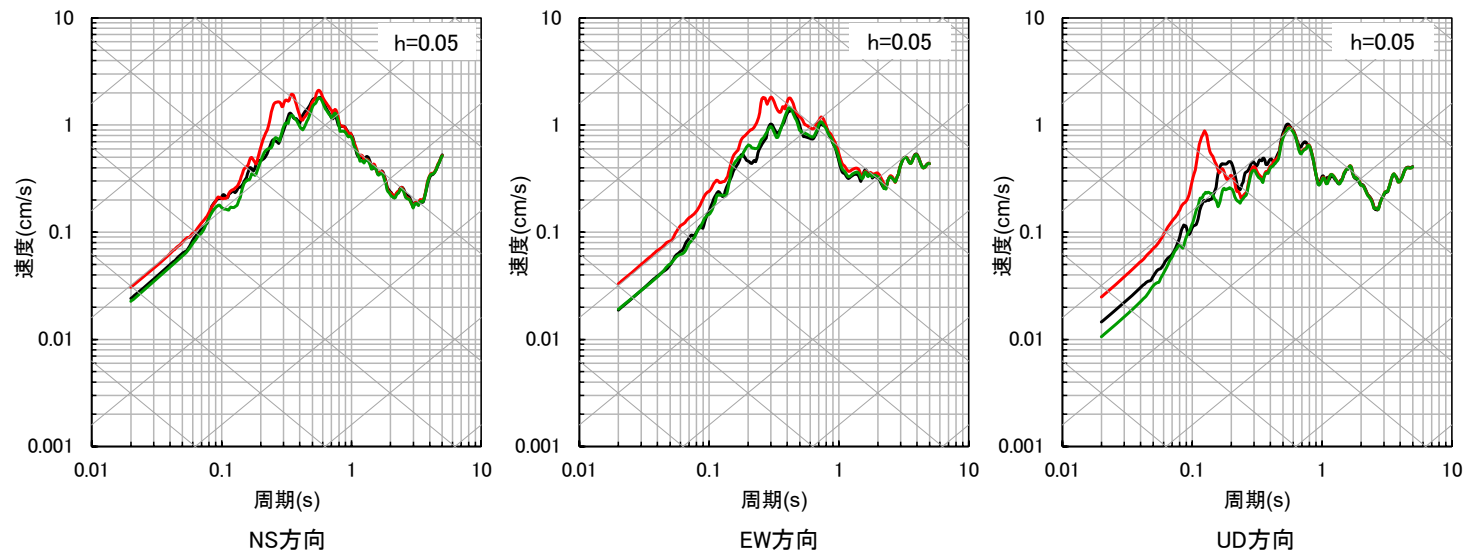
⑫ 熊本県熊本地方



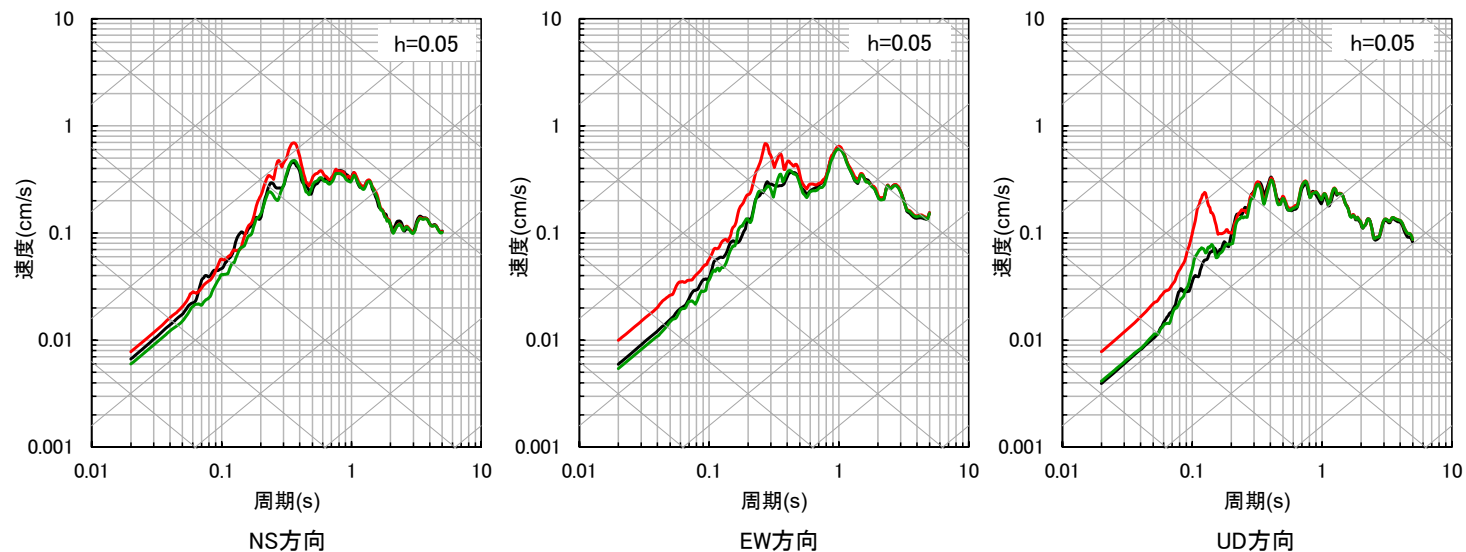
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



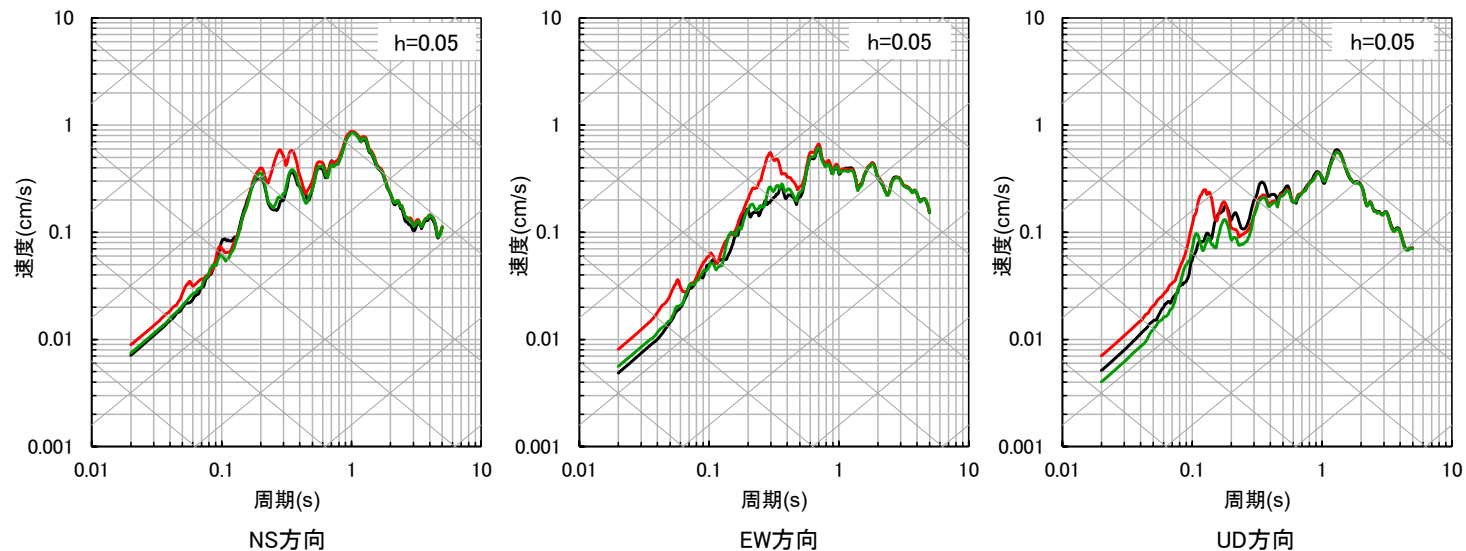
⑭ 熊本県阿蘇地方



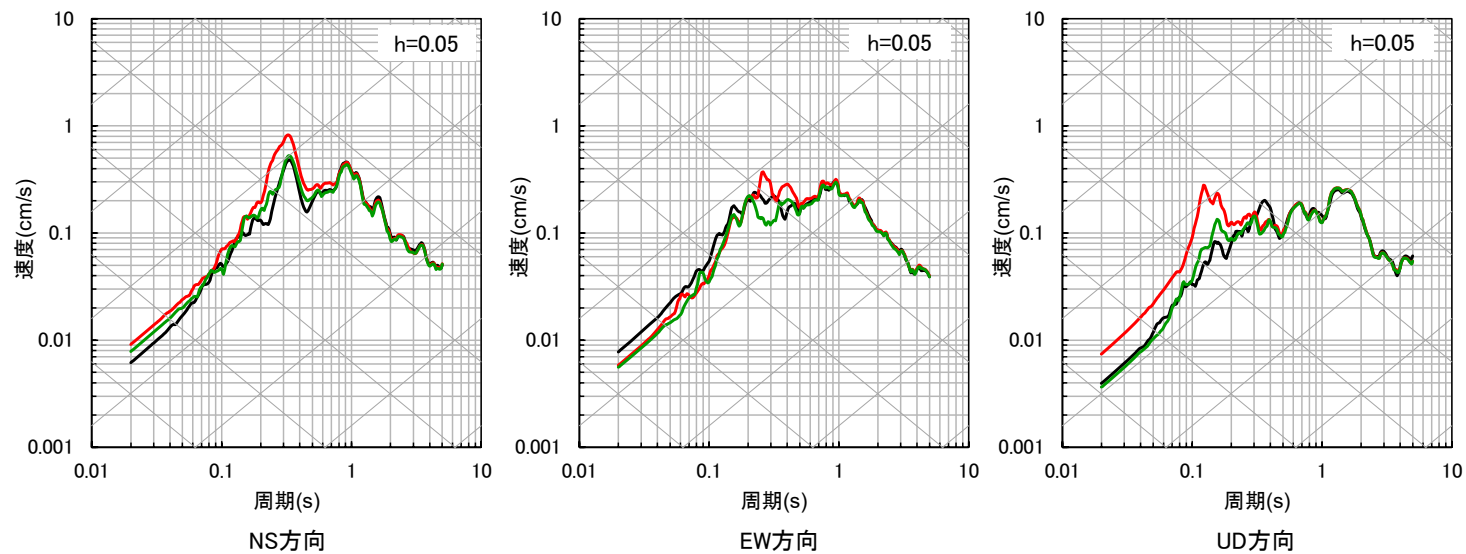
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



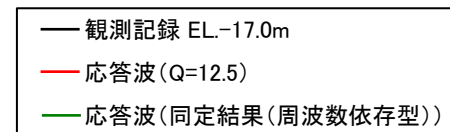
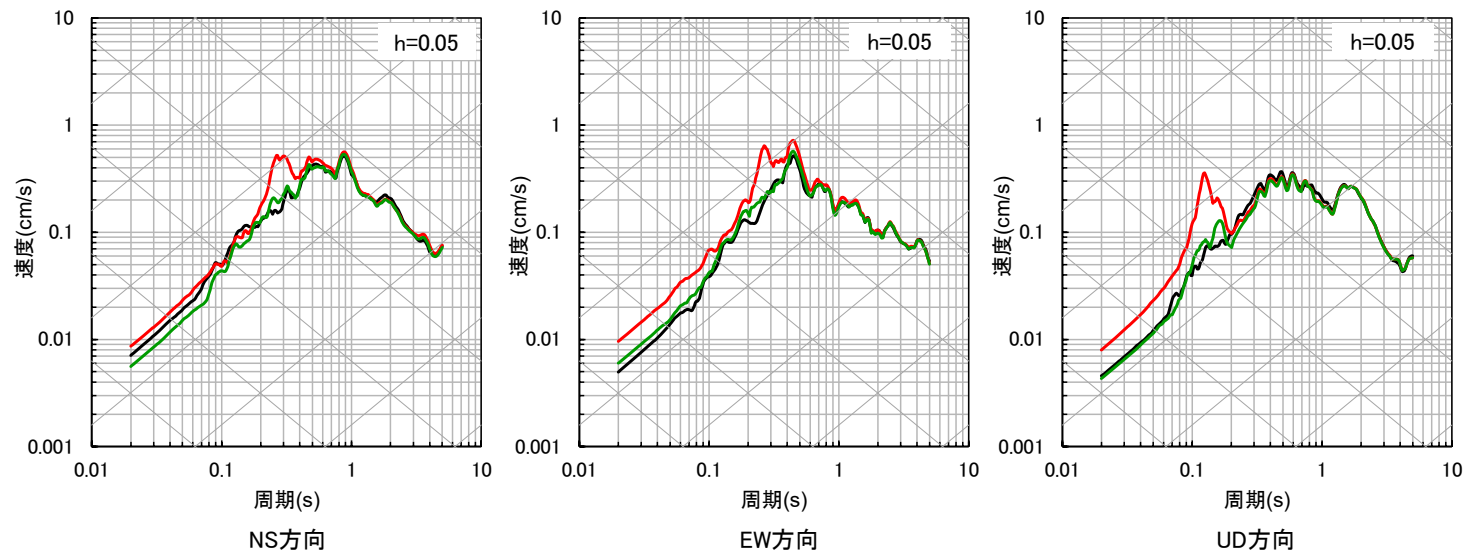
⑯ 熊本県熊本地方



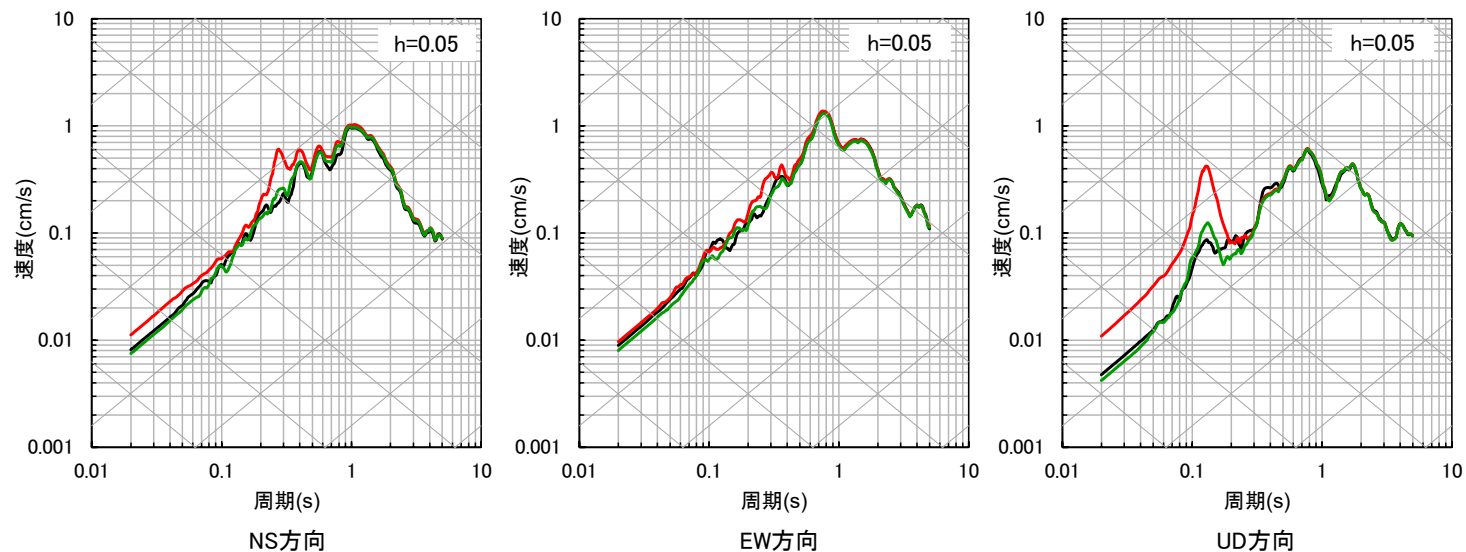
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



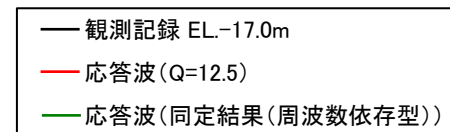
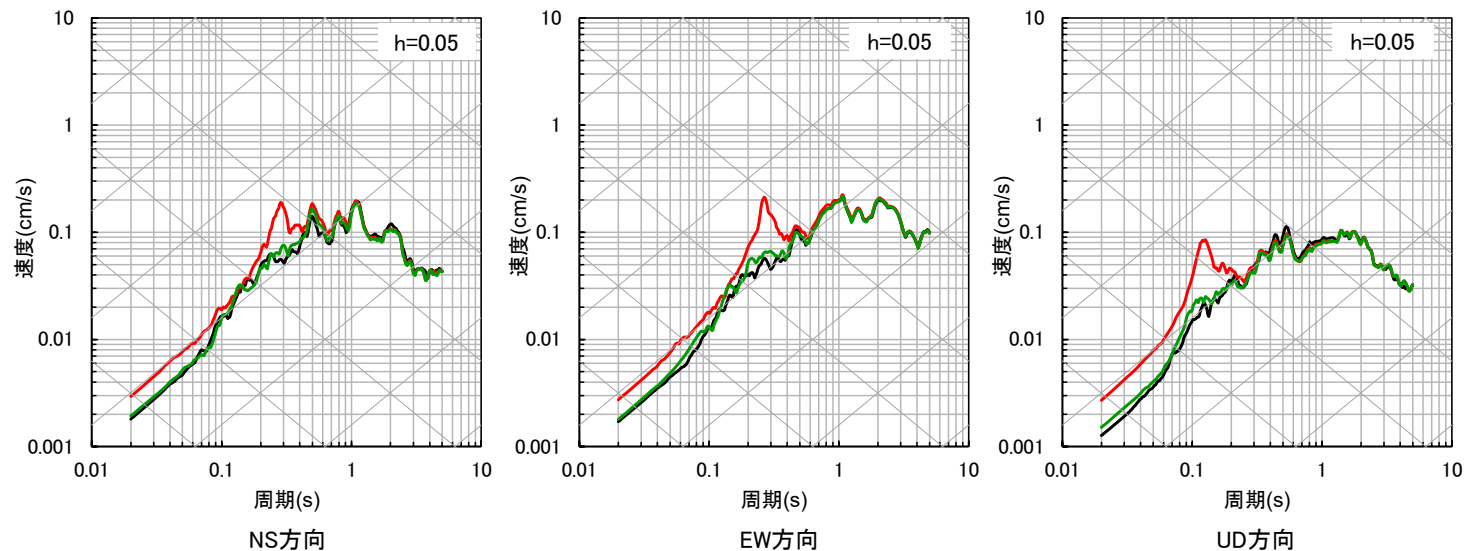
⑱ 熊本県阿蘇地方



2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

①9 熊本県熊本地方



2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

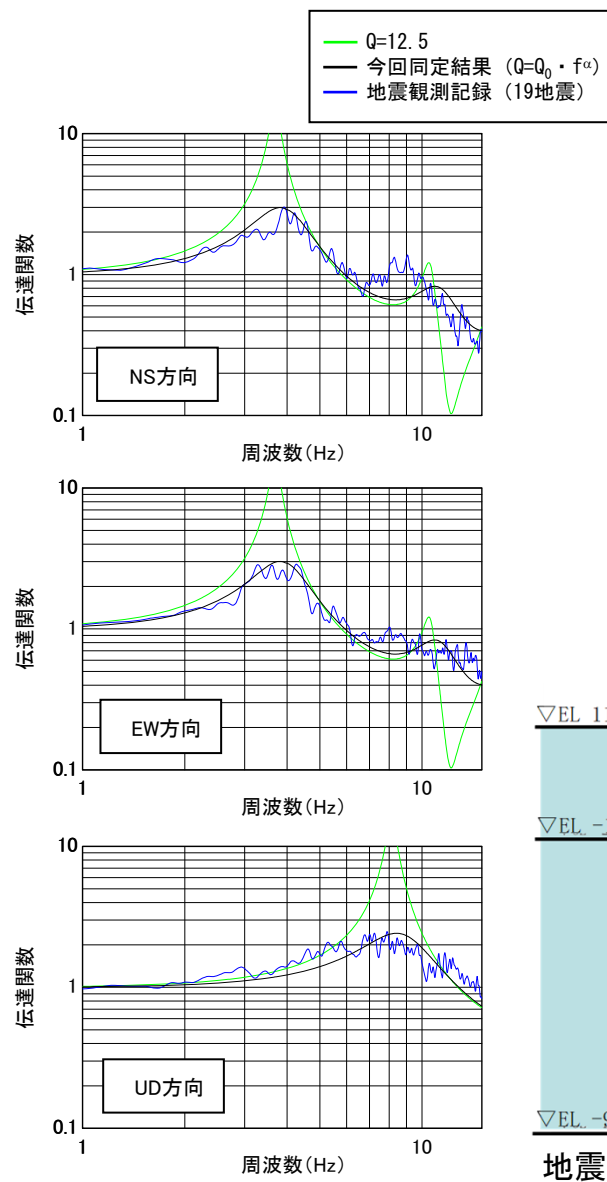
b. 伝達関数による地盤減衰 (Q値) の確認

- 地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数と伝達関数 (周波数依存型) により同定した地盤減衰による理論伝達関数との比較を実施。
- その結果、地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数のほうが卓越周波数において大きなピークを有することを確認した。

地下構造モデル (Q=12.5)

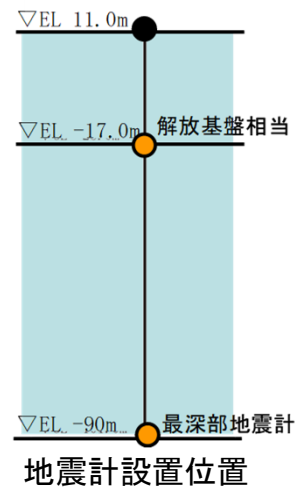
EL. (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
11m	2.35	1350	3000	12.5
-15m	2.35	1350	3000	12.5
-50m	2.35	1570	3440	12.5
-100m				

※解放基盤表面 (EL. -15m) 上に層を追加



伝達関数の比較
(EL. -17.0m/EL. -90.0m)

※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング



地震計設置位置

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

(3) 地盤減衰（Q値）の設定

- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討により、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性の向上が見込まれるため、地盤減衰（Q値）を対象に評価を実施した。
- 地盤減衰（Q値）は、周波数依存が認められ、高周波数になるほどQ値が増加する性質やある周波数で上限が存在する性質を踏まえたQ値の関数モデルに速度構造を加えた地下構造モデルを用い、伝達関数による検討を実施した。
- 伝達関数による検討に加え、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から地盤減衰（Q値）を直接推定可能な地震波干渉法による検討も実施した。
- 上記検討で得られた地盤減衰（Q値）を基に、これまでに取得している地震観測記録は限られていることの不確かさを考慮し、周波数に依存せず、保守的に $Q=12.5$ とした。
- 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）について、最深部地震計の観測記録と解放基盤相当における観測記録を用いて、応答スペクトルによる確認及び伝達関数による確認を実施した。

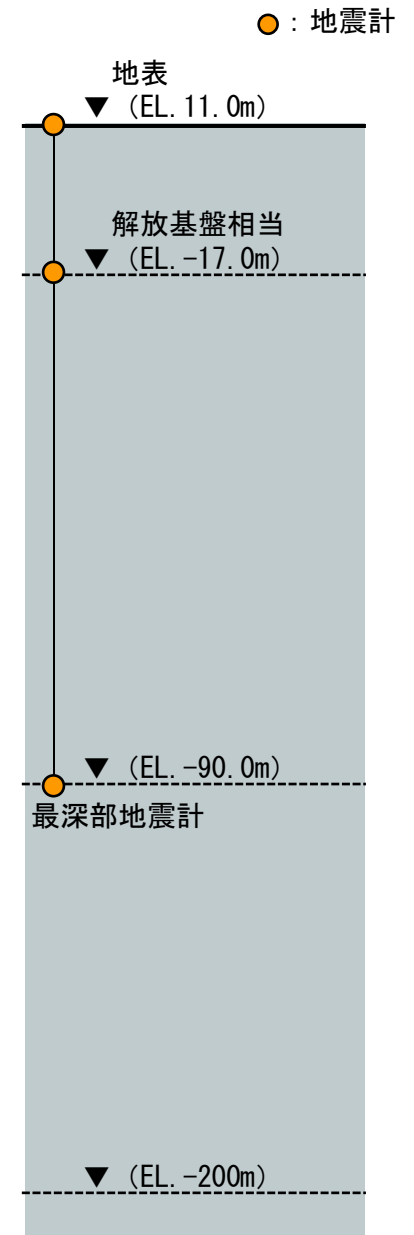


- 上記の検討・確認を踏まえ、地盤減衰（Q値）は、保守的に $Q=12.5$ と設定する。

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

(1) 地盤減衰（Q値）の検討

- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）について、以下の通り、多面的な検討を実施。
 - a. 速度層断面による検討：
 - ・ 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、既存の速度層断面が得られている。
 - ・ 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認する。
 - b. ボーリング孔内減衰測定による検討：
 - ・ ボーリング孔内における減衰測定により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を測定する。
 - ・ ボーリング孔内測定による減衰が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認する。
- 複数の手法による検討結果を踏まえて、地盤減衰（Q値）を検討。



2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

a. 速度層断面による検討

- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）について、速度層断面を基に検討を実施する。

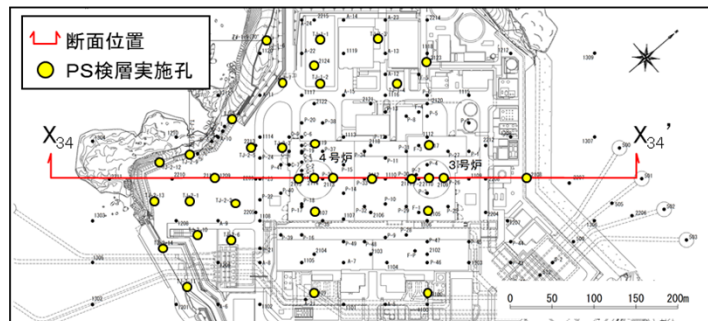
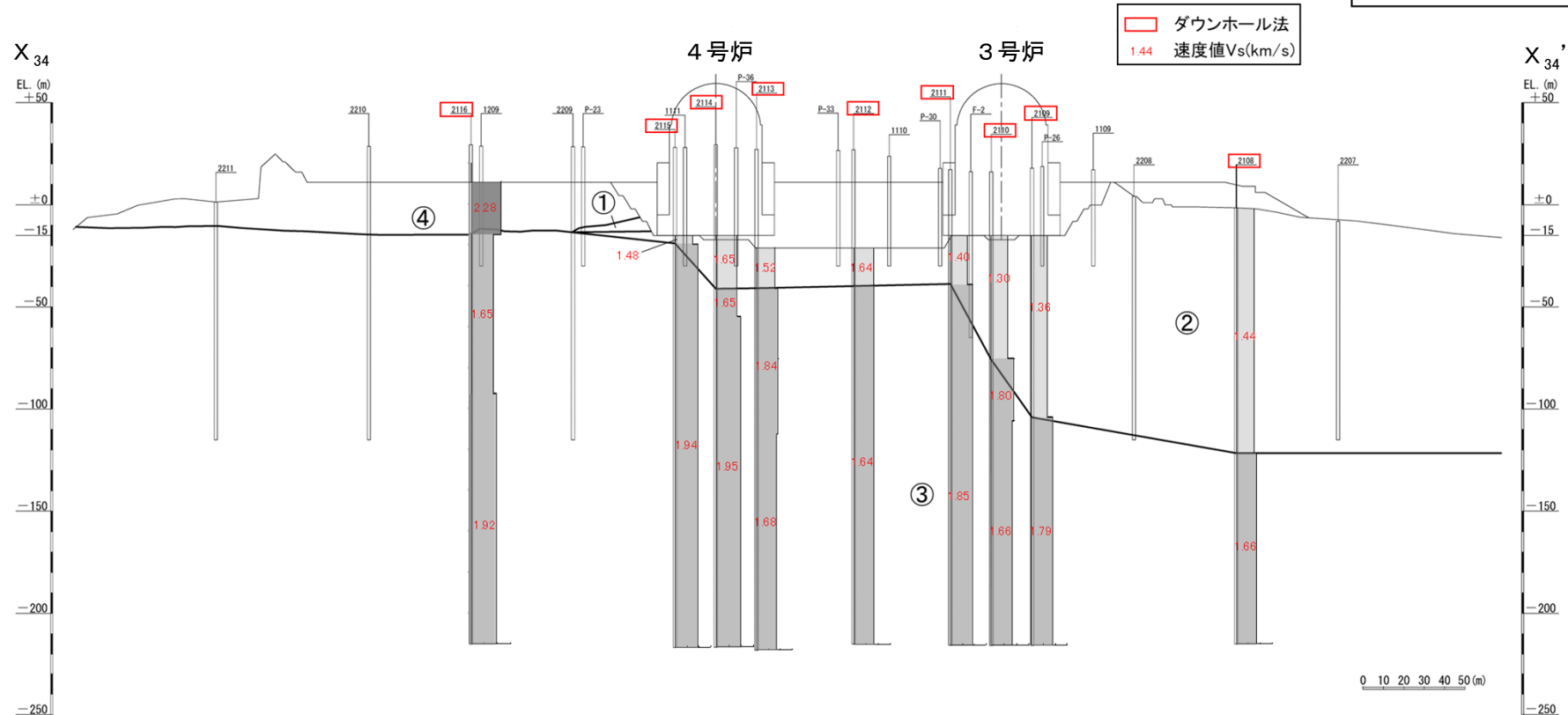


- 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面では、解放基盤表面からEL. -200mまでは概ね②、③速度層に分類されており、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。（57～59頁参照）

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

第402回
審査会合資料
(一部修正※)

速度構造について (X₃₄-X_{34'} 断面) (S波速度)

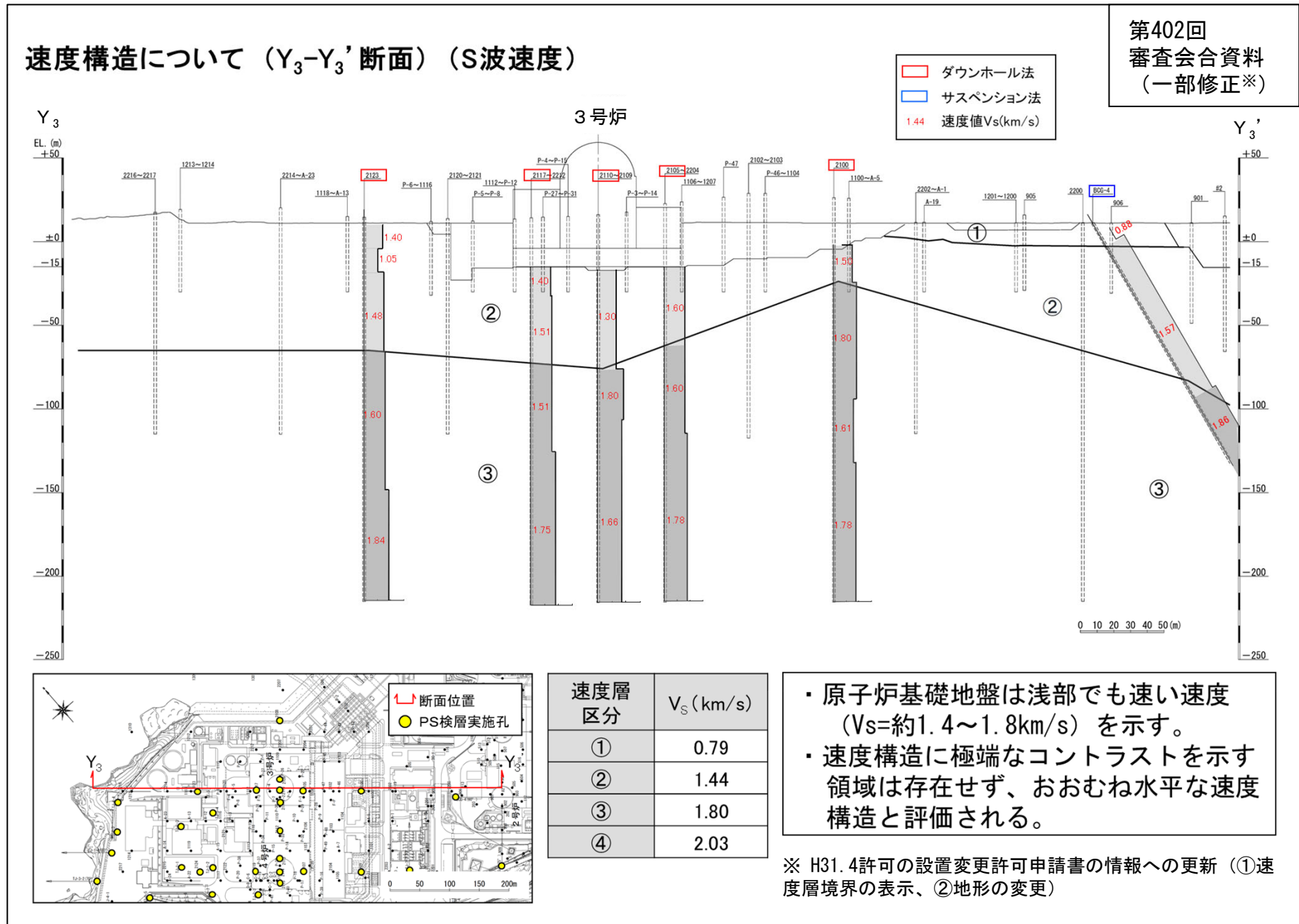


速度層区分	V _S (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (V_s=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①速度層境界の表示、②地形の変更)

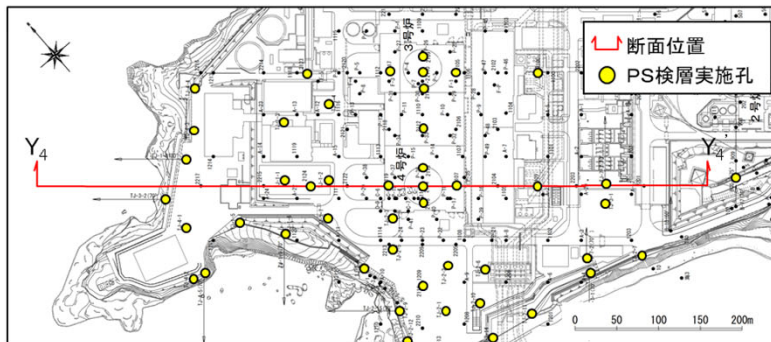
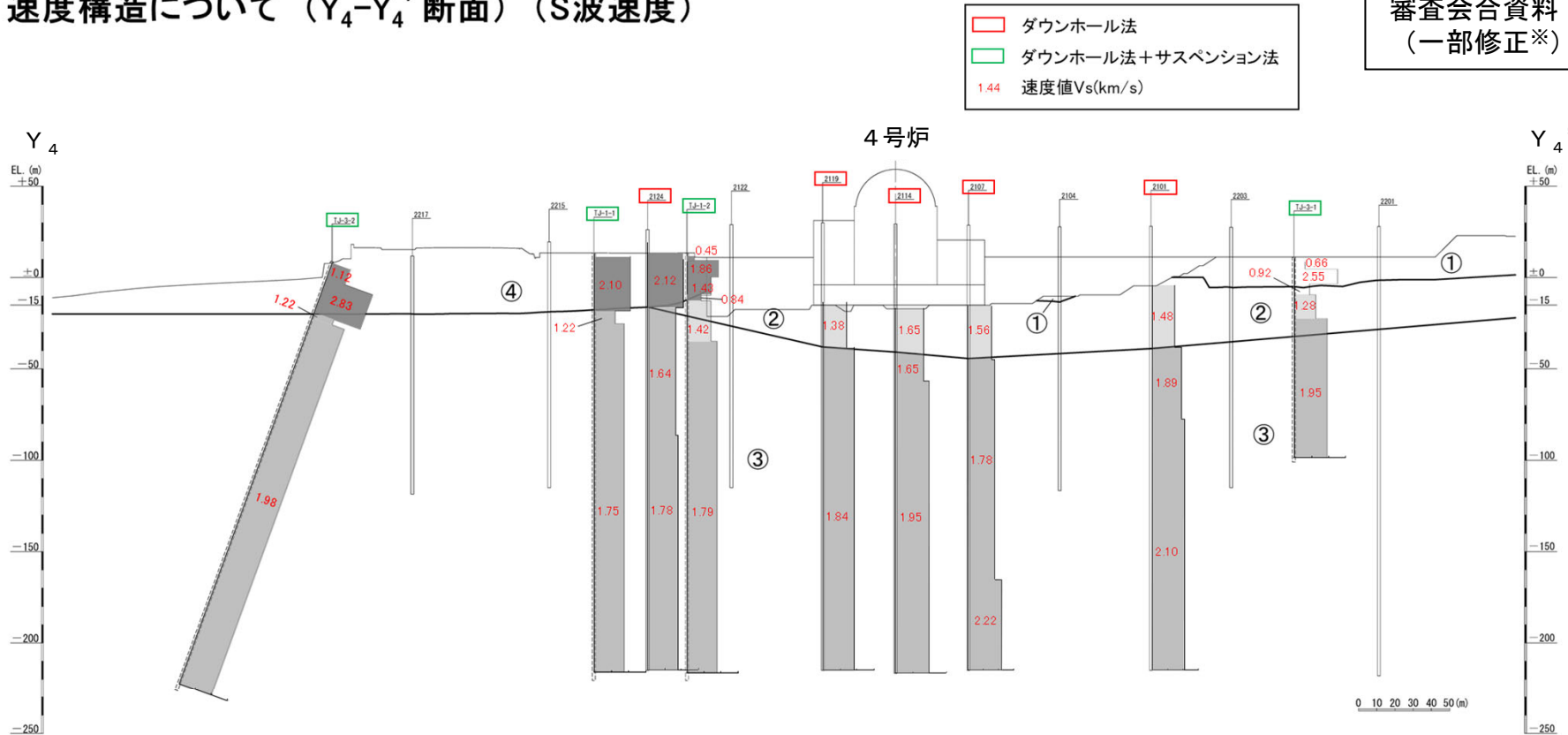
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)



2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

速度構造について (Y₄-Y₄'断面) (S波速度)

第402回
審査会合資料
(一部修正※)



速度層区分	V _S (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

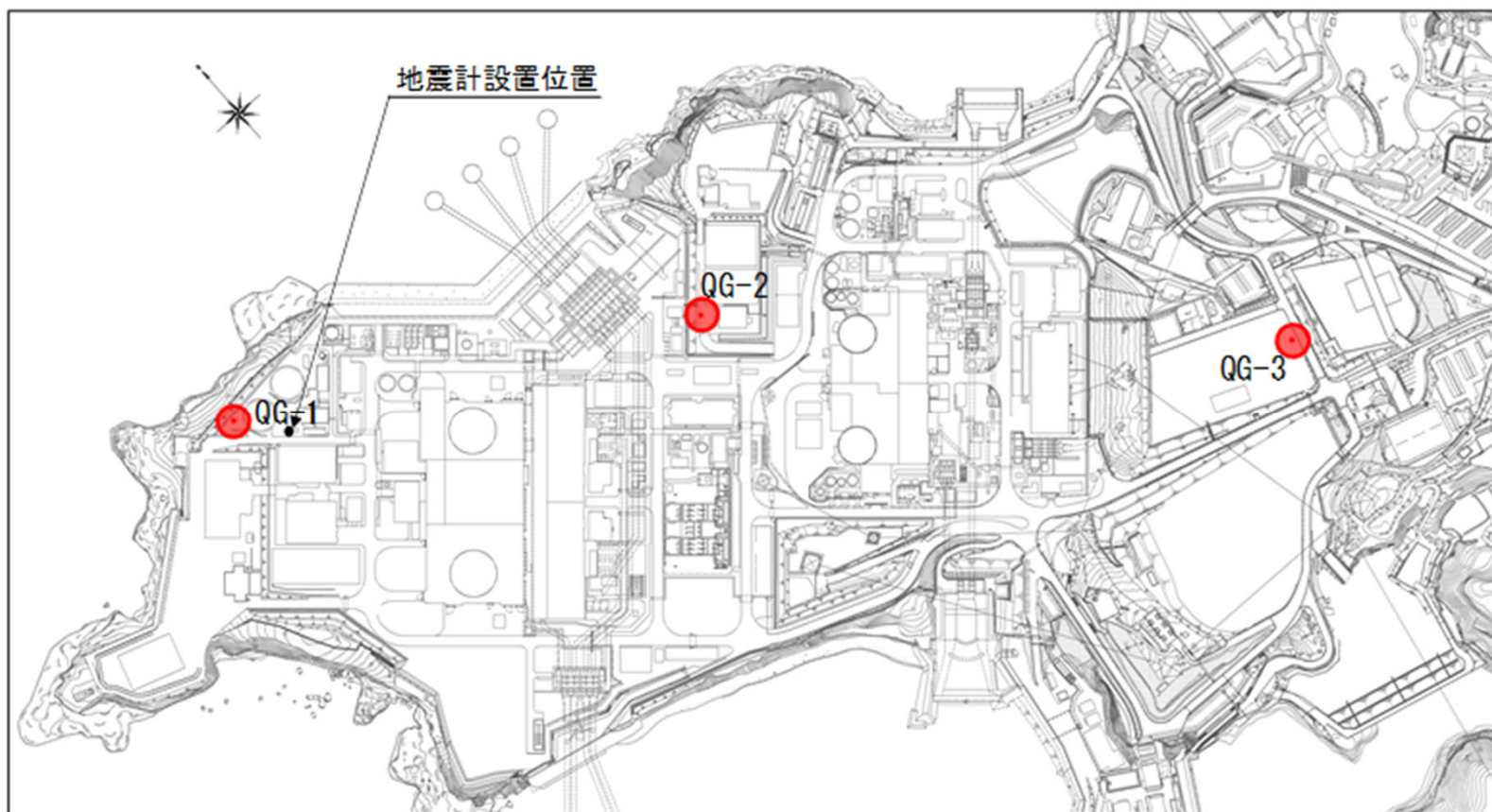
※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①TJ-3-2, TJ-1-1, TJ-1-2, TJ-3-1孔の追加、②速度層境界の変更、③地形の変更)

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

b. ボーリング孔内減衰測定による検討

■ 追加ボーリング調査位置

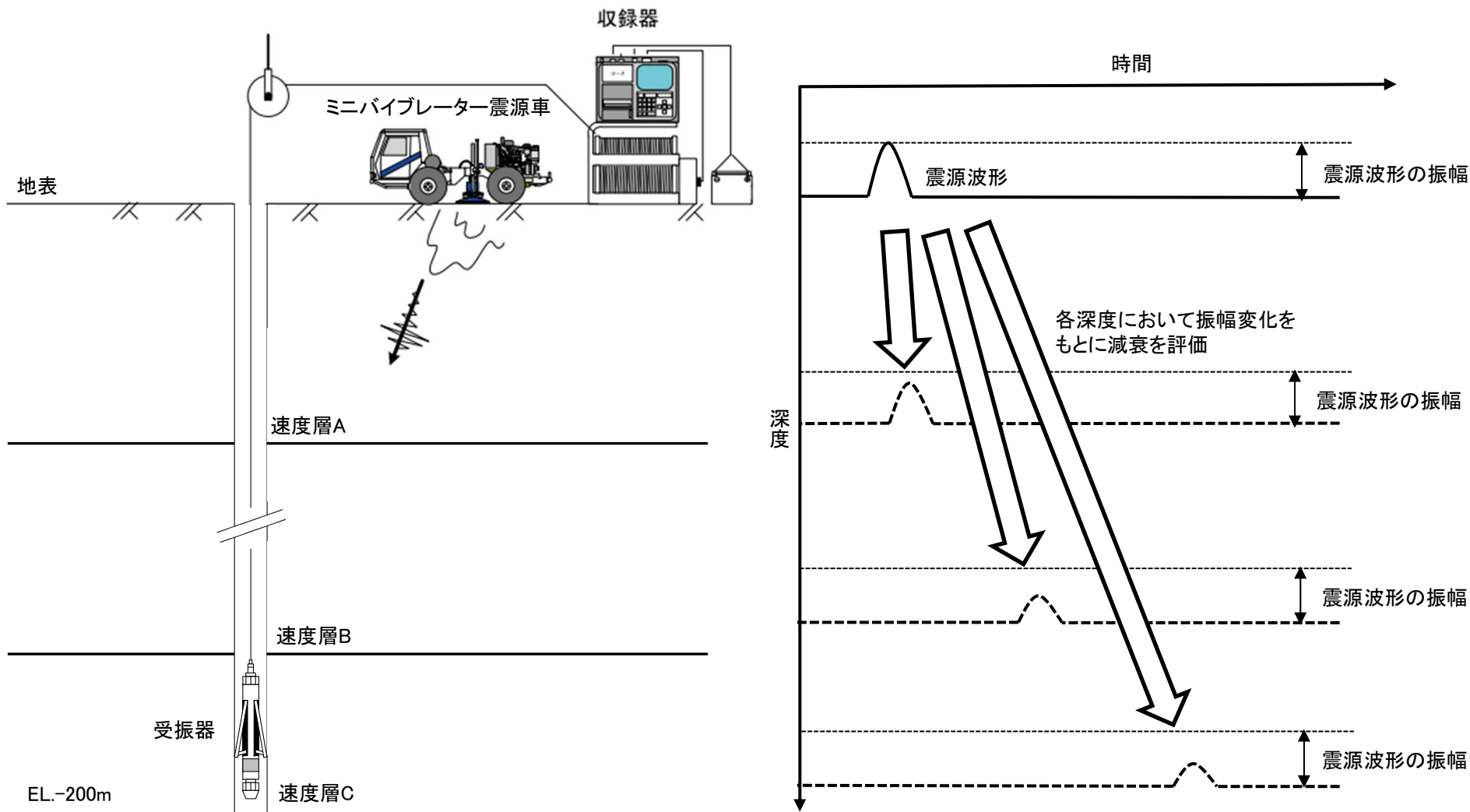
- 発電所構内において、解放基盤表面からEL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

■ ボーリング孔内における減衰測定^{14), 15)}

- 地表にて震源車を用いて人工的に励起した振動を追加ボーリング孔内に設置した受振器で観測¹⁴⁾し、震源位置の波形の振幅と孔内受振器の波形の振幅の関係から速度層区間ごとのQ値を算出¹⁵⁾する。(参考③)



減衰評価イメージ図

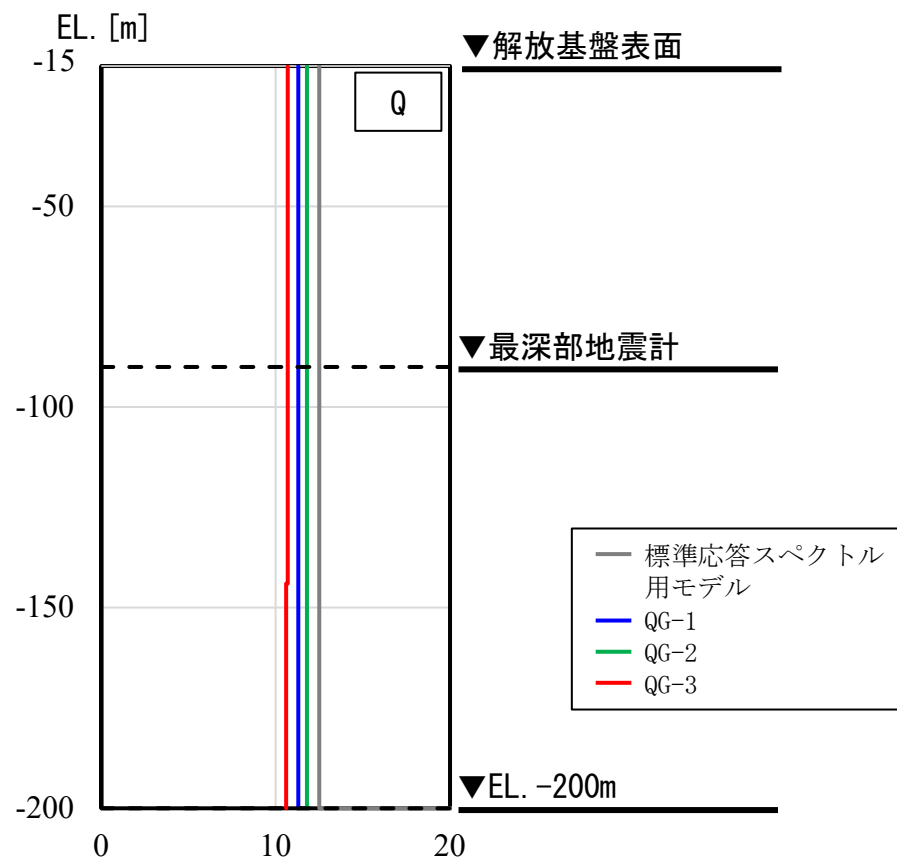
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 減衰測定結果を踏まえた地盤減衰（Q値）の検討

- ボーリング孔内における減衰測定の結果、QG-1孔は $Q=11.3$ 、QG-2孔は $Q=11.8$ 及びQG-3孔は $Q=10.6\sim 10.7$ となり、全孔ともに最深部地震計以浅と最深部地震計以深でQ値は同等である。
- なお、全孔ともにQ値は、標準応答スペクトルに用いる $Q=12.5$ を下回る。

孔名	EL. (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値	減衰定数 h (%)
QG-1	-15.0 ~ -200.0	37	11.3	4.4
QG-2	-15.0 ~ -200.0	29	11.8	4.2
QG-3	-15.0 ~ -144.0	36	10.7	4.7
	-144.0 ~ -200.0	31	10.6	4.7

※ 調査結果は解放基盤表面以深からEL.-200mに範囲を統一したものを記載



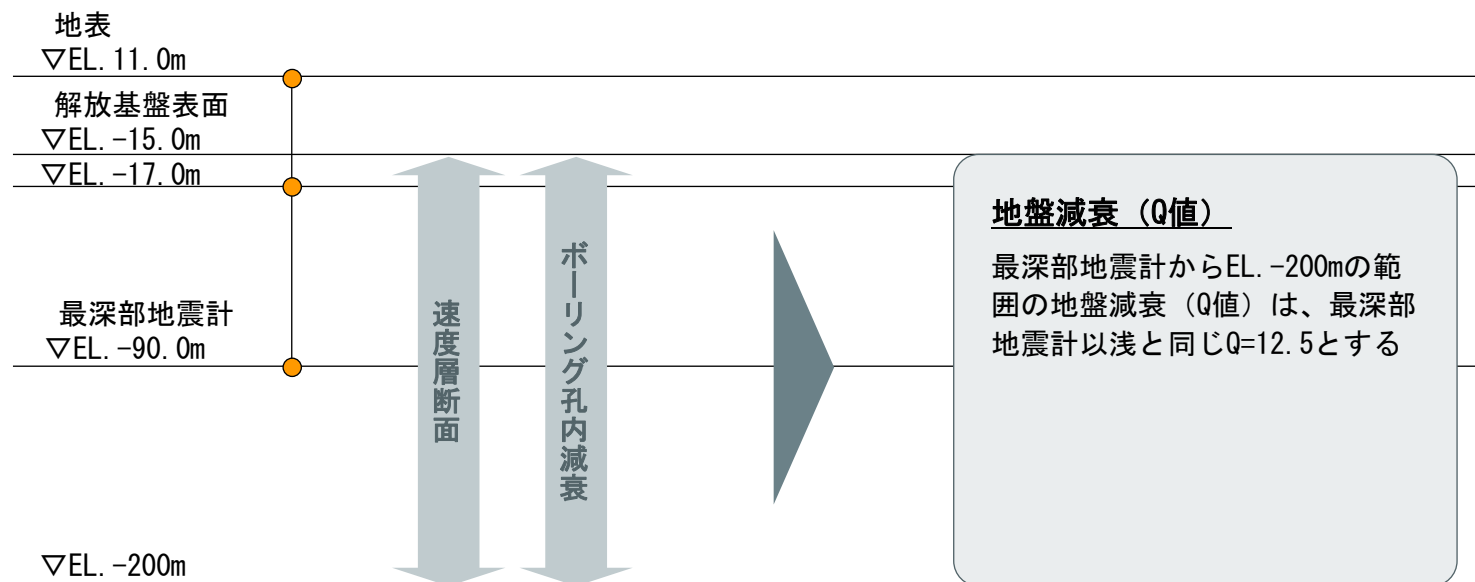
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 複数の手法による検討結果を踏まえた地盤減衰（Q値）

- 速度層断面による検討の結果、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。
- ボーリング孔内減衰測定結果が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認した。



- 最深部地震計からEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ とする。



●：地震計

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

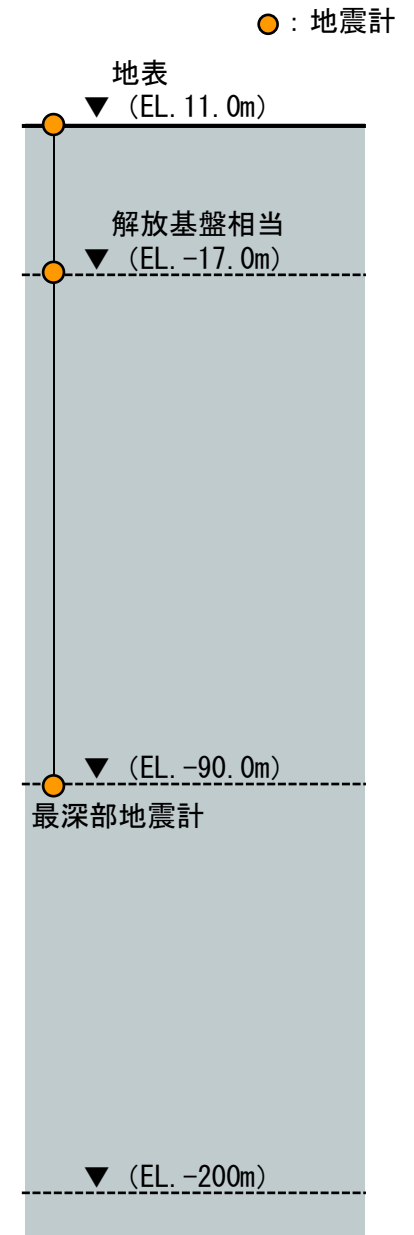
(2) 地盤減衰（Q値）の確認

a. 岩石コアを用いた減衰測定による確認

- 岩石コアを用いた減衰測定により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における岩石の減衰（Q値）を測定。
- 岩石コアを用いた測定による減衰※が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認する。

※佐藤・岡田(2012)¹⁶⁾での指摘（参考④）

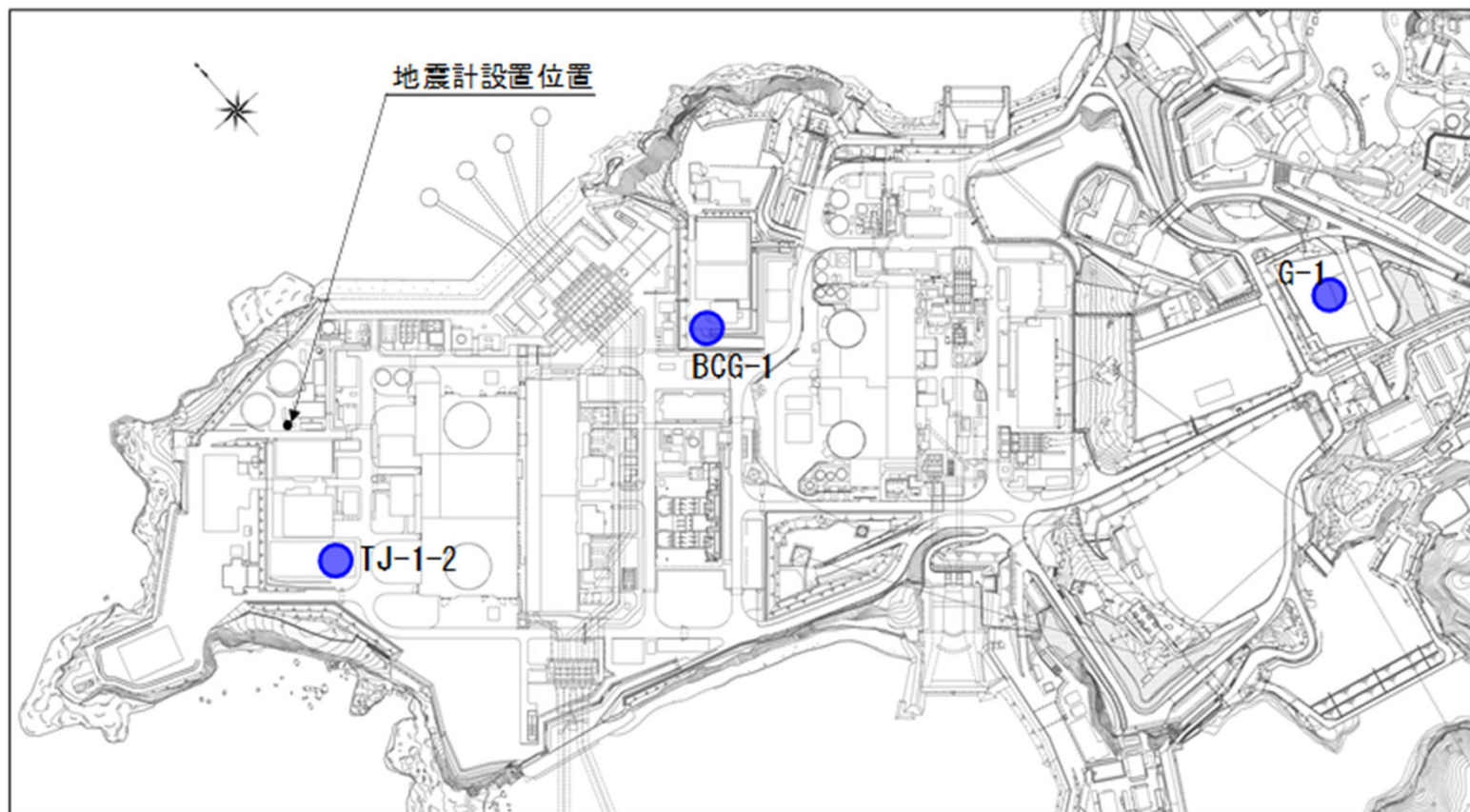
- 岩石コアを用いて測定した減衰は、鉛直アレイ観測記録に基づき評価した減衰に比べて小さくなる。
- 鉛直アレイ観測記録に基づき評価された減衰は、実際の岩盤を対象としているため、顕著な亀裂やランダム性の存在による減衰の付加効果が生じている。



2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 岩石コア採取位置

- 発電所構内における解放基盤表面からEL. -200mまでの既存ボーリング3孔から、最深部地震計以浅と最深部地震計以深のそれぞれ6本ずつの岩石コア供試体（砂岩）を採取し、岩石の減衰（Q値）を測定。



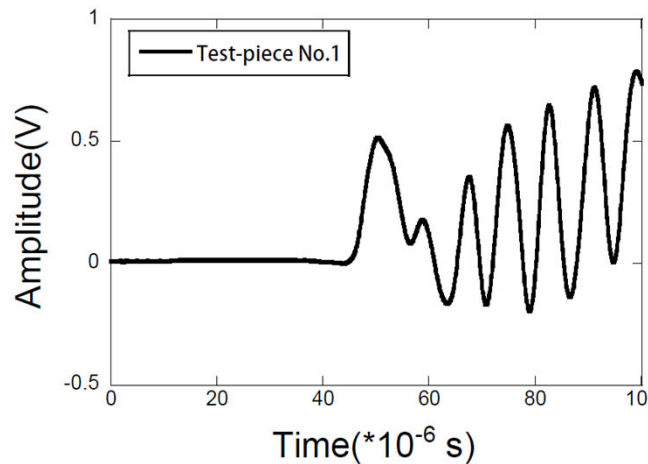
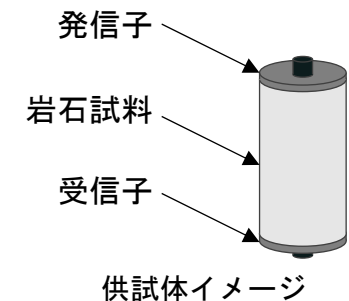
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

■ 岩石コアを用いた減衰測定^{16), 17)}

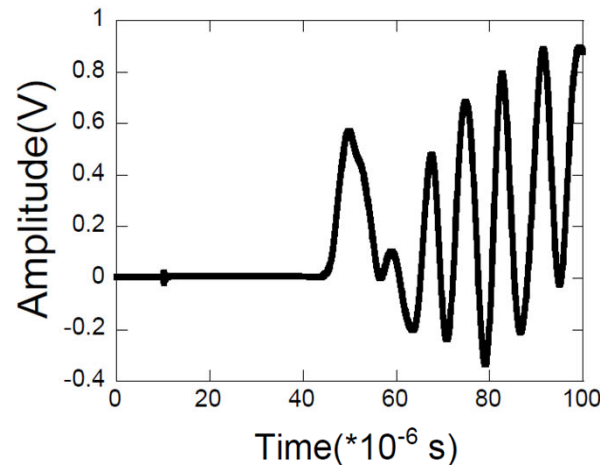
- 佐藤・岡田 (2012)¹⁶⁾において適用性が確認された、異なる試験体の透過パルス波のスペクトル比を用いる「スペクトル比法」(Toksöz et al. (1979)¹⁷⁾)による評価を実施。供試体1として敷地内のボーリング調査により得られた岩石コアを、供試体2としてQ値が既知なアルミニウムを使用し、透過波のスペクトル比 $A_1(f)/A_2(f)$ から次式に基づき、岩石の減衰(Q値)を推定。
- 岩石コアで得られるQ値は、地盤を構成する材料の減衰であり、亀裂等を含む地盤全体の減衰に対して部分的であることから、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の相対比較による検討を実施。

$$\ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right) = -\pi x f \left(\frac{1}{Q_1 c_1} - \frac{1}{Q_2 c_2}\right) + K$$

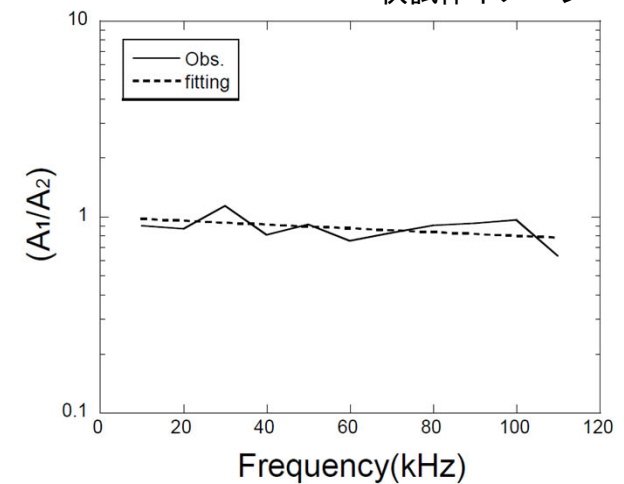
c	弾性波速度
Q	Q値
x	伝播距離(供試体長さ)
f	周波数
K	供試体での幾何減衰に関する項



岩石コア供試体の超音波受振波形



アルミニウム供試体の超音波受振波形



岩石コア供試体とアルミニウム供試体のスペクトル比とフィッティング結果

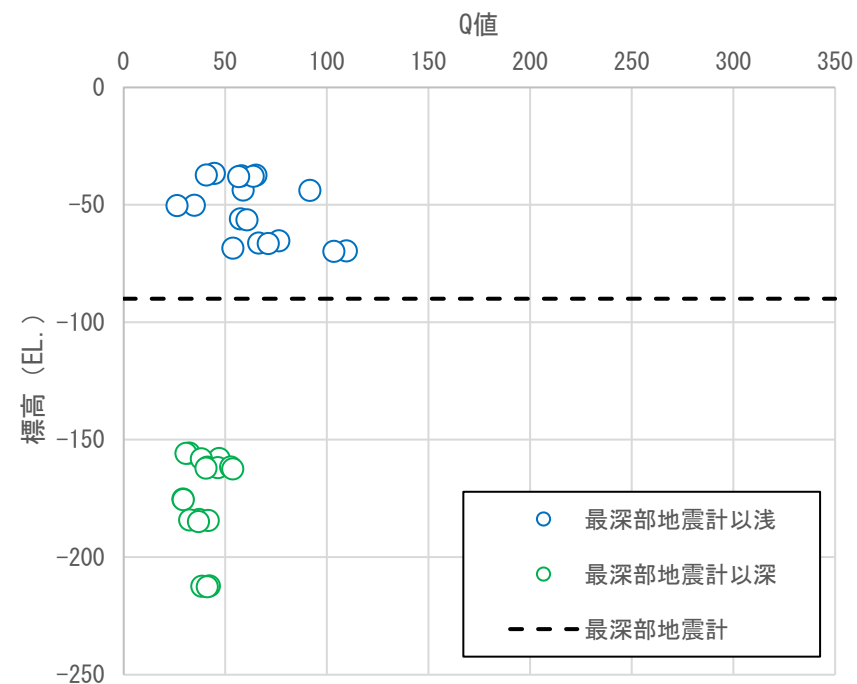
スペクトル比法による減衰測定イメージ ※佐藤・岡田 (2012)¹⁶⁾より抜粋

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ Q値測定結果を踏まえた地盤減衰（Q値）の確認

- 岩石コアを用いた減衰測定の結果、最深部地震計以浅のQ値は $Q=20\sim110$ の範囲に分布し、平均値は $Q=63.3$ 、最深部地震計以深のQ値は $Q=20\sim60$ の範囲に分布し、平均値は $Q=39.5$ となり、岩石コアのQ値は最深部地震計以浅と最深部地震計以深とで概ね同等もしくは最深部地震計以深が小さい傾向にある。

6供試体平均	TJ-1-2		BCG-1		G-1		全孔平均	
	Q値	減衰定数h(%)	Q値	減衰定数h(%)	Q値	減衰定数h(%)	Q値	減衰定数h(%)
最深部地震計以浅	54.8	0.91	76.9	0.65	58.2	0.86	63.3	0.79
最深部地震計以深	44.8	1.12	34.5	1.45	39.3	1.27	39.5	1.27



2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

(3) 地盤減衰（Q値）の設定

- 速度層断面による検討の結果、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。
- ボーリング孔内減衰測定結果が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認した。
- 上記の検討結果から、最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ とした。
- 設定した地盤減衰（Q値）について、岩石コアを用いた減衰測定による確認を実施した。



- 上記の検討・確認を踏まえ、最深部地震計からEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ と設定する。
- なお、参考として、より一層の説明性の向上を目的として、「経験的地盤増幅率による検討」により、最深部地震計（EL. -90m）からEL. -200mまでの範囲で設定した地盤減衰（ $Q=12.5$ ）に矛盾がないことを確認した。（参考⑤、⑥）

2.3 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定

- EL. -200m以深の範囲は、既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認。
 - 設定根拠としている地震調査委員会（2007）³⁾における地盤構造の物性値は、詳細法（ハイブリッド合成法）による強震動計算を目的として設定されており、短周期から長周期までの全ての周期帯へ適用されている。
 - なお、既許可以降の知見である防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS (V3.2)⁴⁾の深部地盤と、地震調査委員会（2007）³⁾の地盤構造の物性値が整合する。（補足①）
- 解放基盤表面からEL. -200mまでの速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用する。
- 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討から地盤減衰（Q値）を設定する。
- 上記を踏まえ、以下の通り地下構造モデルを設定する。

設定した地下構造モデル

EL. 解放基盤表面 -15m	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
-15m	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 地下構造モデルの妥当性確認方針

- 前節までの通り、地盤減衰（Q値）は、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づいて設定。
- 本節では、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲について、下表の方法により、全ての周期帯における設定した地下構造モデルの妥当性を確認。

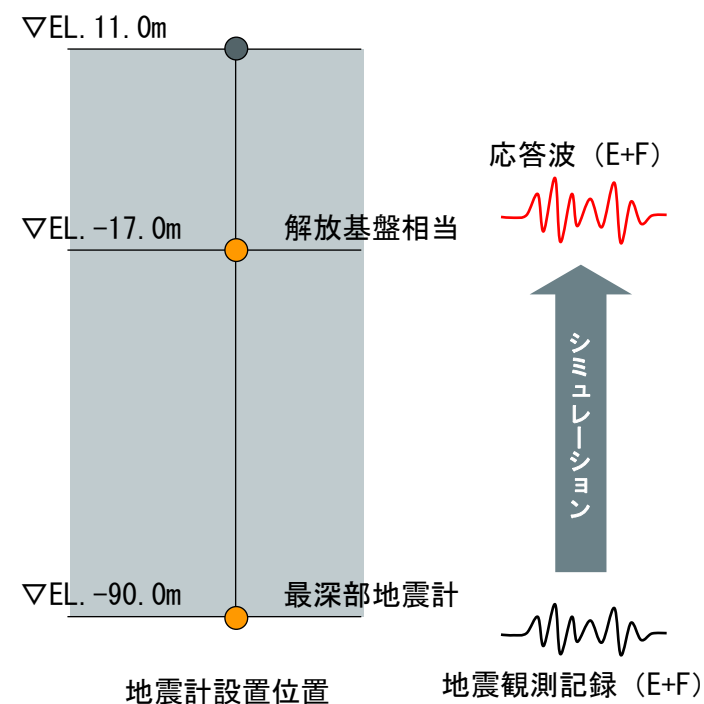
確認方法	対象深度EL. (m)		比較方法	比較対象		確認する観点
	-15.0	-90.0		-200		
応答スペクトルによる確認	EL. -15.0m~EL. -90m		応答スペクトル	設定した地下構造モデル	地震観測記録（解放基盤相当）	設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
PS検層モデルとの比較による確認	EL. -15.0m~EL. -200m		理論伝達関数	設定した地下構造モデル	PS検層モデル	設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数と同等もしくは上回る。

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

(1) 地震観測記録の応答スペクトルによる確認

- 地震観測記録の得られている浅部の地下構造モデルについて、鉛直アレイの地震観測記録に基づいた観測事実との整合性を確認するため、最深部地震計（EL. -90m）で得られた地震観測記録を入力※とし、1次元波動論に基づき、推定した応答波（EL. -17m）の応答スペクトル※と同位置の地震計で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施。（72～81頁参照）
- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -90mまでの範囲における地下構造モデルについて、以下の観点で全ての周期帯における妥当性を確認した。
 - 設定した地下構造モデルの応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
- なお、設定した地下構造モデルの応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルを下回る地震（⑩熊本県熊本地方の地震（EW方向））について、特異な地震観測記録であることを確認し、設定した地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断した。（補足③）

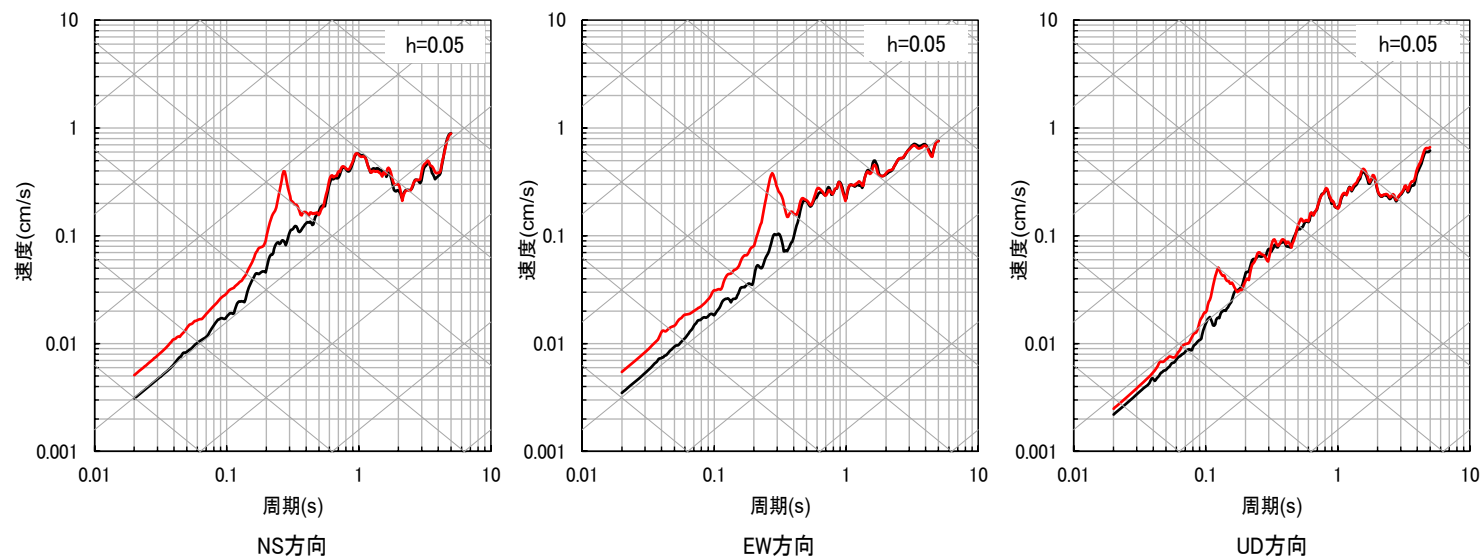
※入力の最深部地震計（EL. -90m）で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当（EL. -17m）での応答波は地中記録のため、E+Fで評価。



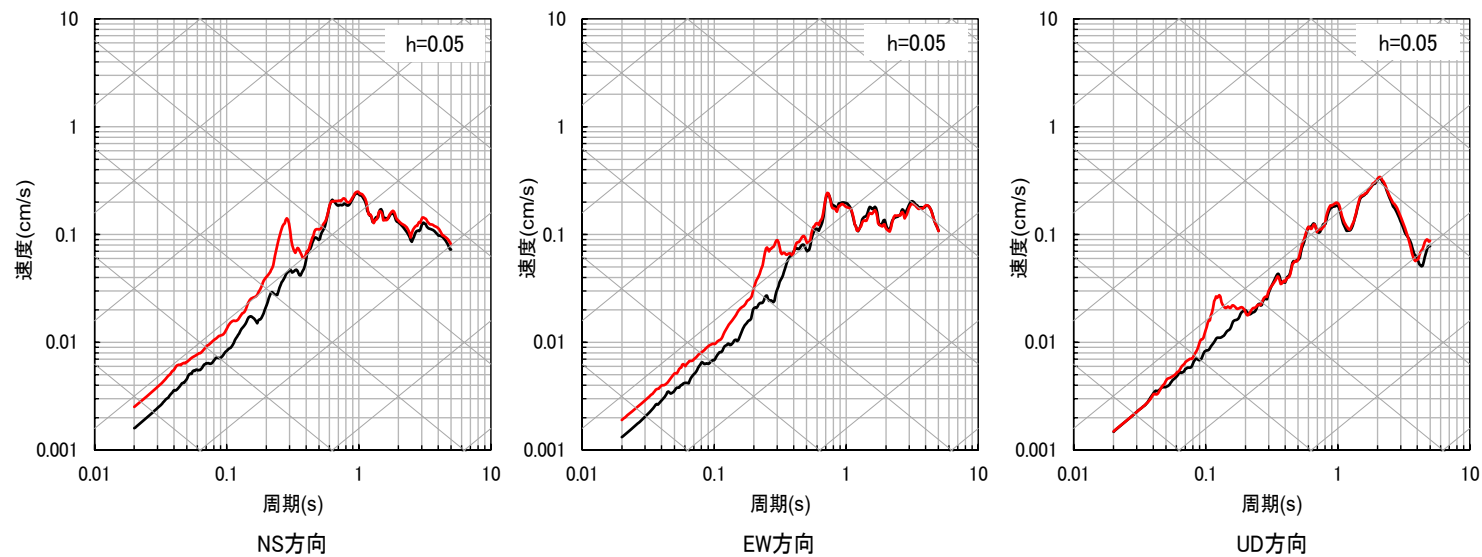
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



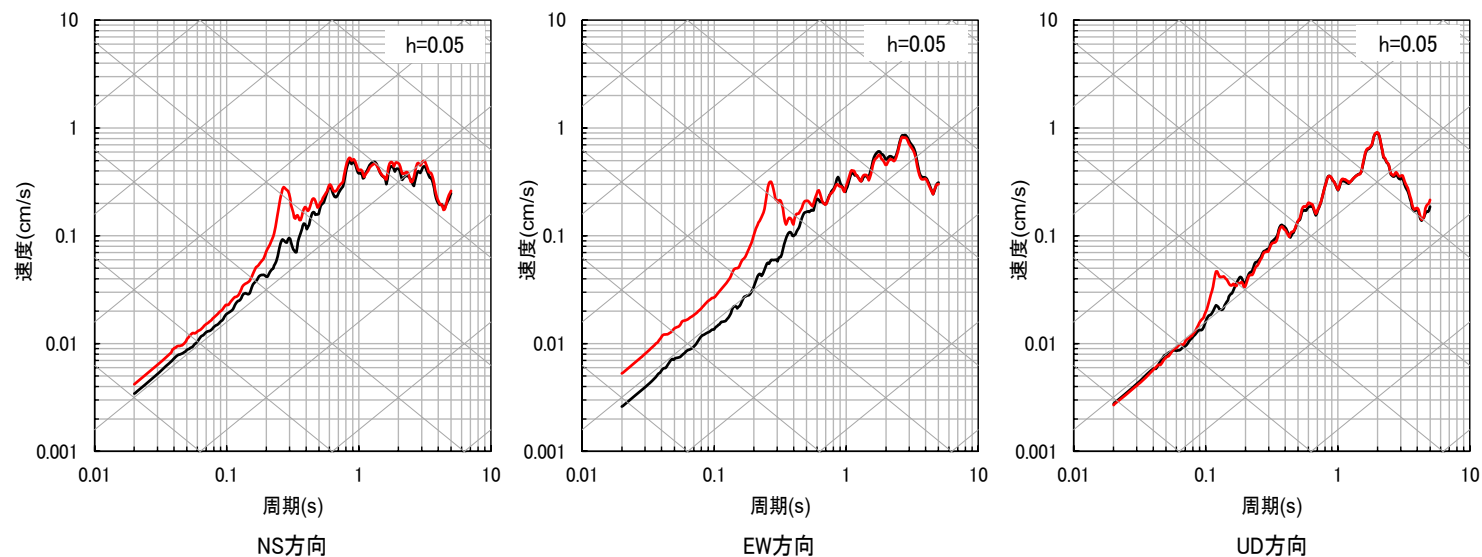
② 鹿児島県北西部



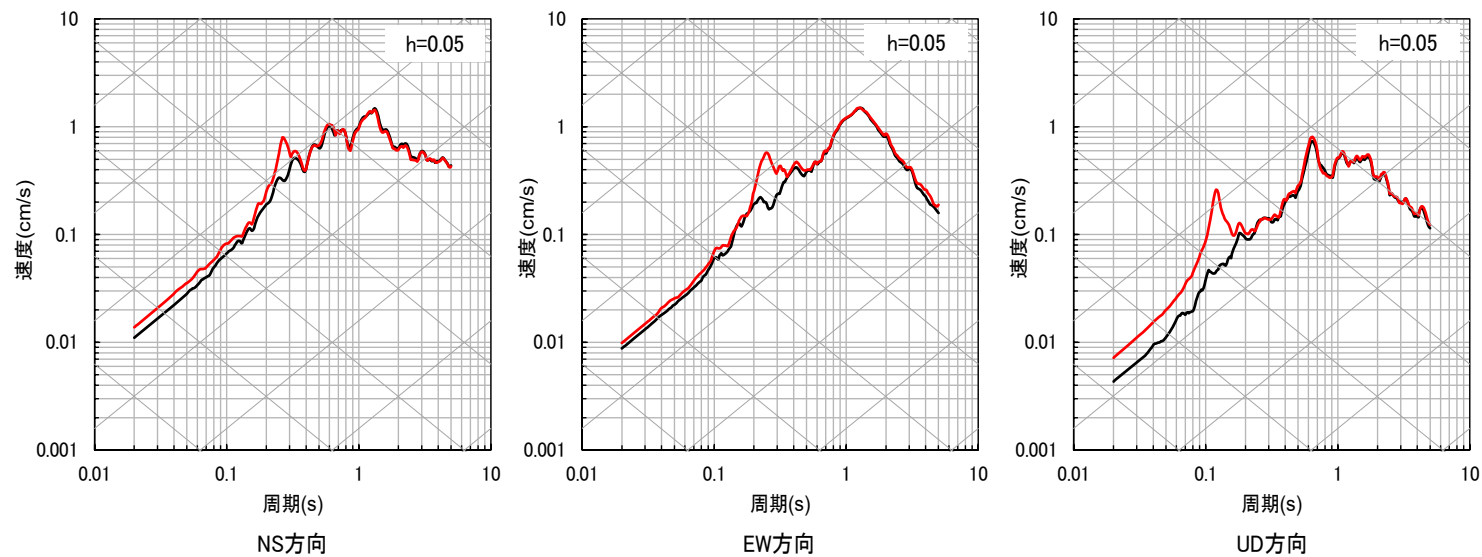
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



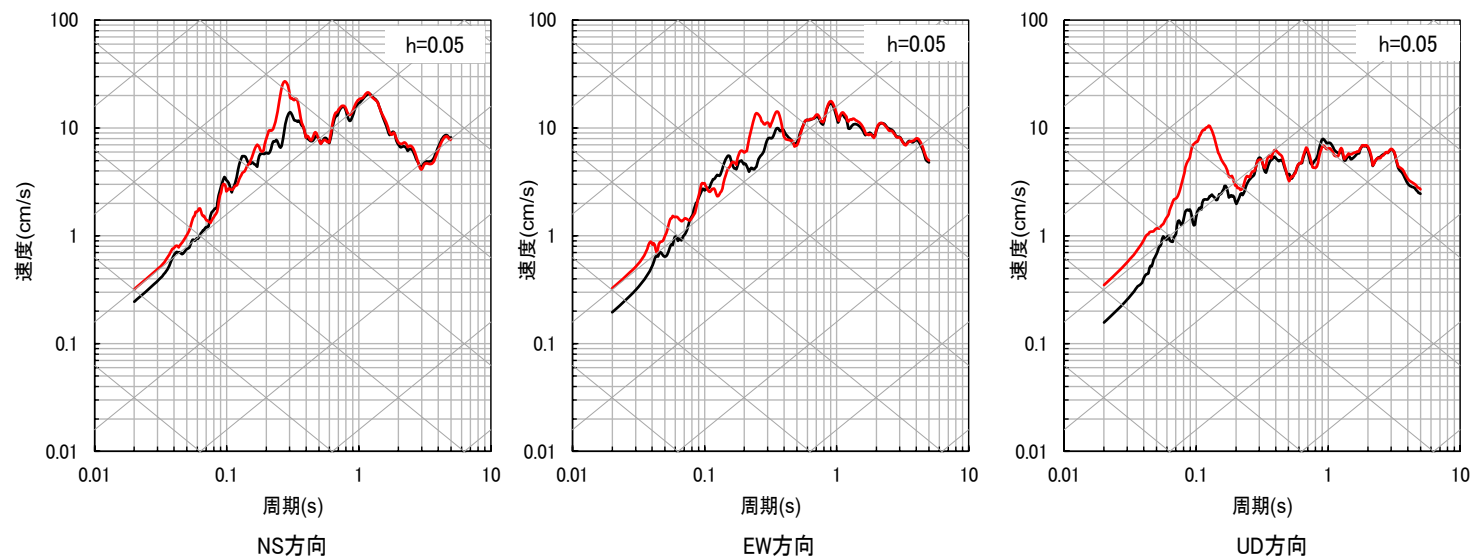
④ 山口県



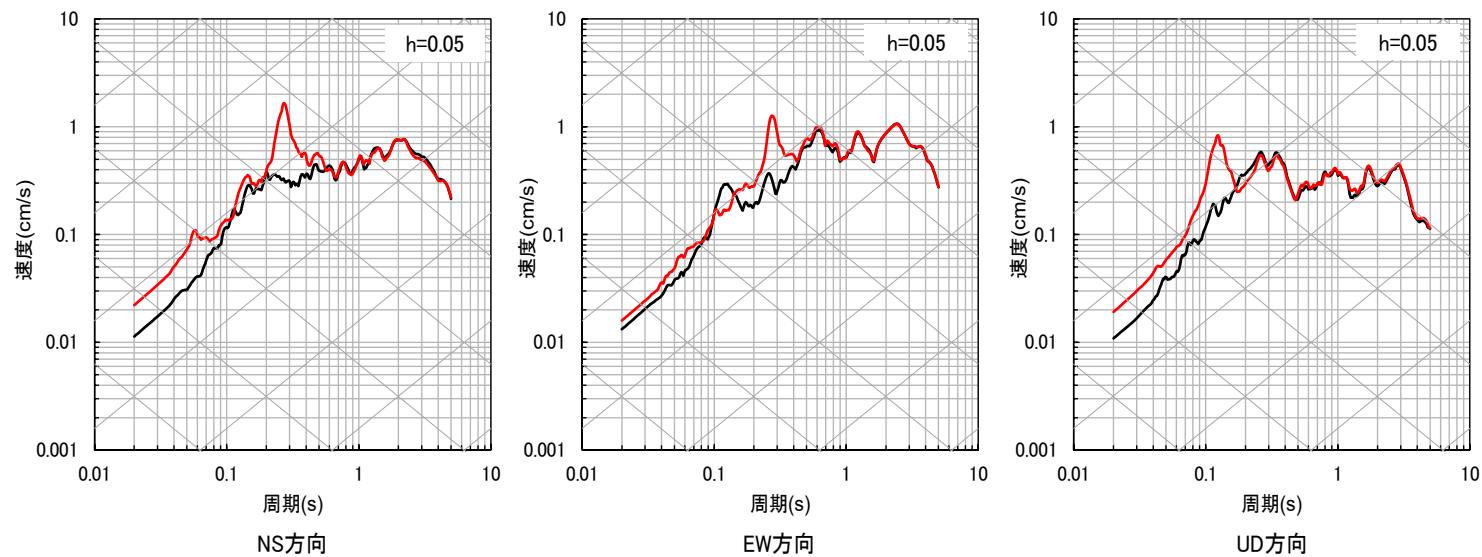
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



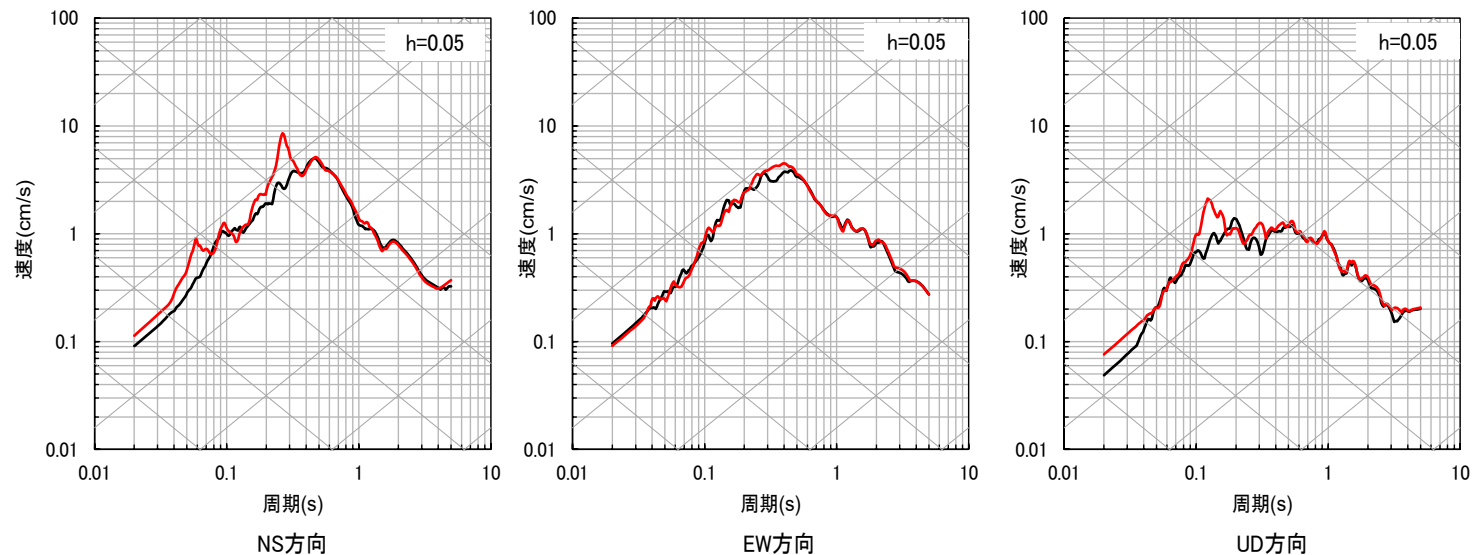
⑥九州北西沖



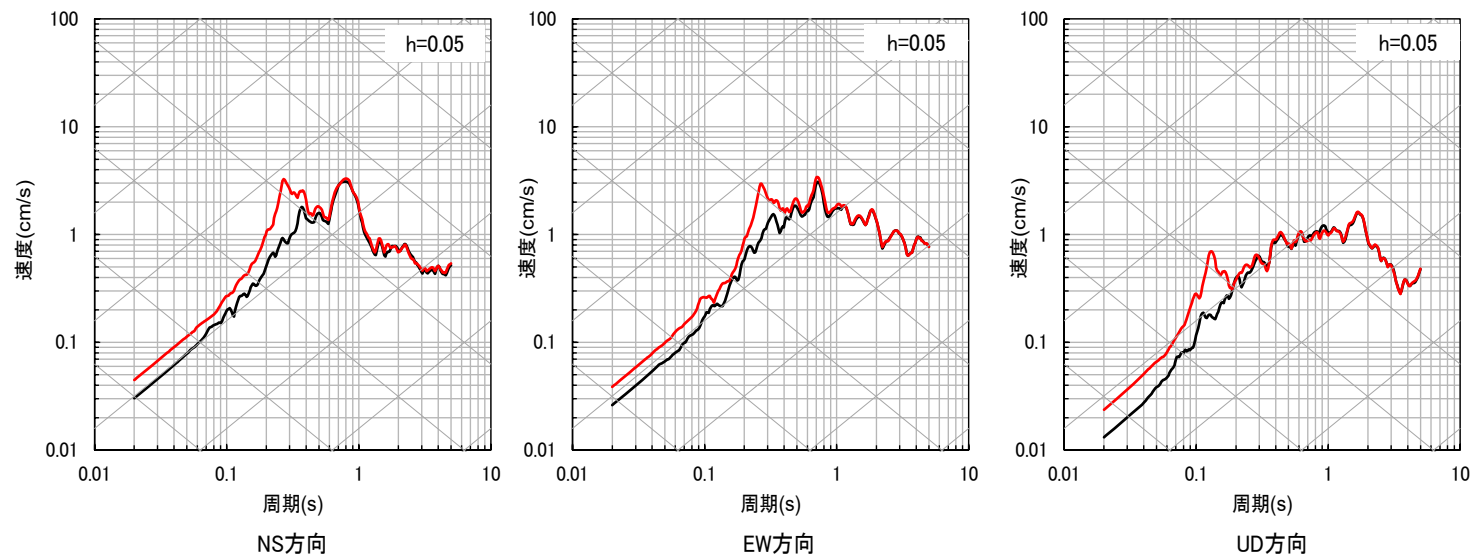
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



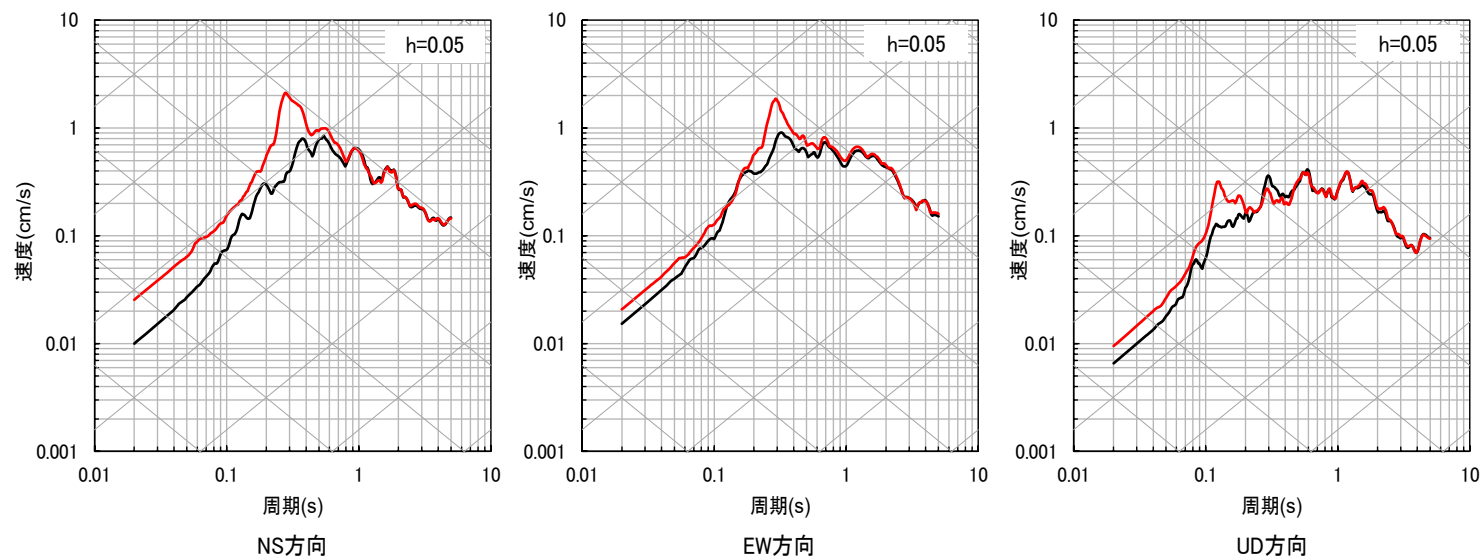
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



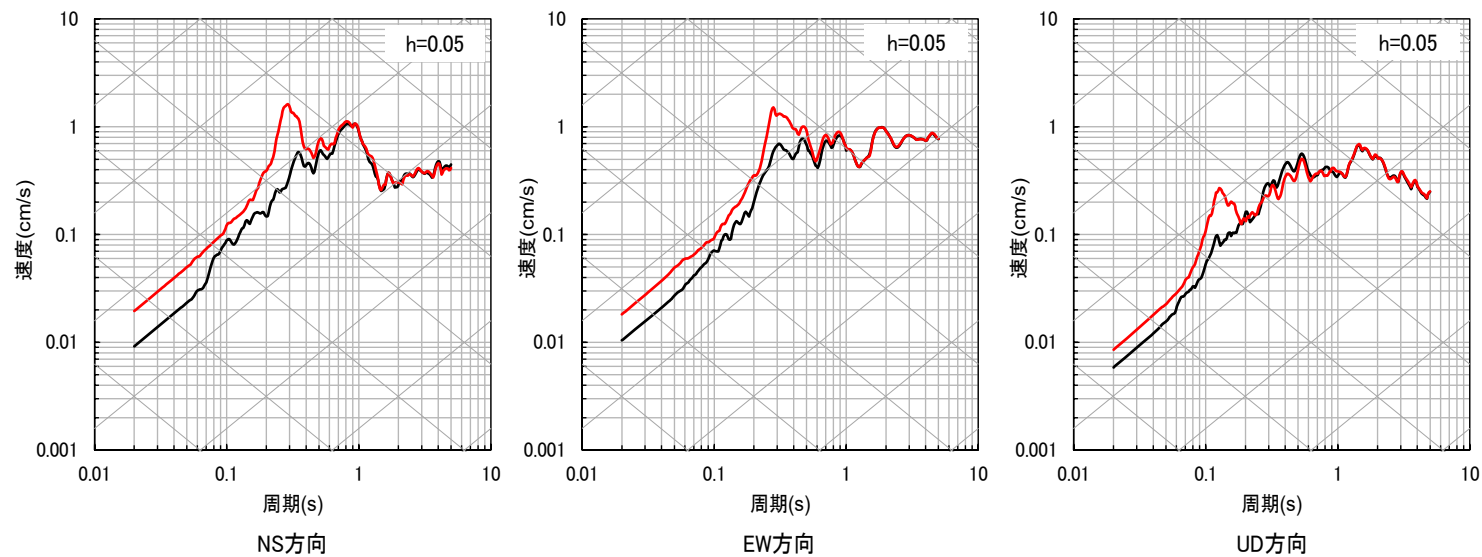
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



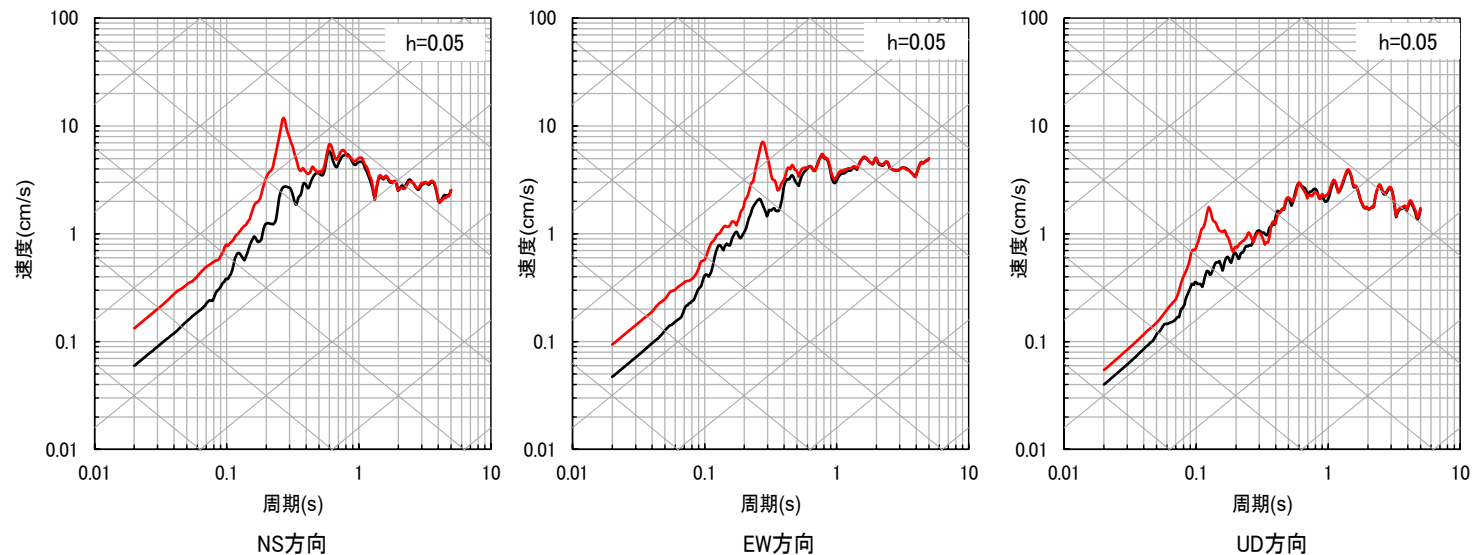
⑩ 熊本県熊本地方



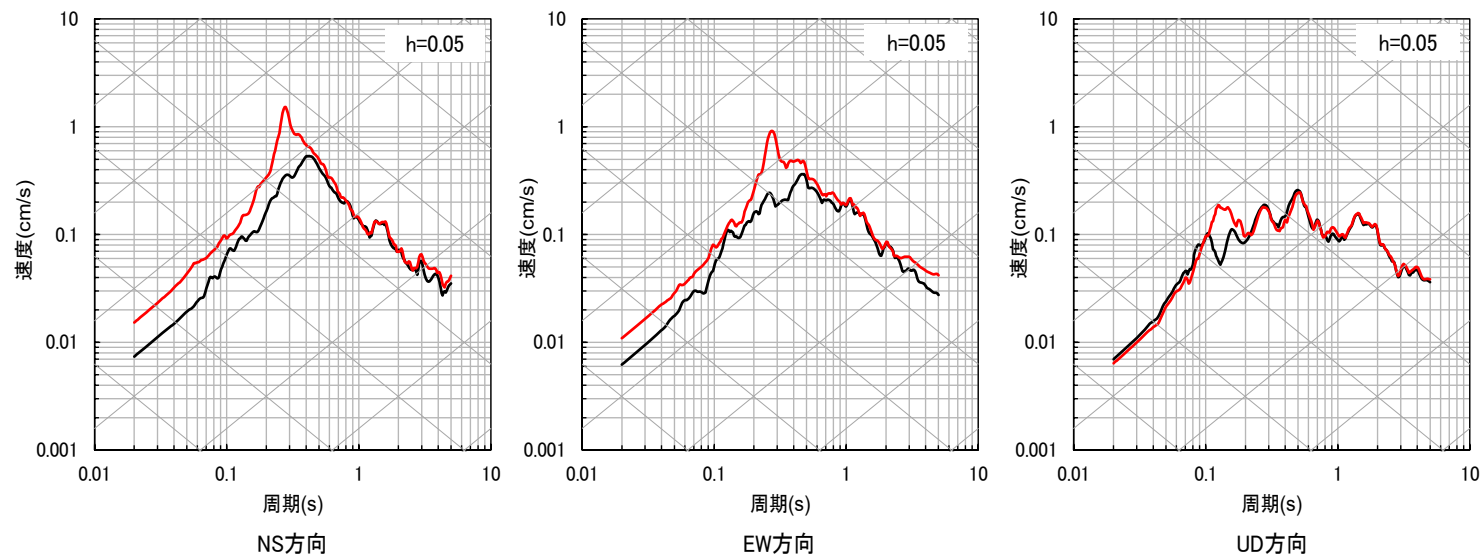
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



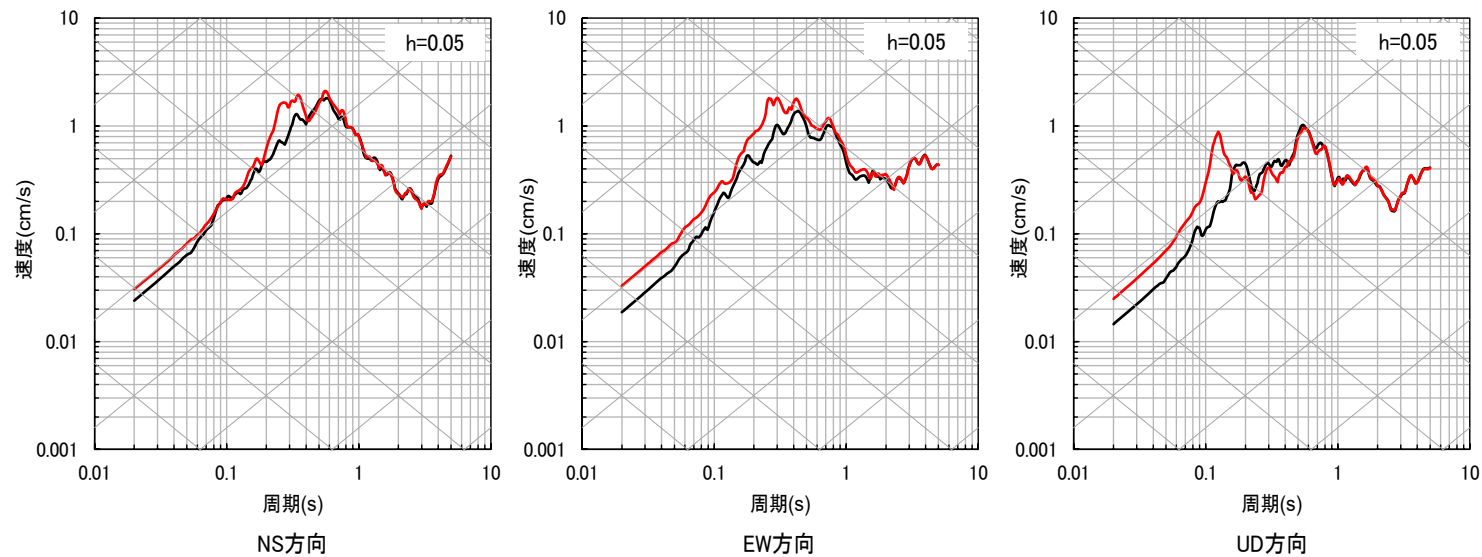
⑫ 熊本県熊本地方



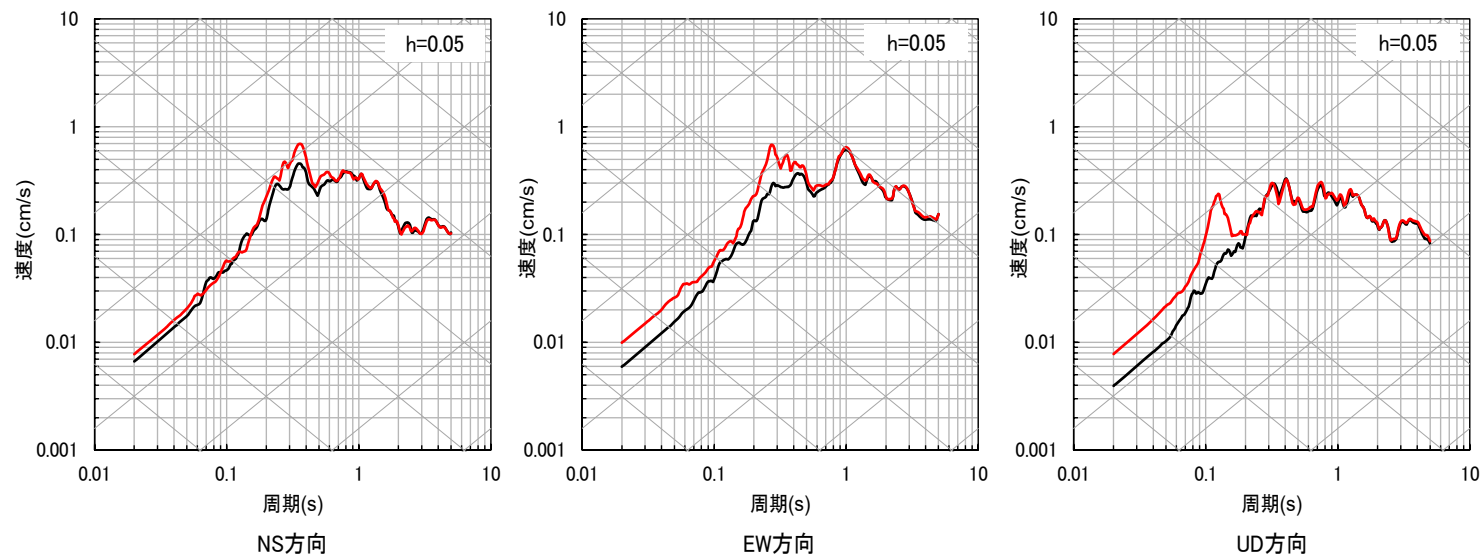
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



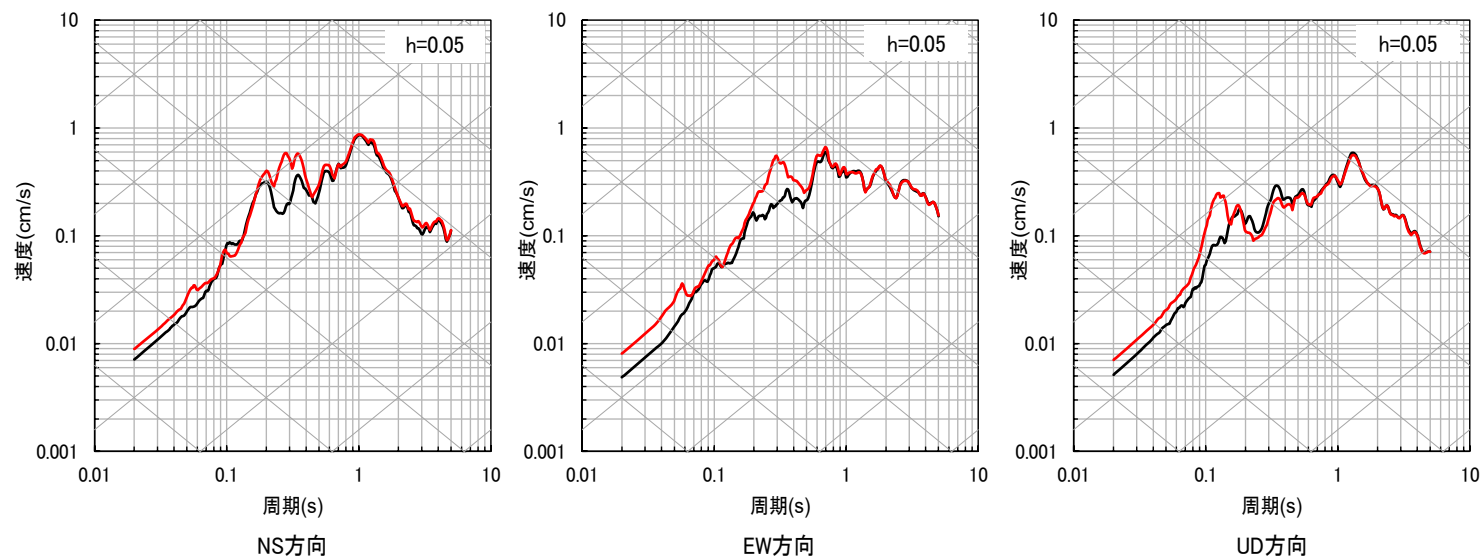
⑭ 熊本県阿蘇地方



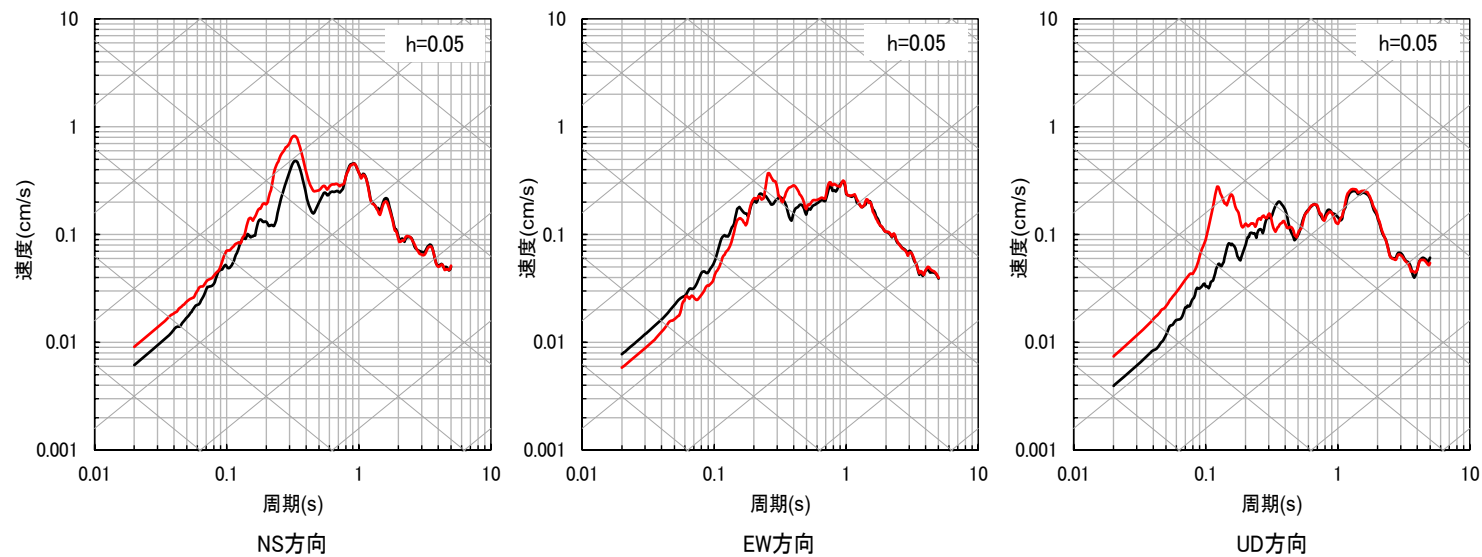
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



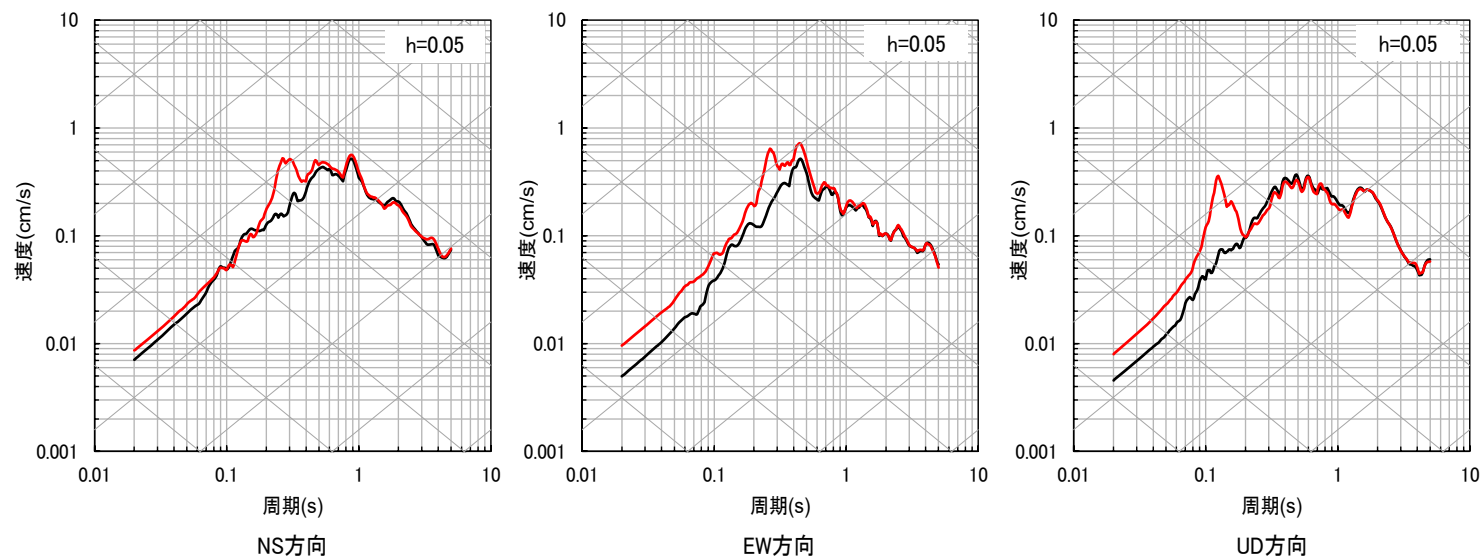
⑯ 熊本県熊本地方



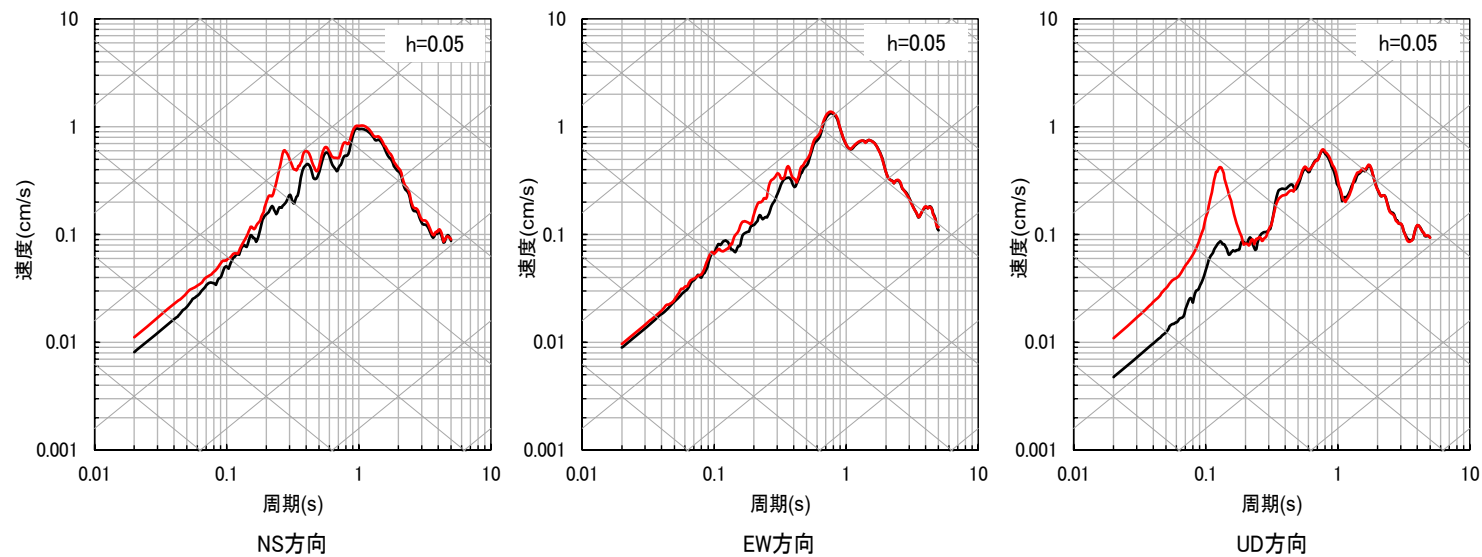
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



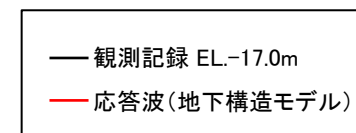
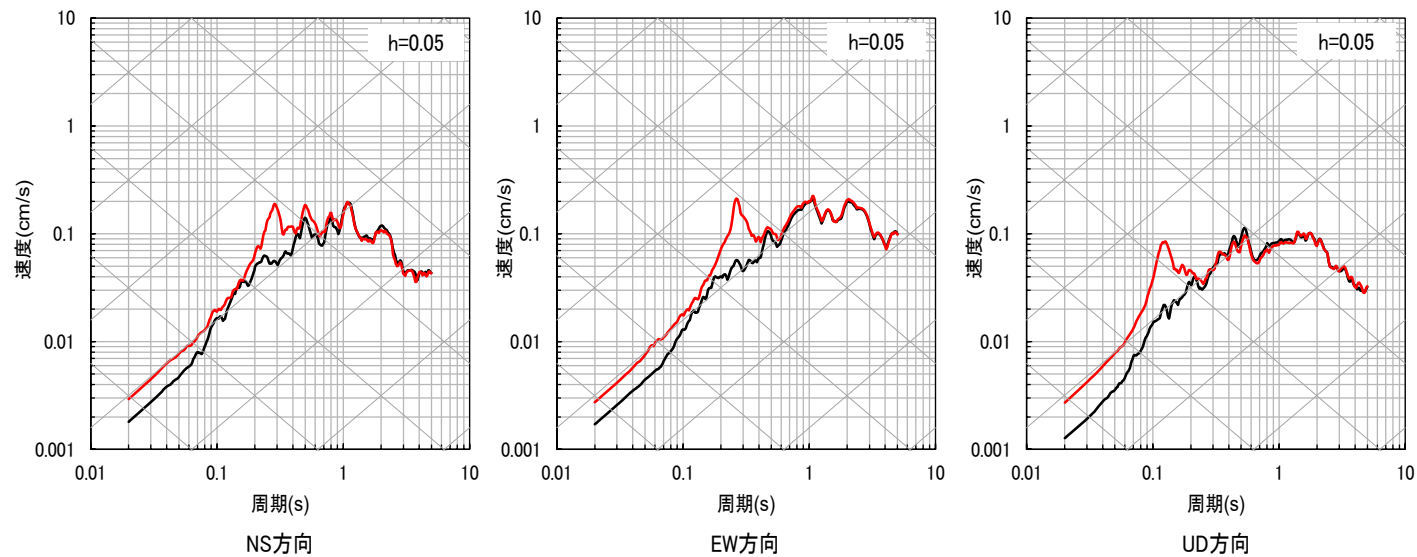
⑱ 熊本県阿蘇地方



2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

①9 熊本県熊本地方



2.4 地下構造モデルの妥当性確認

(2) PS検層モデルとの比較による確認

- 追加調査により解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において得られた、Vs、Vp、Q値を基に、PS検層モデルを設定。
- 設定した地下構造モデルとPS検層モデルによる理論伝達関数の比較により、設定した地下構造モデルの妥当性を確認する。

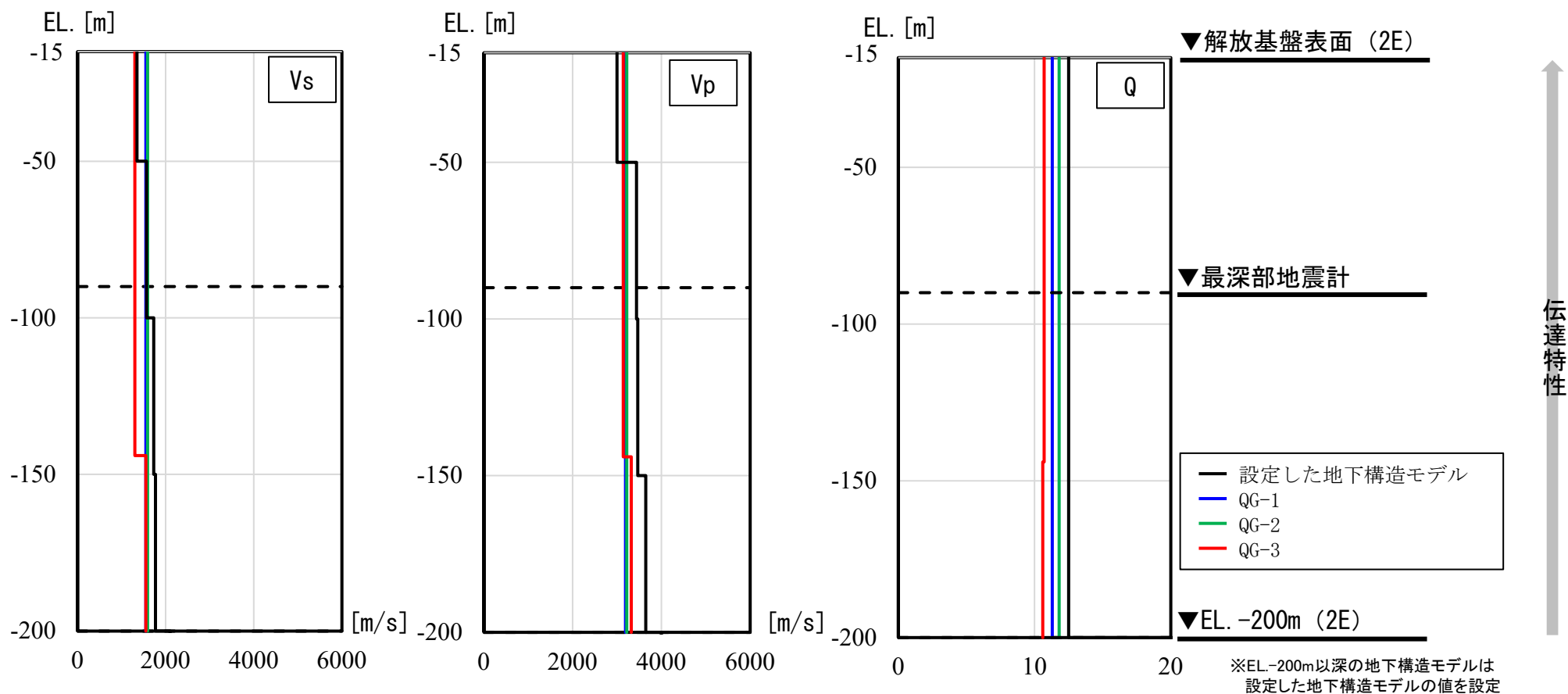
設定した地下構造モデル				PS検層モデル				
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	伝達特性	伝達特性	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -90.0m)	1570	3440	12.5					
▼ (EL. -100m)								
▼ (EL. -150m)	1730	3470	12.5					
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -1804m)	2100	4000	200					
	3100	5500	300					

検討イメージ

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ PS検層モデルの設定

- 追加ボーリング孔における解放基盤表面からEL. -200mまでのPS検層結果等を踏まえ、PS検層モデルを設定。
- 追加ボーリング孔におけるPS検層による速度 (V_s 、 V_p) は、設定した地下構造モデルと概ね整合している。
- 追加ボーリング孔内減衰測定によるQ値は、いずれも設定した地下構造モデルの $Q=12.5$ を下回る。なお、得られたQ値は、高周波数側におけるQ値の上限値に対応すると考えられるが、周波数によらず一定のQ値を設定。



2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ PS検層モデルにおけるEL. -200m以深の設定

- 実地盤の状況として、EL. -200mで大きく速度構造が変わらないと考えられるため（補足④）、EL. -200mに速度コントラストのないモデルを以下の通り、設定する。

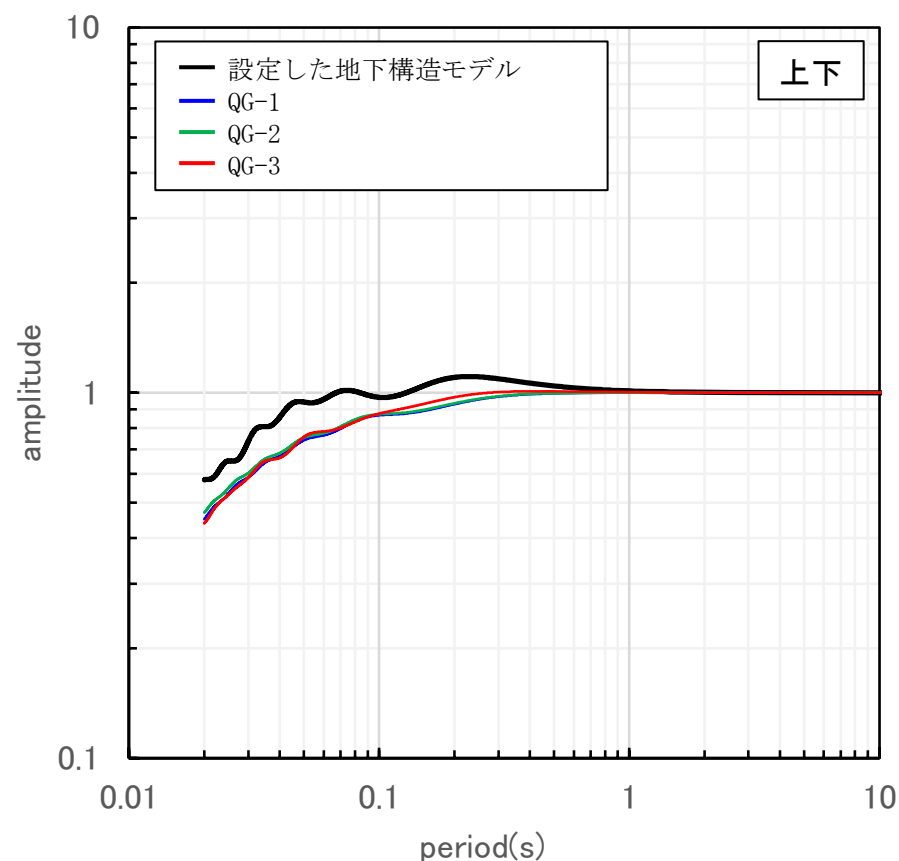
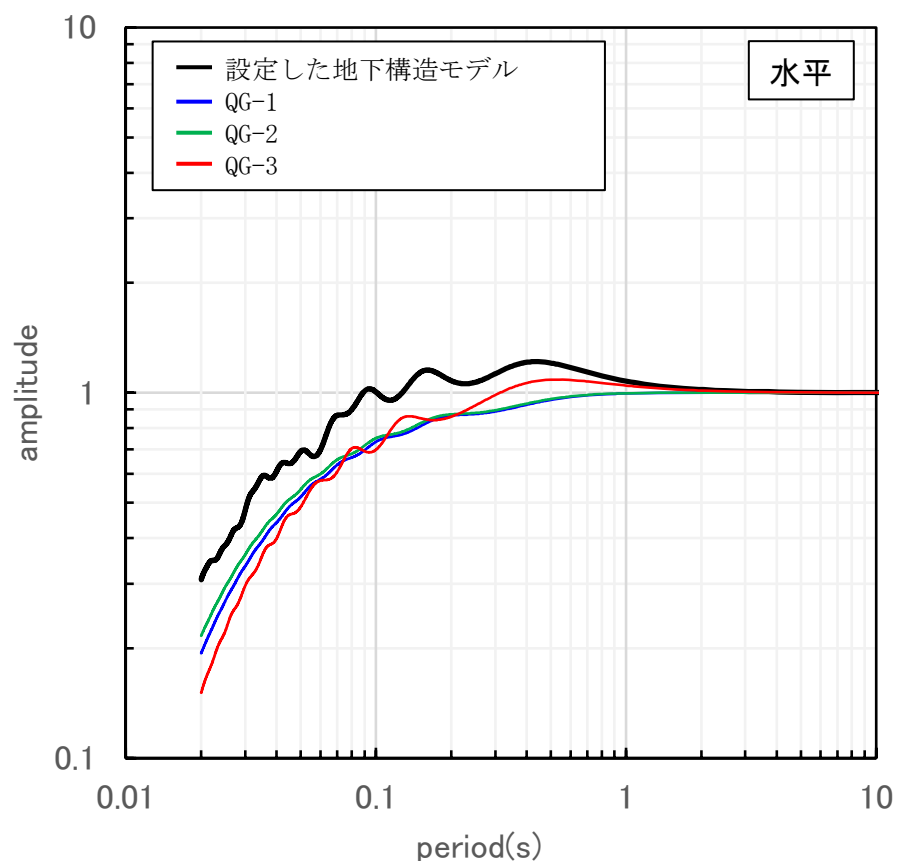
地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル※			QG-1モデル			QG-2モデル			QG-3モデル		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -144m)	1730	3470	12.5	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8			
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5							1550	3320	10.6
	2100 (1770)	4000 (3650)	200	1550	3190	200	1590	3220	200	1550	3320	200

※速度コントラストをなくした場合(EL. -200m以深を上層と同じ速度に設定)の設定値について括弧で示す。

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 伝達関数の比較

- 設定した地下構造モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）が、PS検層モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）に対して、同等もしくは上回ることを確認し、解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mまでの範囲における地下構造モデルは全ての周期帯において妥当と判断した。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

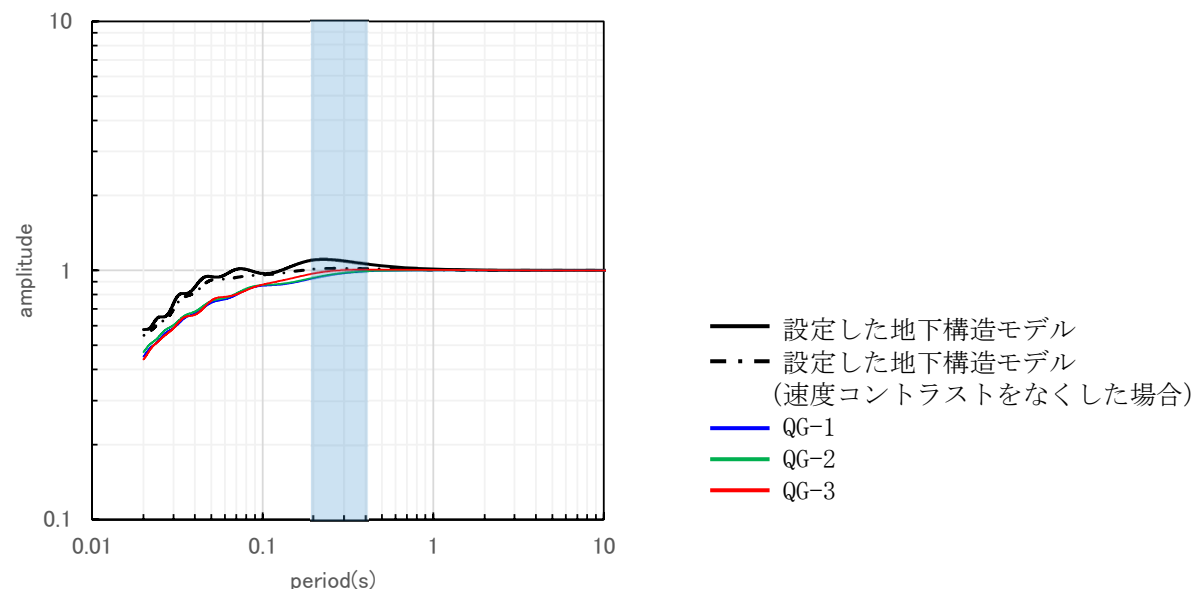
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■ 上下方向に関する観測事実との整合性を踏まえた地下構造モデルの妥当性

- 地震観測記録が得られている解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -90mまでの範囲で見ると、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、上下方向の一部の地震観測記録の周期0.2~0.4秒付近において、スペクトル形状 (凹凸) の僅かな差異により、局所的に観測記録を下回る。(72~81頁参照、例: ⑬熊本県熊本地方の地震)
- 一方、追加調査を行った解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲で見ると、EL. -200mの速度コントラストがないよう条件を揃えた場合の、設定した地下構造モデルとPS検層モデルの伝達関数の比較では、設定した地下構造モデル (黒一点鎖線) はPS検層モデル (青・緑・赤線) を上回る。
- 設定した地下構造モデル (黒実線) は、実際にはEL. -200mに速度コントラストを設けており、その効果によって、下図のとおり、当該周期帯 (0.2~0.4秒付近) において、さらに保守性を有するものとなっている。



- 設定した地下構造モデルは、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において十分な保守性を有していることから、上下方向に関する観測事実との不整合を踏まえても、その妥当性に影響はないと判断した。(補足⑤)



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m、上下方向)

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

「2.4 地下構造モデルの妥当性確認」のまとめ

- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -90mの範囲の地下構造モデルについて、「地震観測記録の応答スペクトルによる確認」の結果、全ての周期帯において、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。
- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mの範囲の地下構造モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」の結果、全ての周期帯において、設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数に対して、同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。
- なお、参考として、より一層の説明性の向上を目的に、「ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認」により、深部を含む全体を見ても、浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを確認した。（参考⑦）

2.5 標準応答スペクトル用モデルの設定

■ 標準応答スペクトル用モデルの設定

- 設定した地下構造モデルのうち、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）について、以下の点を踏まえ、地盤減衰（Q値）を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に見直し、標準応答スペクトル用モデルを設定した。
 - EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られておらず、相対的に信頼性が劣る。
 - 標準応答スペクトルを考慮した地震動に更に余裕を持たせることで安全裕度の向上を図る。
- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面（ $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層）で定義されることから、 $V_s=3100\text{m/s}$ の層上面（EL. -1804m）に地震基盤相当面を設定する。
- 見直し後の地下構造モデルを用いて、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施する。

※ 地盤減衰（Q値）の見直しにより地震動レベルは、基準地震動の最大加速度で水平： 15cm/s^2 、鉛直： 12cm/s^2 増大。（補足⑥）

地震観測記録の最大加速度で数 cm/s^2 程度増大する。（補足⑦）

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル
（標準応答スペクトル用モデル）

設定した地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値		層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
解放基盤表面											
-15m	0.0	2.35	1350	3000	12.5		0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m							-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5		-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m											
-150m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5		-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-200m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5		-0.135	2.35	1770	3650	16.7
地震基盤相当面											
-1804m	-0.185	2.40	2100	4000	200		-0.185	2.40	2100	4000	200
	-1.789	2.60	3100	5500	300		-1.789	2.60	3100	5500	300

: 見直し範囲

2.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

■ 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認方針

- 標準応答スペクトル用モデルの設定にあたり、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を、Q=12.5からQ=16.7に見直し。
- 本節では、「2.4 地下構造モデルの妥当性確認」で実施した項目のうち、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）の見直しの影響を受ける「PS検層モデルとの比較による確認」により、全ての周期帯における、標準応答スペクトル用モデルの妥当性を確認。

確認方法	対象深度EL. (m)			比較方法	比較対象		確認する観点
	-15.0	-90.0	-200				
PS検層モデルとの比較による確認				理論伝達関数	標準応答スペクトル用モデル	PS検層モデル	標準応答スペクトル用モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数と同等もしくは上回る。

2.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

■ PS検層モデルとの比較

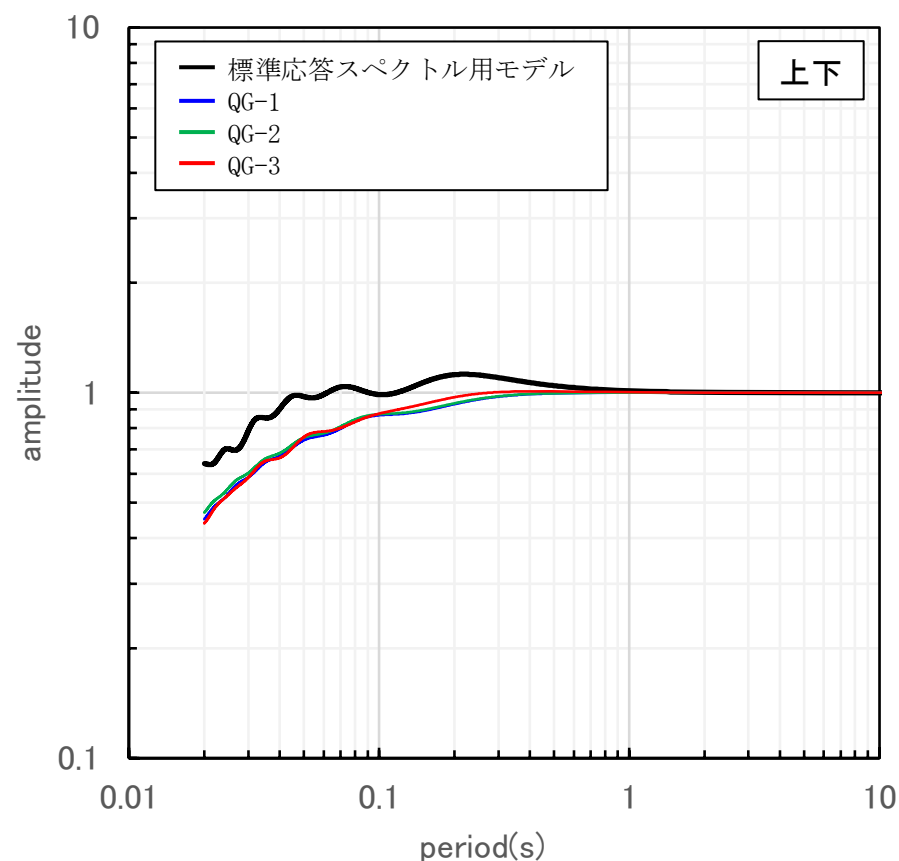
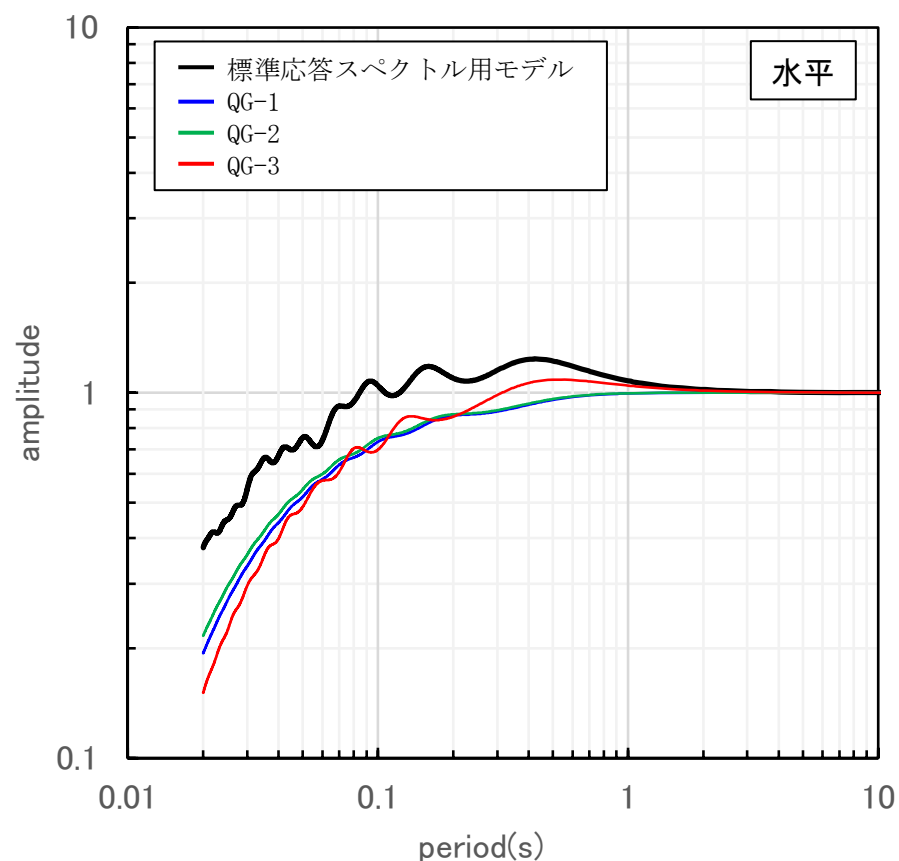
- 標準応答スペクトル用モデルとPS検層モデルの理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の比較を実施する。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	標準応答スペクトル用 モデル			QG-1モデル			QG-2モデル			QG-3モデル		
	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)												
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -90.0m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -100m)	1570	3440	16.7	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8			
▼ (EL. -144m)	1730	3470	16.7									
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	16.7							1550	3320	10.6
	2100	4000	200	1550	3190	200	1590	3220	200	1550	3320	200

2.6 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

■ 伝達関数の比較

- 標準応答スペクトル用モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）が、PS検層モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）に対して、同等もしくは上回ることを確認し、解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mまでの範囲における標準応答スペクトル用モデルは全ての周期帯において妥当と判断した。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

2.7 標準応答スペクトル用モデルの地震動評価への適用

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたり、標準応答スペクトルは0.02秒～5秒で定義され全周期に適用可能な地下構造モデルの設定が必要であることから、既許可以降取得した地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを新たに設定（標準応答スペクトル用モデル）し、その妥当性について確認した。
- また、標準応答スペクトル用モデルに対し、既許可の敷地ごとに震源を特定して策定する基準地震動に影響がないことを確認した。影響確認には、標準応答スペクトル用モデルの地震基盤相当面以深に、既許可の地下構造モデルの層を追加したモデル（標準応答スペクトル用モデルを反映したモデル）を用いた。

(1) 既許可の敷地ごとに震源を特定して策定する基準地震動評価

- ・ 応答スペクトルに基づく地震動評価は、Noda et al. (2002)²⁾の手法の評価結果に基づきSs-1を策定（地下構造モデルを使用しない）
- ・ 断層モデルを用いた手法による地震動評価は、経験的グリーン関数法によりSs-2及びSs-3を策定。経験的グリーン関数法と長周期の理論的手法による地震動とのハイブリッド合成法による評価結果は経験的グリーン関数法より小さいことを確認し、経験的グリーン関数法による結果で代表させた。
- ・ 経験的グリーン関数法について、基準地震動Ss-2（城山南断層の断層傾斜角の不確かさケース (No. 9)）と基準地震動Ss-3（竹木場断層の断層傾斜角の不確かさケース (No. 8)）に対応する統計的グリーン関数法の結果との比較し、妥当性を確認。

(2) 既許可地震動評価への影響確認結果（補足⑨）

- ・ 標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルを用いた理論計算と経験的グリーン関数法のハイブリッド合成法による評価結果は、既許可評価を下回ることから、経験的グリーン関数法で代表させる既許可評価に影響がないことを確認。
- ・ 標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルを用いた統計的グリーン関数法による評価結果は、既許可と同様に長周期では経験的グリーン関数法が大きく、短周期では同等の傾向であり、経験的グリーン関数法を採用する既許可評価に影響はないことを確認。

2.7 標準応答スペクトル用モデルの地震動評価への適用

- したがって、標準応答スペクトル用モデルは全周期に適用可能でその妥当性を確認できていること、また、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルにより既許可の地震動評価に影響を与えないことを確認したことから、地震動評価に用いる地下構造モデルは、標準応答スペクトル用モデルを反映した地震動評価用のモデル（下右図）に統一するものとする。

EL. 解放基盤表面	長周期帯の理論的手法による 地震動評価に用いる地下構造モデル (既許可の地下構造モデル)					標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル (標準応答スペクトル用モデル)					今後の地震動評価用の地下構造モデル				
	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
-15m	0.0	2.35	1350	3000	100	0.0	2.35	1350	3000	12.5	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m						-0.035	2.35	1570	3440	12.5	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.035	2.35	1570	3440	100	-0.075	2.35	1570	3440	16.7	-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m						-0.085	2.35	1730	3470	16.7	-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-150m	-0.085	2.35	1730	3650	100	-0.135	2.35	1770	3650	16.7	-0.135	2.35	1770	3650	16.7
-200m	-0.135	2.35	2100	4000	200	-0.185	2.40	2100	4000	200	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	-0.185	2.40	3100	5500	300	-1.789	2.60	3100	5500	300	-1.789	2.60	3100	5500	300
-3015m	-1.789	2.60	3500	5900	300						-3.0	2.70	3500	5900	300
-20015m	-3.0	2.70	3800	6600	500						-20.0	3.00	3800	6600	500
-33015m	-20.0	3.00	4300	7600	500						-33.0	3.30	4300	7600	500
	-33.0	3.30													

2.7 標準応答スペクトル用モデルの地震動評価への適用

■ 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定根拠は以下のとおり。

地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q値
解放基盤表面								
-15m	0.0	2.35	1350	3000	12.5	岩石試験結果を 基に設定	試掘坑内弾性波試験 結果を基に設定	地震観測記録 を用いた検討 を基に設定
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5	上層の 岩石試験結果 を基に設定	PS検層結果 を基に設定	
-90m	-0.075	2.35	1570	3440	16.7			
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	16.7			
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	16.7			
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	地震調査委員会(2007) ³⁾ を基に設定	速度層断面、 ボーリング孔 内減衰測定に よる検討を踏 まえ設定 ^{※1}	
地震基盤相当面								
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300	地震調査委員会(2003) ¹⁸⁾ を基に設定		
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300			
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500			
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500			

※1 EL. -90mからEL. -200mまでは、EL. -90m以浅と比較して、S波速度に大きな差異が見られず、ボーリング孔内減衰測定結果の地盤減衰(Q値)が同等であることから、Q=12.5とした上で、この範囲では地震観測記録が得られていないことから、さらに保守的にQ=16.7と設定する。

※2 地震調査委員会(2007、2003)^{3)、18)}のQ値が慣用値(Vs/15~Vs/10)を大きく上回る層については、地震調査委員会(2007、2003)^{3)、18)}のQ値を基に設定。

3. 模擬地震波の作成

3.1 模擬地震波の作成方針

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる模擬地震波の作成方針

- 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（以下、「審査ガイド」とする。）では、下記のように示されている。

震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトル（地震動レベル）に対して、地震動の継続時間及び振幅包絡線の経時的変化等の特性が適切に考慮されていることを確認する。また、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震動を作成する場合には複数の方法（例えば、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、実観測記録の位相を用いる方法等）により検討が行われていることを確認する。

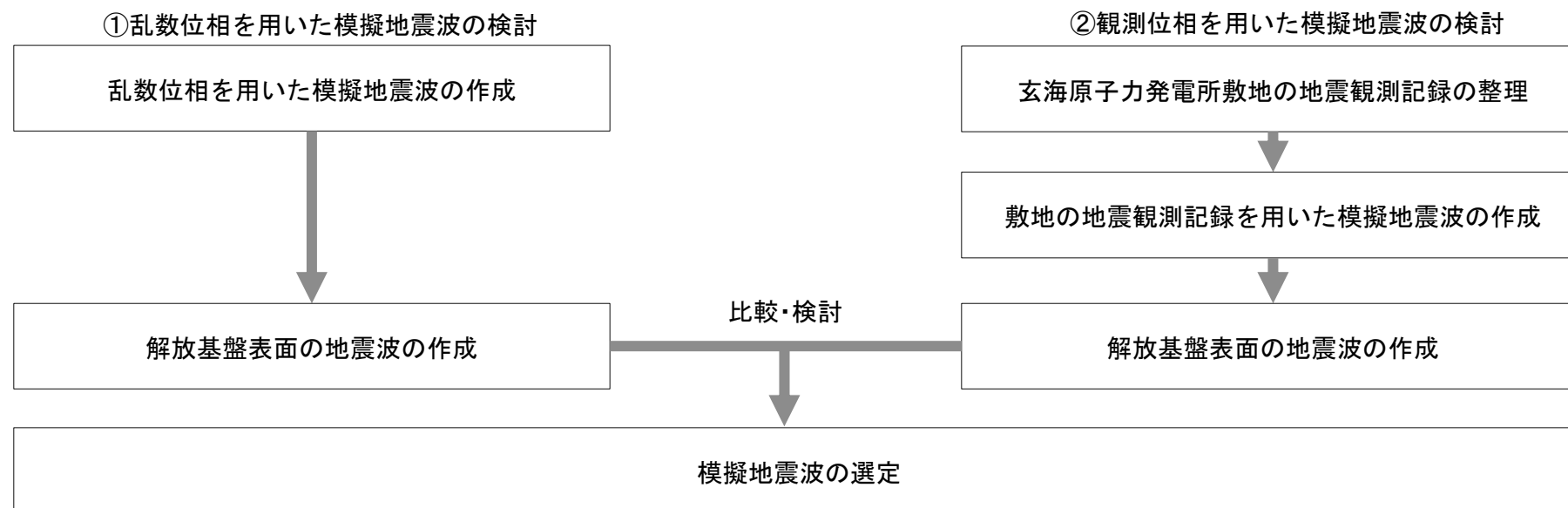
- 審査ガイドを踏まえて、以下の方針で模擬地震波を作成し、解放基盤表面における地震波を比較・検討した上で、「標準応答スペクトルを考慮した地震動」に用いる模擬地震波を設定する。

①正弦波の重ね合わせによる位相（乱数位相）を用いた模擬地震波（以下、乱数位相を用いた模擬地震波という。）

→Noda et al. (2002)²⁾の手法に基づき乱数位相を用いた模擬地震波を作成。

②実観測記録の位相を用いた模擬地震波（以下、観測位相を用いた模擬地震波という。）

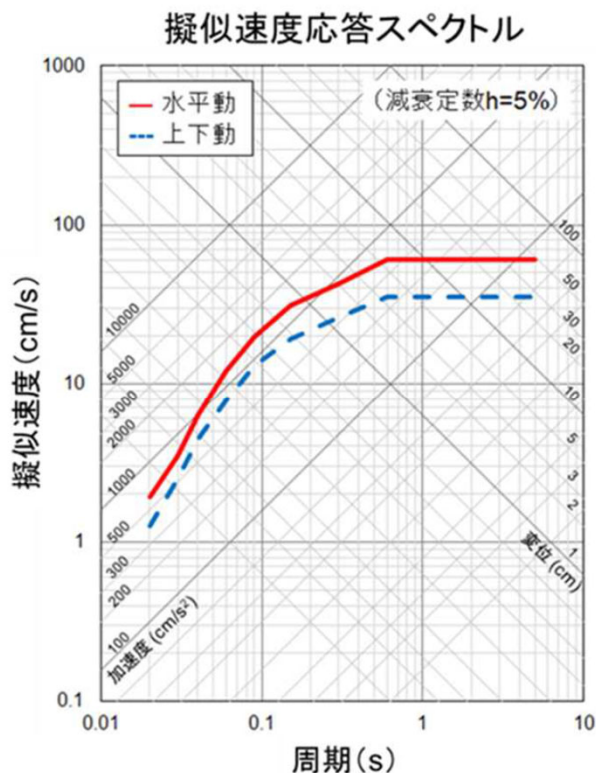
→玄海原子力発電所敷地で得られた地震観測記録を整理し、実観測記録の位相を用いて模擬地震波を作成。



3.1 模擬地震波の作成方針

■ 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

- 複数の方法による検討では、「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」に記載された標準応答スペクトルに適合するように地震基盤相当面における模擬地震波を作成する。
- また、模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度は、日本電気協会(2015)¹⁹⁾に記載された判定基準を満足させることで確認する。



コントロールポイント

周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
解放基盤表面	-15m	0.0	1350	3000	12.5
	-50m	-0.035	1570	3440	12.5
	-90m	-0.075	1570	3440	16.7
	-100m	-0.085	1730	3470	16.7
	-150m	-0.135	1770	3650	16.7
	-200m	-0.185	2100	4000	200
地震基盤相当面	-1804m	-1.789	3100	5500	300

地震基盤相当面における標準応答スペクトル
 (「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」より抜粋)

3.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

- 地震基盤相当面での乱数位相を用いた模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al. (2002)²⁾による振幅包絡線の経時的变化を採用し、下記の条件でマグニチュードM及び等価震源距離 X_{eq} を設定した上で、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。

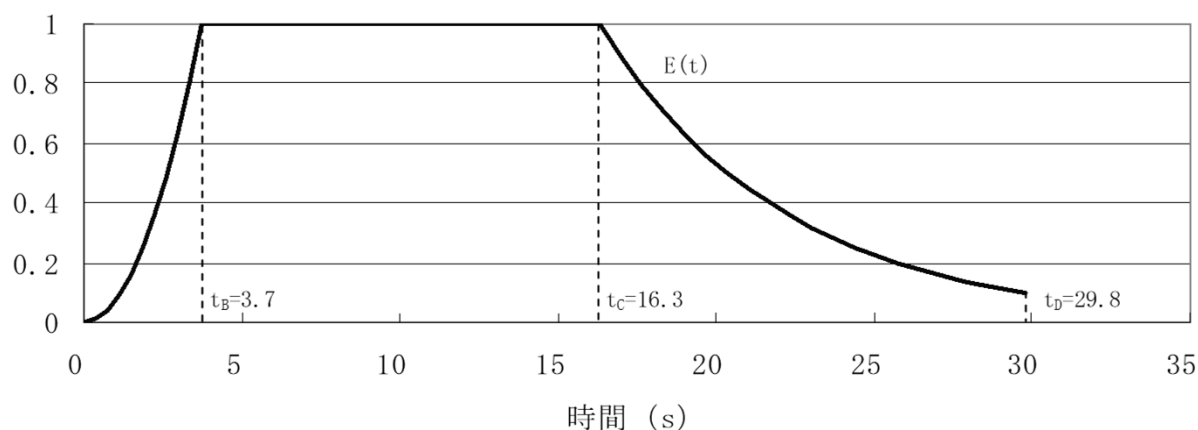
マグニチュード M:

審査ガイドにおける「全国共通に考慮すべき地震動」の地震規模は、Mw6.5程度未満と記載されている。武村(1990)²⁰⁾の M_0 -M関係及びKanamori(1977)²¹⁾の M_0 -Mw関係によりMw6.5をMに換算するとM6.9となる。審査ガイドでは「Mw6.5程度未満」と幅をもって示されていることから、換算式から求められるMについても幅を持たせ、模擬地震波の主要動の継続時間が長めとなるよう保守的にM7.0として設定。

等価震源距離 X_{eq} :

等価震源距離は震源近傍を想定し、 $X_{eq}=10\text{km}$ として設定。

模擬地震波	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的变化 (s)		
		t_B	t_C	t_D
水平	29.8	3.7	16.3	29.8
鉛直	29.8	3.7	16.3	29.8



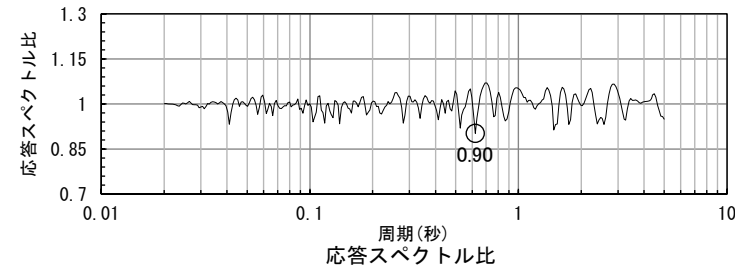
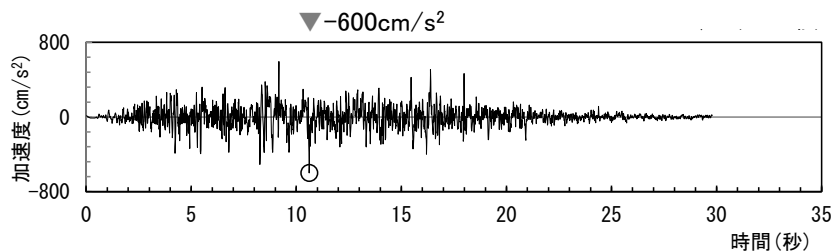
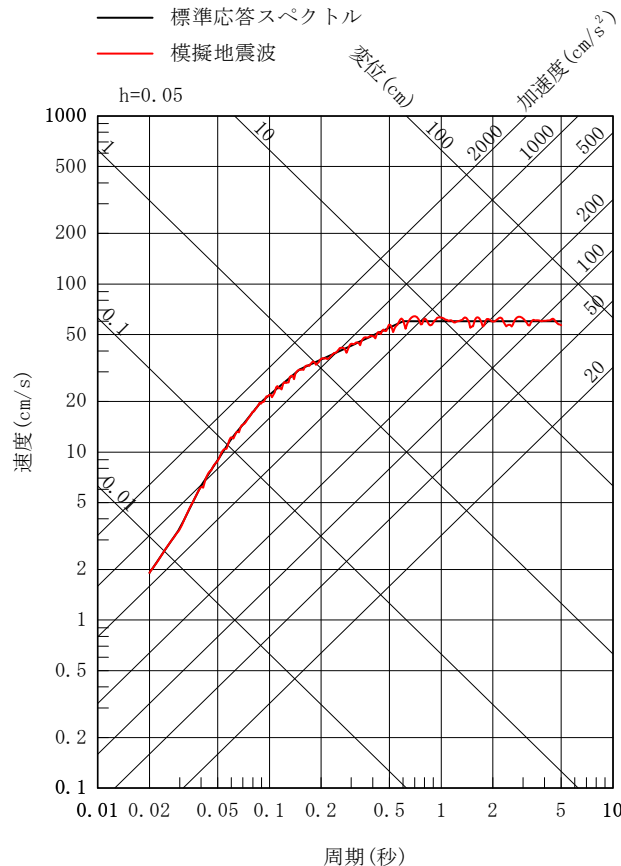
$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & (0 < t \leq t_B) \\ 1.0 & (t_B < t \leq t_C) \\ \frac{\ln(0.1)}{e^{t_D-t_C}} (t-t_C) & (t_C < t \leq t_D) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} t_B &= 10^{0.5M-2.93} \\ t_C - t_B &= 10^{0.3M-1.0} \\ t_D - t_C &= 10^{0.17M+0.54 \log X_{eq}-0.6} \end{aligned}$$

3.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（水平方向）

- 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（水平方向）を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)¹⁹⁾に記載された判定基準を満足することを確認した。



	作成結果
①応答スペクトル比R(T)	0.90 ≥ 0.85
②SI比	1.00 ≥ 1.00

$$\textcircled{1} \quad R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T : 周期 (s)

$S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

$$\textcircled{2} \quad SI \text{比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

SI : 応答スペクトル強さ

$S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

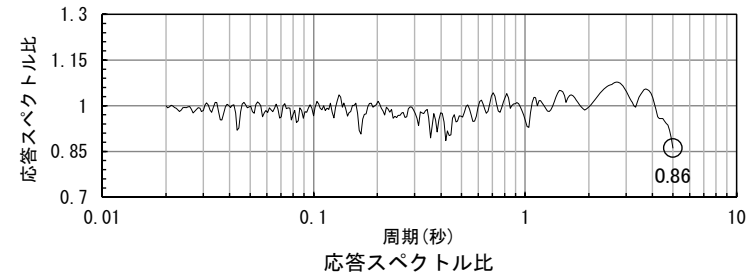
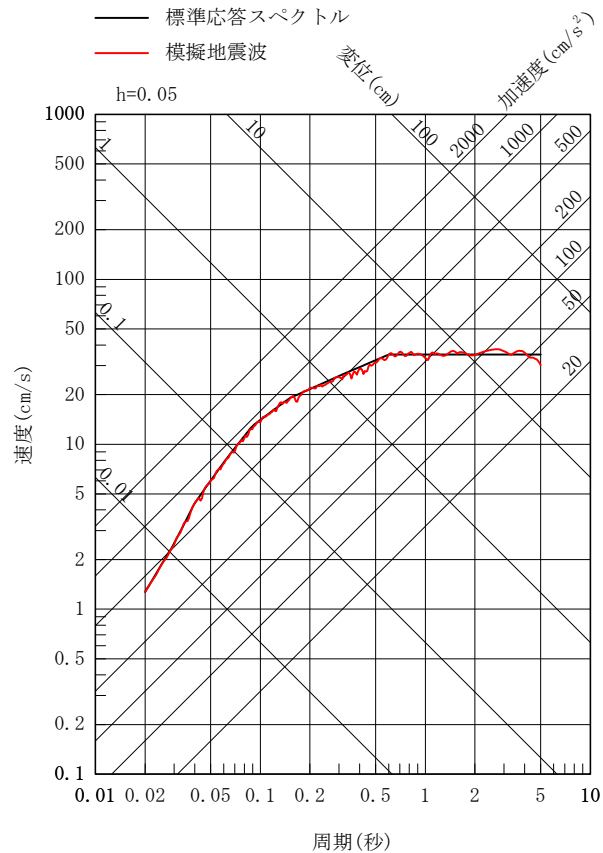
$\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

T : 固有周期 (s)

3.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（鉛直方向）

- 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（鉛直方向）を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)¹⁹⁾に記載された判定基準を満足することを確認した。



	作成結果
①応答スペクトル比R(T)	0.86 ≥ 0.85
②SI比	1.01 ≥ 1.00

$$\textcircled{1} \quad R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T : 周期 (s)

$S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

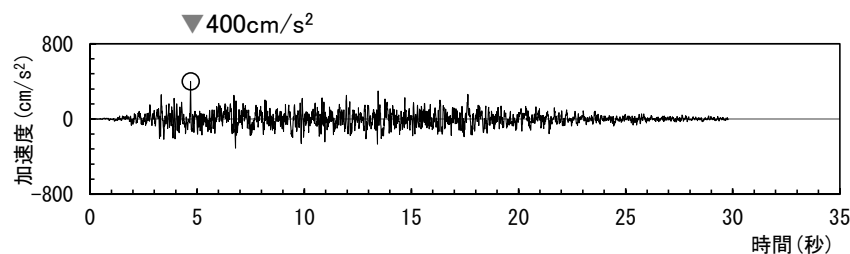
$$\textcircled{2} \quad SI \text{比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

SI : 応答スペクトル強さ

$S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

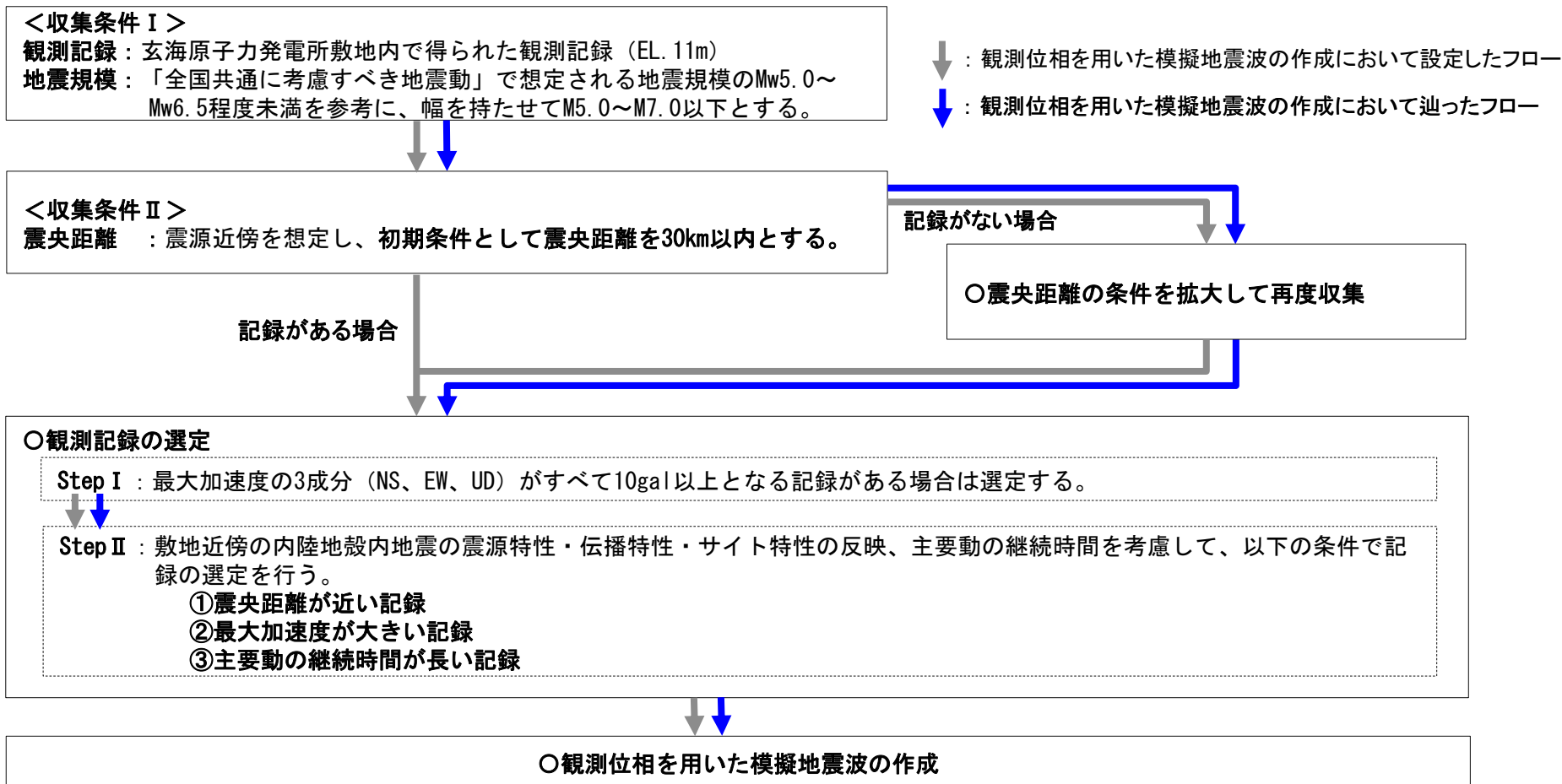
T : 固有周期 (s)



3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集条件（2 / 2）

- 観測位相を用いた模擬地震波は、下記のフローに従い玄海原子力発電所の敷地地盤で得られた観測記録の位相を与えて作成する。
 - 観測位相を用いた模擬地震波には敷地地盤の振動特性を適切に反映することが必要と考えられることから、下記の条件により敷地近傍で発生した内陸地殻内地震の観測記録を収集する。記録が得られていない場合は、対象範囲を拡大した上で観測記録を収集する。
 - 収集した記録が複数ある場合には適切に選定し、観測位相を用いた模擬地震波を作成する。

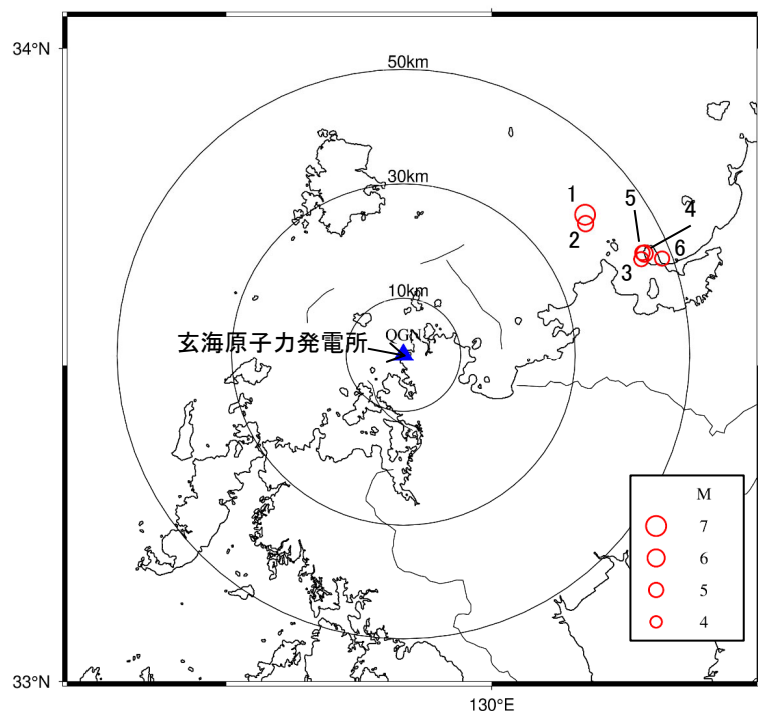


観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集・選定フロー

3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 敷地における地震観測記録の収集及び選定（収集条件 I, II 及び観測記録の選定 Step I）

- 玄海原子力発電所の敷地において、マグニチュード5.0以上で震央距離30km以内の内陸地殻内地震の観測記録は該当なし。
- 敷地からの震央距離を50km以内に対象を拡大すると、6地震が得られる。6地震の震央分布図及び諸元を示す。
- そのうちNS、EW、UD方向すべてが10gal以上の地震は2地震となる。
- なお、6地震の観測記録については、特異な位相特性をもつ記録がないことを確認。



収集した6地震の震央分布図

収集した6地震の諸元

地震 No.	発生日月時・時刻					地名	北緯		東経		震源 深さ (km)	M	震央 距離 (km)	最大加速度 (Gal)			最大加速度 (3成分) 10gal以上 判定
	年	月	日	時	分		度	分	度	分				NS	EW	UD	
1	2005	3	20	10	53	九州北西沖	33	44.35	130	10.58	9.2	7.0	40.2	84.2	69.5	50.9	○
2	2005	3	22	15	55	九州北西沖	33	43.52	130	10.61	10.5	5.4	39.3	4.1	4.1	3.5	除外
3	2005	4	10	20	34	福岡県中部	33	40.11	130	16.93	4.7	5.0	44.9	2.5	3.3	2.1	除外
4	2005	4	20	6	11	福岡県中部	33	40.69	130	17.29	13.5	5.8	45.8	31.8	29.6	16.0	○
5	2005	4	20	9	9	福岡県中部	33	40.72	130	17.03	13.3	5.1	45.5	13.8	17.4	5.8	除外
6	2005	5	2	1	23	福岡県中部	33	40.22	130	19.23	11.4	5.0	48.3	22.1	11.5	4.5	除外

3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 敷地における地震観測記録の収集・選定（観測記録の選定 Step II）

- Step I で選定された2地震について、①震央距離、②最大加速度、③主要動の継続時間について比較・検討する。
- ①震央距離が最も近く、②最大加速度が最も大きく、③主要動の継続時間が最も長いのは、「No.1 2005年3月20日 九州北西沖の地震（福岡県西方沖地震 本震）（M7.0）」
- 以上より、「No.1 2005年3月20日 九州北西沖の地震（福岡県西方沖地震 本震）（M7.0）」を、観測位相を用いた模擬地震波に用いる記録として選定する。

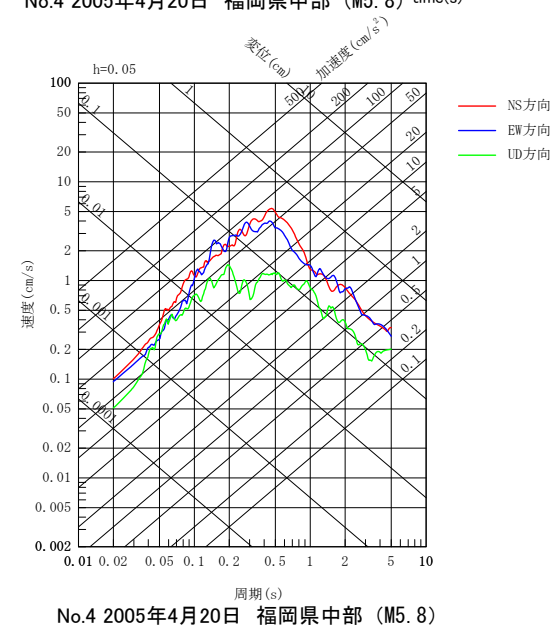
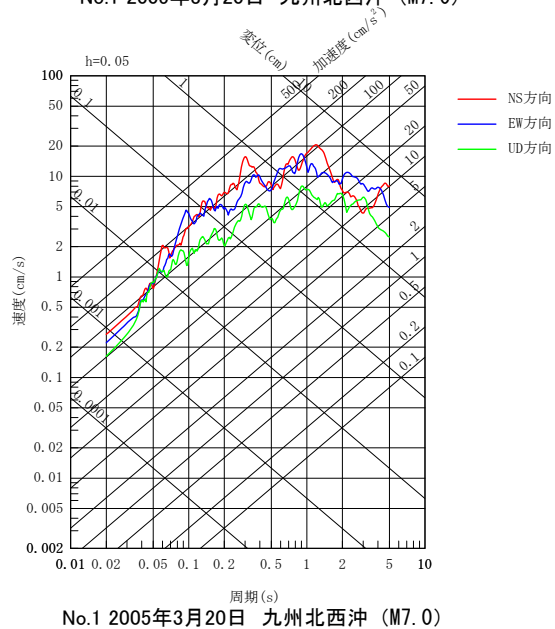
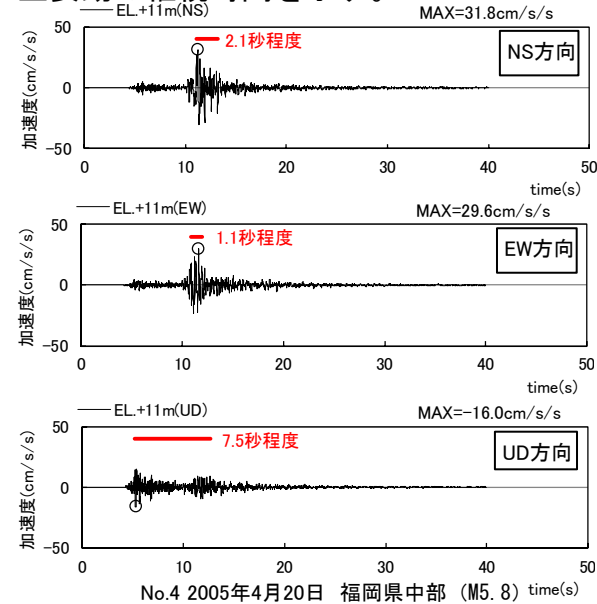
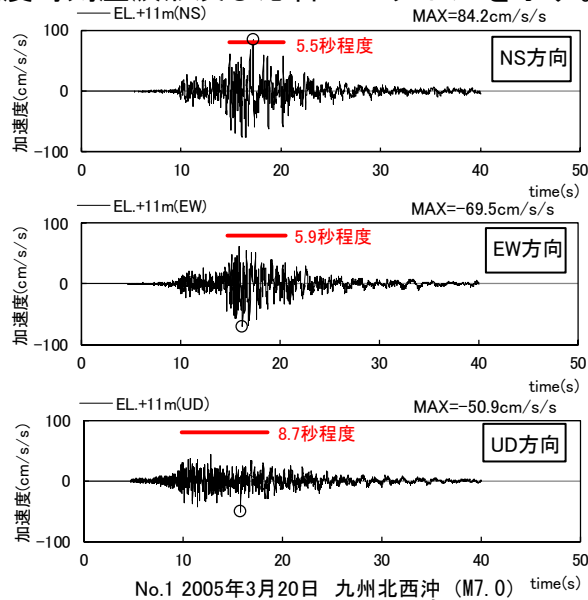
No.	地震名	地震規模 M	①震央距離 (km)	②最大加速度 (gal)	③主要動の継続時間※ (秒)			実観測位相の選定
					NS	EW	UD	
1	2005年3月20日 九州北西沖の地震 (福岡県西方沖地震 本震)	7.0	<u>40.2</u>	<u>84.2</u>	<u>5.5</u>	<u>5.9</u>	<u>8.7</u>	①震央距離が最も近い ②最大加速度が最も大きい ③主要動の継続時間が最も長い
4	2005年4月20日 福岡県中部の地震 (福岡県西方沖地震 余震)	5.8	45.8	31.8	2.1	1.1	7.5	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が短い

※最大加速度の0.5倍以上の振幅の継続時間を主要動の継続時間として評価。

3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 収集・選定された地震観測記録（加速度時刻歴波形・応答スペクトルの比較）

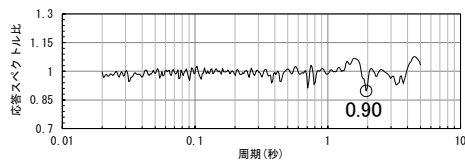
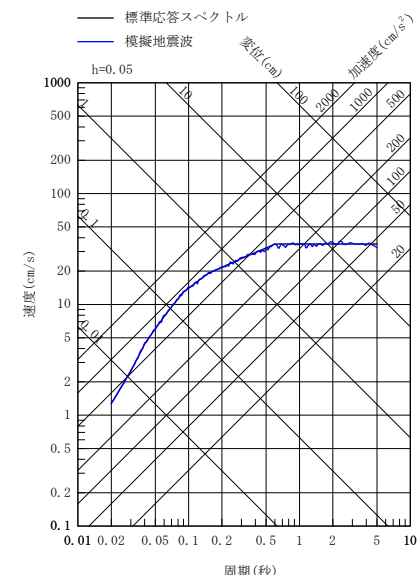
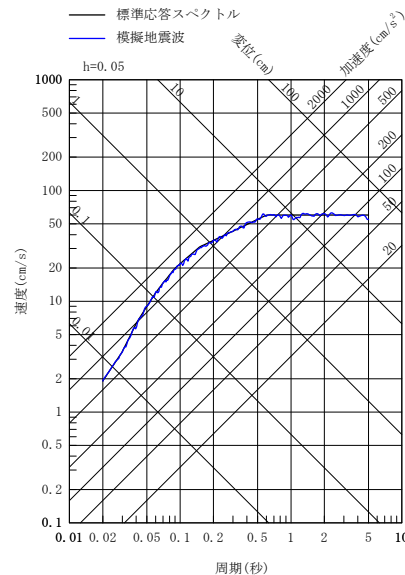
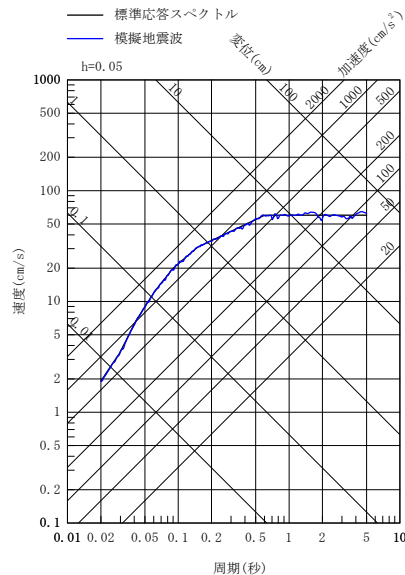
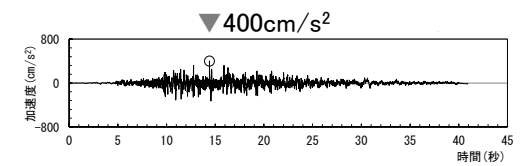
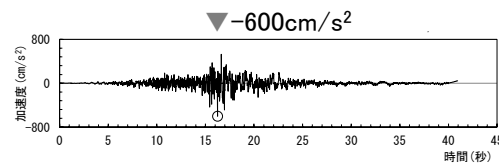
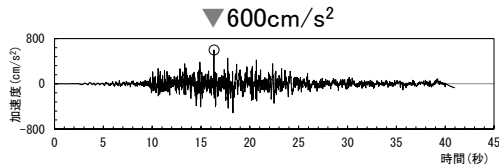
- 2地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。なお、赤線は、主要動の継続時間を示す。



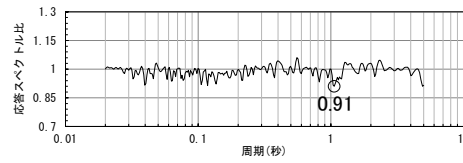
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 模擬地震波の作成結果 (No1. 2005年3月20日の地震)

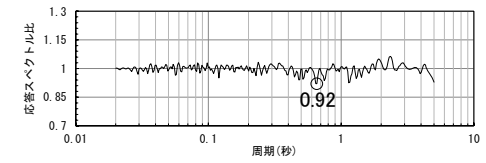
- 観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトル及び時刻歴波形を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)¹⁹⁾に記載された判定基準を満足することを確認した。



NS方向



EW方向



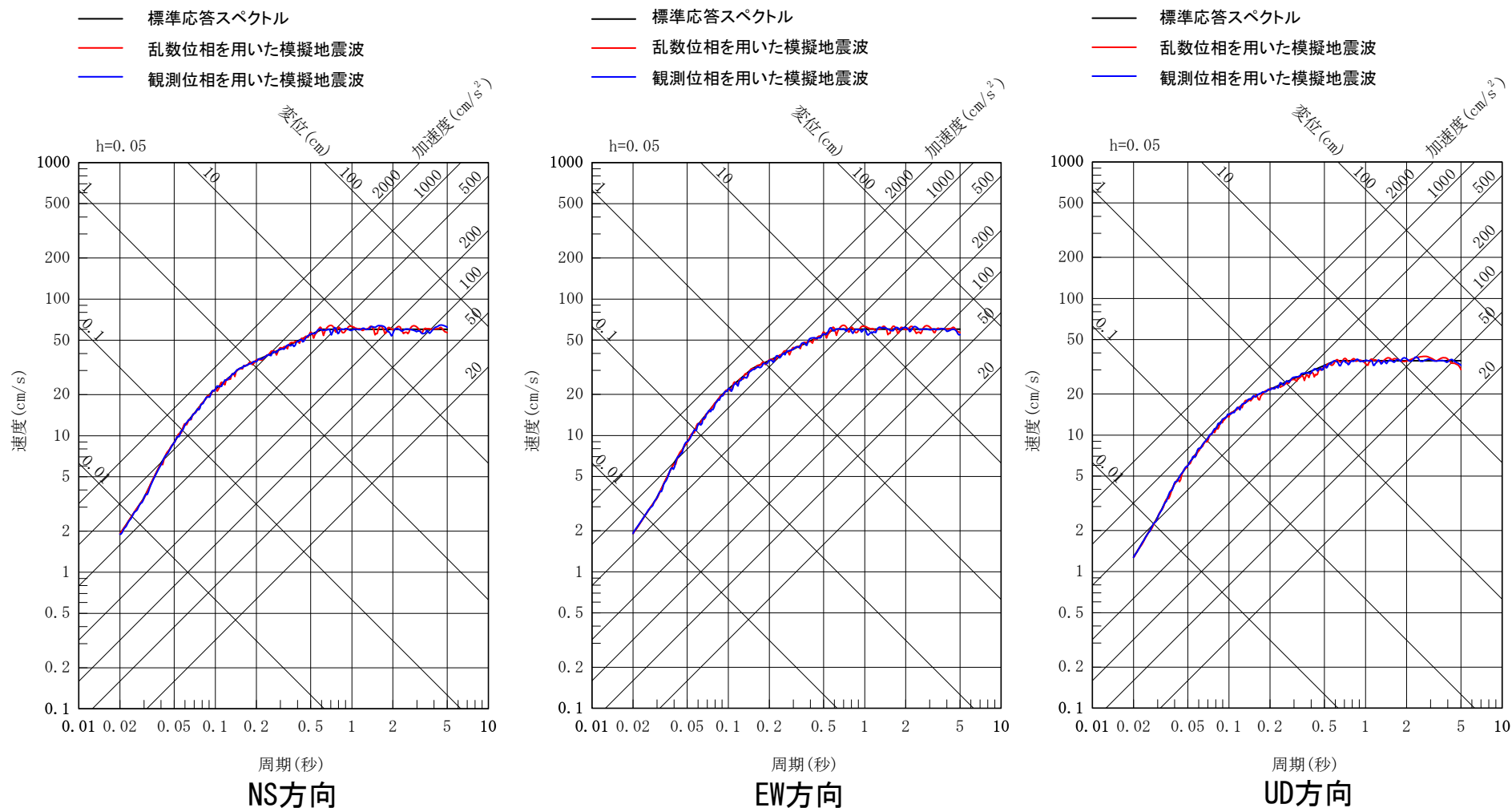
UD方向

作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
① 応答スペクトル比R(T)	0.90 ≥ 0.85	0.91 ≥ 0.85	0.92 ≥ 0.85
② SI比	1.00 ≥ 1.00	1.00 ≥ 1.00	1.00 ≥ 1.00

3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 地震基盤相当面における模擬地震波の応答スペクトル（乱數位相を用いた模擬地震波との比較）

- 乱數位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトルの比較を以下に示す。
- 両者の応答スペクトルは、標準応答スペクトルに適合するよう作成していることから、有意な差は見られない。



地震基盤相当面における模擬地震波の応答スペクトルの比較

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の作成

- 地震基盤相当面における模擬地震波に対して、一次元波動論により、解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、標準応答スペクトルを考慮した解放基盤表面での地震動を作成する。解放基盤表面における地震動の検討は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを使用する。

■ 解放基盤表面の地震波の比較

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波について、下記のような着目点で比較を行い複数の方法による特徴の違いを確認した上で、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる模擬地震波を選定する。

比較・検討項目	着目点	概要
①時刻歴波形	<ul style="list-style-type: none">最大加速度の大きさ強震部の継続時間[※]の長さ	<ul style="list-style-type: none">解放基盤表面における時刻歴波形の最大加速度について比較解放基盤表面における時刻歴波形の強震部の継続時間について比較
②応答スペクトル	<ul style="list-style-type: none">周期ごとの応答値の大きさ周期ごとの応答値の比の大きさ	<ul style="list-style-type: none">解放基盤表面における応答スペクトルの比較地震基盤相当面における応答スペクトルに対する解放基盤表面における応答スペクトルの比による増幅率の比較

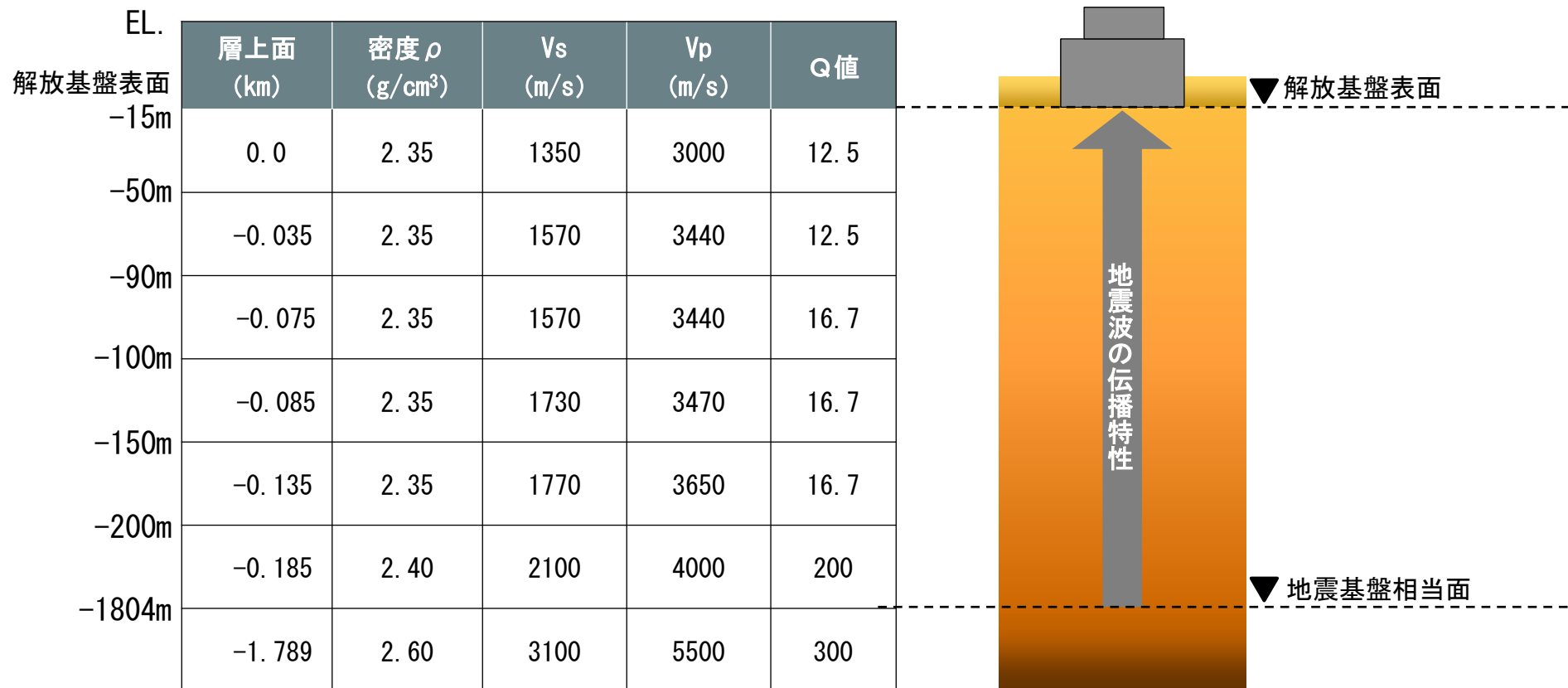
※解放基盤表面の地震波の最大加速度(水平;568~617gal、鉛直;385~441gal)の0.5倍を目安として水平300gal以上、鉛直200gal以上の振幅の継続時間を強震部の継続時間として評価。

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の作成

- 地震基盤相当面の模擬地震波に対して、敷地の地盤増幅特性を考慮するため、一次元波動論により、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを使用して解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定する。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル



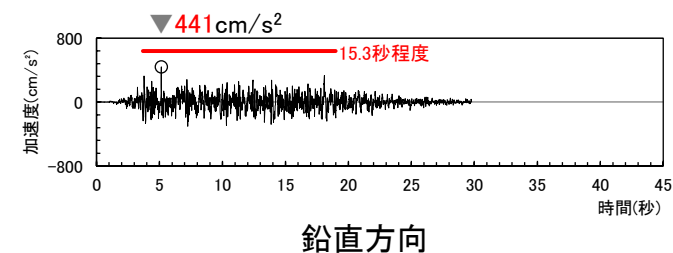
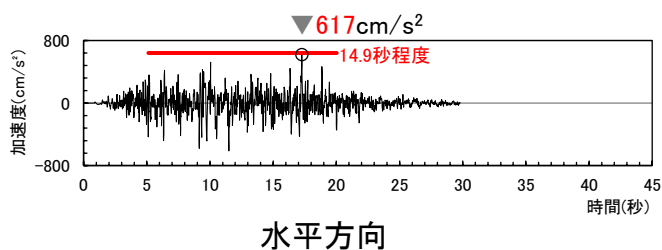
標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

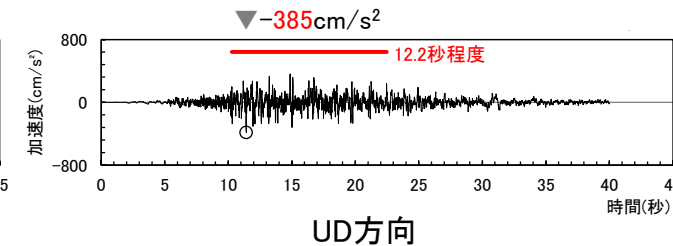
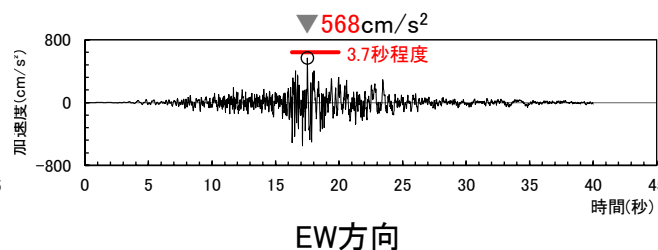
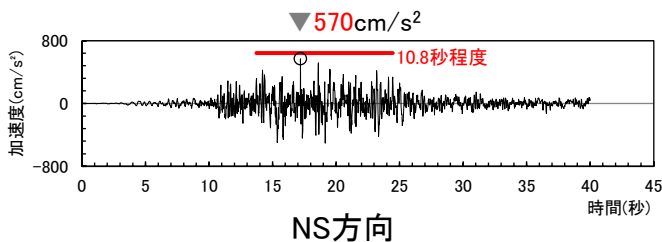
■ 解放基盤表面の地震波の比較：①時刻歴波形

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波を以下に示す。なお、赤線は、強震部の継続時間を示す。
- 最大加速度の大きさは、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の方が大きいことを確認。
- 強震部の継続時間についても同様に、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の方が長いことを確認。

● 乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波



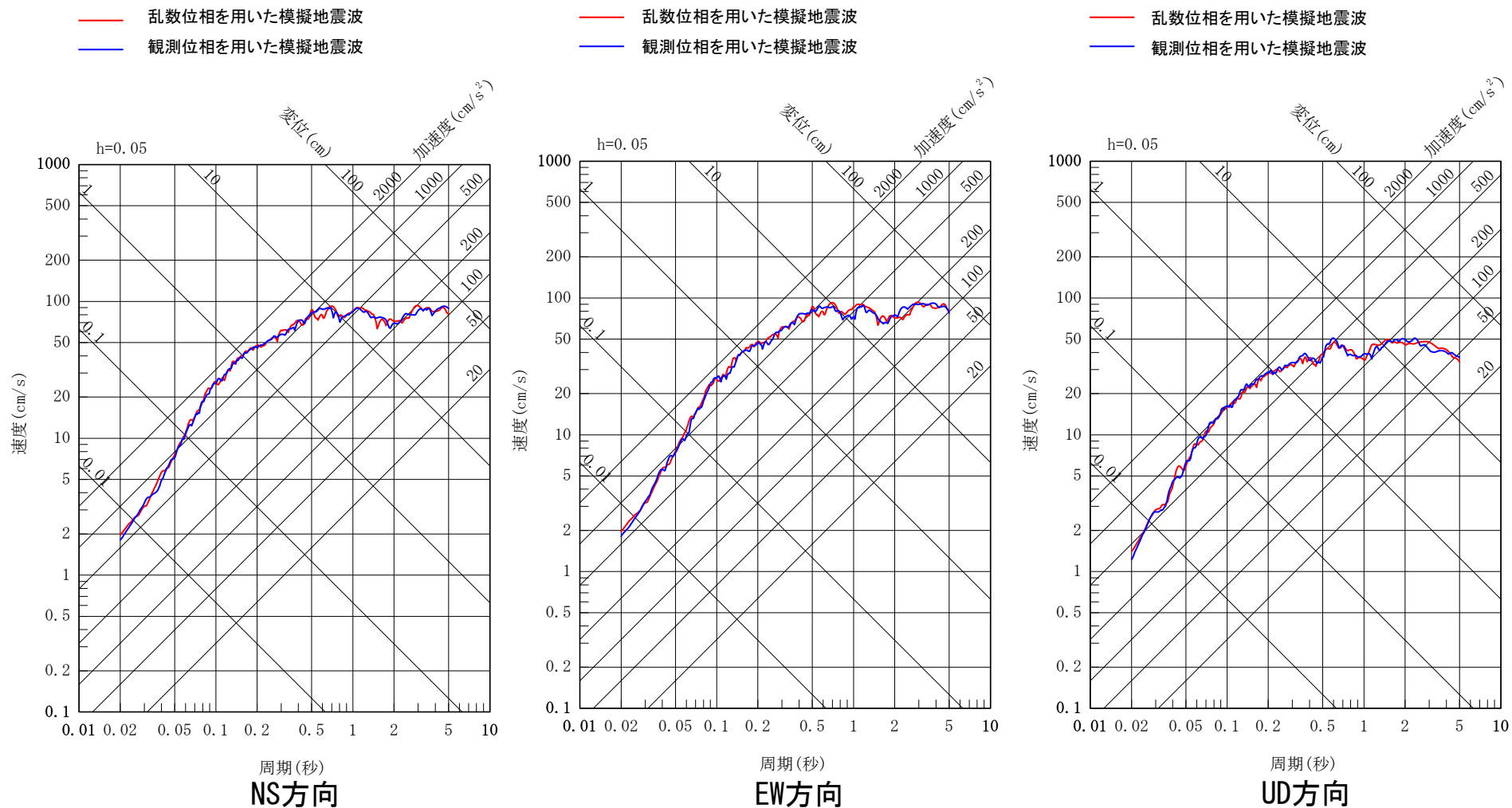
● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波



3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の比較：②応答スペクトル

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の応答スペクトルを以下に示す。
- 解放基盤表面での両者の応答スペクトルは同程度であり、位相の違いによる影響がないことを確認。

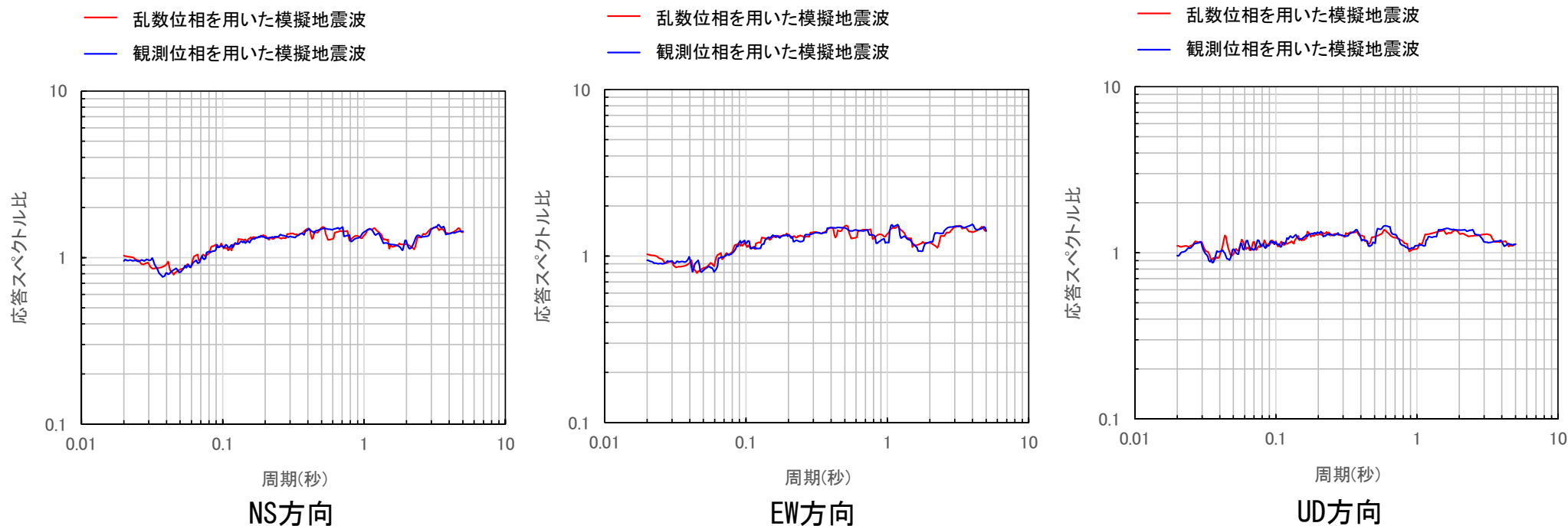


解放基盤表面の地震波の応答スペクトル

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の比較：②応答スペクトル

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波について、地震基盤相当面における応答スペクトルに対する解放基盤表面における応答スペクトルの比を示す。
- 両者の応答スペクトル比は同程度であり、位相の違いによる影響がないことを確認。



応答スペクトルの比(解放基盤表面/地震基盤相当面)

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の比較結果

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の比較結果を以下に示す。
- 比較の結果、時刻歴波形については、観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の方が最大加速度が大きく強震部の継続時間が長いこと、応答スペクトルについては、応答値の大きさ及び応答値の比の大きさともに、両者が同程度であることを確認した。
- 以上より、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価においては、乱数位相を用いた模擬地震波を採用する。

解放基盤表面の地震波の比較結果

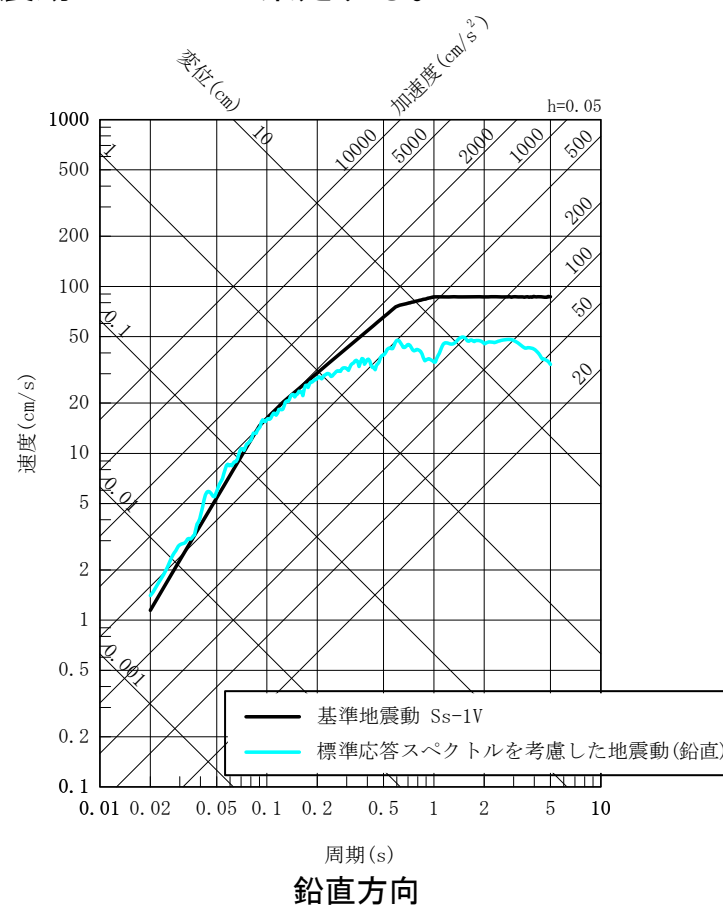
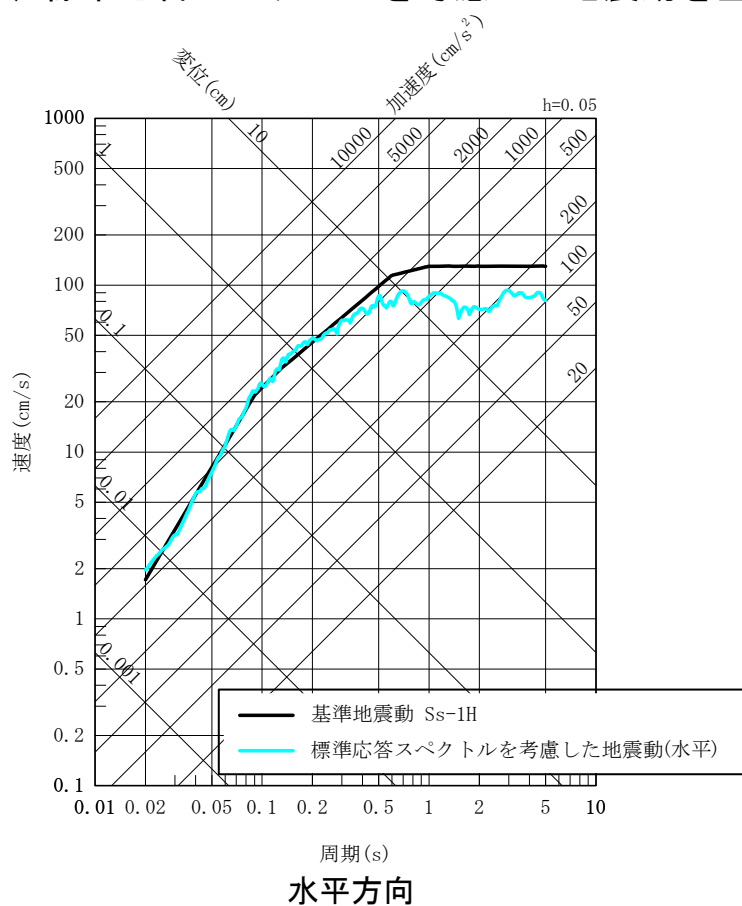
比較・検討項目	着目点	比較結果
①時刻歴波形	最大加速度の大きさ	観測位相を用いた模擬地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波の方が大きい
	強震部の継続時間の長さ	観測位相を用いた模擬地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波の方が長い
②応答スペクトル	周期ごとの応答値の大きさ	乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度
	周期ごとの応答値の比の大きさ	乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度

4. 基準地震動の策定

4. 基準地震動の策定

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動の策定

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動の策定にあたっては、標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトルがいずれかの周期帯で基準地震動Ss-1の応答スペクトルを上回る場合、新たに基準地震動として策定する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動は、一部の周期帯で基準地震動Ss-1を上回る。
- このため、標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動Ss-6として策定する。

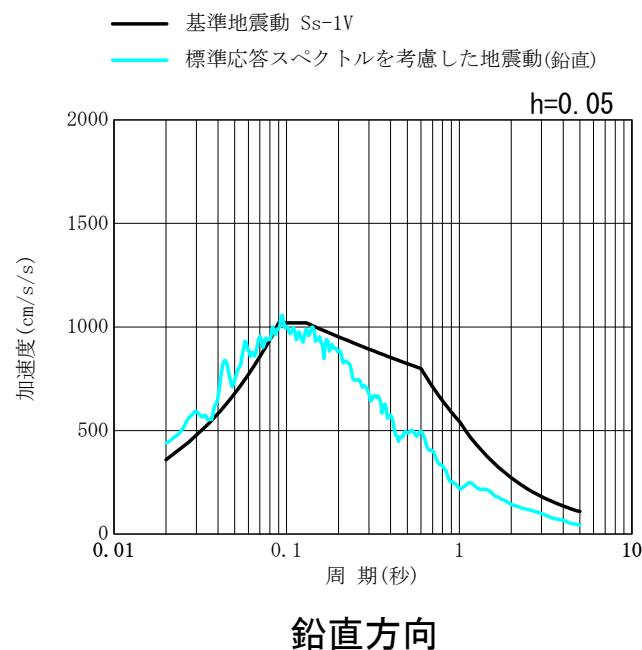
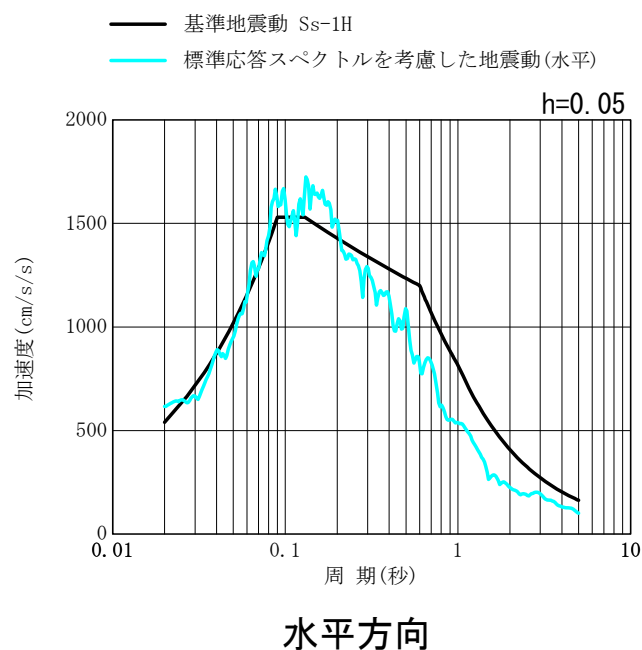


標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動Ss-1との応答スペクトルの比較

4. 基準地震動の策定

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動の策定

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動の水平成分は、周期0.2秒付近より長周期側では基準地震動 S_s-1 を下回るが、周期0.2秒付近より短周期側の一部の周期帯（0.02~0.03秒付近、0.04秒付近、0.06~0.2秒付近）では、基準地震動 S_s-1 を上回る。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動の鉛直成分は、周期0.09秒付近より長周期側では基準地震動 S_s-1 を下回るが、周期0.09秒付近より短周期側では、基準地震動 S_s-1 を上回る。

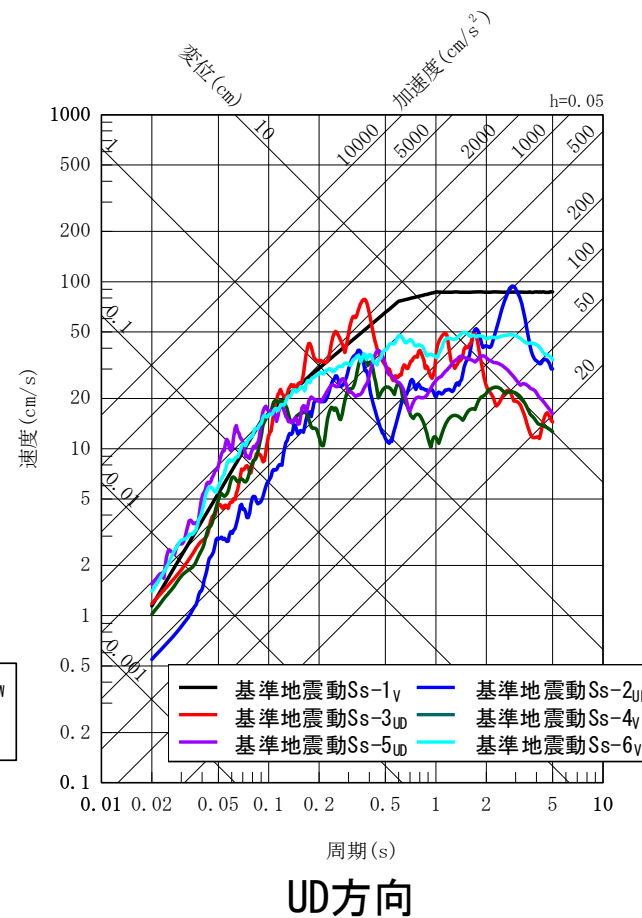
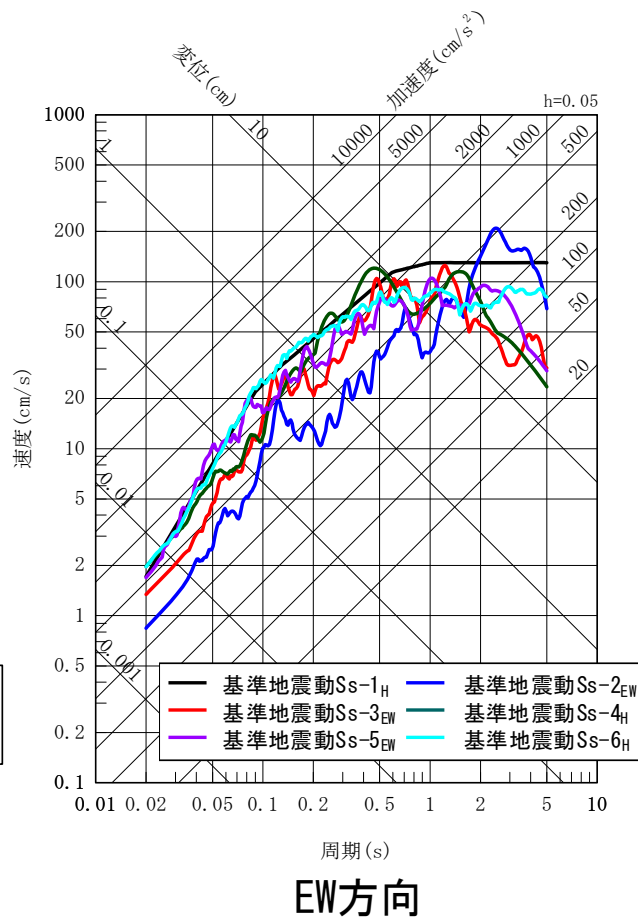
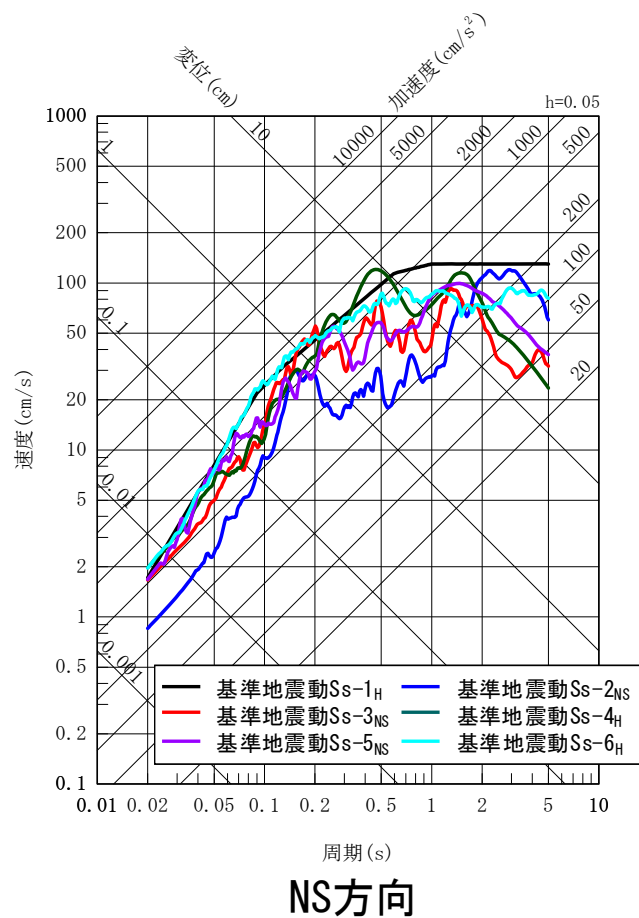


標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動 S_s-1 との応答スペクトルの比較

4. 基準地震動の策定

■ 基準地震動の応答スペクトル

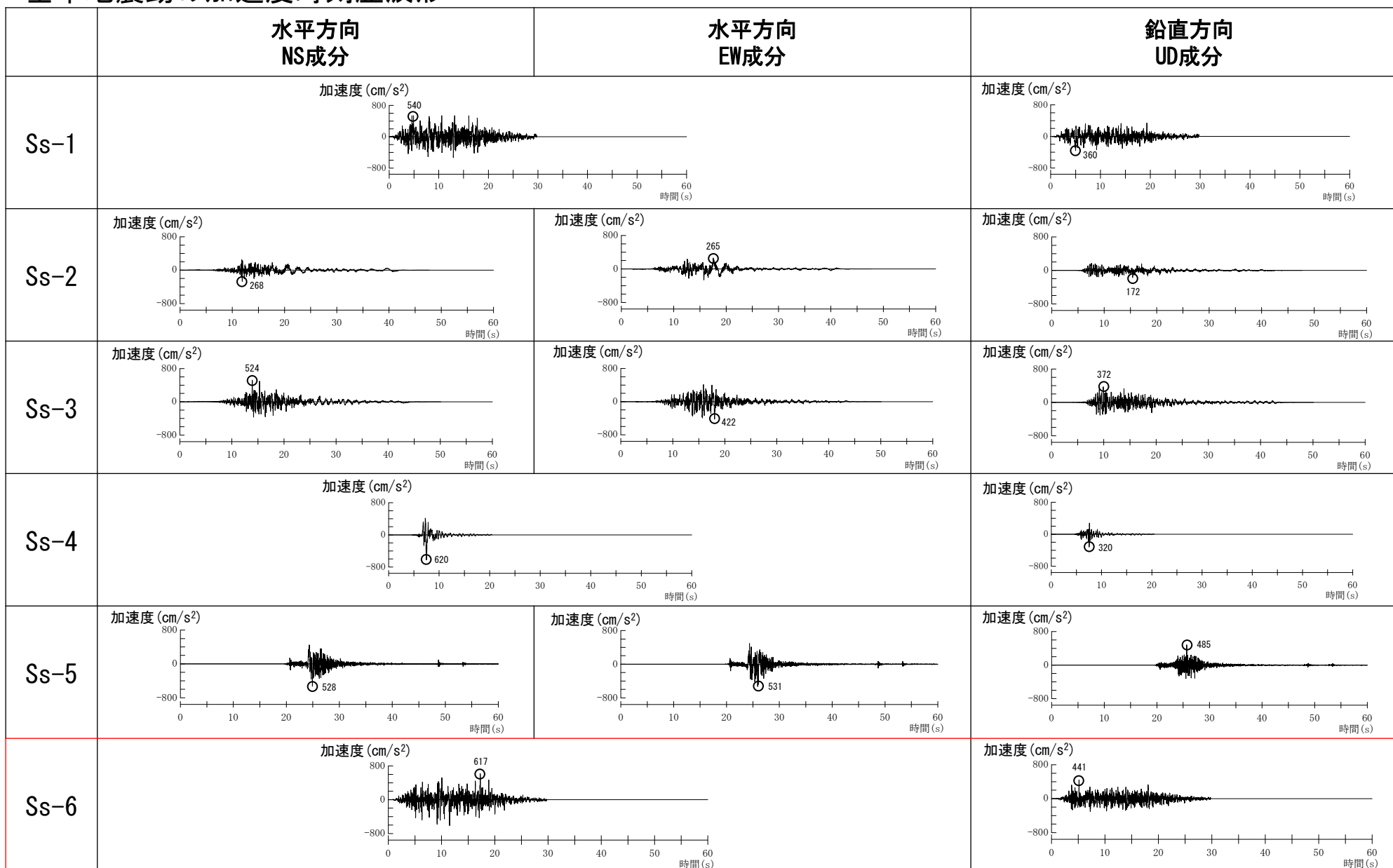
- 基準地震動Ss-1～Ss-6の応答スペクトルを以下に示す。



基準地震動の応答スペクトル

4. 基準地震動の策定

■ 基準地震動の加速度時刻歴波形



4. 基準地震動の策定

■ 基準地震動の最大加速度一覧

基準地震動の最大加速度(単位:cm/s²)

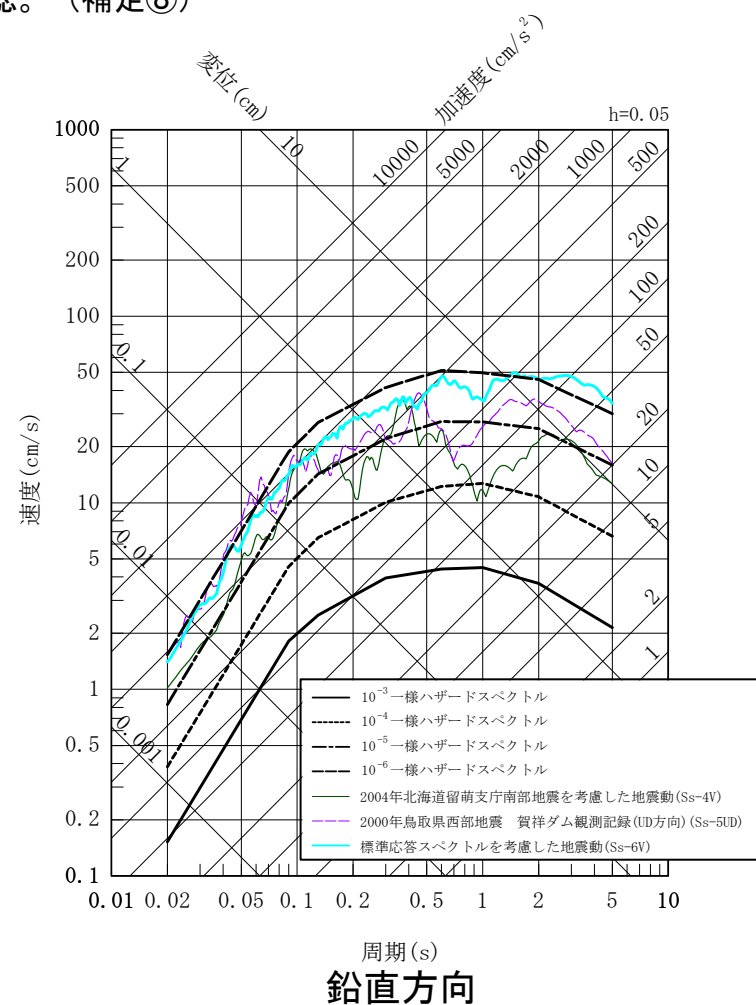
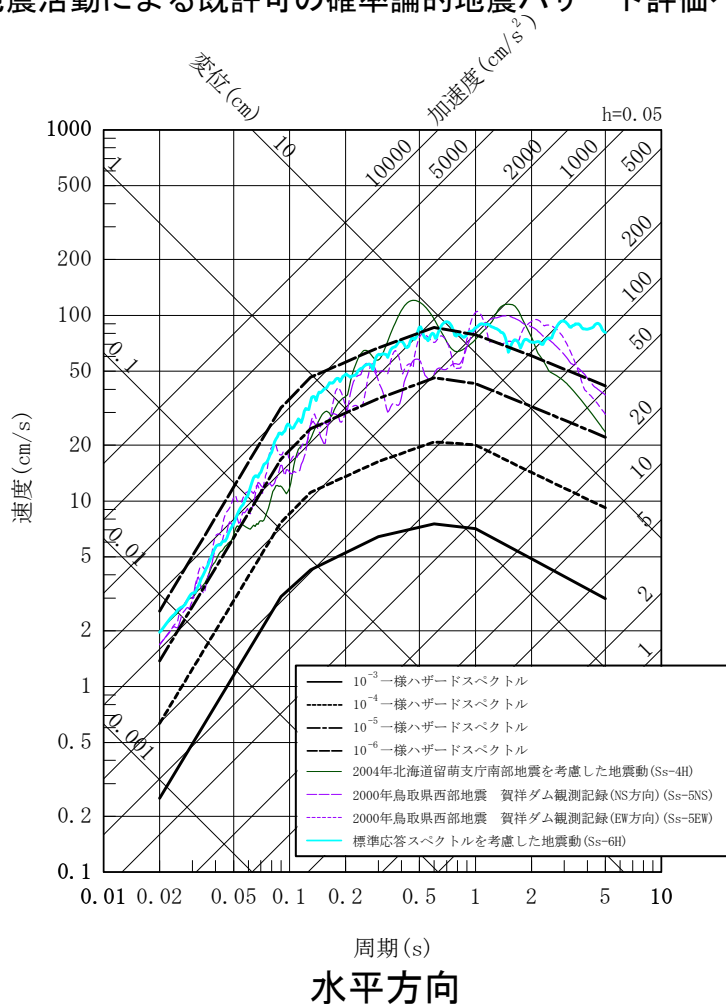
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540		360
断層モデルを用いた手法	城山南断層	Ss-2	268	265	172
	竹木場断層	Ss-3	524	422	372
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
全国共通に考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-4	620		320
地域性を考慮する地震動 (Mw6.5程度以上)	鳥取県西部地震	Ss-5	528	531	485
全国共通に考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	標準応答スペクトル	Ss-6	617		441

5. 超過確率の参照

5. 超過確率の参照

■ 「震源を特定せず策定する地震動」の超過確率

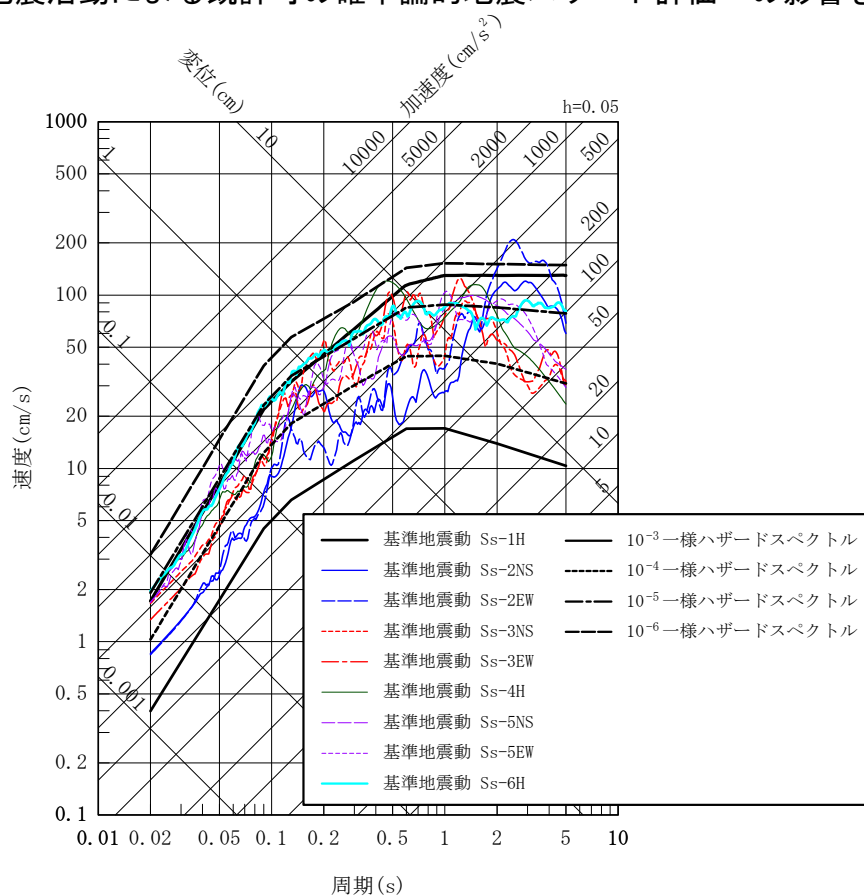
- 「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較する。
- 「震源を特定せず策定する地震動」の年超過確率は、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認。
(標準応答スペクトルを考慮した地震動(Ss-6)の年超過確率も $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度)
- なお、既許可の一様ハザードスペクトルを使用することの妥当性確認として、既許可以降に発生した2016年熊本地震(M7.3)等の地震活動による既許可の確率論的地震ハザード評価への影響を確認。(補足⑧)



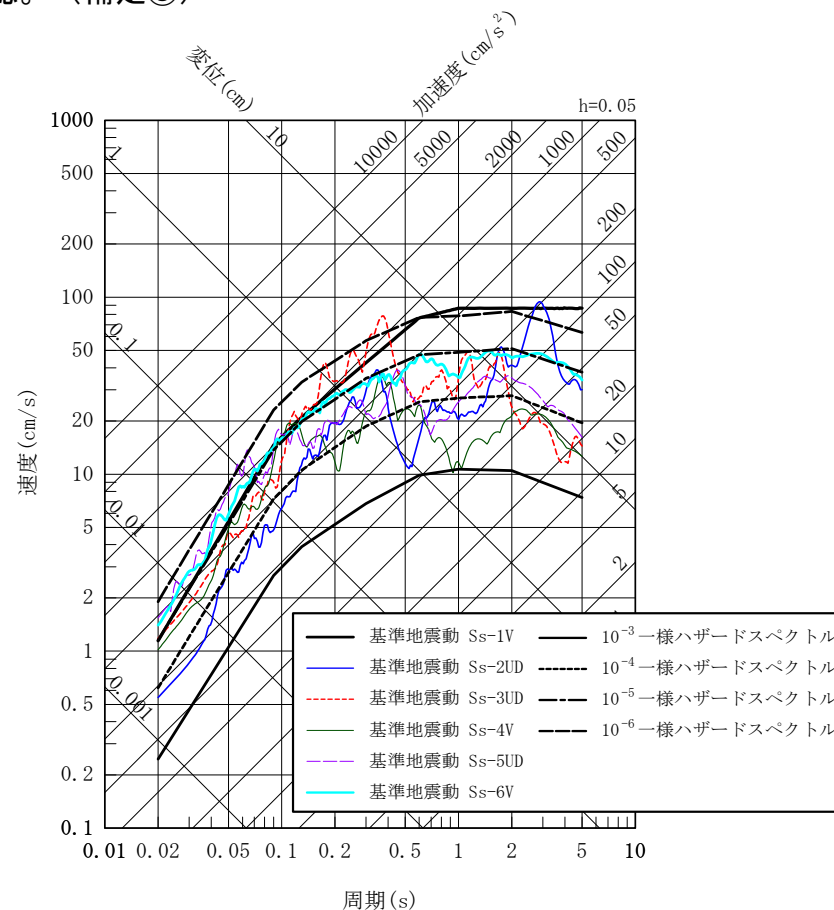
5. 超過確率の参照

■ 基準地震動の超過確率

- 基準地震動の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「特定震源モデル」及び「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較する。
- 基準地震動の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認。
(標準応答スペクトルを考慮した地震動 (Ss-6) の年超過確率も $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度)
- なお、既許可の一様ハザードスペクトルを使用することの妥当性確認として、既許可以降に発生した2016年熊本地震 (M7.3) 等の地震活動による既許可の確率的地震ハザード評価への影響を確認。(補足⑧)



水平方向



鉛直方向

6. まとめ

6. まとめ

<地下構造モデルの設定>

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたり、既許可以降取得した地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを新たに設定するとともに、その妥当性について確認した。

■ 地下構造モデルの設定

- 既許可以降の地震観測記録の分析の結果、地盤減衰（Q値）は精度・信頼性の向上が見込まれると判断し、速度構造は既許可の地下構造モデルの速度構造と同等であることを確認した。
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠は長周期帯に限定したものではないため、短周期帯の地震動評価に用いる。

【EL. -200m以深】

- 既許可の地下構造モデルを流用して設定し、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性を確認した。

【EL. -200m以浅】

- 速度構造・密度は、既許可の地下構造モデルを流用して設定した。
- 地盤減衰（Q値）は、以下の検討・確認を実施し、設定した。

〔最深部地震計以浅（EL. -90m以浅）の地盤減衰（Q値）〕

- 地震観測記録に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、不確かさを考慮し、周波数に依存せず、保守的に $Q=12.5$ とした。
- 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）について、地震観測記録を用いて、応答スペクトル及び伝達関数により確認した。

〔最深部地震計以深（EL. -90m以深）の地盤減衰（Q値）〕

- 速度層断面による検討の結果、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないこと、及びボーリング孔内減衰測定結果が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等であることを確認し、最深部地震計からEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、最深部地震計以浅と同じ $Q=12.5$ とした。
- 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）について、岩石コアを用いた減衰測定により確認した。

6. まとめ

■ 地下構造モデルの妥当性確認

- 解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -90mの範囲の地下構造モデルについて、「地震観測記録の応答スペクトルによる確認」の結果、全ての周期帯において、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。
- 解放基盤表面 (EL. -15m) からEL. -200mの範囲の地下構造モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」の結果、全ての周期帯において、設定した地下構造モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数に対して、同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。



■ 標準応答スペクトル用モデルの設定

- 設定した地下構造モデルのうち、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰 (Q値) について、以下の点を踏まえ、地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ から $Q=16.7$ に見直し、標準応答スペクトル用モデルを設定した。
 - EL. -90mからEL. -200mまでの範囲は、地震観測記録が得られておらず、相対的に信頼性が劣る。
 - 標準応答スペクトルを考慮した地震動に更に余裕を持たせることで安全裕度の向上を図る。

■ 標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認

- EL. -200m以深の範囲は、設定した地下構造モデルと同じ設定であり、短周期から長周期までの全ての周期帯への適用性は変わらない。
- EL. -200m以浅の範囲の標準応答スペクトル用モデルについて、「PS検層モデルとの比較による確認」の結果、全ての周期帯において、標準応答スペクトル用モデルによる理論伝達関数が、PS検層モデルによる理論伝達関数に対して、同等もしくは上回ることから、妥当性を確認した。

■ 今後の地震動評価用の地下構造モデルの適用

- 標準応答スペクトル用モデルは全周期に適用可能でその妥当性を確認できていること、また、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルにより既許可の地震動評価に影響を与えないことを確認したことから、地震動評価に用いる地下構造モデルは、標準応答スペクトル用モデルを反映した地震動評価用のモデルに統一するものとする。

6. まとめ

<模擬地震波の作成>

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる模擬地震波は、乱数位相を用いる方法と観測位相を用いる方法の2つの方法を比較する方針とし、以下の通り確認したことから、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価においては乱数位相を用いた模擬地震波を採用した。
 - 解放基盤表面における時刻歴波形の最大加速度について、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波の方が大きい
 - 解放基盤表面における時刻歴波形の強震部の継続時間について、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波の方が長い
 - 解放基盤表面における応答スペクトルについて、乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度
 - 地震基盤相当面における応答スペクトルに対する解放基盤表面における応答スペクトルの比について、乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度

<基準地震動の策定>

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動は、一部の周期帯で基準地震動 S_s-1 を上回ることから基準地震動 S_s-6 として策定した。

<超過確率の参照>

- 「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較した結果、「震源を特定せず策定する地震動」の年超過確率は、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認した。
- 基準地震動の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「特定震源モデル」及び「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較した結果、基準地震動の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認した。

6. まとめ

<今後の取り組み>

- 以上のとおり、既許可時審査以降継続的に取得している鉛直アレイ観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施し、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを設定した。

- 今後も、更なる信頼性の向上を図ることを目的に、最新の技術的知見の収集・分析・評価を実施する。
 - 広域地震観測〔継続〕
 - 敷地内地下構造の把握
 - ・ 敷地内鉛直アレイ地震観測〔継続〕
 - ・ 減衰測定に用いたボーリング孔における地震計増設（EL. -200m）
 - ・ 大深度ボーリング及び地下深部の地震観測の実施についても検討



【補足①】 深部地下構造モデルの確認

【補足①】 深部地下構造モデルの確認

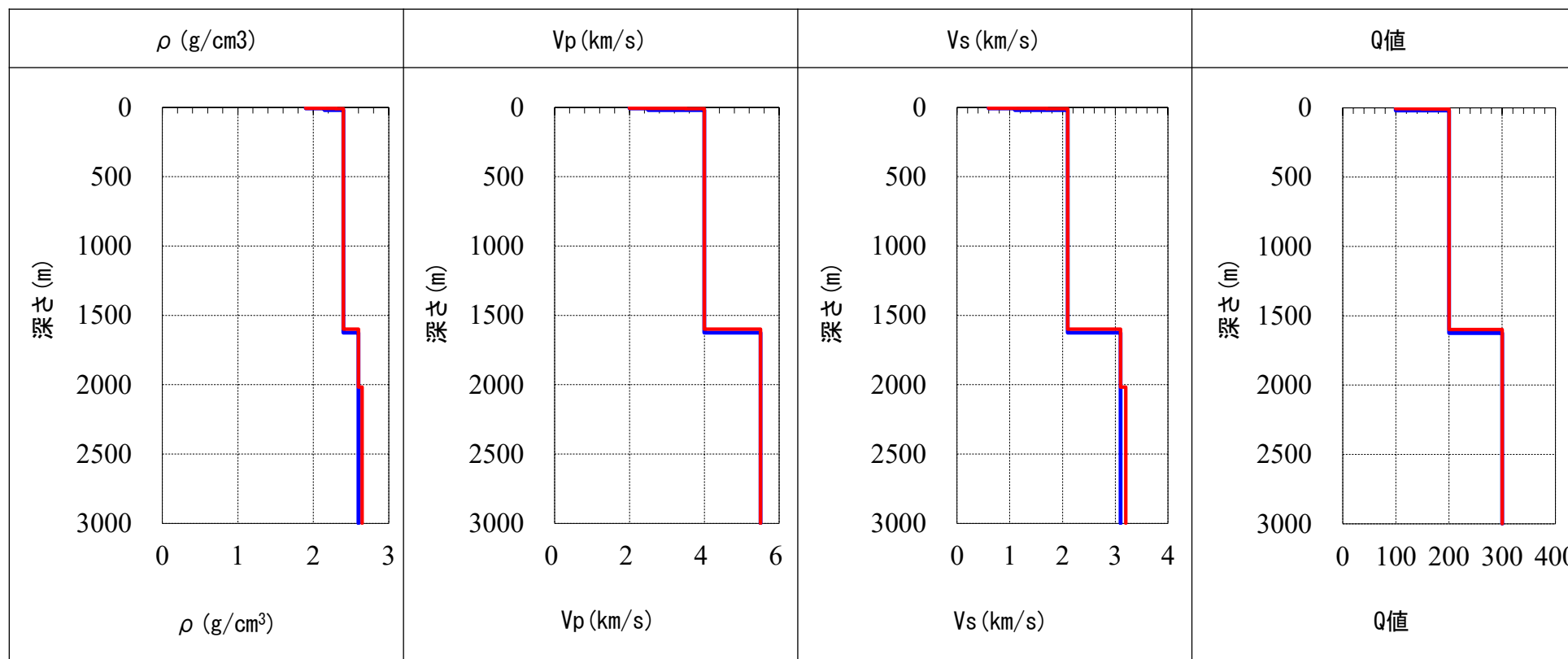
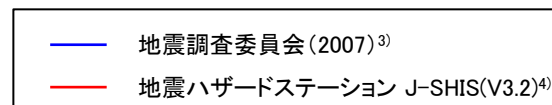
■ 既許可以降の知見との比較による深部地下構造モデルの確認

- 地下構造モデルの設定根拠に用いている地震調査委員会 (2007)³⁾の地盤構造と、既許可以降の知見である防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS (V3.2)⁴⁾の深部地盤と比較した結果、玄海原子力発電所を囲む4地点の物性値及び $V_s=2.1\text{km/s}$ に対応する地盤厚さの平均値が整合している。(下図)



- 既許可以降の知見と照らして、EL. -200m以深の範囲における地下構造モデルの妥当性に影響はないことを確認。

4地点の平均値

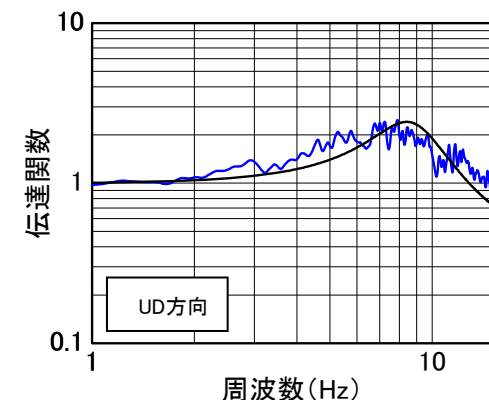
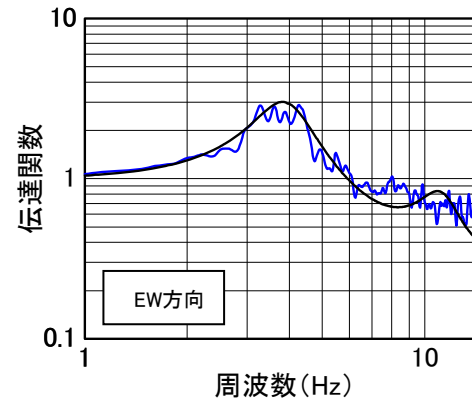
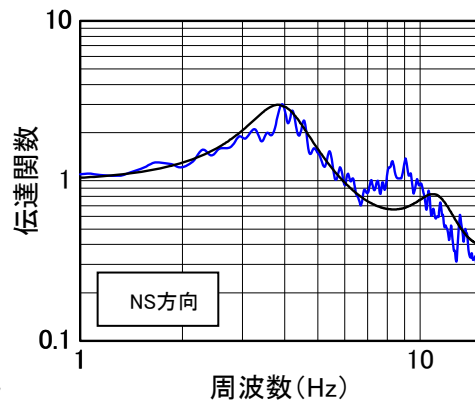
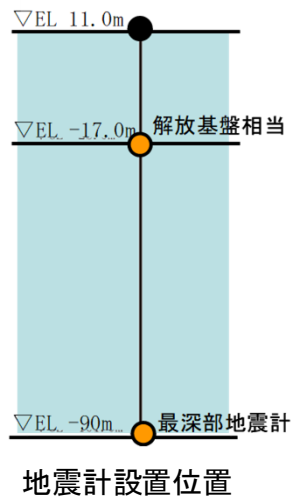


【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 地震観測記録との整合性

- 「2.2.1(1)a. 伝達関数（周波数依存型）による検討」において、地盤減衰の同定結果による理論伝達関数と地震観測記録による平均伝達関数を比較した結果、1次卓越周波数におけるピークは整合。
- 水平方向の7Hz以上については、地震観測記録の平均伝達関数と部分的に整合していない。
- 部分的に整合していない要因として考えられる以下の影響について、次頁以降で検討を実施し、影響のない事を確認。
 - 地震観測記録のスミージングの影響
 - S波速度 V_s 、P波速度 V_p の同定解析の影響



今回の伝達関数の比較
(EL.-17.0m/EL.-90.0m)

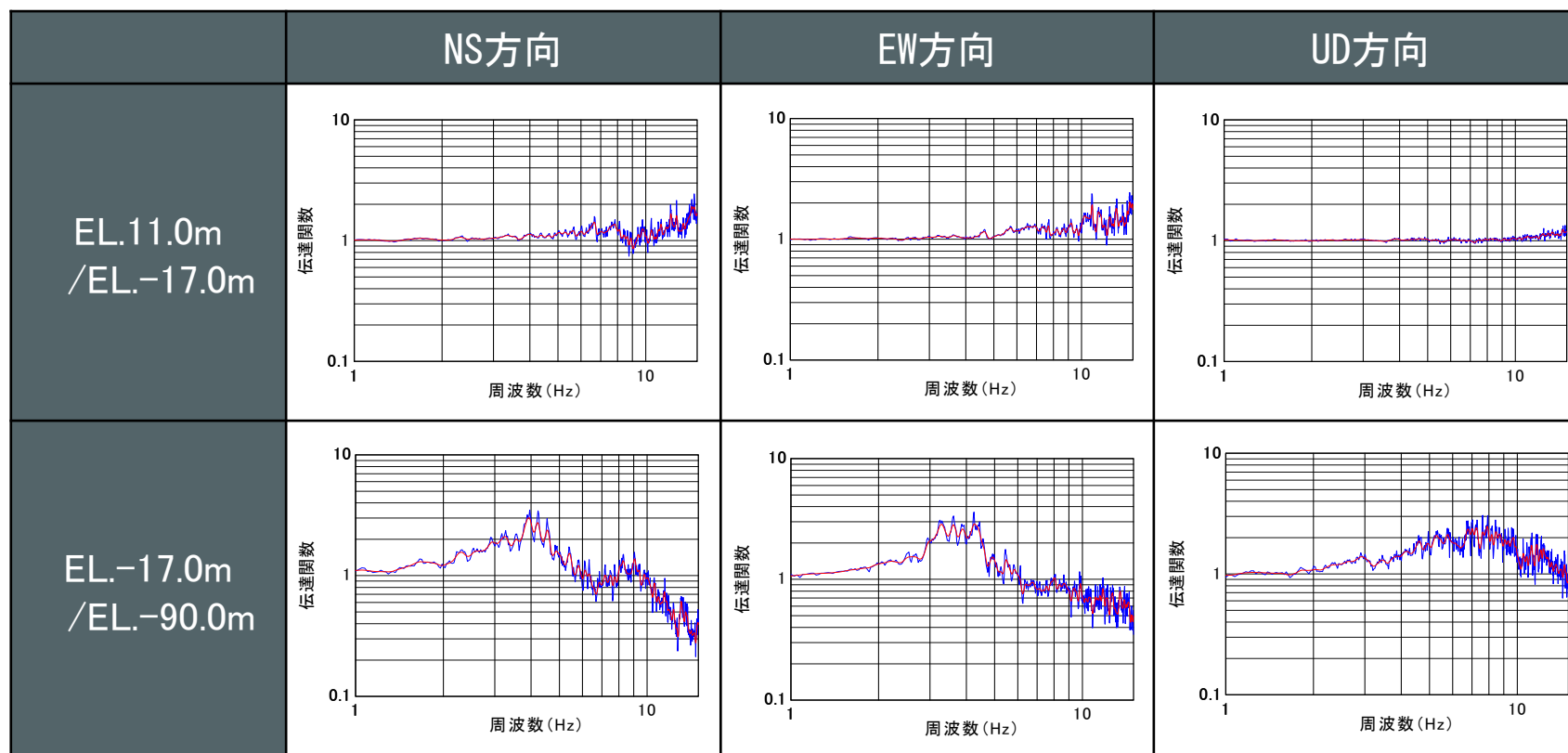
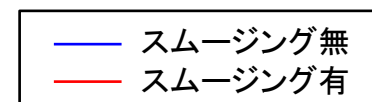
— 地震観測記録 (19地震)
— 今回同定結果 ($Q=Q_0 \cdot f^\alpha$)

※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスミージング

【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 地震観測記録のスミージングによる影響確認

- 伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定では、ターゲットとする観測伝達関数について、地震観測記録（19地震）の平均伝達関数のピークを明瞭にするため、観測記録にBand幅0.2HzのParzenウィンドウ処理によりスミージングを実施。
- スミージングの有無により、地震観測記録（19地震）の平均伝達関数に大局的な差異は生じない。
- スミージング無の場合の平均伝達関数を用いて地盤減衰の同定を実施し、今回の同定結果との比較を実施。

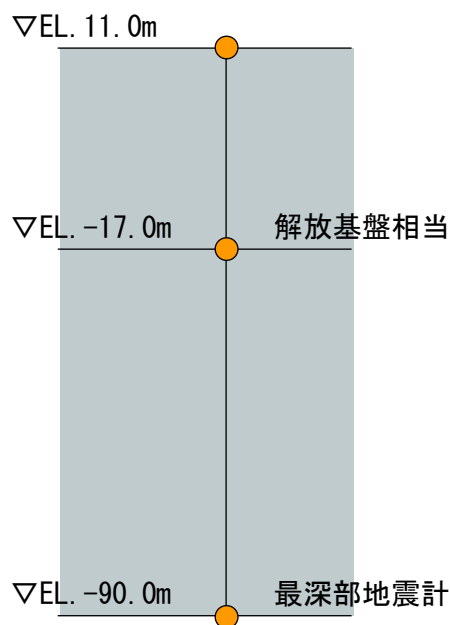


【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 同定における解析条件

- ・ スムージングの有無のみを変更した解析条件で地盤同定を実施し、スムージングの影響を確認。

伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定における解析条件
（スムージングの影響確認用）



地震計設置位置

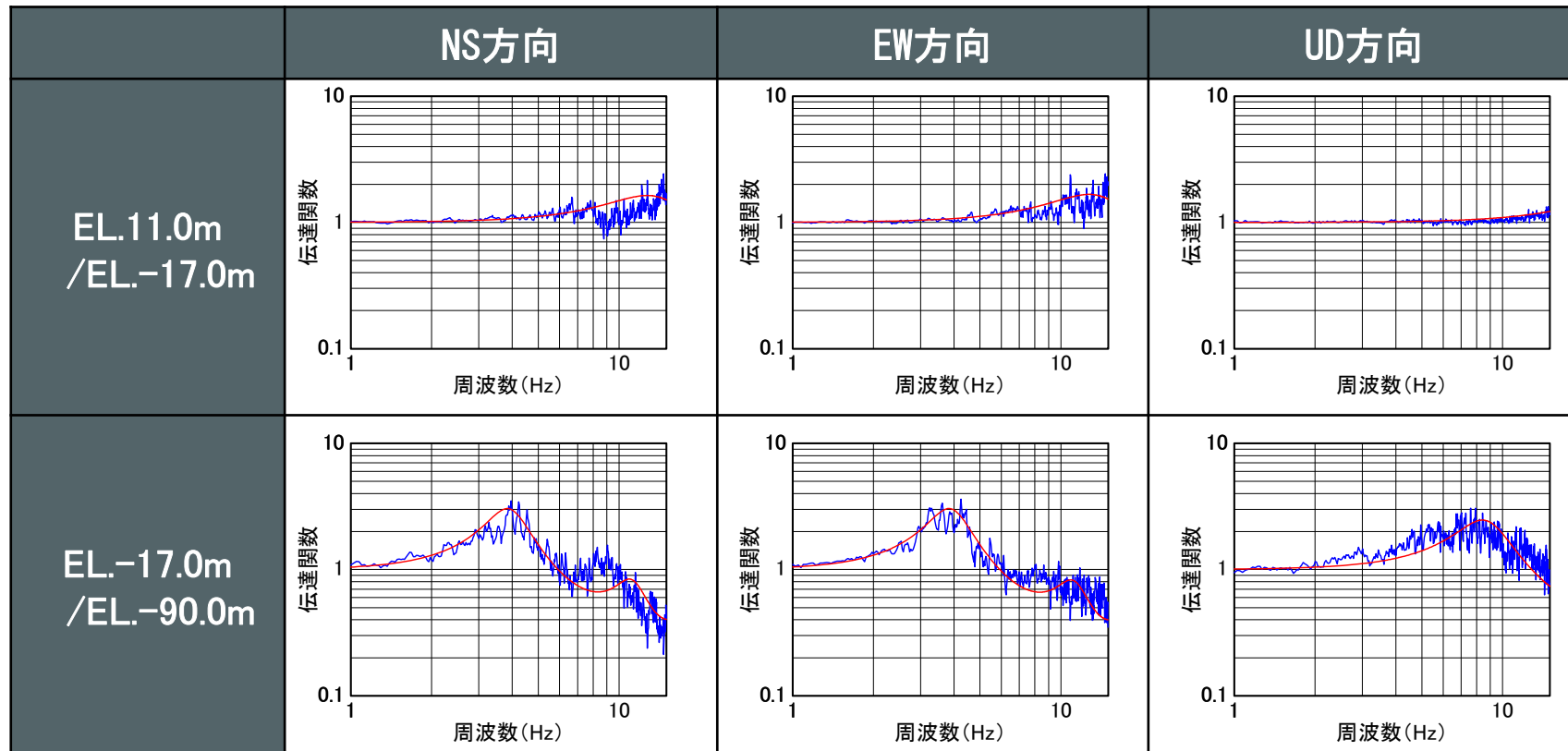
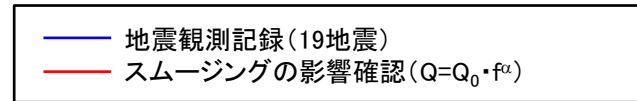
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 <u>ウィンドウ処理なし</u>
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰（Q値）を同定
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

※下線部は伝達関数（周波数依存型）による同定における解析条件からの変更点

【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 地盤減衰（Q値）の同定結果（スムージング無）

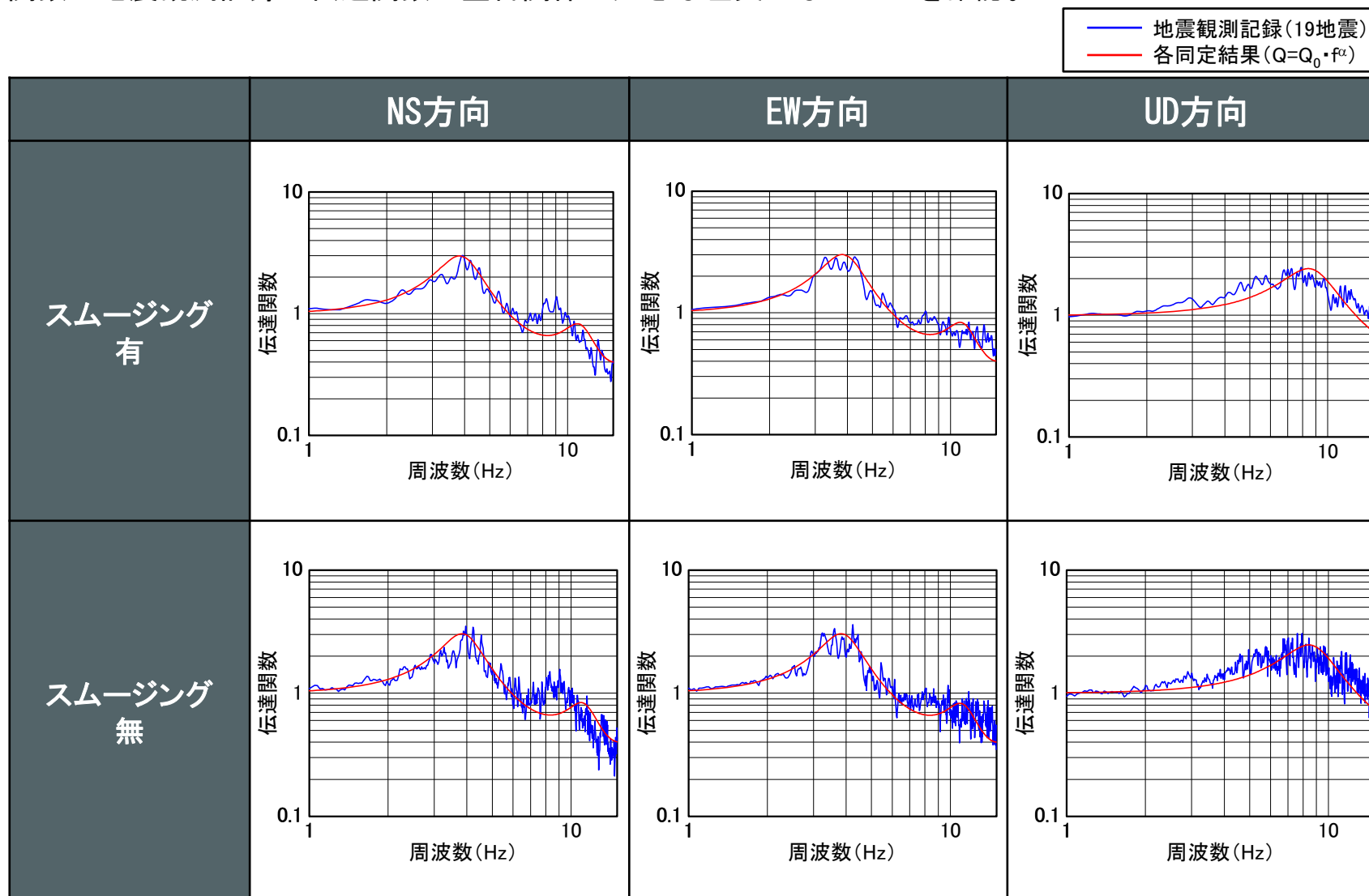
- ・ スムージング無で地盤同定を実施した場合の、同定結果の伝達関数と19地震の平均伝達関数を以下に示す。



【補足②】 地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 地盤減衰（Q値）の同定結果の比較（EL. -17.0m/EL. -90.0m）

- ・ スムージング無の場合の平均伝達関数を用いて地盤減衰の同定を実施した結果、今回同定結果と比べて、理論伝達関数と地震観測記録の伝達関数の整合性に大きな差異がないことを確認。



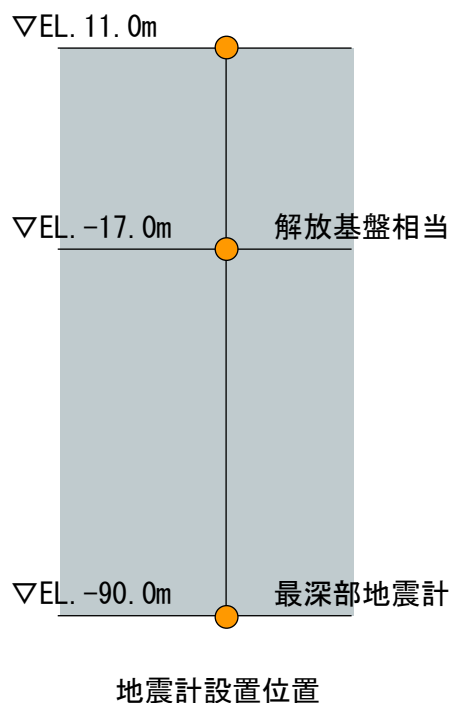
※観測記録（スムージング有のみ）及び理論（スムージング有のみ）の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ S波速度Vs、P波速度Vpの同定解析の影響

- 地盤減衰（Q値）に加えて、S波速度Vs、P波速度Vpを対象とした地盤同定を実施し、Vs、Vpの同定解析の影響を確認。

伝達関数（周波数依存型）による地盤同定における解析条件
（Vs、Vpの同定解析の影響確認用）



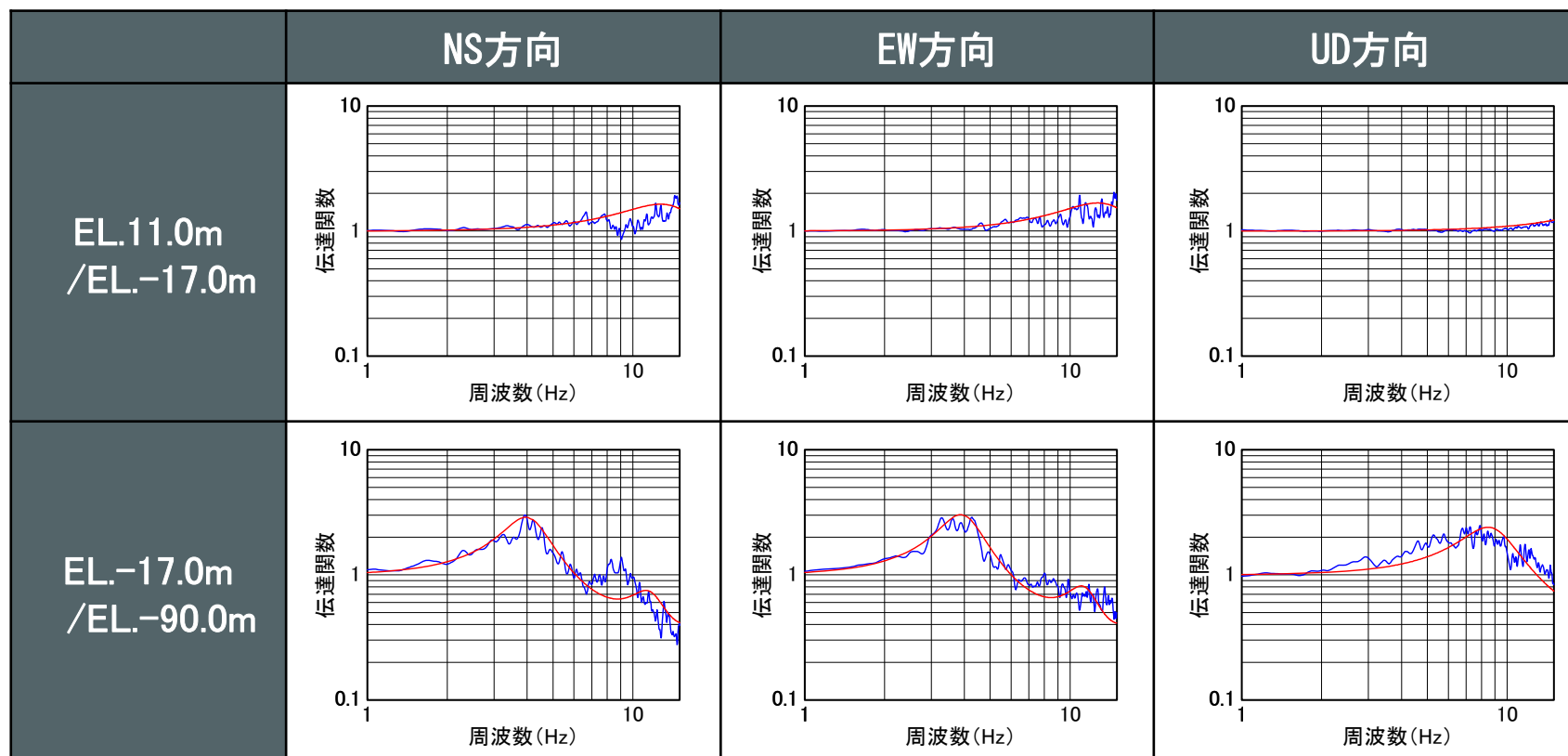
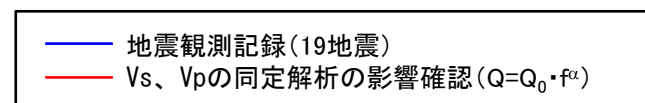
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	<u>層厚、密度は既許可の地下構造モデルの値を参照し、S波速度Vs、P波速度Vp、地盤減衰（Q値）を同定</u>
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

※下線部は伝達関数（周波数依存型）による同定における解析条件からの変更点

【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果 (Vs、Vp同定解析)

- 地盤減衰 (Q値) に加えて、S波速度Vs、P波速度Vpを対象とした地盤同定を実施した場合の、同定結果の伝達関数と19地震の平均伝達関数を以下に示す。

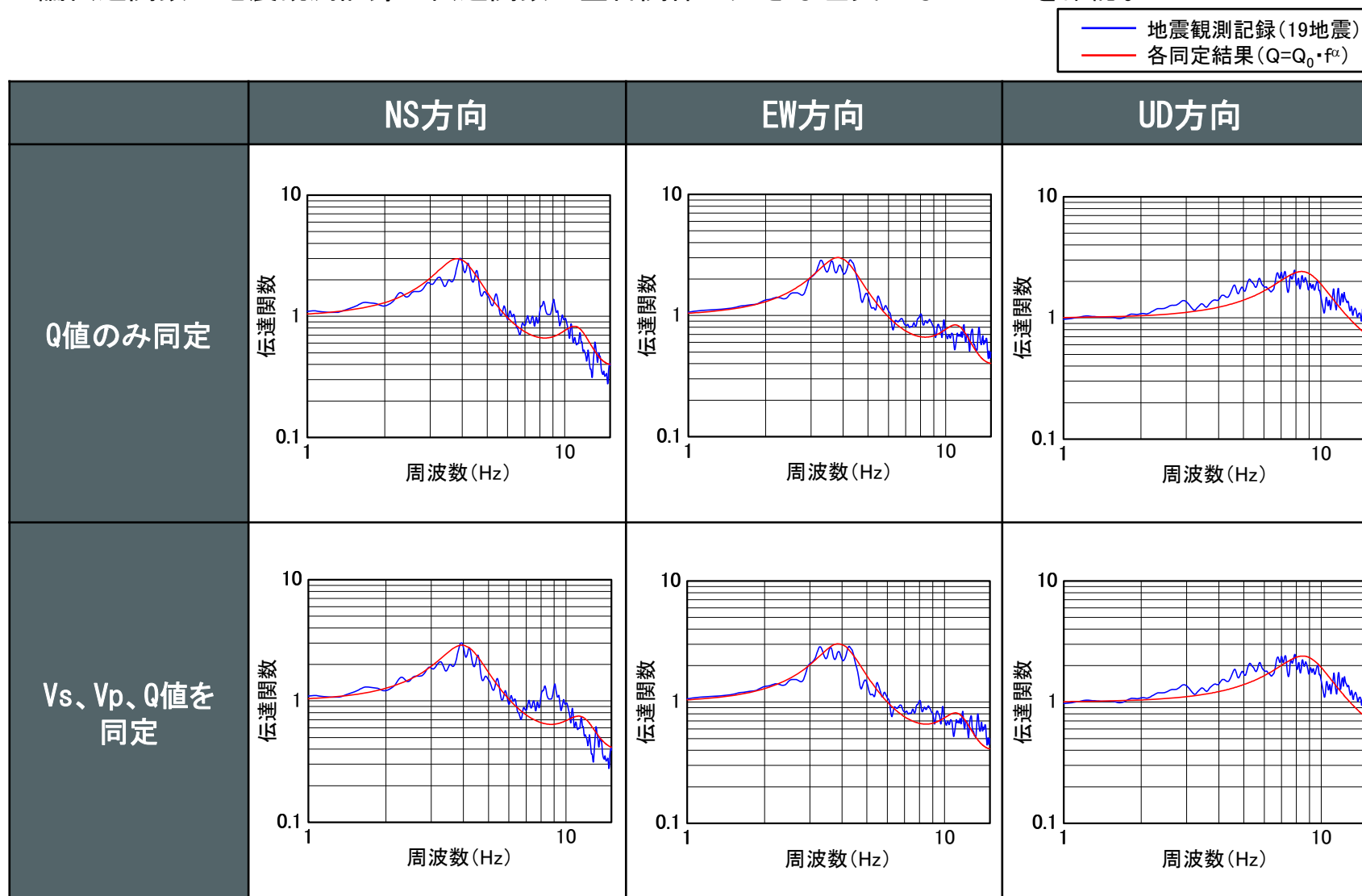


※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

【補足②】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討

■ 地盤減衰（Q値）の同定結果の比較（EL. -17.0m/EL. -90.0m）

- 地盤減衰（Q値）に加えて、S波速度 V_s 、P波速度 V_p を対象とした地盤同定を実施した結果、今回同定結果と比べて、理論伝達関数と地震観測記録の伝達関数の整合関係に大きな差異がないことを確認。



※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

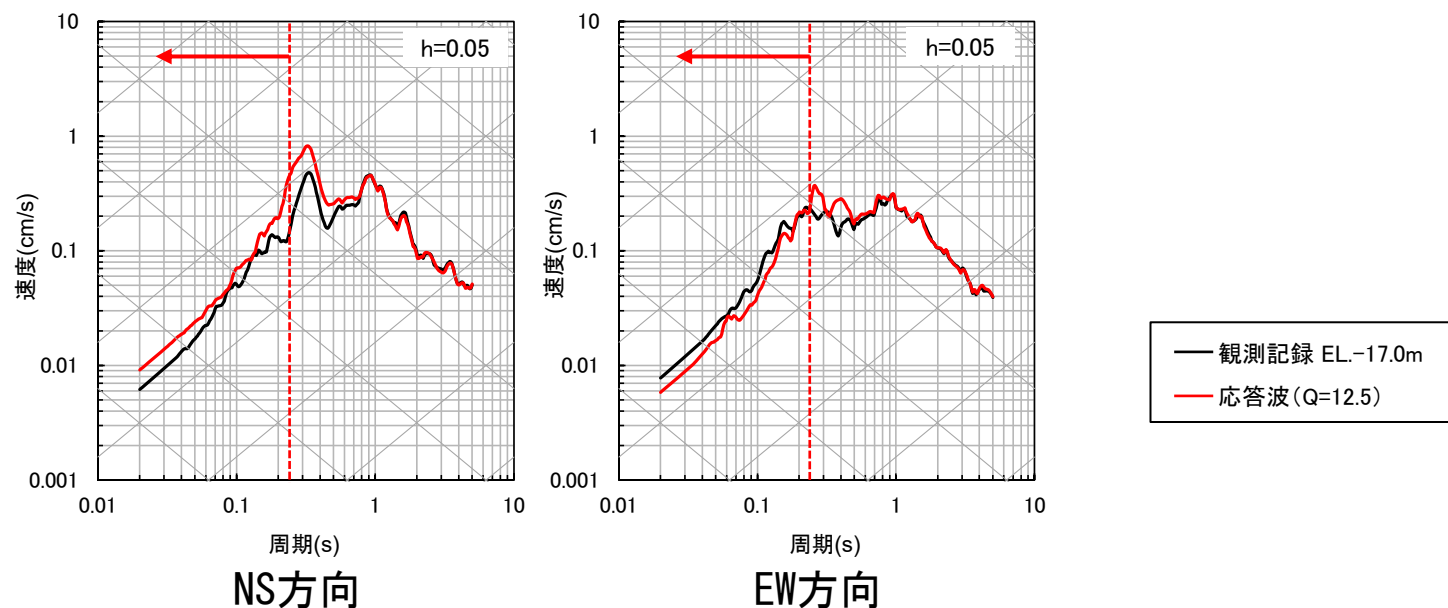
【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

■ ⑩熊本県熊本地方の地震（EW方向）の記録の特異性確認

- ・ 地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルは、大半の地震において、地震観測記録の応答スペクトルと比べて、同等もしくは上回ることを確認。（例：⑩熊本県熊本地方の地震（NS方向））
- ・ ⑩熊本県熊本地方の地震（EW方向）では、0.25秒程度以下の短周期帯において、地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルが地震観測記録の応答スペクトルを下回ることを確認。
- ・ 上記傾向の要因として考えられる以下の影響について、確認を実施。
 - ・ 理論伝達関数の卓越周波数付近における入力波の振幅特性による影響
- ・ 次頁以降において、確認した結果、上記傾向の要因は、EL. -90mの地震観測記録において、設定した地下構造モデルの理論伝達関数の卓越周波数のピーク付近の周波数帯で数Hzにわたる振幅が小さい特性（凹）によるものと考えられ、設定した地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断した。なお、標準応答スペクトルは数Hzにわたって振幅が小さい特性（凹）を有していないため、上記と同じ傾向は見られないと考えられる。

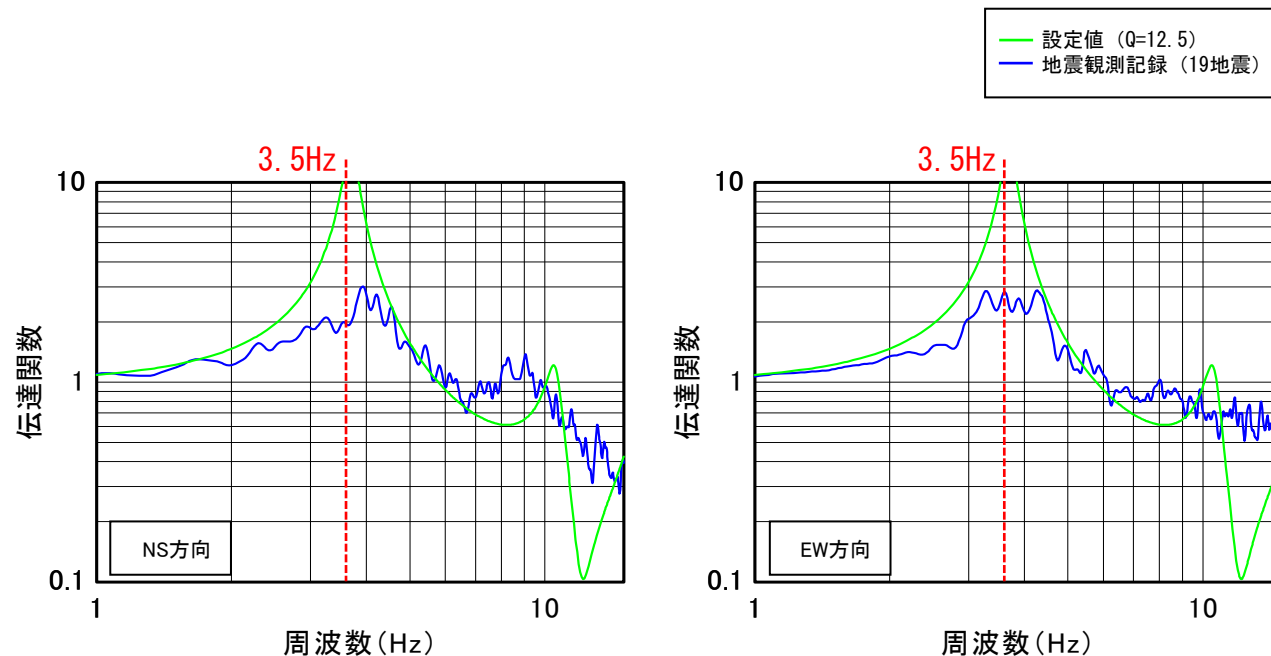
⑩熊本県熊本地方



【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

■ 伝達関数による傾向分析

- 地震観測記録（19地震）による平均伝達関数と理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）を比較すると、3.5Hz程度の卓越周波数付近では、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）は、地震観測記録（19地震）による平均伝達関数を大きく上回る傾向。
- 一方、3.5Hz程度の卓越周波数付近を除く周波数帯において、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）は地震観測記録（19地震）による平均伝達関数を下回る傾向。



伝達関数の比較

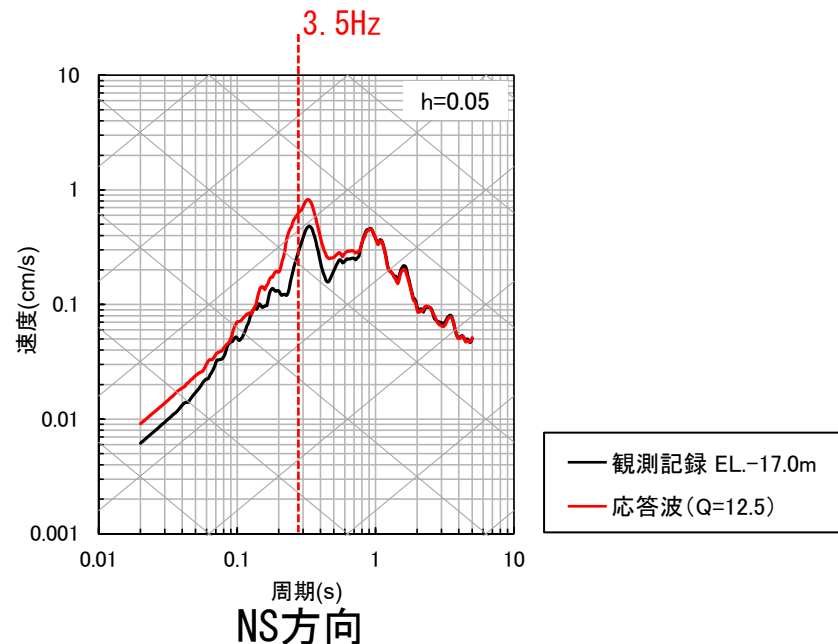
※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

■ 伝達関数による傾向と応答スペクトルによる傾向の差異

- ・ 応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルを見ると、前頁の理論伝達関数 ($Q=12.5$) で大きなピークが見られた3.5Hz (0.29秒) 程度の卓越周波数付近でピークが見られ、理論伝達関数 ($Q=12.5$) のピークが反映されている。
- ・ 一方、前頁の理論伝達関数 ($Q=12.5$) が地震観測記録の伝達関数を下回る周期帯では、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルが地震観測記録の応答スペクトルを上回り、フーリエ振幅スペクトルによる伝達関数とは異なる傾向。(例：⑩熊本県熊本地方の地震 (NS方向))

例：⑩熊本県熊本地方 (NS方向)

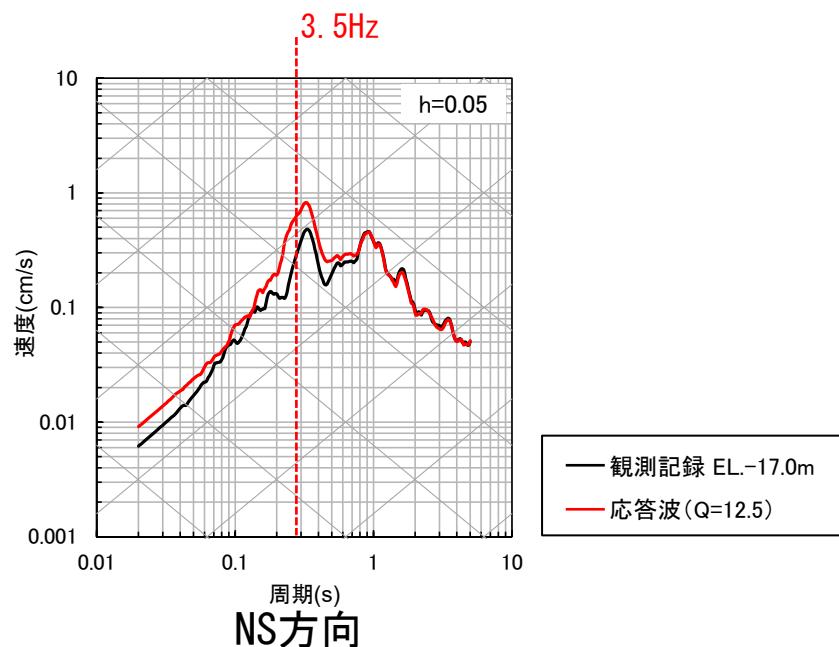


【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

■ 応答スペクトルの特性

- 前頁までを踏まえると、理論伝達関数 ($Q=12.5$) の卓越周波数付近 (3.5Hz程度) の大きなピークが当該周波数の周辺の周波数帯にも影響を与え、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされる。
(例：⑯熊本県熊本地方の地震 (NS方向))
- ただし、入力波 (地震観測記録 (EL. -90.0m)) において、理論伝達関数 ($Q=12.5$) の卓越周波数付近の振幅が小さいと、理論伝達関数 ($Q=12.5$) のピークの影響が反映されず、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされないと考えられる。

例：⑯熊本県熊本地方 (NS方向)

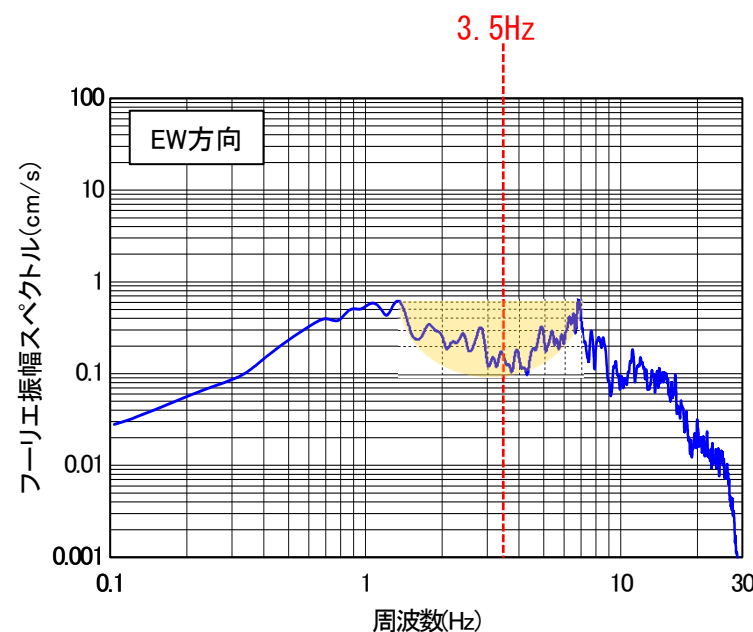
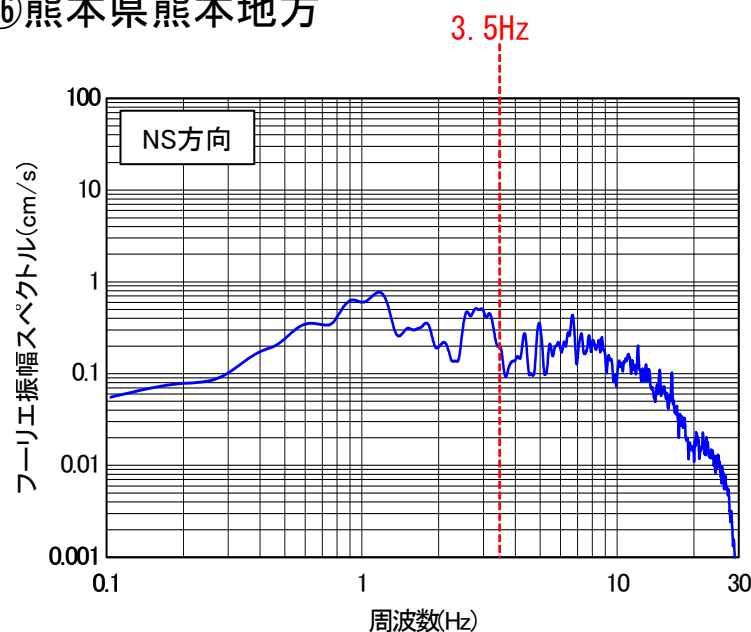


【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

■ ⑩熊本県熊本地方の地震（EW方向）のフーリエ振幅スペクトル（EL. -90.0m）の分析

- ⑩熊本県熊本地方の地震（EW方向）のフーリエ振幅スペクトルは、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）の3.5Hz程度の卓越周波数のピーク付近の周波数帯で数Hzにわたり振幅が小さい特性を確認。
- 上記の影響で、応答波（ $Q=12.5$ ）の応答スペクトルの短周期帯では、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）のピークの影響が反映されず、嵩上げされなかったことが、応答波（ $Q=12.5$ ）の応答スペクトルが観測記録の応答スペクトルを下回った1つの要因と考えられる。

⑩熊本県熊本地方

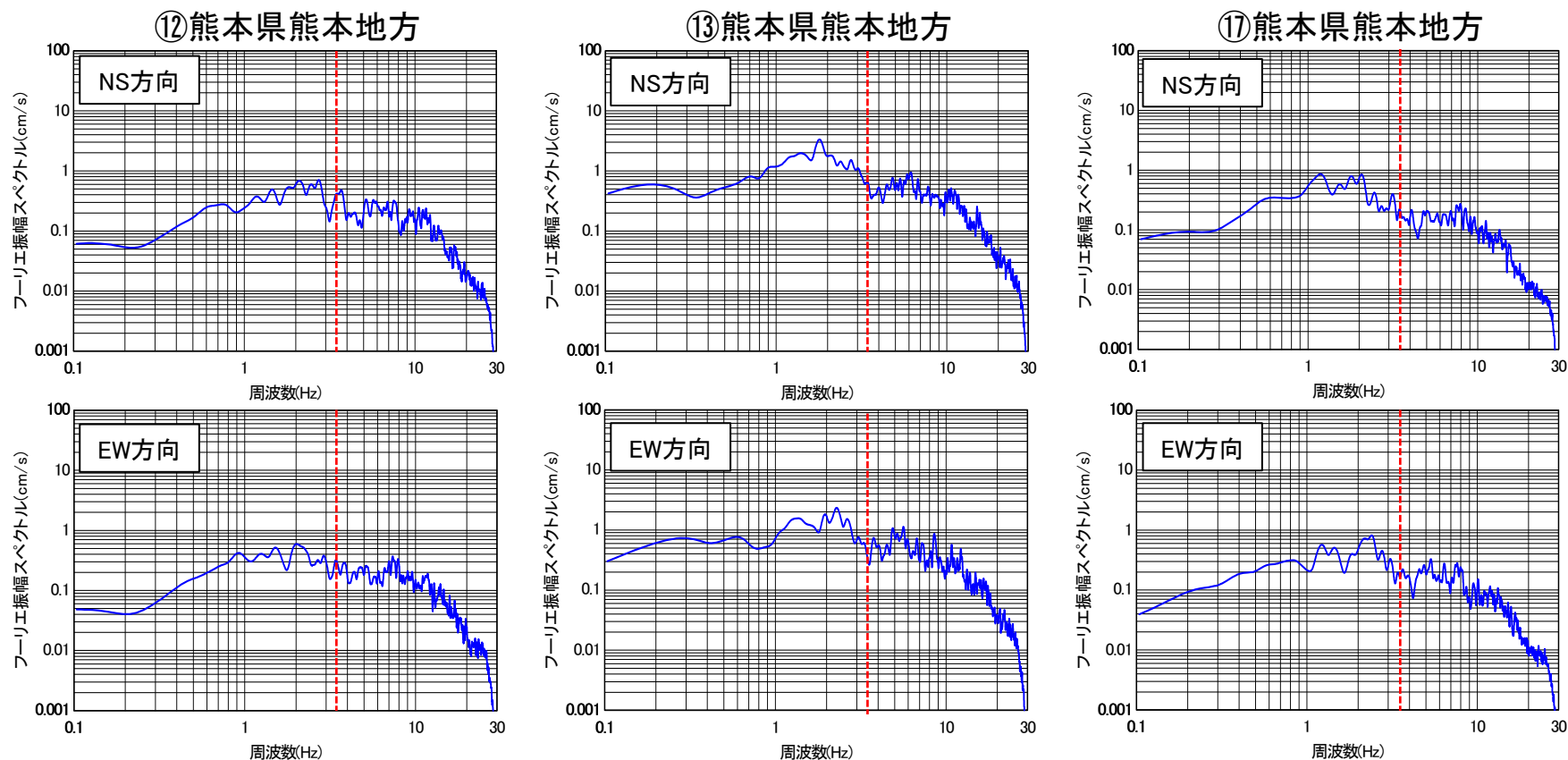


観測記録（EL. -90.0m）のフーリエ振幅スペクトル

【補足③】 応答スペクトルによる確認における特異な地震観測記録の分析

■ 要因の分析

- 前頁までの傾向が、⑬熊本県熊本地方の地震の震源近傍で発生した地震（⑫、⑬及び⑰の地震）において、同様の傾向が見られるか確認を実施。
- ⑫、⑬及び⑰の地震では、⑬熊本県熊本地方（EW方向）の短周期帯の応答スペクトルに見られたような応答波（ $Q=12.5$ ）の応答スペクトルが観測記録の応答スペクトルを下回る傾向は見られない。
- また、⑫、⑬及び⑰の地震の観測記録（EL. -90.0m）のフーリエ振幅スペクトルにおいて、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）の3.5Hz程度の卓越周波数のピーク付近の周波数帯で数Hzにわたり振幅が小さい特性は見られない。



観測記録（EL. -90.0m）のフーリエ振幅スペクトル

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）の影響検討

- 追加ボーリング孔（QG-1～3）におけるPS検層はEL. -200mまで実施しているが、PS検層モデルの理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の算出にあたり、EL. -200m以深の設定が必要である。
- EL. -200m以深の設定により、計算の境界条件としてEL. -200mでの速度コントラストが生じるため、PS検層モデルの設定にあたり、以下の3ケースを検討し、影響を確認する。
 - a. 設定した地下構造モデルの速度を流用した場合（EL. -200m以深を設定した地下構造モデルと同じ速度に設定）
 - b. 速度コントラストをなくした場合（EL. -200m以深を上層と同じ速度に設定）
 - c. 速度コントラストを大きくした場合（EL. -200m以深の速度を大きく設定）

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

a. 設定した地下構造モデルの速度を流用した場合

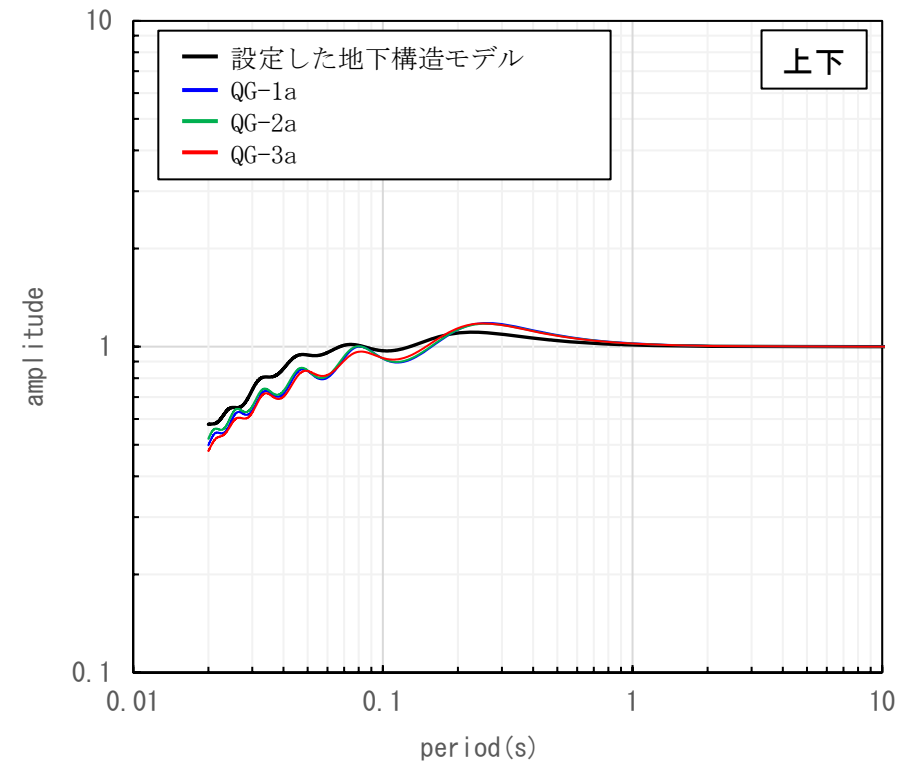
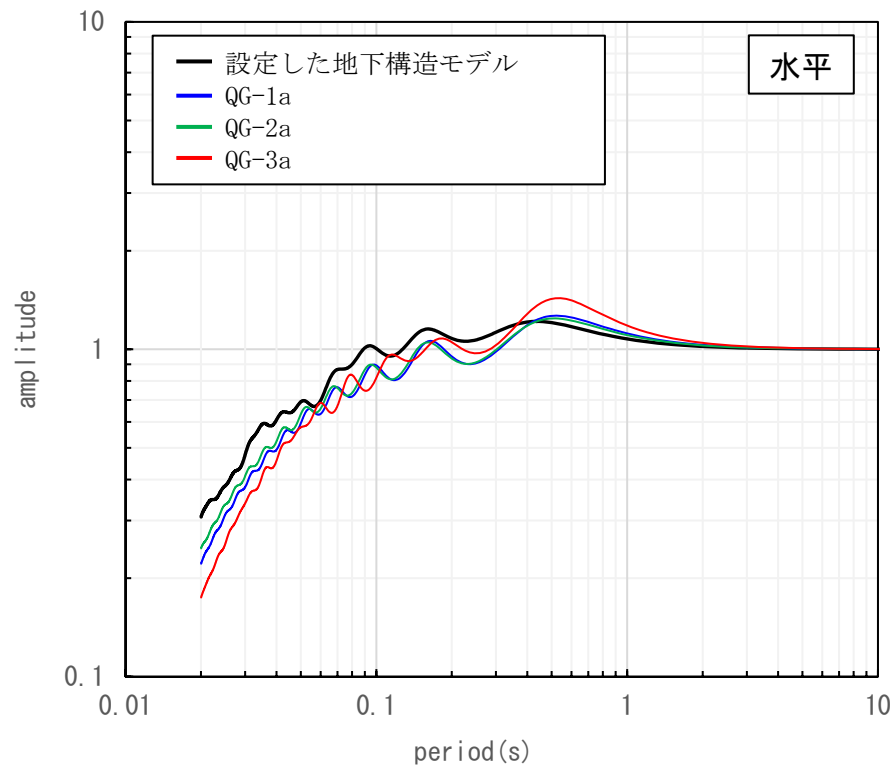
- 設定した地下構造モデルの速度を流用した場合として、EL. -200m以深を設定した地下構造モデルと同じ速度に設定する。(QG-1a~3aモデル)
- 伝達関数の比較に用いる地下構造モデルを以下に示す。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル			QG-1aモデル			QG-2aモデル			QG-3aモデル		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -144m)	1730	3470	12.5	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8			
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5							1550	3320	10.6
	2100	4000	200	2100	4000	200	2100	4000	200	2100	4000	200

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 伝達関数の比較

- 設定した地下構造モデルの速度を流用した結果、理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の一部の周期帯（水平：0.5秒付近、上下：0.2～0.4秒付近）において、特徴的なピークが現れている。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

b. 速度コントラストをなくした場合

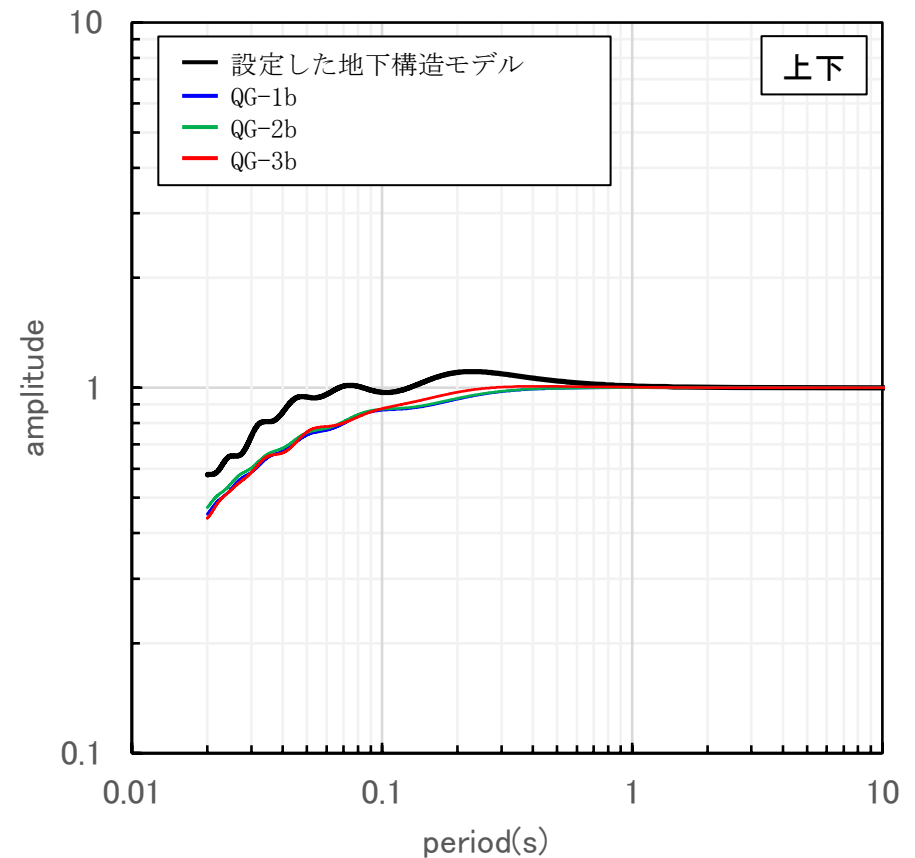
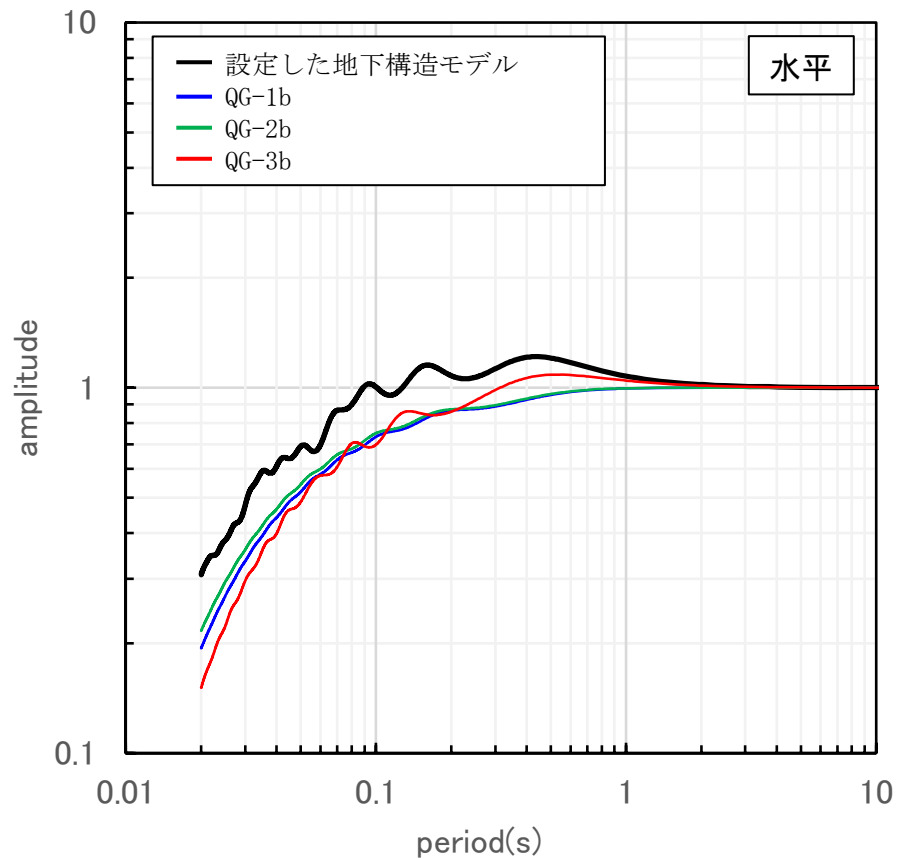
- 速度コントラストをなくした場合として、PS検層モデルのEL. -200m以深を上層と同じ速度に設定する。（QG-1b～3bモデル）
- 伝達関数の比較に用いる地下構造モデルを以下に示す。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル			QG-1bモデル			QG-2bモデル			QG-3bモデル		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -144m)	1730	3470	12.5	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8			
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5							1550	3320	10.6
	2100	4000	200	1550	3190	200	1590	3220	200	1550	3320	200

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 伝達関数の比較

- 速度コントラストをなくした結果、一部の周期帯（水平：0.5秒付近、上下：0.2~0.4秒付近）における特徴的なピークの解消を確認。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

c. 速度コントラストを大きくした場合

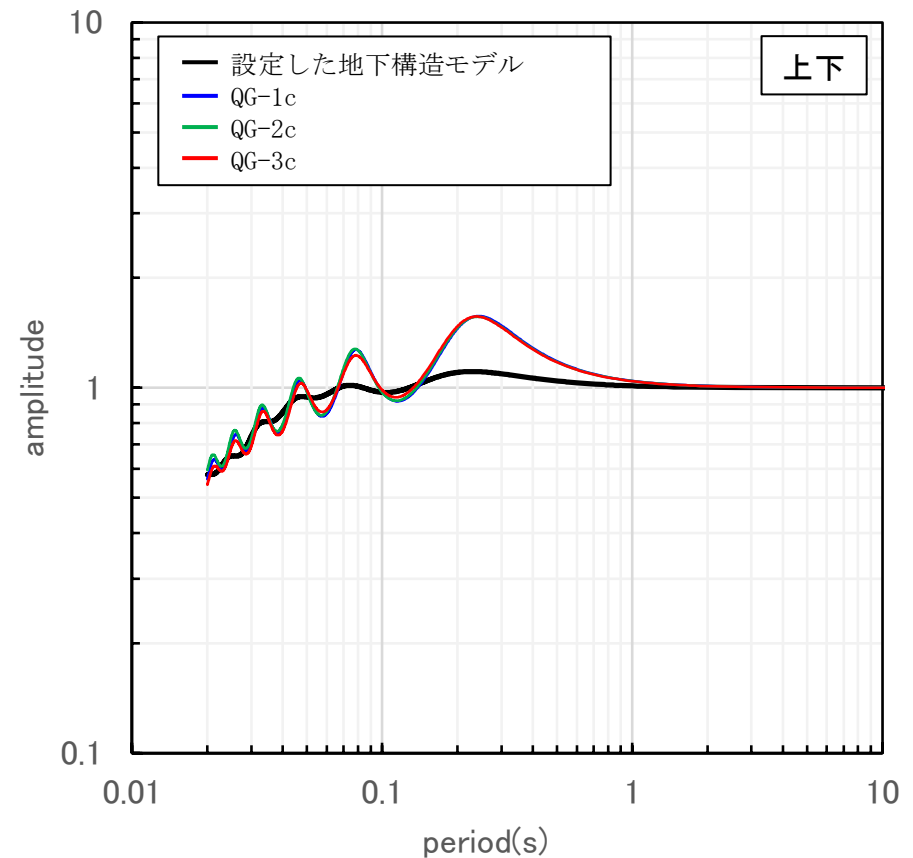
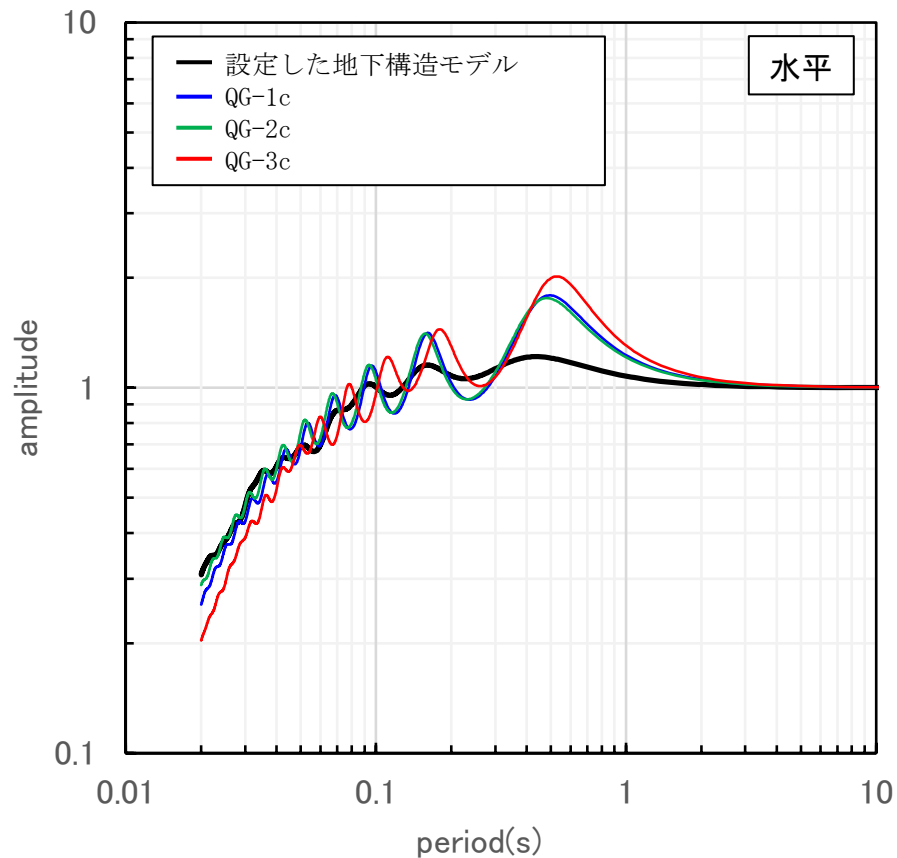
- 速度コントラストを大きくした場合として、PS検層モデルのEL. -200m以深の速度を大きく設定する。(QG-1c~3cモデル)
- 伝達関数の比較に用いる地下構造モデルを以下に示す。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	設定した地下構造モデル			QG-1cモデル			QG-2cモデル			QG-3cモデル		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -144m)	1730	3470	12.5	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8			
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5							1550	3320	10.6
	2100	4000	200	3100	5500	200	3100	5500	200	3100	5500	200

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 伝達関数の比較

- 速度コントラストを大きくした結果、一部の周期帯（水平：0.5秒付近、上下：0.2～0.4秒付近）における特徴的なピークの増大を確認。



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m)

【補足④】 PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 境界条件の影響検討結果

- 計算の境界条件（EL. -200mでの速度コントラスト）の影響により、一部の周期帯（水平：0.5秒付近、上下：0.2～0.4秒付近）において特徴的なピークが生成されることを確認した。

■ PS検層モデルの設定

- 敷地地下深部の地下構造は、均質かつ水平な速度構造を示す佐世保層群が十分な深さまで分布しており、EL. -200mでの速度コントラストがないことを確認した。
 - 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面では、EL. -200m以深まで③速度層が分布しており、EL. -200m付近で速度構造が大きく変わらない。（155～157頁参照）
 - 文献調査の結果、敷地付近の佐世保層群は、EL. -200m以深まで続いており、EL. -200m付近で地質・地質構造が大きく変わらない。（158～159頁参照）



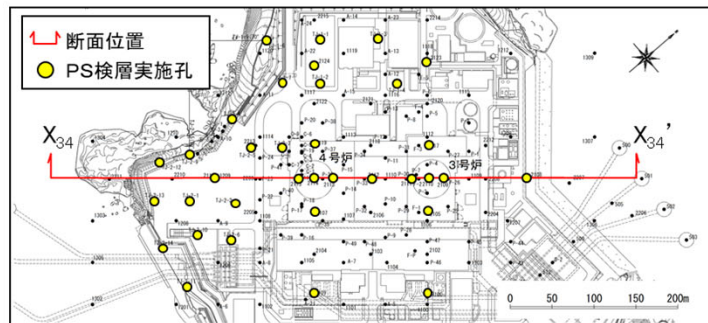
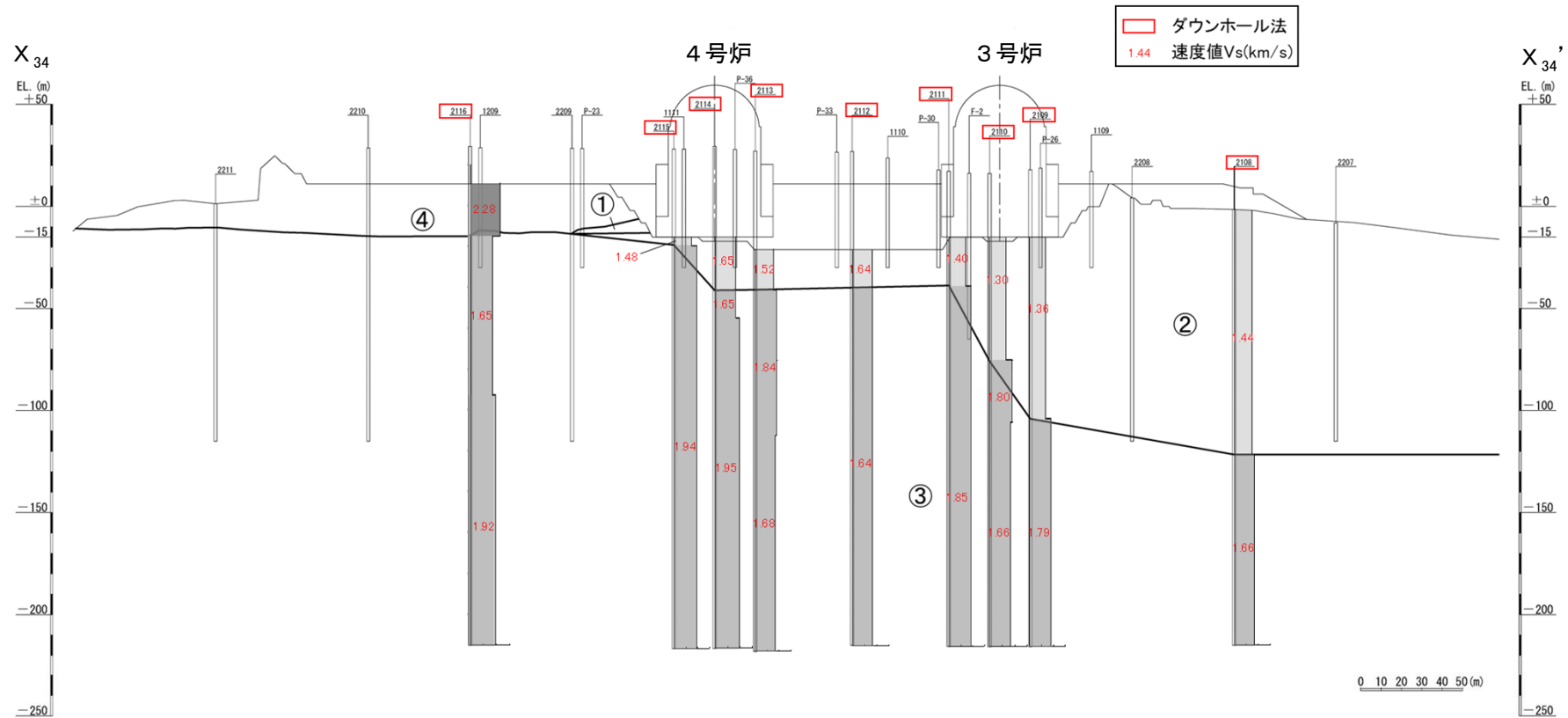
- PS検層モデルとして、実地盤の状況に近いと考えられる「b. 速度コントラストをなくした場合」の地下構造モデルを設定する。

【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面

第402回審査会合資料（一部修正※）

速度構造について (X₃₄-X_{34'} 断面) (S波速度)



速度層区分	V _S (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

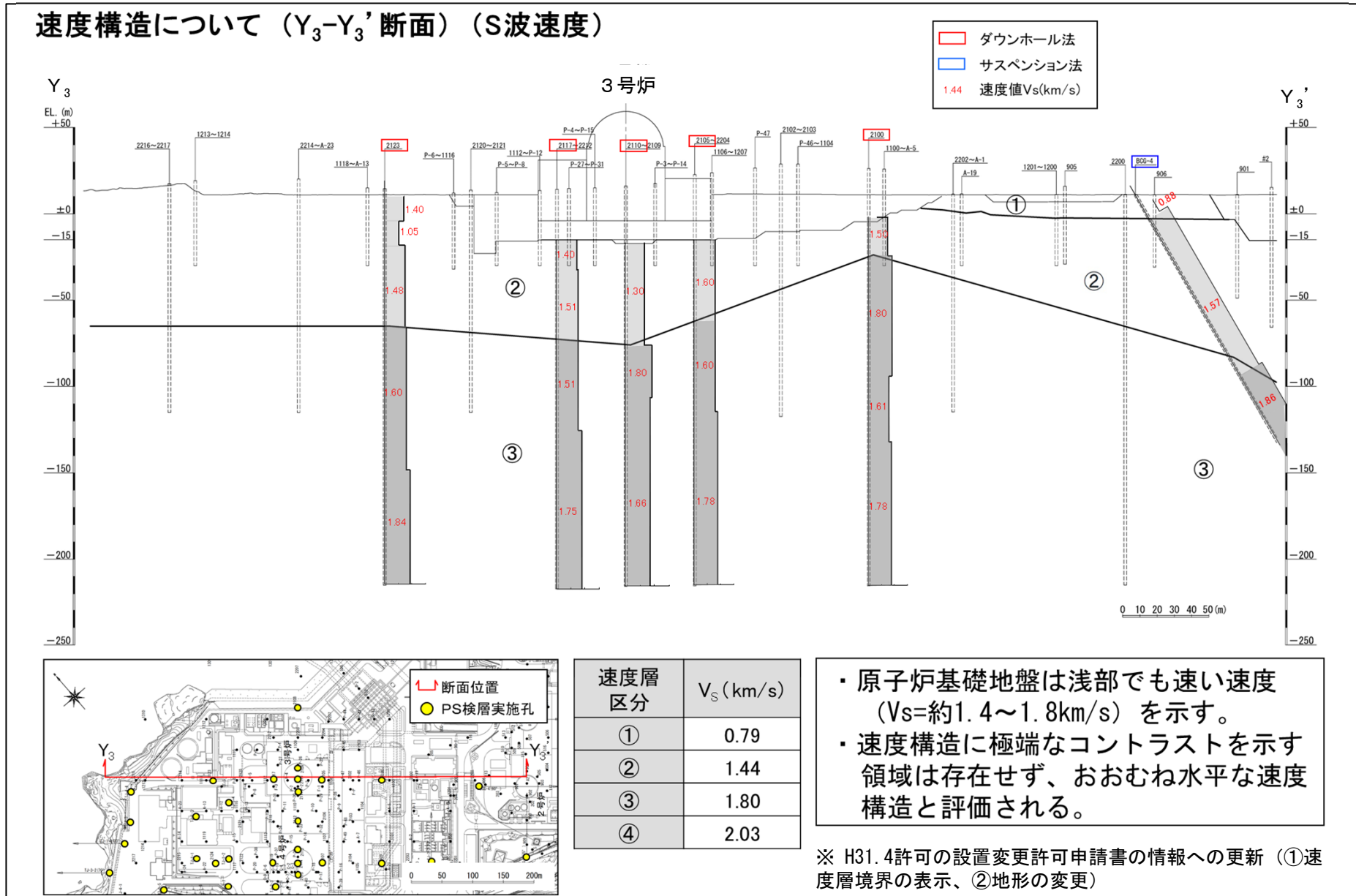
- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (V_s=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①速度層境界の表示、②地形の変更)

【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面

第402回審査会合資料（一部修正※）

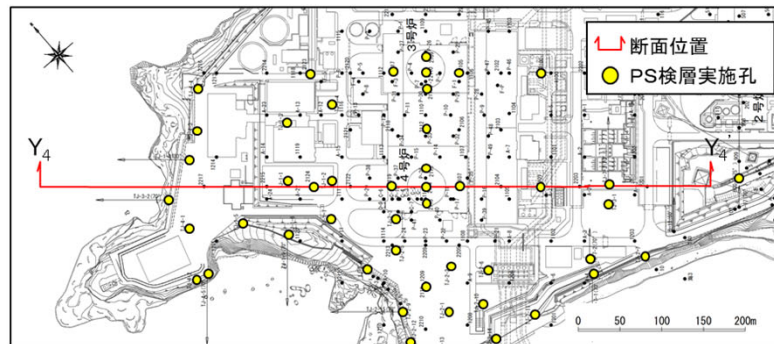
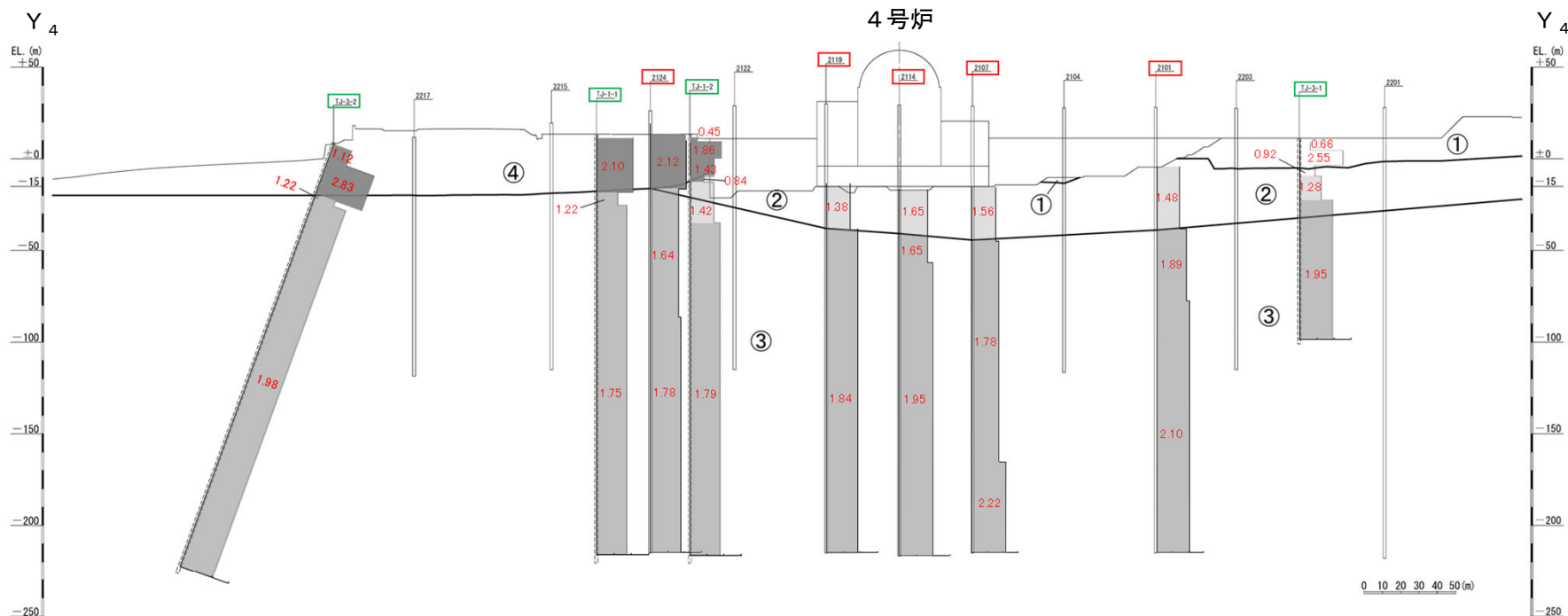


【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面

第402回審査会合資料（一部修正※）

速度構造について（Y₄-Y₄'断面）（S波速度）



速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度（V_s=約1.4~1.8km/s）を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

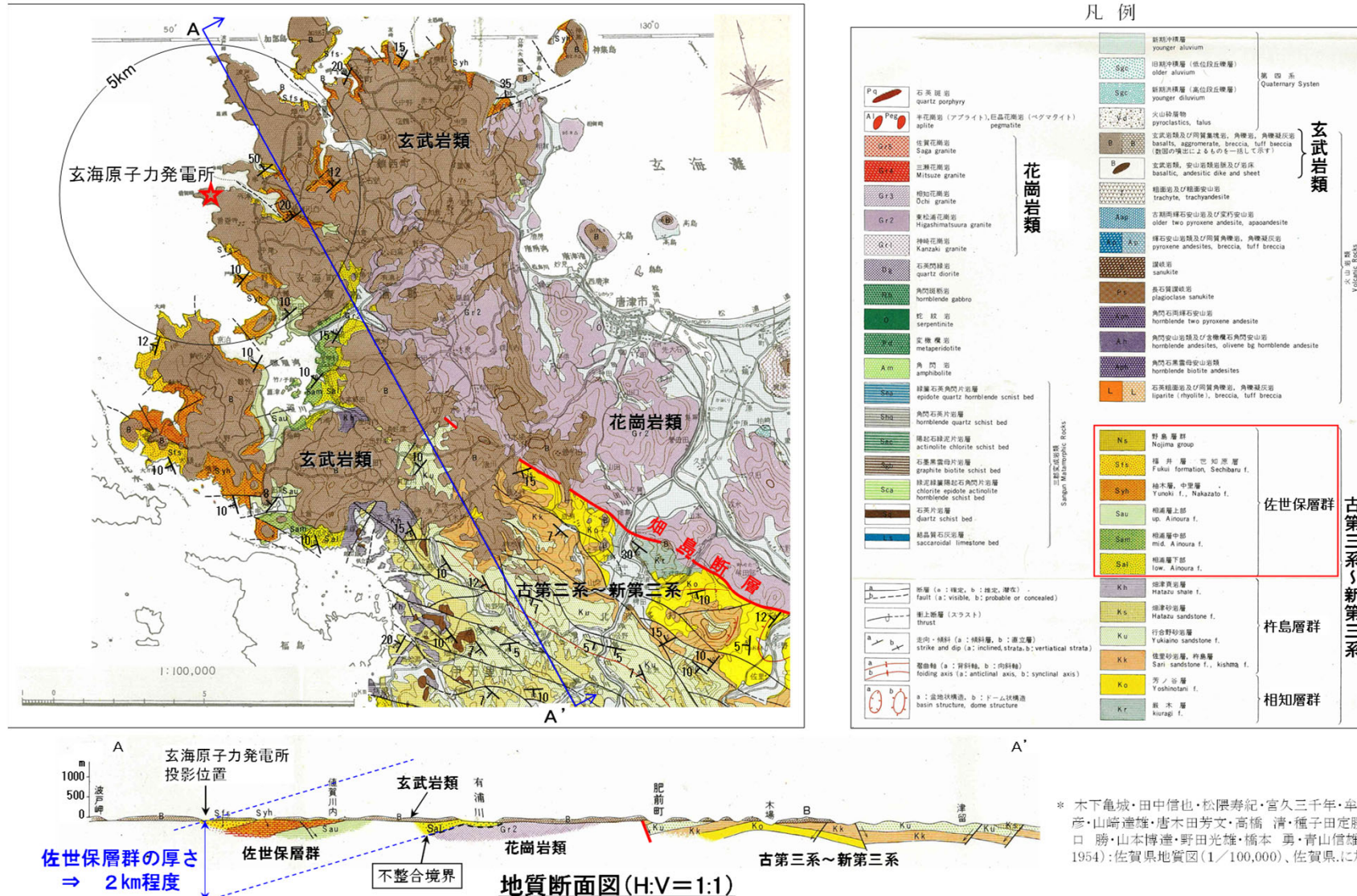
※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新（①TJ-3-2, TJ-1-1, TJ-1-2, TJ-3-1孔の追加、②速度層境界の変更、③地形の変更）

【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

■ 敷地及び敷地周辺の地下構造に関する文献調査

第402回審査会合資料

○ 10万分の1佐賀県地質図によると、敷地付近の佐世保層群の厚さは、2km程度と推定される。



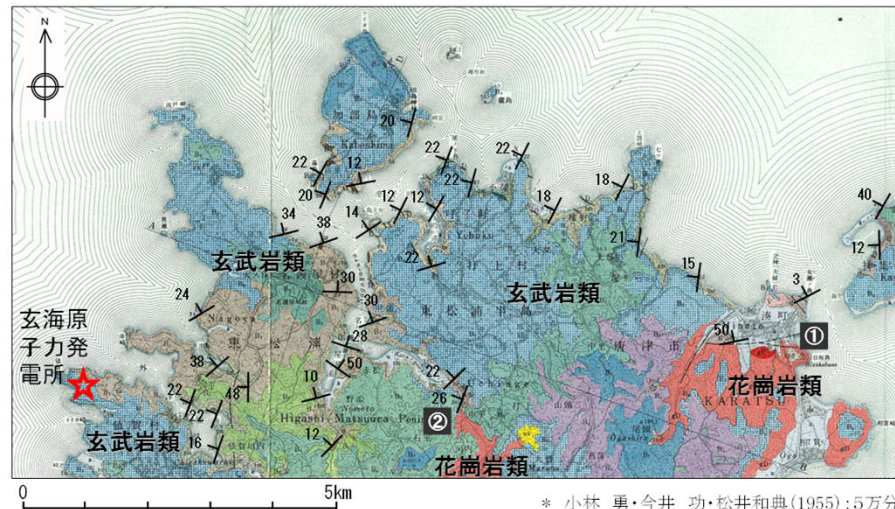
* 木下亀城・田中徳也・松隈寿紀・宮久三千年・幸田邦彦・山崎達雄・唐木田芳文・高橋 清・種子田定勝・山口 勝・山本博達・野田光雄・橋本 勇・青山信雄 (1954): 佐賀県地質図 (1/100,000)、佐賀県. に加筆

【補足④】PS検層モデルとの比較による確認における境界条件の影響検討

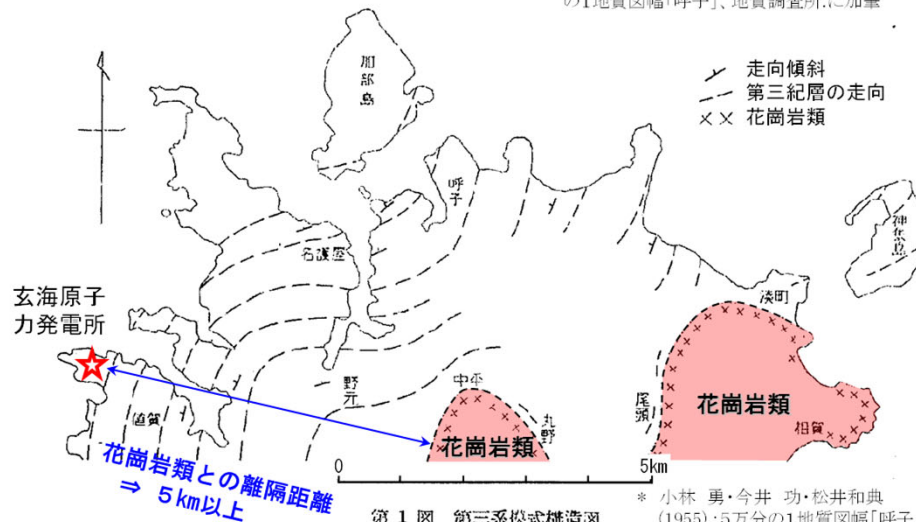
■ 敷地及び敷地周辺の地下構造に関する文献調査

第402回審査会合資料

○ 5万分の1地質図幅「呼子」によると、花崗岩類と敷地との離隔距離は5km以上とされており、佐世保層群の走向・傾斜から、敷地付近の佐世保層群の厚さを推定すると、少なくとも1km程度以上となる。

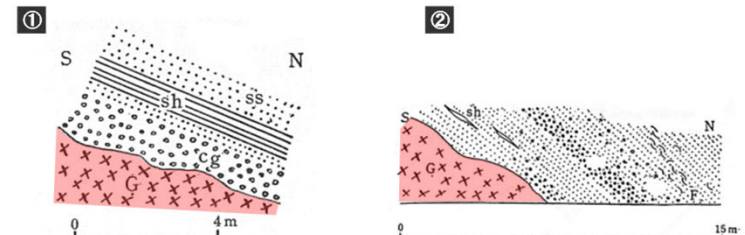


* 小林 勇・今井 功・松井和典(1955):5万分の1地質図幅「呼子」、地質調査所に加筆



* 小林 勇・今井 功・松井和典(1955):5万分の1地質図幅「呼子」、地質調査所に加筆

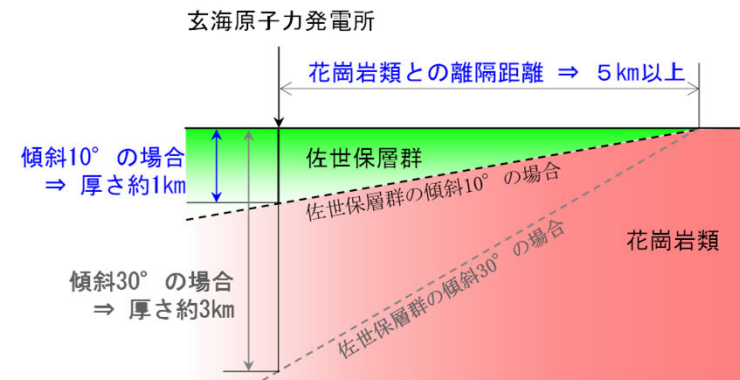
【花崗岩類と第三紀層の不整合露頭】



第3圖 妻村日坂鼻露頭 第5圖 打上村中平露頭
ss: 砂岩 sh: 頁岩 cg: 礫岩 G: 花崗岩 F: 貝化石 sh: 頁岩 G: 花崗岩

* 小林 勇・今井 功・松井和典(1953)唐津・呼子両図幅内におけるいくつかの問題点について、地質調査所月報、第4巻、第3号、p.215-218に加筆

【模式断面図】



◆ 佐世保層群の傾斜は10~50°程度であり、最も低角度である傾斜10°の場合でも、敷地付近の佐世保層群の厚さは、約1kmと推定される。



【補足⑤】 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

【補足⑤】上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

■ 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -90mまでの範囲では、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、上下方向の一部の地震観測記録の周期0.2～0.4秒付近において、スペクトル形状（凹凸）の僅かな差異により局所的に観測記録を下回るが、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲では、設定した地下構造モデルとPS検層モデルの伝達関数の比較によると、上下方向の当該周期帯において十分な保守性を有する地下構造モデルであることから、地下構造モデルの妥当性に影響はないと判断した。（86頁参照）
- 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討結果は以下の通り。

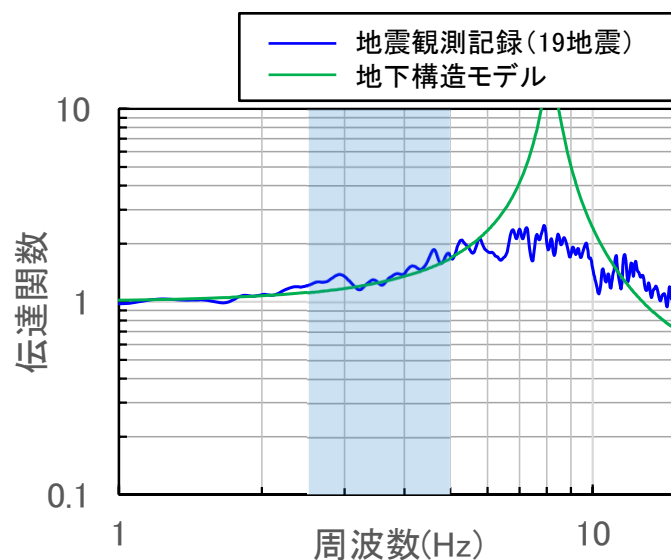


- スペクトル形状（凹凸）の僅かな差異により、応答波が局所的に観測記録を下回る要因は、地下構造モデルが観測事実に整合的であるためと考えられる。
 - 地震観測記録と設定した地下構造モデルの伝達関数（EL. -17.0m/EL. -90.0m）を比較した結果、当該周期帯（2.5～5Hz付近）において、両者は整合していることを確認した。（次頁参照）
- なお、スペクトル形状（凹凸）の生成要因は、EL. -90m以深の範囲にあると考えられる。
 - 深度毎の地震観測記録の応答スペクトルを比較した結果、解放基盤相当（EL. -17m）で見られたスペクトル形状（凹凸）は、最深部地震計（EL. -90m）でも同様の傾向が見られることを確認した。（163～164頁参照）
 - 上記の確認結果から、スペクトル形状（凹凸）の生成要因は、浅部の地下構造によるものではなく、例えば震源特性などによるものであると考えられる。
- 解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -200mまでの範囲の、周期0.2～0.4秒付近において、保守性を有する地下構造モデルであることを確認。（165頁参照）
 - 速度コントラストがないよう条件を揃えた場合の、設定した地下構造モデルとPS検層モデルの伝達関数の比較では、設定した地下構造モデルはPS検層モデルを上回ることを確認した。
 - 設定した地下構造モデルは、実際にはEL. -200mに速度コントラストを設けており、その効果によって、下図のとおり、当該周期帯（0.2～0.4秒付近）において、さらに保守性を有するものとなっている。

【補足⑤】 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

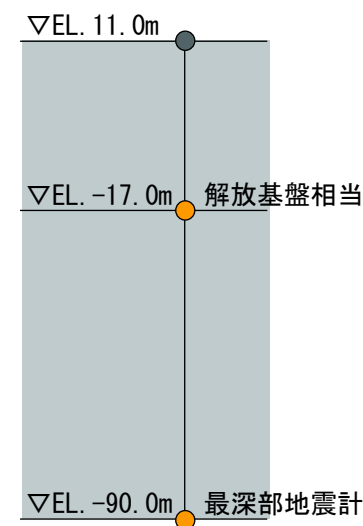
■ 伝達関数 (EL. -17m/EL. -90m) の比較結果

- 地震観測記録と設定した地下構造モデルの伝達関数 (EL. -17.0m/EL. -90.0m) を比較した結果、当該周期帯 (2.5~5Hz付近) において、両者は整合していることを確認した。



伝達関数の比較 (EL. -17.0m/EL. -90.0m)

※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング



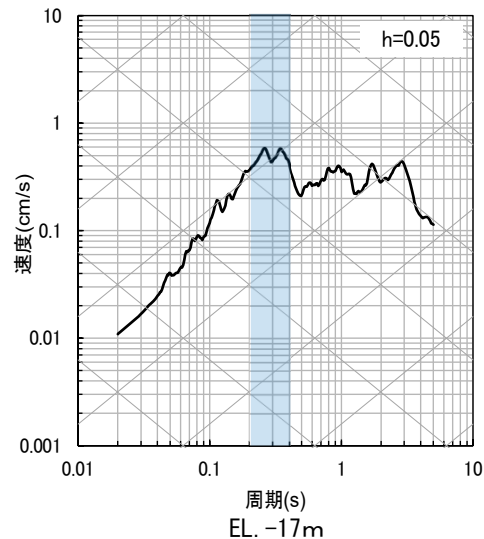
地震計設置位置

【補足⑤】上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

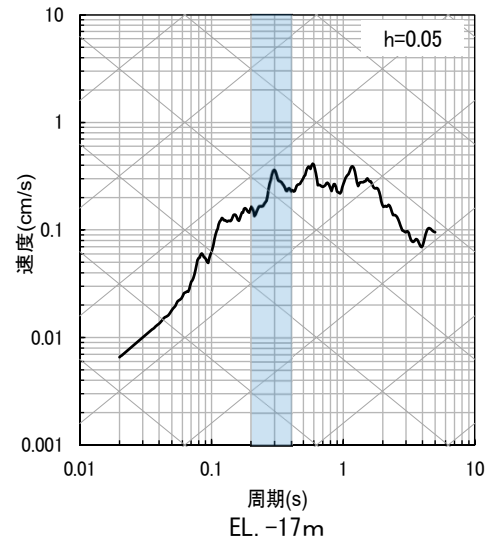
■ 地震観測記録の深度毎の応答スペクトルの比較結果 (1/2)

- 深度毎の地震観測記録の応答スペクトルを比較した結果、解放基盤相当 (EL. -17m) で見られたスペクトル形状 (凹凸) は、最深部地震計 (EL. -90m) でも同様の傾向が見られることを確認した。

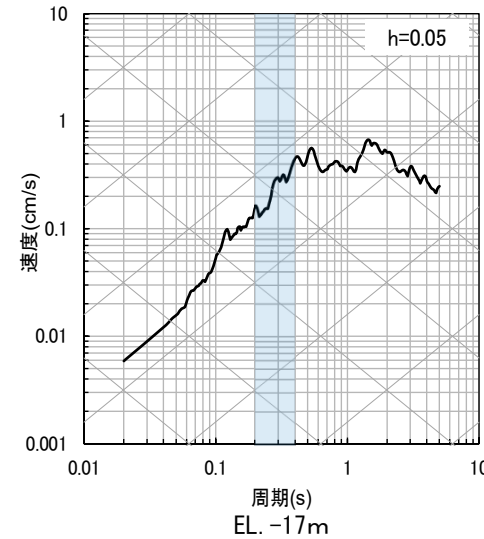
⑥九州北西沖



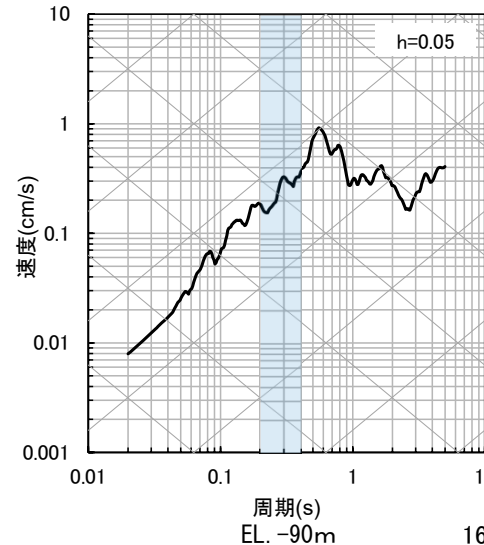
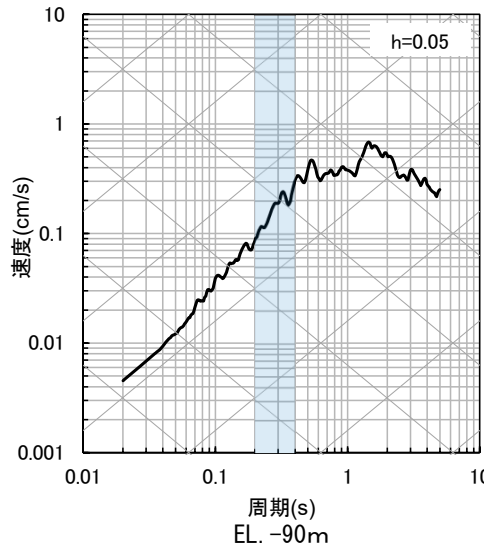
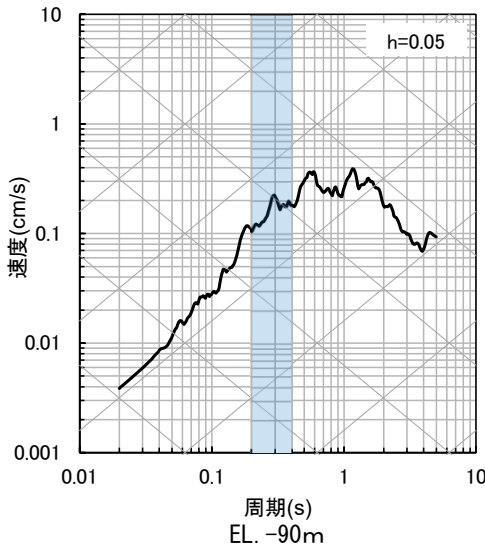
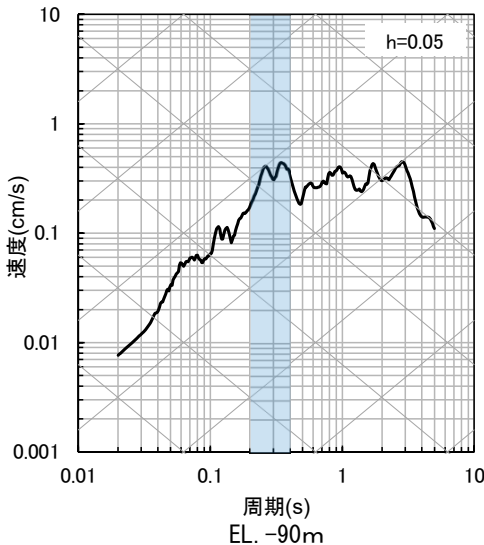
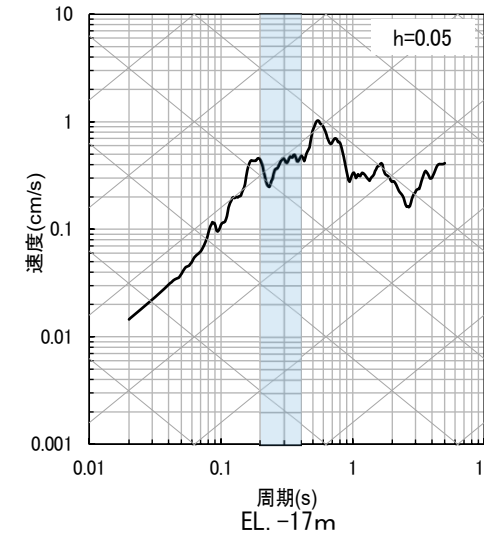
⑨熊本県熊本地方



⑩熊本県熊本地方



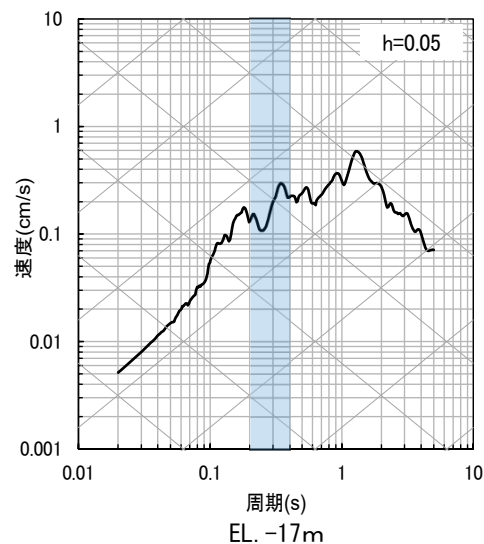
⑬熊本県熊本地方



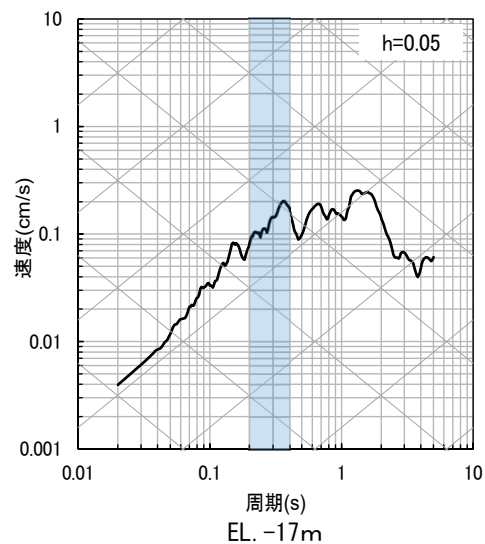
【補足⑤】上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

■ 地震観測記録の深度毎の応答スペクトルの比較結果 (2/2)

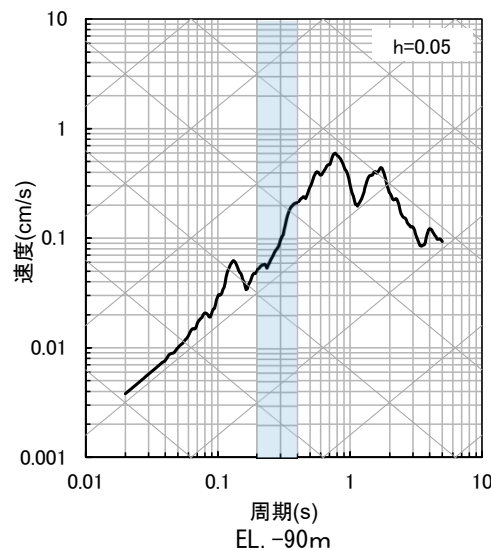
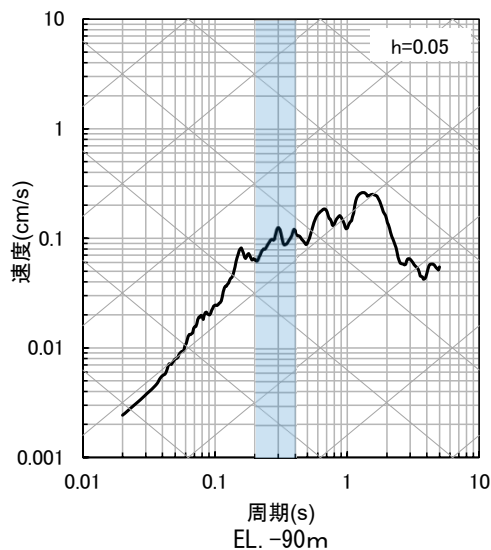
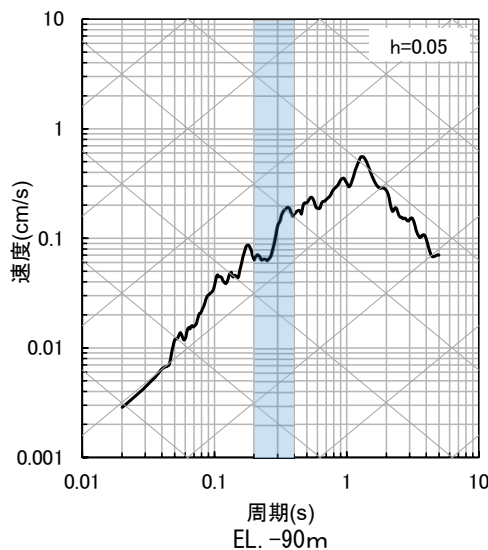
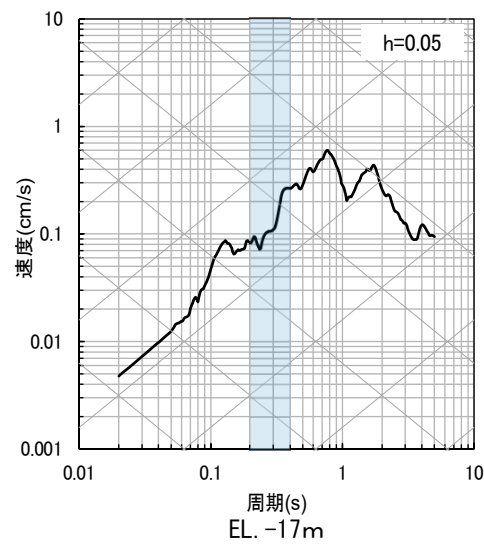
⑮熊本県阿蘇地方



⑯熊本県熊本地方



⑰熊本県阿蘇地方

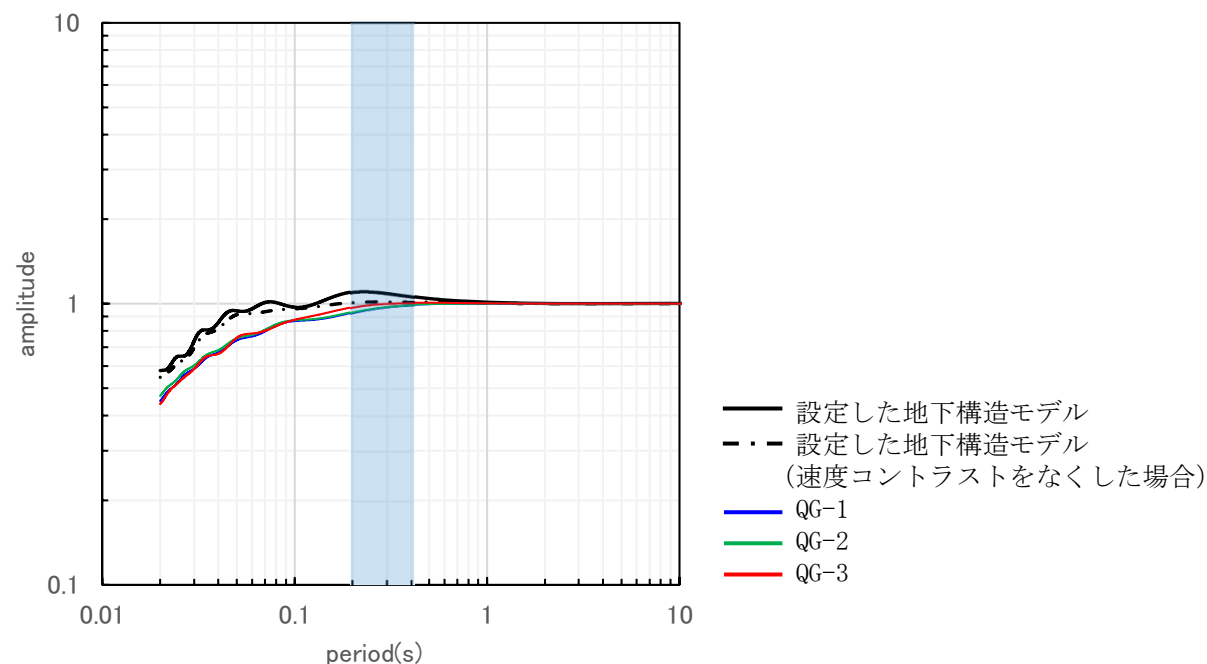


【補足⑤】 上下方向に関する観測事実との整合性に係る検討

■ 伝達関数 (EL. -15m/EL. -200m) の比較結果

- PS検層モデルと設定した地下構造モデルの伝達関数 (EL. -15.0m/EL. -200m) を比較した結果、当該周期帯 (0.2~0.4秒付近) において、設定した地下構造モデルが上回ることを確認した。
 - EL. -200mの速度コントラストの影響により上下方向の周期0.2~0.4秒付近において特徴的なピークが生成されることを確認している。(補足④)
 - 速度コントラストがないよう条件を揃えた場合の、設定した地下構造モデルとPS検層モデルの伝達関数の比較では、設定した地下構造モデル (黒一点鎖線) はPS検層モデル (青・緑・赤線) を上回る。
 - 設定した地下構造モデル (黒実線) は、実際にはEL. -200mに速度コントラストを設けており、その効果によって、下図のとおり、当該周期帯 (0.2~0.4秒付近) において、さらに保守性を有するものとなっている。

設定した地下構造モデル			
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5
▼ (EL. -150m)	1730	3470	12.5
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5
	2100 (1770)	4000 (3650)	200



伝達関数の比較 (EL. -15m/EL. -200m、上下方向)

※速度コントラストをなくした場合 (EL. -200m以深を上層と同じ速度に設定) の設定値について括弧で示す。

【補足⑥】 解放基盤表面の地震波の作成における地盤減衰（Q値）の影響

【補足⑥】解放基盤表面の地震波の作成における地盤減衰（Q値）の影響

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

- 「2.5 標準応答スペクトル用モデルの設定」では、既許可以降取得した地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき設定した地下構造モデルについて、地盤減衰（Q値）の見直しを行い、標準応答スペクトル用モデルを設定。
- 地盤減衰（Q値）の見直しを行ったことによる、解放基盤表面での地震動レベルへの影響について、次頁にて確認。

設定した地下構造モデル

標準応答スペクトル用モデル

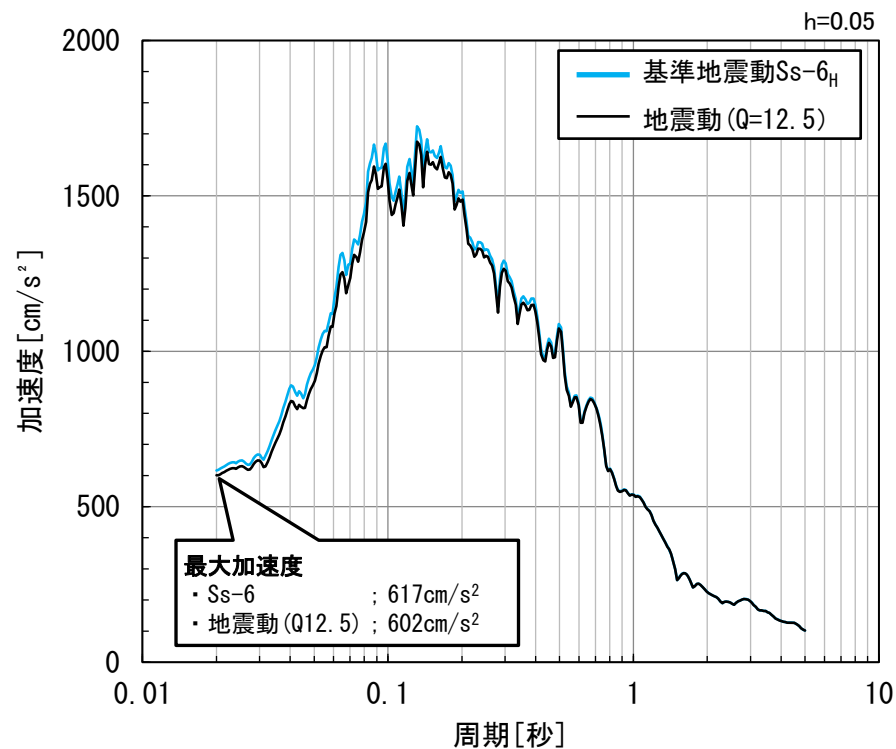
EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
解放基盤表面	0.0	2.35	1350	3000	12.5	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-15m										
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.075	2.35	1570	3440	12.5	-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5	-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5	-0.135	2.35	1770	3650	16.7
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	-0.185	2.40	2100	4000	200
地震基盤相当面										
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300	-1.789	2.60	3100	5500	300

16.7 : 見直し範囲

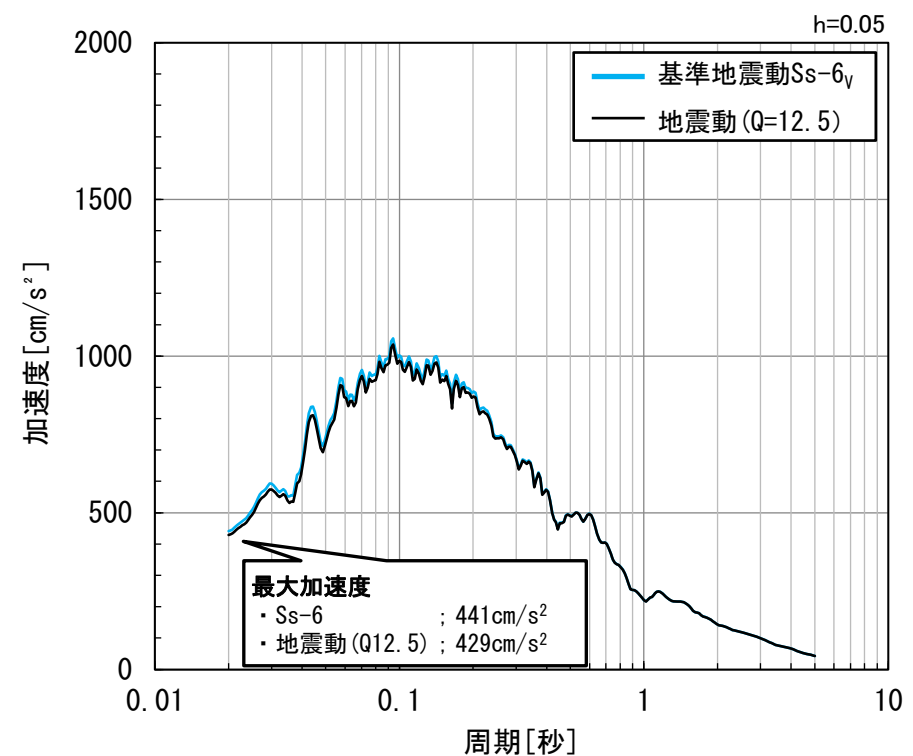
【補足⑥】 解放基盤表面の地震波の作成における地盤減衰（Q値）の影響

■ 地盤減衰（Q値）の見直しに伴う解放基盤表面での地震動レベルへの影響

- 基準地震動Ss-6について、地盤減衰（Q値）の見直し前（ $Q=12.5$ ）の地震動との比較結果を下図に示す。
- 基準地震動Ss-6の最大加速度は、地盤減衰（Q値）の見直し前（ $Q=12.5$ ）の地震動に比べて、水平； 15cm/s^2 、鉛直； 12cm/s^2 大きくなっており、応答スペクトルの短周期帯でも基準地震動Ss-6が大きい傾向にあることを確認した。



水平方向



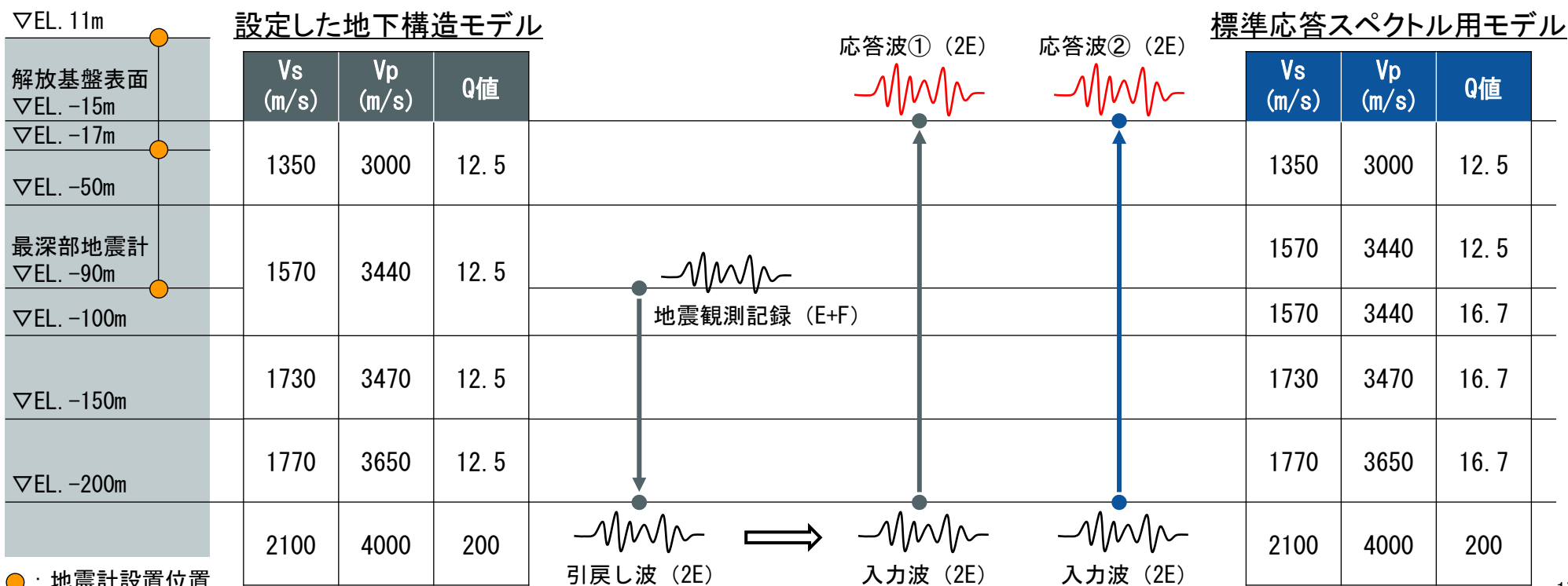
鉛直方向

【補足⑦】 地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

- 標準応答スペクトル用モデルの地盤減衰（Q値）の設定にあたり、Q=12.5からQ=16.7に見直しており、見直しによる影響を、地震観測記録を用いて確認する。
 - EL. -90mの観測記録を、設定した地下構造モデルのEL. -200mまで引き戻す。（引戻し波）
 - 引戻し波を、設定した地下構造モデルのEL. -200mに入力し、解放基盤表面（EL. -15m）で出力する。（応答波①）
 - 引戻し波を、標準応答スペクトル用モデルのEL. -200mに入力し、解放基盤表面（EL. -15m）で出力する。（応答波②）
 - 応答波①と応答波②の最大加速度、理論伝達関数、及び応答スペクトルの比較を実施する。



【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 最大加速度による地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果

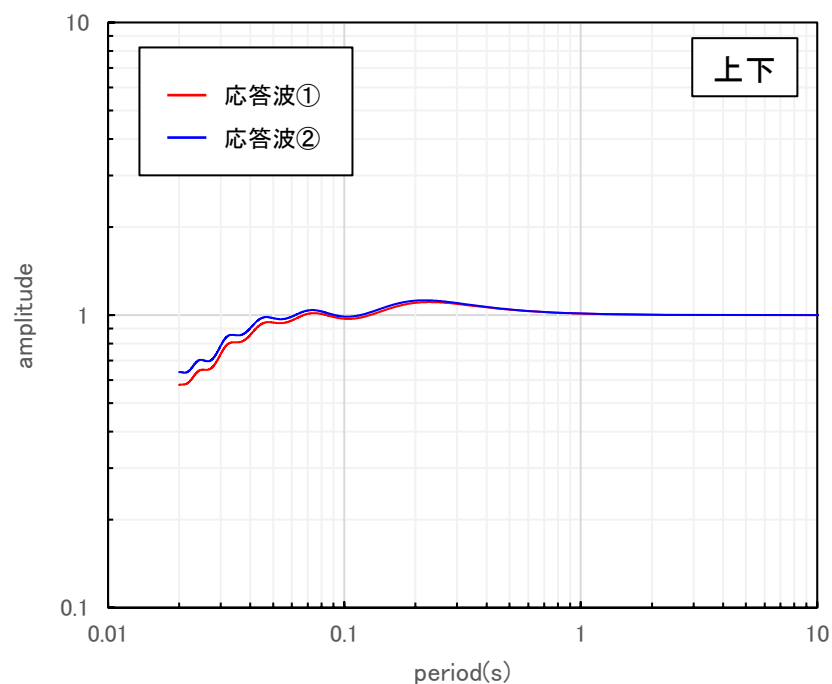
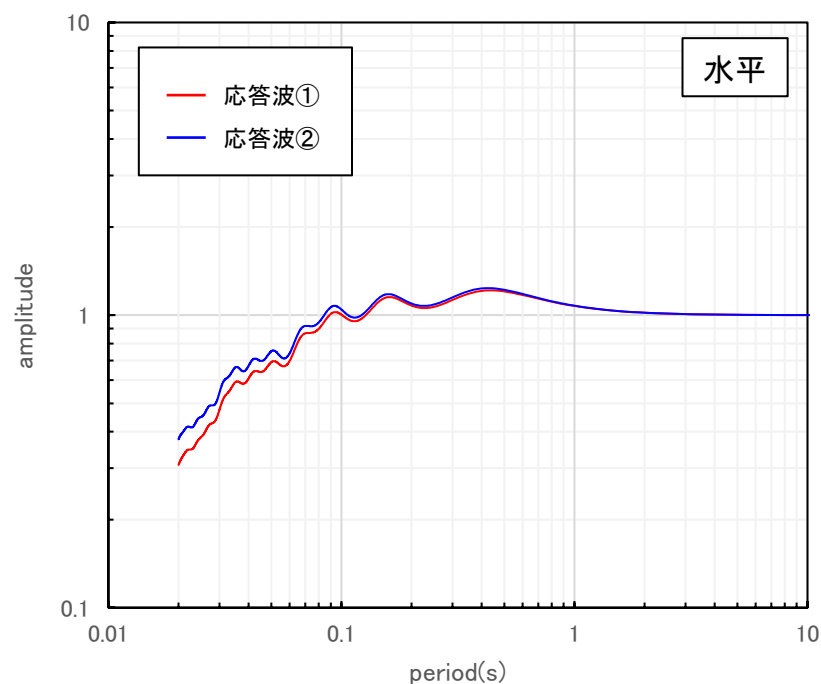
- 応答波①と応答波②の比較の結果、地盤減衰（Q値）の見直しにより、下表の通り最大加速度が増大することを確認した。

番号	地震名	最大加速度差分（cm/s ² ）（応答波②－応答波①）		
		NS方向	EW方向	UD方向
①	鹿児島県北西部	0.0	0.0	0.0
②	鹿児島県北西部	0.0	0.0	0.0
③	鹿児島県北西部	0.0	0.1	0.0
④	山口県	0.1	0.0	0.0
⑤	九州北西沖	9.9	6.5	3.4
⑥	九州北西沖	0.3	0.3	0.1
⑦	福岡県中部	2.9	1.3	0.5
⑧	熊本県熊本地方	0.3	0.3	0.1
⑨	熊本県熊本地方	0.2	0.2	0.0
⑩	熊本県熊本地方	0.2	0.1	0.0
⑪	熊本県熊本地方	0.7	0.6	0.2
⑫	熊本県熊本地方	0.1	0.0	0.0
⑬	熊本県熊本地方	0.4	0.3	0.2
⑭	熊本県阿蘇地方	0.0	0.1	0.1
⑮	熊本県阿蘇地方	0.1	0.1	0.0
⑯	熊本県熊本地方	0.1	0.1	0.0
⑰	熊本県熊本地方	0.1	0.1	0.0
⑱	熊本県阿蘇地方	0.1	0.1	0.1
⑲	熊本県熊本地方	0.0	0.1	0.0

【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 伝達関数による地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果

- 応答波①と応答波②の比較の結果、地盤減衰（Q値）の見直しにより、伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）が増大することを確認した。



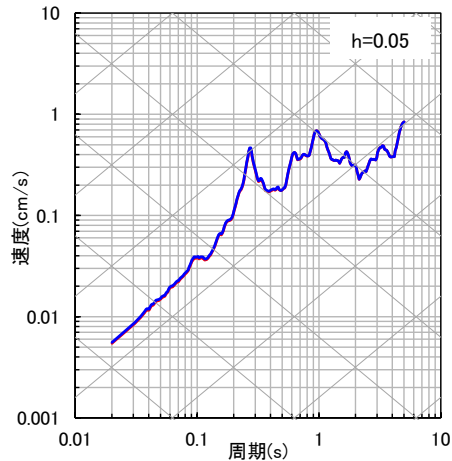
伝達関数の比較（EL. -15m/EL. -200m）

【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

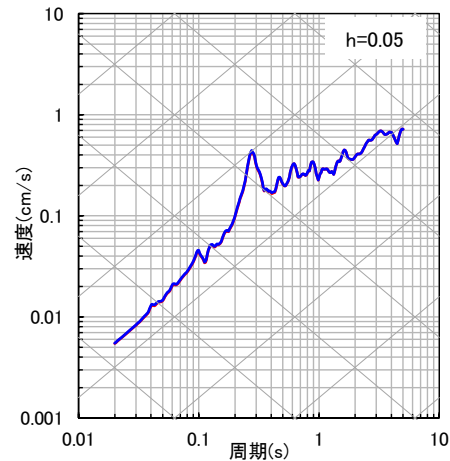
■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（1/10）

- 応答波①と応答波②の比較の結果、地盤減衰（Q値）の見直しにより、応答スペクトルが僅かに増大することを確認した。

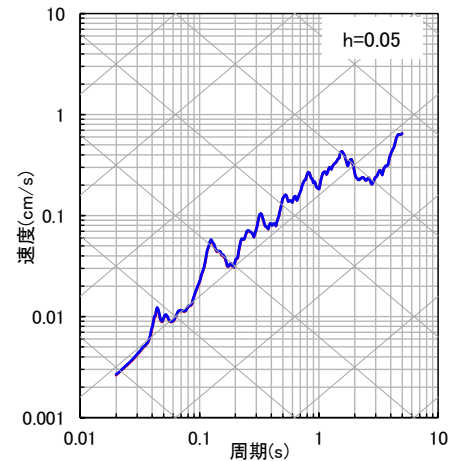
① 鹿児島県北西部



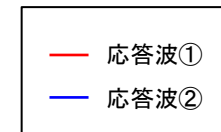
NS方向



EW方向



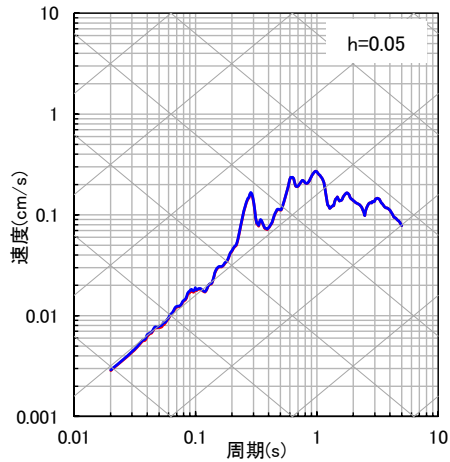
UD方向



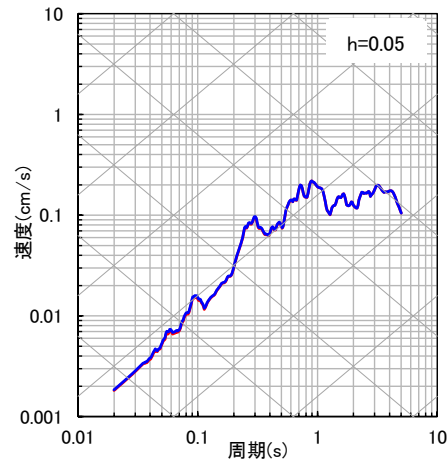
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（2/10）

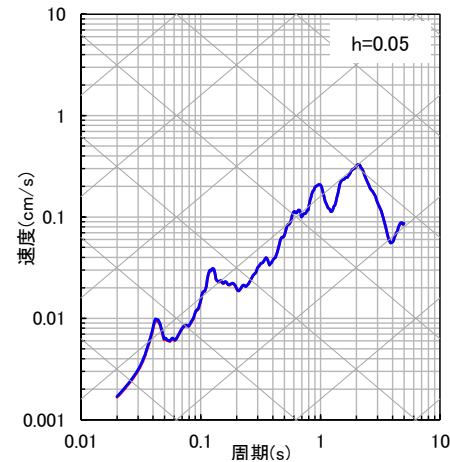
② 鹿児島県北西部



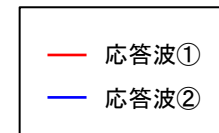
NS方向



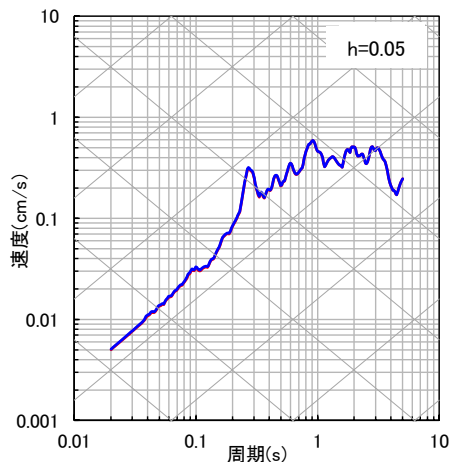
EW方向



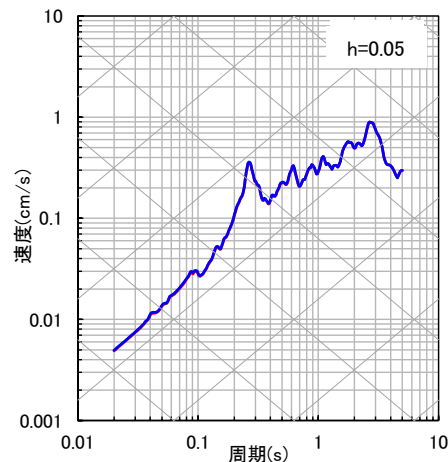
UD方向



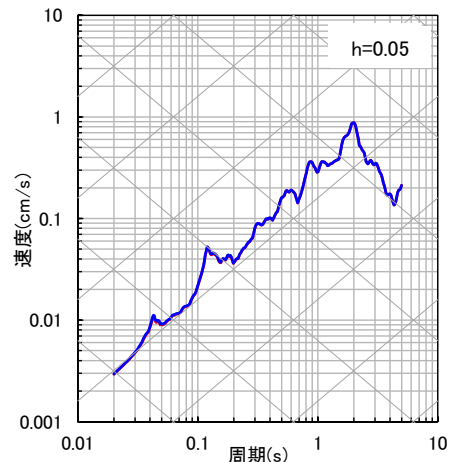
③ 鹿児島県北西部



NS方向



EW方向

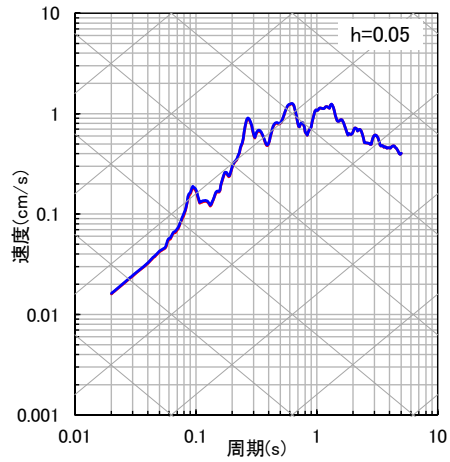


UD方向

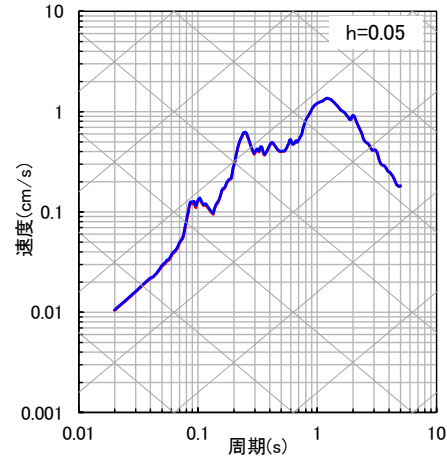
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（3/10）

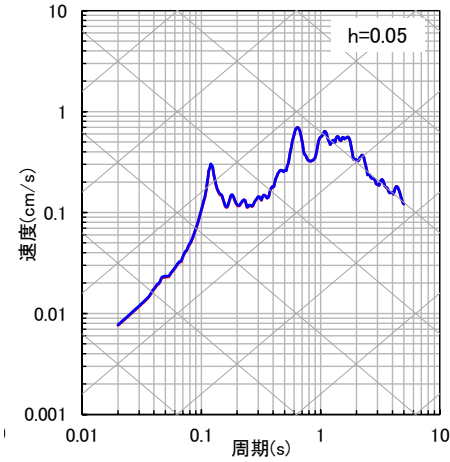
④山口県



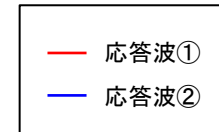
NS方向



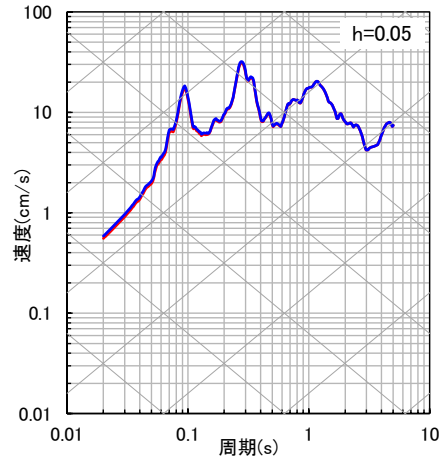
EW方向



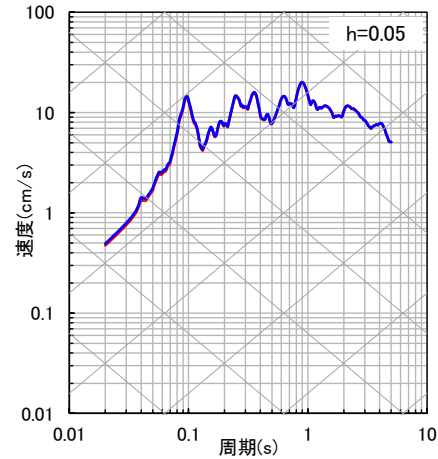
UD方向



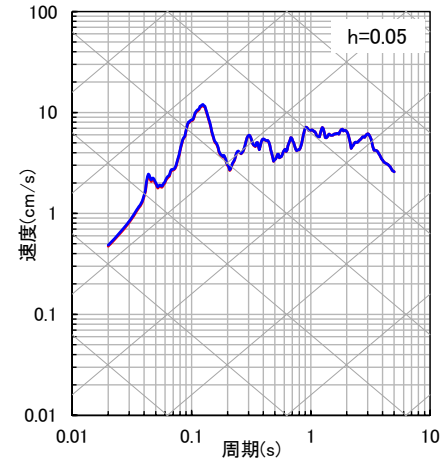
⑤九州北西沖（2005年福岡県西方沖地震本震）



NS方向



EW方向

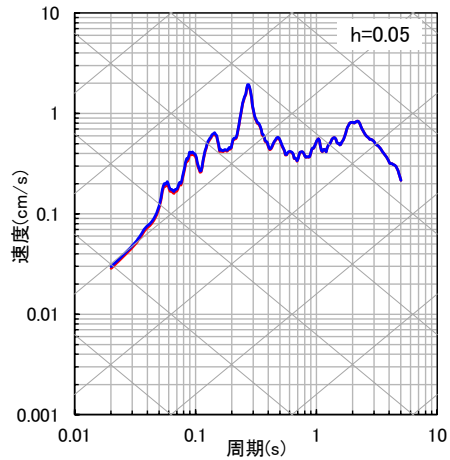


UD方向

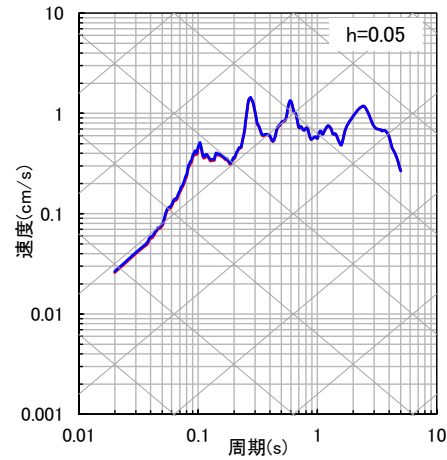
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（4/10）

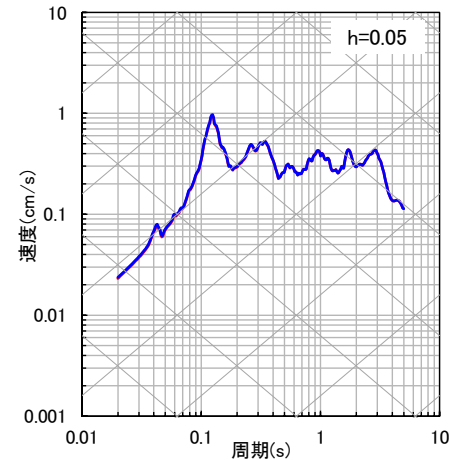
⑥九州北西沖



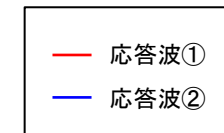
NS方向



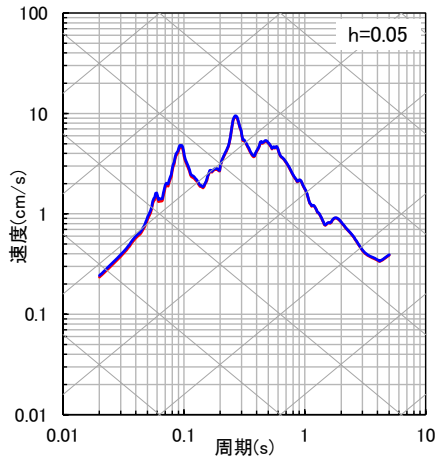
EW方向



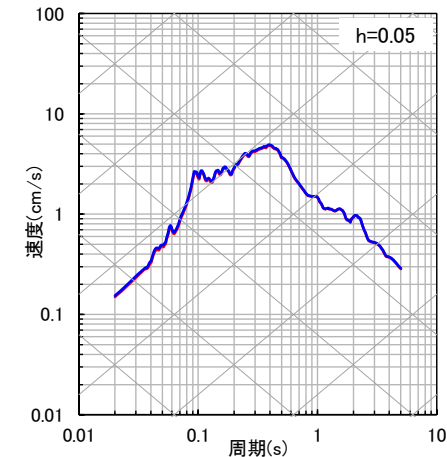
UD方向



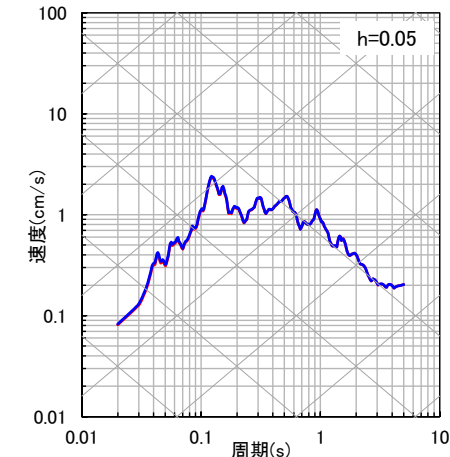
⑦福岡県中部（2005年福岡県西方沖地震最大余震）



NS方向



EW方向

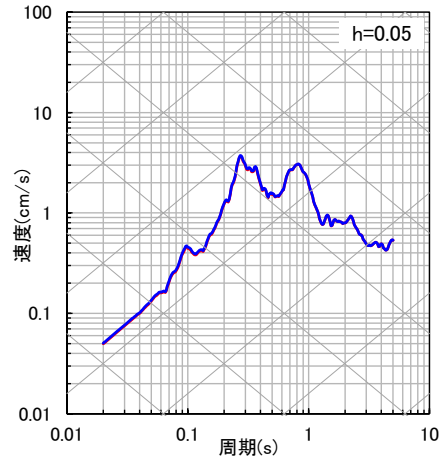


UD方向

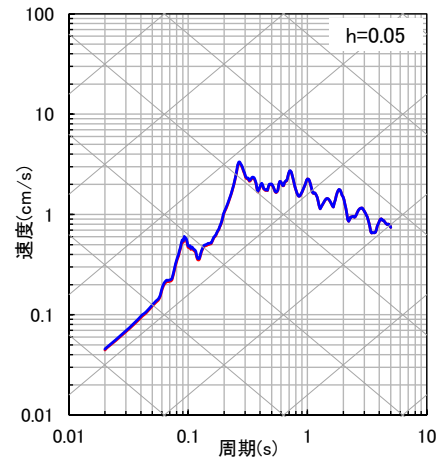
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（5/10）

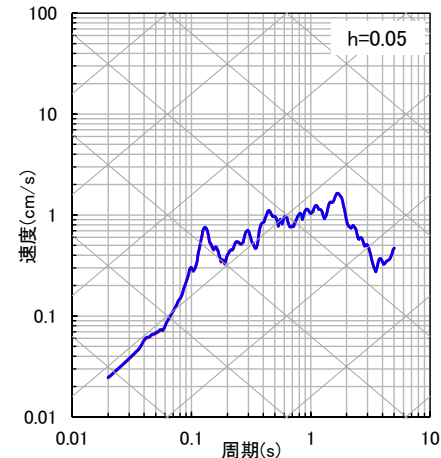
⑧熊本県熊本地方（2016年熊本地震前震）



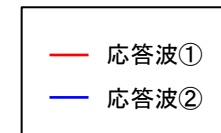
NS方向



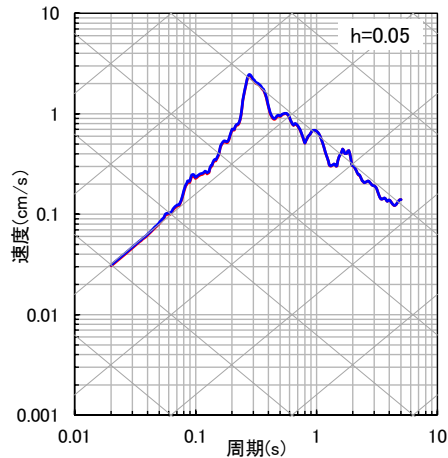
EW方向



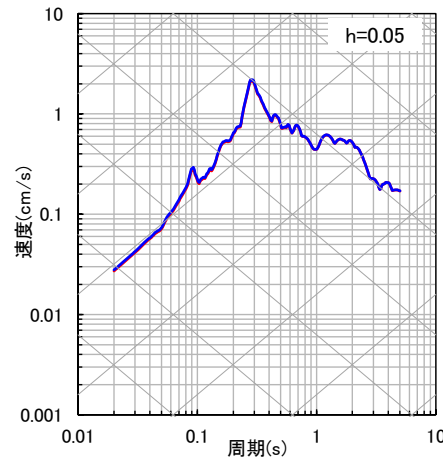
UD方向



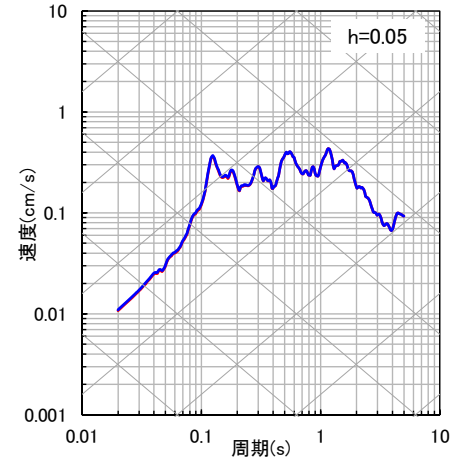
⑨熊本県熊本地方



NS方向



EW方向

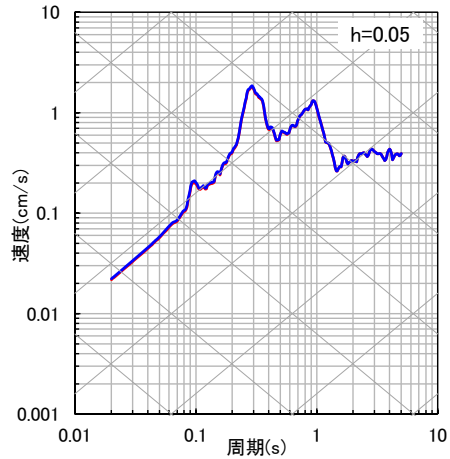


UD方向

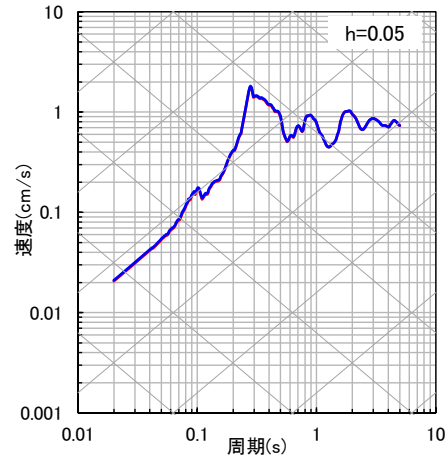
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（6/10）

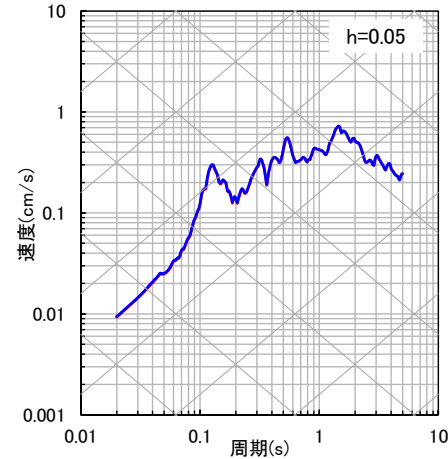
⑩ 熊本県熊本地方



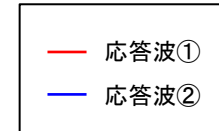
NS方向



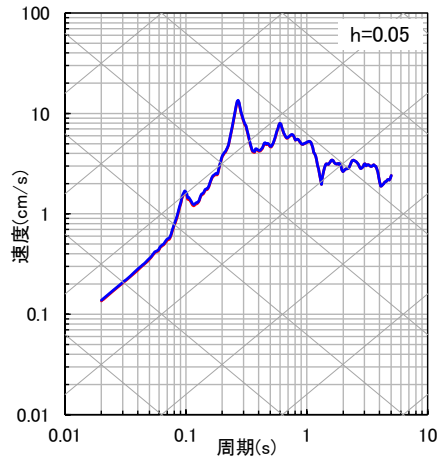
EW方向



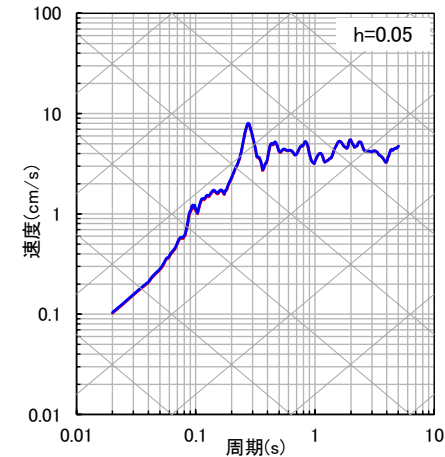
UD方向



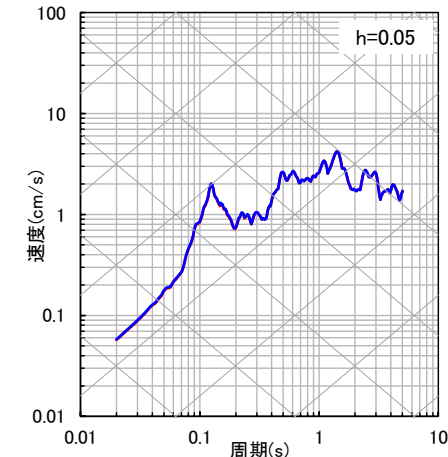
⑪ 熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）



NS方向



EW方向

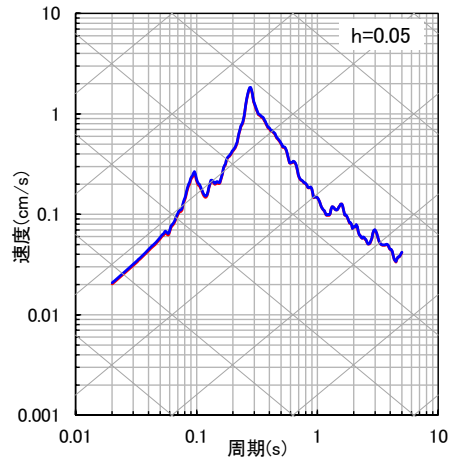


UD方向

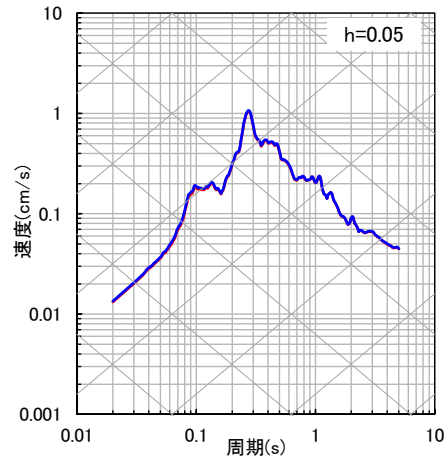
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（7/10）

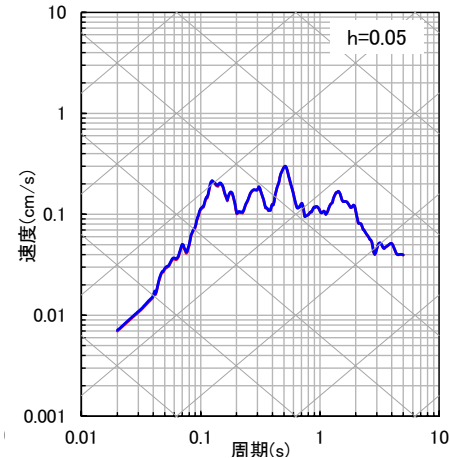
⑫ 熊本県熊本地方



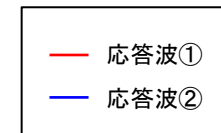
NS方向



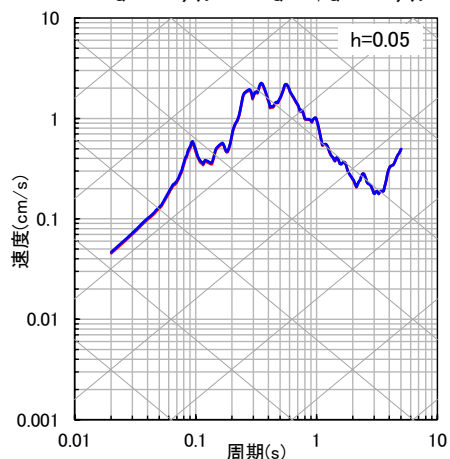
EW方向



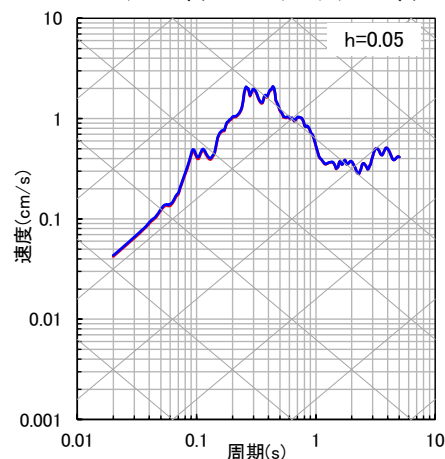
UD方向



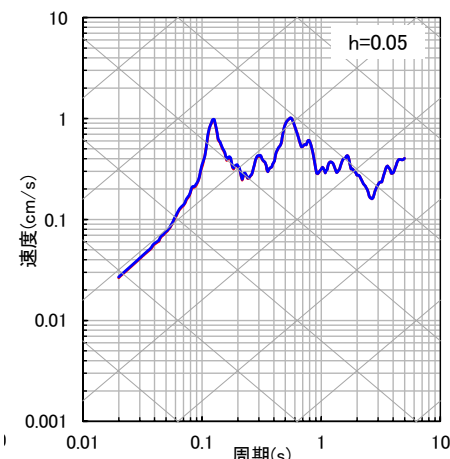
⑬ 熊本県熊本地方



NS方向



EW方向

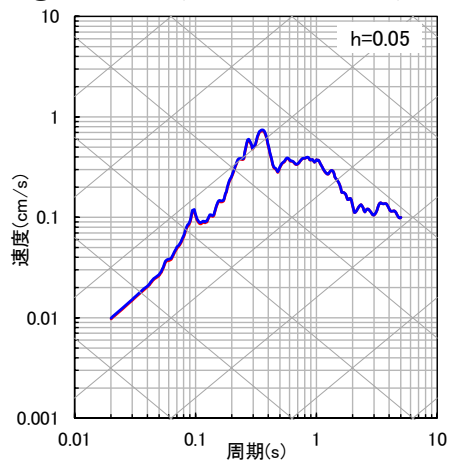


UD方向

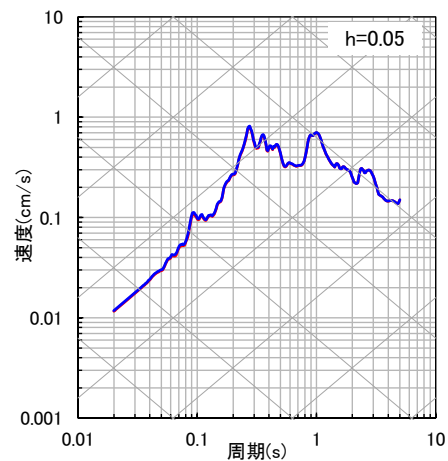
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（8/10）

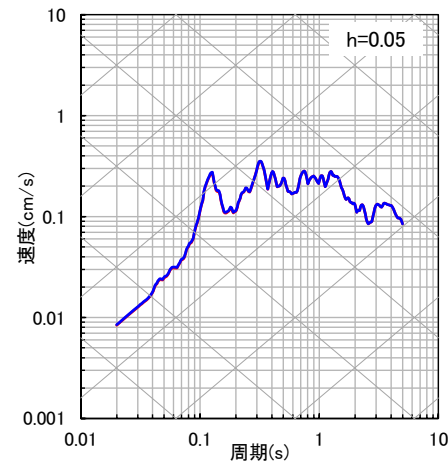
⑭ 熊本県阿蘇地方



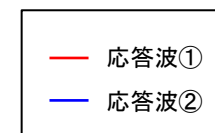
NS方向



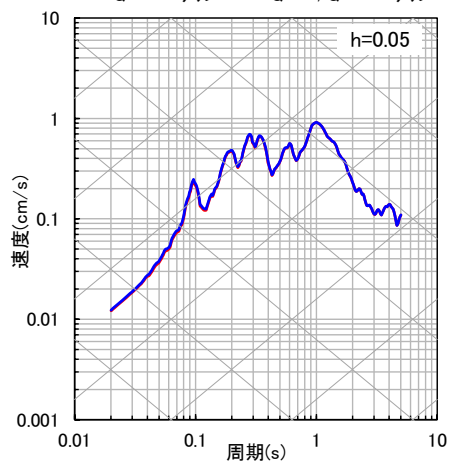
EW方向



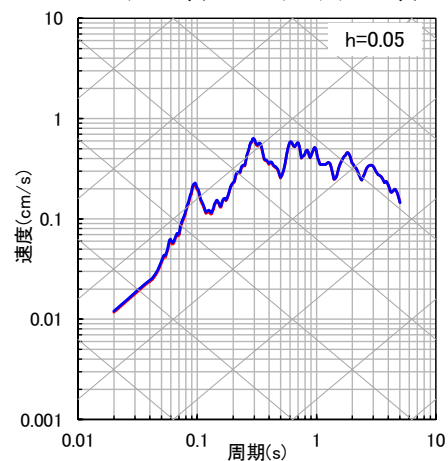
UD方向



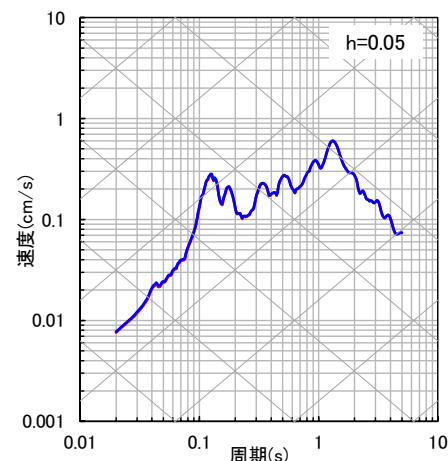
⑮ 熊本県阿蘇地方



NS方向



EW方向

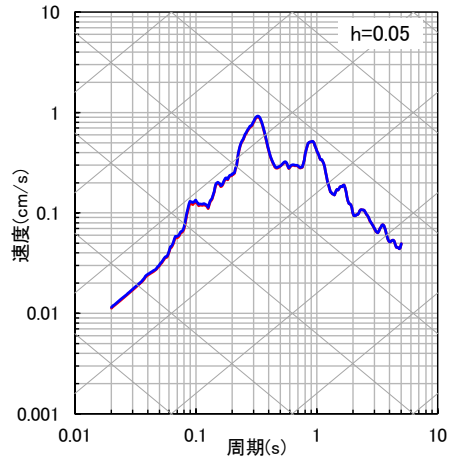


UD方向

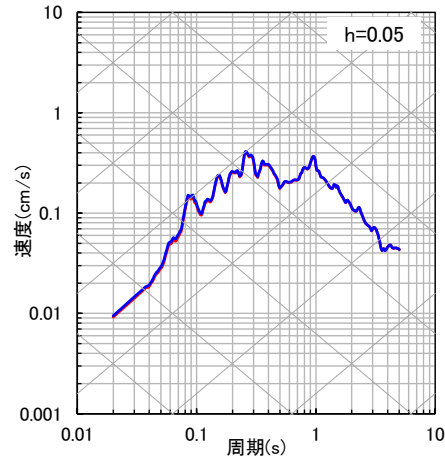
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（9/10）

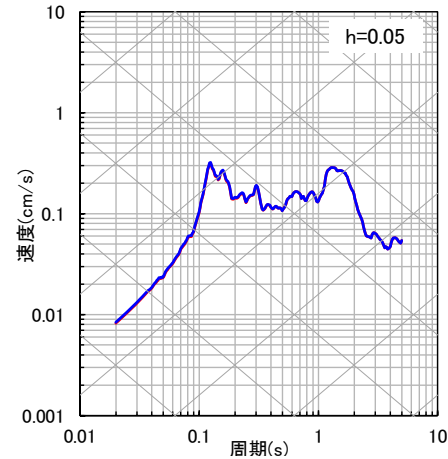
⑩熊本県熊本地方



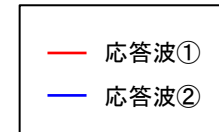
NS方向



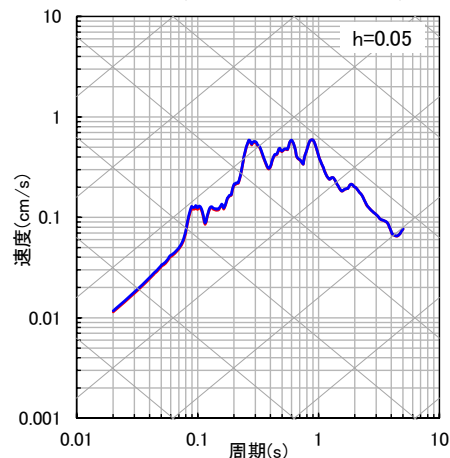
EW方向



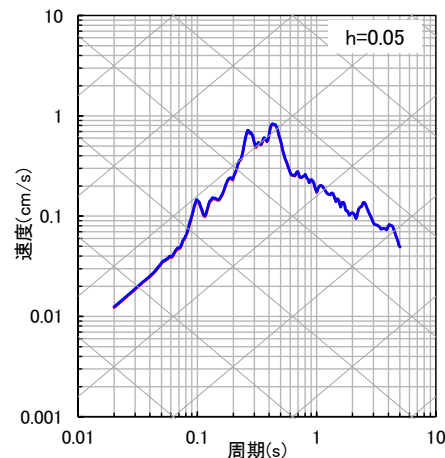
UD方向



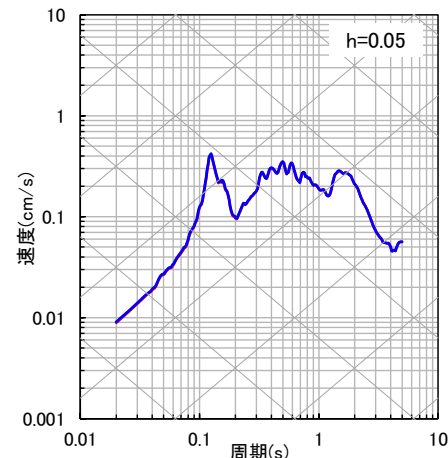
⑪熊本県熊本地方



NS方向



EW方向

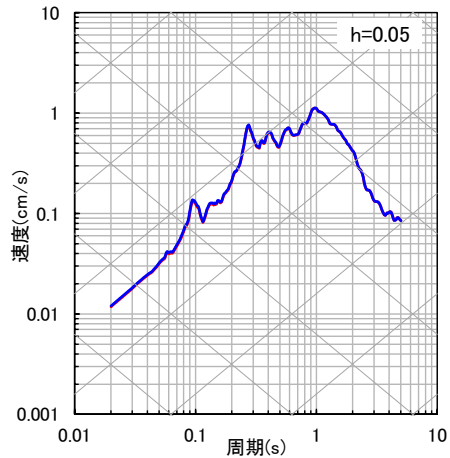


UD方向

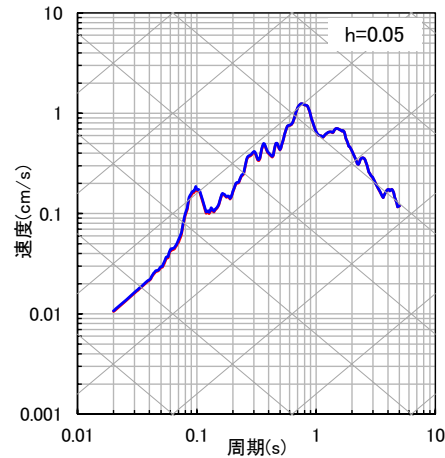
【補足⑦】地震観測記録を用いた地盤減衰（Q値）の見直しの影響検討

■ 応答スペクトルによる地盤減衰（Q値）の見直しの影響確認結果（10/10）

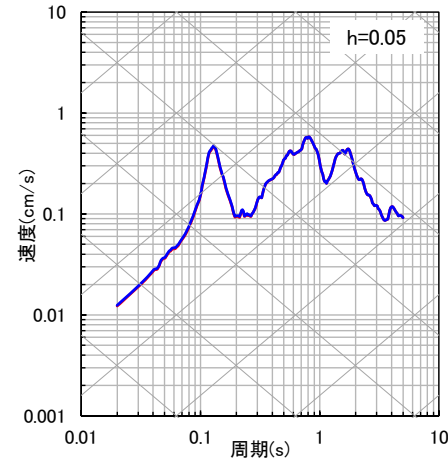
⑱ 熊本県阿蘇地方



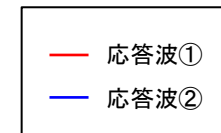
NS方向



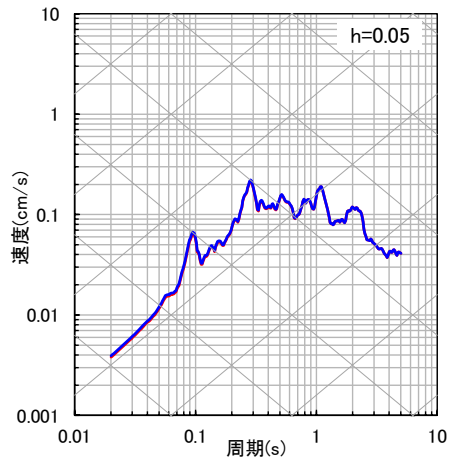
EW方向



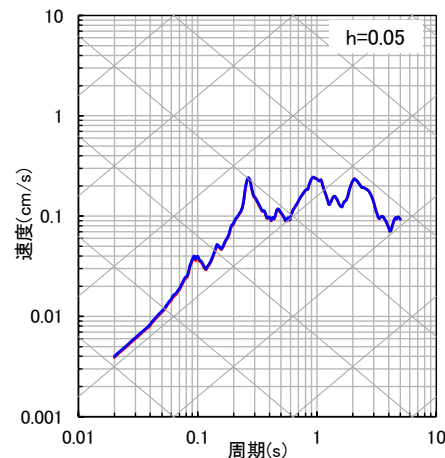
UD方向



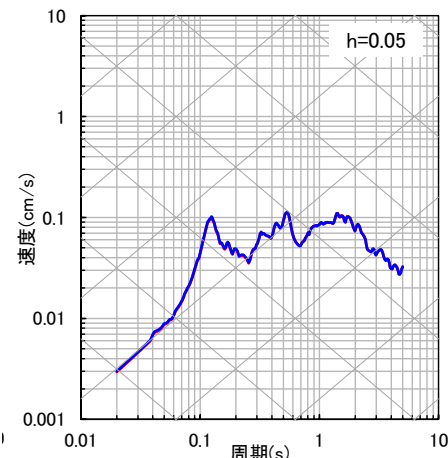
⑲ 熊本県熊本地方



NS方向



EW方向



UD方向

【補足⑧】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

【補足⑧】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

■ 既許可における確率論的地震ハザード評価

- ・ 既許可では、玄海原子力発電所に及ぼす影響の大きい内陸地殻内地震を対象に、「特定震源モデル」と「領域震源モデル」を構築して確率論的地震ハザード評価を実施。

特定震源モデル

- ・ ひとつの地震に対して、震源の位置、規模及び発生頻度を特定して扱うモデル
 - － 震源の位置、規模及び発生頻度は調査及び各種文献^{22), 23)}を基に設定
 - － 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価の検討用地震、及び「その他の活断層」として敷地から100km程度以内の周辺の活断層を設定（布田川・日奈久断層帯(M8.1)は敷地から100km程度以上離れており影響がないため考慮していない）

領域震源モデル

- ・ ある広がりを持った領域の中で発生する地震群として取り扱うモデル
 - － 領域震源の地震活動区分は、萩原（1991）²⁴⁾及び垣見ほか（2003）²⁵⁾による区分を考慮
 - － 領域の地震規模と地震発生頻度は気象庁カタログ²⁶⁾に基づき設定（1926年1月～2012年12月）
 - － 最大マグニチュードは、気象庁カタログ²⁶⁾や各種文献^{27)～29)}を基に設定



- 既許可以降に発生した2016年熊本地震(M7.3)等の地震活動により、既許可の確率論的地震ハザード評価に影響がないことを確認するため、最新の気象庁カタログ²⁶⁾（1926年1月～2022年3月）に更新し、特定震源モデル及び領域震源モデルのそれぞれについて確認を実施。
- その結果、既許可の特定震源モデル及び領域震源モデルへの影響がないことを確認（185～187頁）。
- したがって、既許可の確率論的地震ハザード評価への影響もないことから、年超過確率の参照においては既許可で評価した一様ハザードスペクトルを使用。

【補足⑧】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

■ 特定震源モデル及び領域震源モデルへの影響確認

特定震源モデル

- 既許可以降に玄海原子力発電所周辺で発生した地震のうち、活断層との関係が明らかな地震は、布田川・日奈久断層帯の活動とされる2016年熊本地震のみ。
- 布田川・日奈久断層帯は敷地から100km程度以上離れており影響がないため、ハザード評価上は考慮していない。
- 以上より、特定震源モデルへの影響はない。

領域震源モデル

- 最新の気象庁カタログ²⁶⁾を踏まえ、萩原(1991)²⁴⁾(図1)及び垣見ほか(2003)²⁵⁾(図2)における領域の年発生頻度を更新。
 - 最新の気象庁カタログ²⁶⁾(1926年1月～2022年3月)に基づき、各領域の年発生頻度を更新。
 - なお、萩原(1991)²⁴⁾の領域N及び垣見ほか(2003)²⁵⁾の領域11X0において、2016年熊本地震本震(M7.3)が発生しているが、2016年熊本地震は、特定の活断層(布田川・日奈久断層帯)との関係が明らかであることから、領域震源モデルでは考慮しない。
- 既許可と気象庁カタログ更新後のハザード曲線の比較により、領域震源モデルへの影響がないことを確認(186～187頁)。

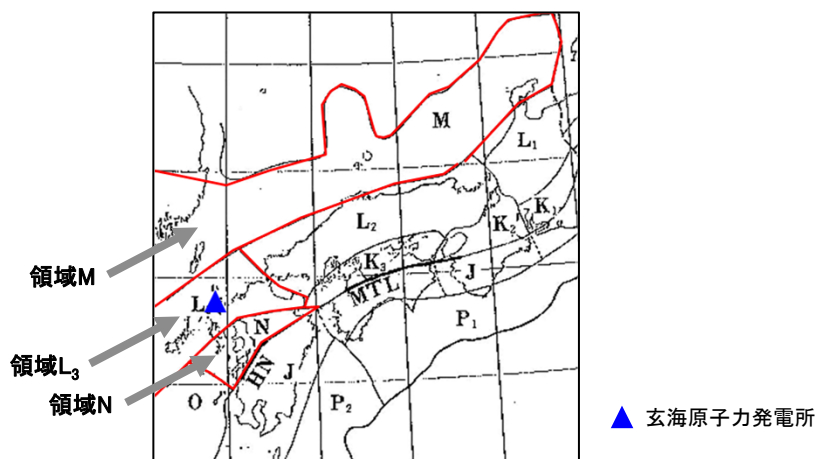


図1 萩原(1991)²⁴⁾の地震地体構造区分(西日本を拡大)

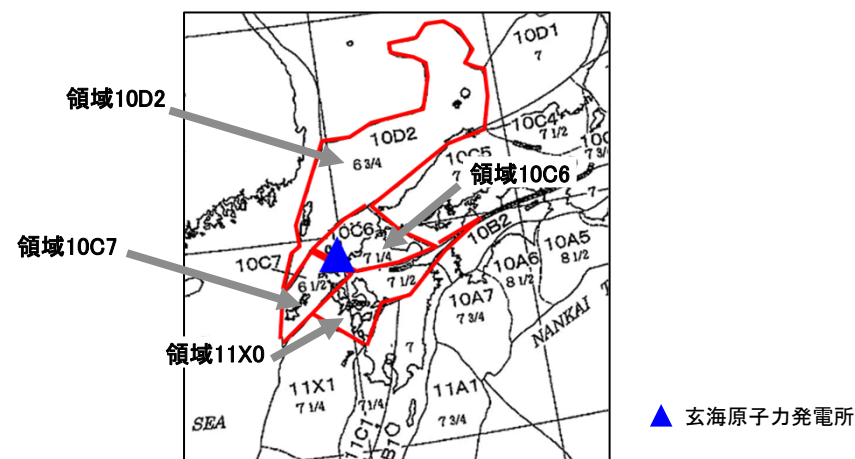


図2 垣見ほか(2003)²⁵⁾の地震地体構造区分(西日本を拡大)

【補足⑧】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

- 気象庁カタログ更新後の萩原（1991）²⁴⁾による領域震源の諸元及びハザード曲線を示す。
 - 気象庁カタログ更新後、全ての領域（L₃、M、N）において年発生頻度がやや増加。
 - 領域震源全体のハザード曲線は既許可と同等であり、領域震源モデルへの影響はない。

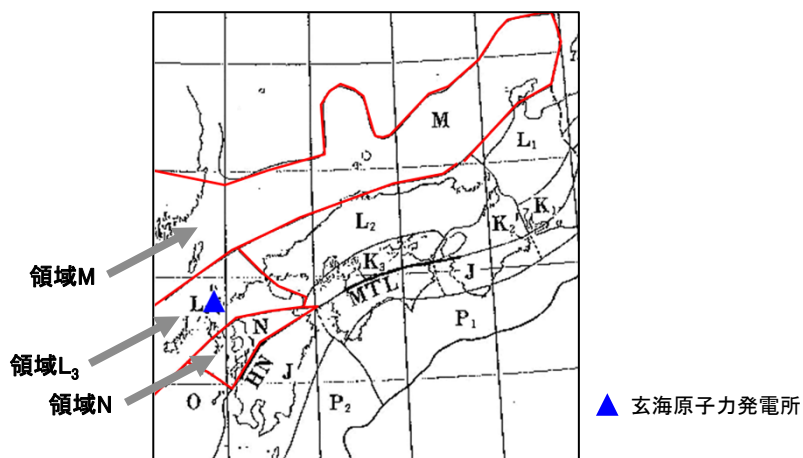


表1 萩原（1991）²⁴⁾による領域震源の諸元の比較

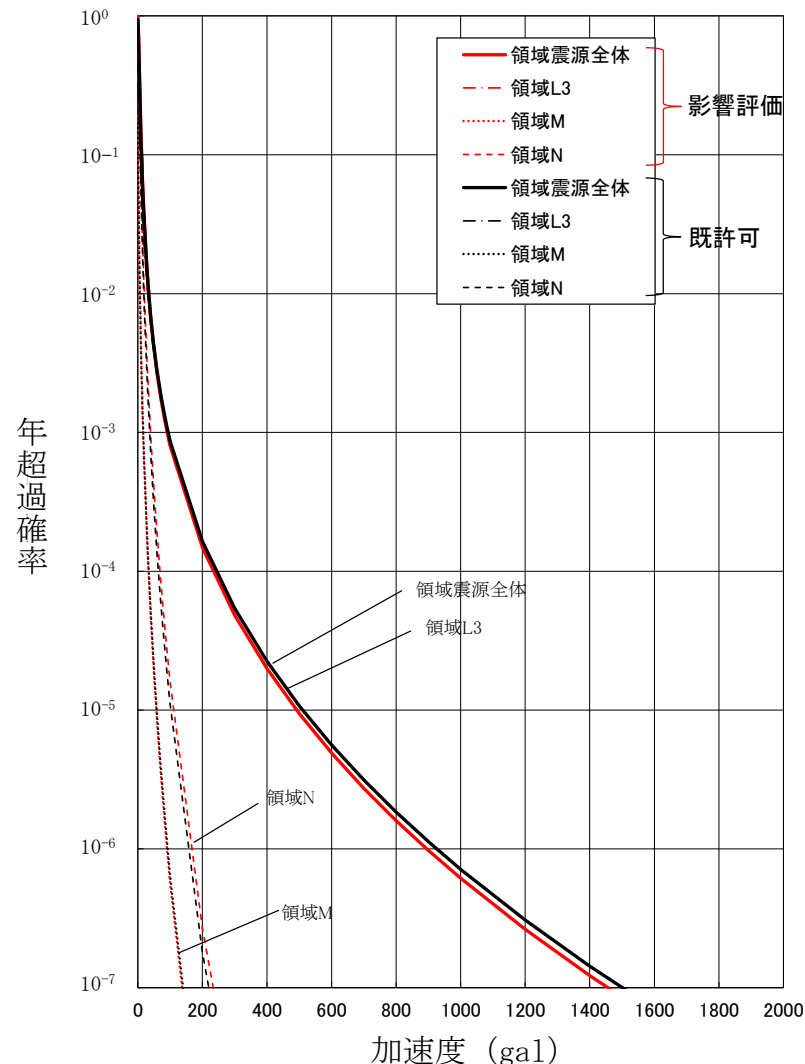
領域	期間	最小M	最大M	b 値 ^{※1}	年発生頻度 ^{※2}
L ₃	1926.1~ 2022.3 (1926.1~ 2012.12)	4.0 (4.0)	7.0/7.3 (7.0/7.3)	0.94 (0.90)	0.46 (0.45)
M		5.0 (5.0)	7.1 (7.1)	0.70 (0.62)	0.19 (0.17)
N		5.0 (5.0)	6.9 (6.9)	1.02 (1.10)	0.37 (0.32)

()内は、既許可の評価結果を示す

※1 対象期間に領域で発生した地震群のMと地震の数との関係(G-R則)を示す。Mが大きな地震の数が増加するとb値が小さくなる。

※2 領域における1年あたりの地震(M5)の数を示す。地震活動が活発になると年発生頻度が大きくなる。

(例) 領域Nは、気象庁カタログ更新後、Mが大きな地震の数が増加していることから、b値は小さくなり、年発生頻度は大きくなる。このため、年超過確率は大きくなる傾向にある。



【補足⑧】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

- 気象庁カタログ更新後の垣見ほか（2003）²⁵⁾による領域震源の諸元及びハザード曲線を示す。
 - 気象庁カタログ更新後、領域10C7及び領域11X0は年発生頻度がやや増加。
 - 領域震源全体のハザード曲線は既許可と同等であり、領域震源モデルへの影響はない。

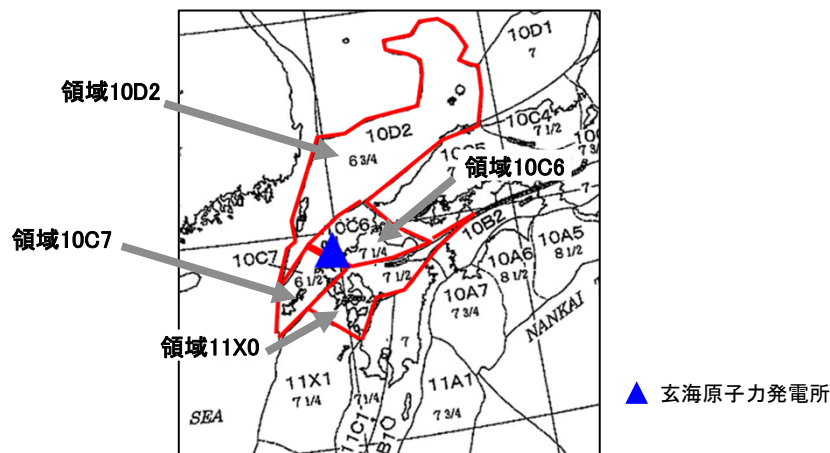


図5 垣見ほか（2003）²⁵⁾の地震地体構造区分（西日本を拡大）

表2 垣見ほか（2003）²⁵⁾による領域震源の諸元の比較

領域	期間	最小M	最大M	b値※1	年発生頻度※2
10C6		4.0 (4.0)	7.0/7.3 (7.0/7.3)	0.91 (0.87)	0.36 (0.39)
10C7	1926.1~ 2022.3	4.0 (4.0)	6.8 (6.8)	0.70 (0.61)	0.07 (0.06)
10D2	(1926.1~ 2012.12)	4.0 (4.0)	7.1 (7.1)	0.93 (0.90)	0.33 (0.34)
11X0		5.0 (5.0)	6.9 (6.9)	1.05 (1.13)	0.39 (0.34)

()内は、既許可の評価結果を示す

※1 対象期間に領域で発生した地震群のMと地震の数との関係(G-R則)を示す。

Mが大きな地震の数が増加するとb値が小さくなる。

※2 領域における1年あたりの地震(M5)の数を示す。地震活動が活発になると年発生頻度が大きくなる。

(例) 領域11X0は、気象庁カタログ更新後、Mが大きな地震の数が増加していることから、b値は小さくなり、年発生頻度は大きくなる。このため、年超過確率は大きくなる傾向にある。

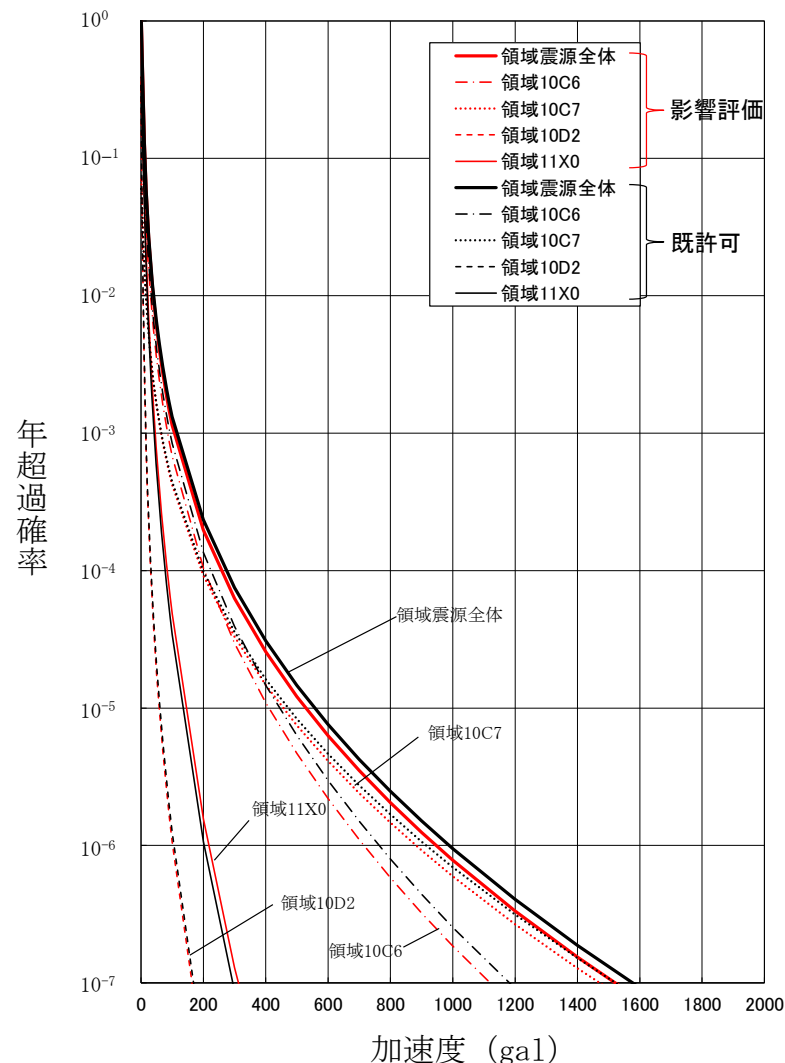


図6 領域ごとのハザード曲線の比較
(垣見ほか(2003)²⁵⁾)

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ 2つの地下構造モデルの位置づけ

- 既許可の地下構造モデルと標準応答スペクトル用モデルは、以下の通り、検討の目的に応じてそれぞれ設定。
 - 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価への適用を目的に、解放基盤表面から地震基盤以深まで設定し、断層モデルを用いた手法のうち理論的手法による長周期帯の評価に用いている。（参考①）
 - 標準応答スペクトル用モデルは、短周期帯も含む地震動評価への適用を目的に、解放基盤表面から地震基盤相当面（ $V_s=3100\text{m/s}$ の層上面）を含む層まで設定し、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる。

長周期帯の理論的手法による
地震動評価に用いる地下構造モデル
(既許可の地下構造モデル)

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル
(標準応答スペクトル用モデル)

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
解放基盤表面										
-15m	0.0	2.35	1350	3000	100	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m						-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.035	2.35	1570	3440	100	-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	100	-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	100	-0.135	2.35	1770	3650	16.7
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300	-1.789	2.60	3100	5500	300
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300					
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500					
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500					

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ 既許可における「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」

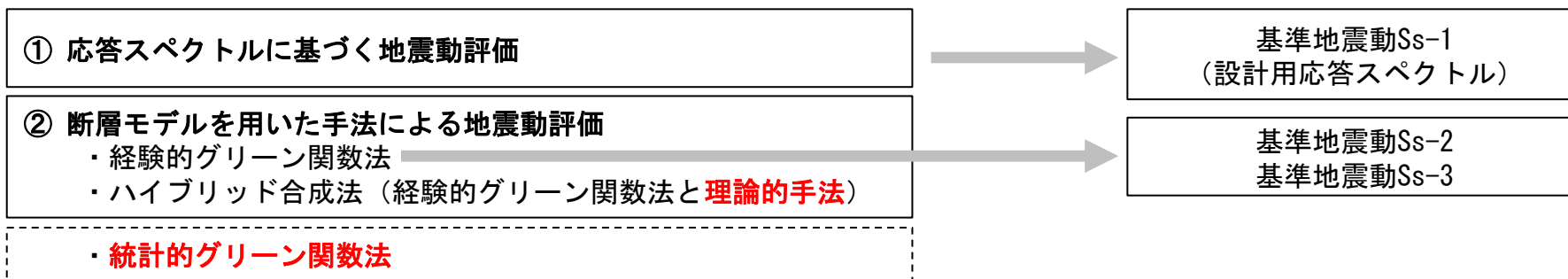
① 応答スペクトルに基づく地震動評価

- Noda et al. (2002)²⁾の手法により、解放基盤表面 ($V_s=1350\text{m/s}$) における地震動を評価。
- 「応答スペクトルに基づく地震動評価」においては、地下構造モデルを使用していない。

② 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- 敷地地盤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り解放基盤表面における地震動を評価。
- 長周期帯は理論的手法により解放基盤表面の地震動評価を実施し、短周期帯の経験的グリーン関数法による地震動評価結果を周期1.33秒で接続したハイブリッド合成法による評価を実施。
- 長周期帯における理論的手法への適用を目的に設定した解放基盤表面以深の地下構造モデルを使用。

- 検討用地震の「応答スペクトルに基づく手法」による地震動評価結果を包絡して、基準地震動Ss-1を策定。(191頁)
- 「断層モデルを用いた手法」による地震動評価による基準地震動は、経験的グリーン関数法による応答スペクトルが、ハイブリッド合成法による応答スペクトルを上回るため、経験的グリーン関数法による評価で代表。
- 「城山南断層による地震」及び「竹木場断層による地震」の「断層モデルを用いた手法」における経験的グリーン関数法による地震動評価結果を基準地震動Ss-2、基準地震動Ss-3として策定。(192頁)
- 基準地震動Ss-1～Ss-3は、地下構造モデルを使用していない。



※経験的グリーン関数法の妥当性確認として統計的グリーン関数法の評価を実施

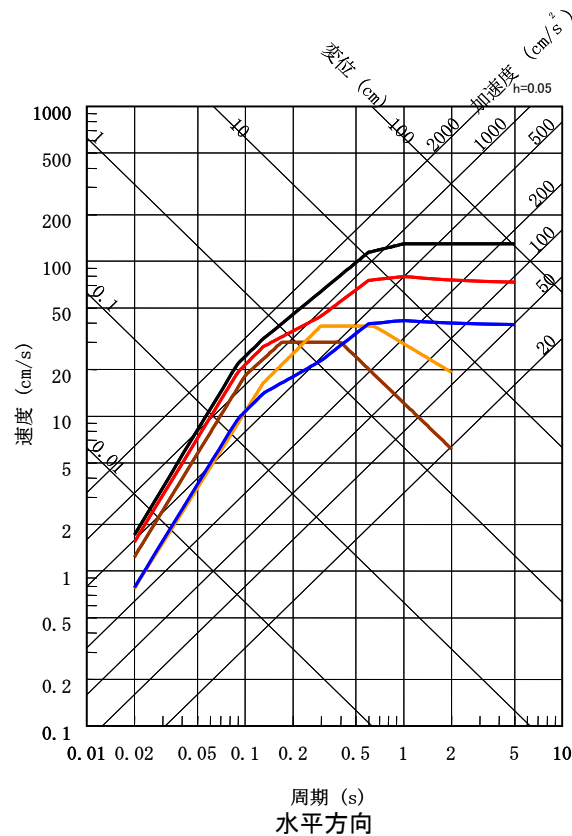
※**朱書き部**は既許可の地下構造モデルを使用

応答スペクトルに基づく基準地震動Ssの策定

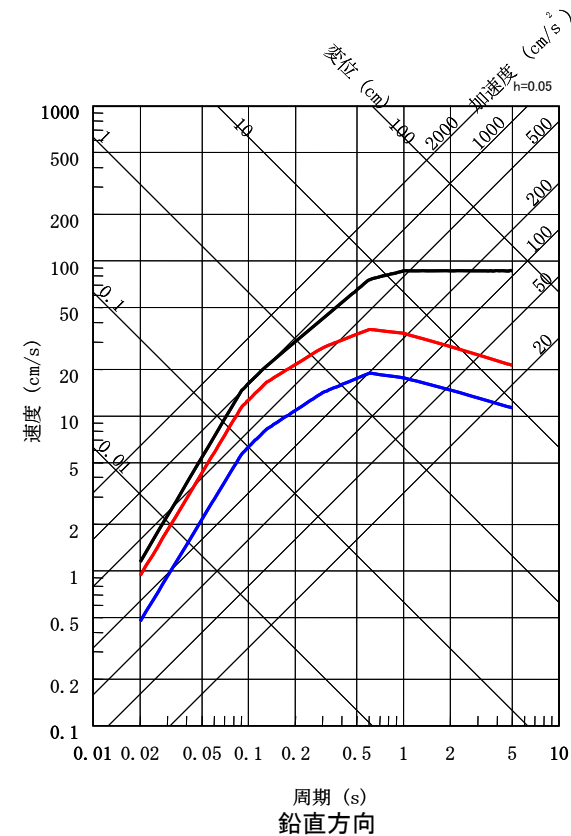
■ 水平方向の基準地震動 $Ss-1_H$ は、検討用地震の応答スペクトルによる評価結果、及び旧耐震指針に基づく基準地震動 S_2 を包絡して設定。

■ 鉛直方向 $Ss-1_V$ は、水平方向の $2/3$ として設定。

- 基準地震動 $Ss-1_H$
- 基準地震動 $S_2(S_N)$
- 基準地震動 $S_2(S_2)$
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）竹木場断層による地震
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）城山南断層による地震



- 基準地震動 $Ss-1_V$
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）竹木場断層による地震
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）城山南断層による地震

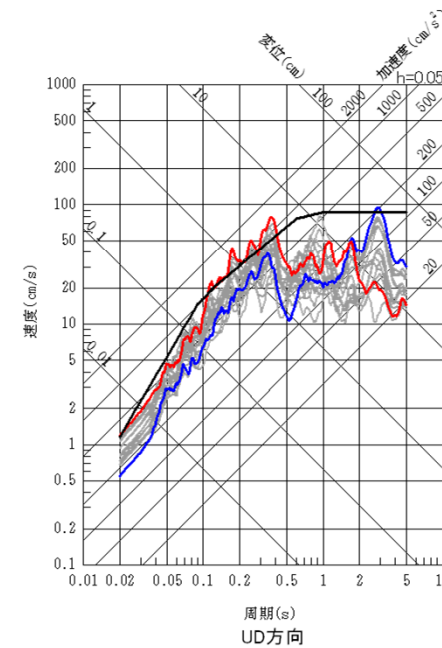
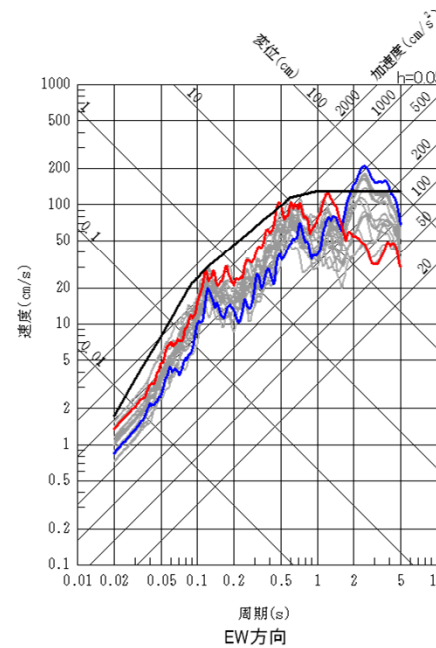
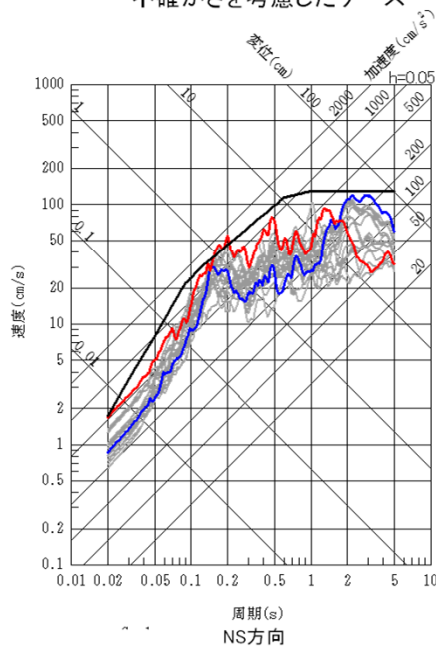
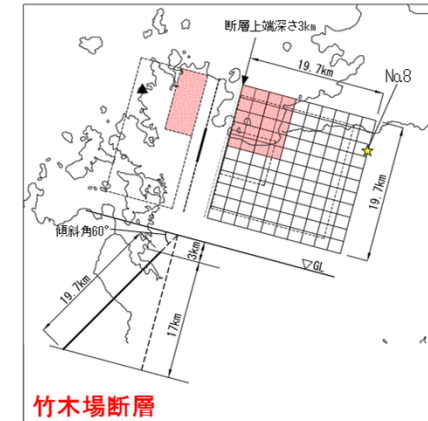
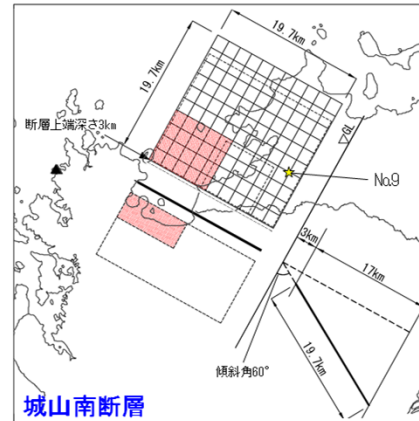


断層モデルを用いた手法に基づいた基準地震動Ssの策定

■「城山南断層による地震」の評価結果のうち、基準地震動Ss-1を一部の周期で上回るものとして、不確かさを考慮したケース(No.9)を、基準地震動Ss-2と設定。 ⇒下図中**青線**

■「竹木場断層による地震」の評価結果のうち、基準地震動Ss-1を一部の周期で上回るものとして、不確かさを考慮したケース(No.8)を、基準地震動Ss-3と設定。 ⇒下図中**赤線**

- Ss-1
- Ss-2
- Ss-3
- 不確かさを考慮したケース



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ 既許可における「震源を特定せず策定する地震動」

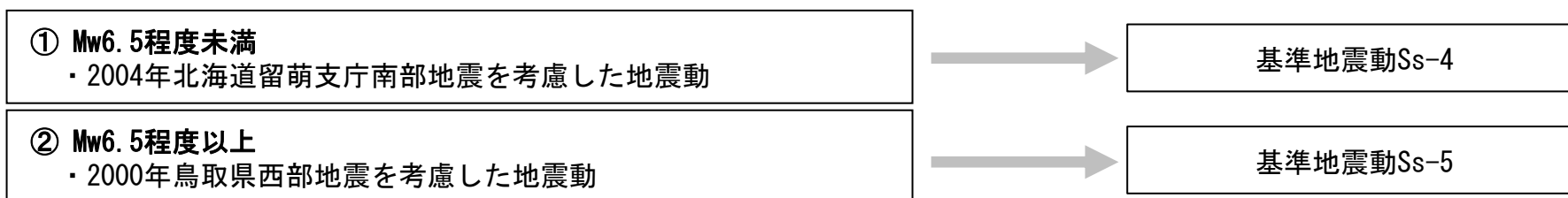
① Mw6.5程度未満

- 2004年北海道留萌支庁南部地震の震源近傍のK-NET港町観測点の解放基盤波に当社独自の検討から余裕を持たせた地震動を設定した地震動を基準地震動Ss-4として策定。（194頁）
- K-NET港町観測点の解放基盤波（ $V_s=938\text{m/s}$ におけるはぎとり波）を、玄海原子力発電所の解放基盤表面（ $V_s=1350\text{m/s}$ ）の地震動として採用。

② Mw6.5程度以上

- 2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム（監査廊）の観測記録を基準地震動Ss-5として策定。（194頁）
- 賀祥ダム（監査廊）の観測記録（ $V_s=1200\text{m/s}\sim 1300\text{m/s}$ 程度）を、玄海原子力発電所の解放基盤表面（ $V_s=1350\text{m/s}$ ）の地震動として採用。
- 「震源を特定せず策定する地震動」においては、地下構造モデルを使用していない。

- ▼
- 基準地震動Ss-4、Ss-5は、地下構造モデルを使用していない。

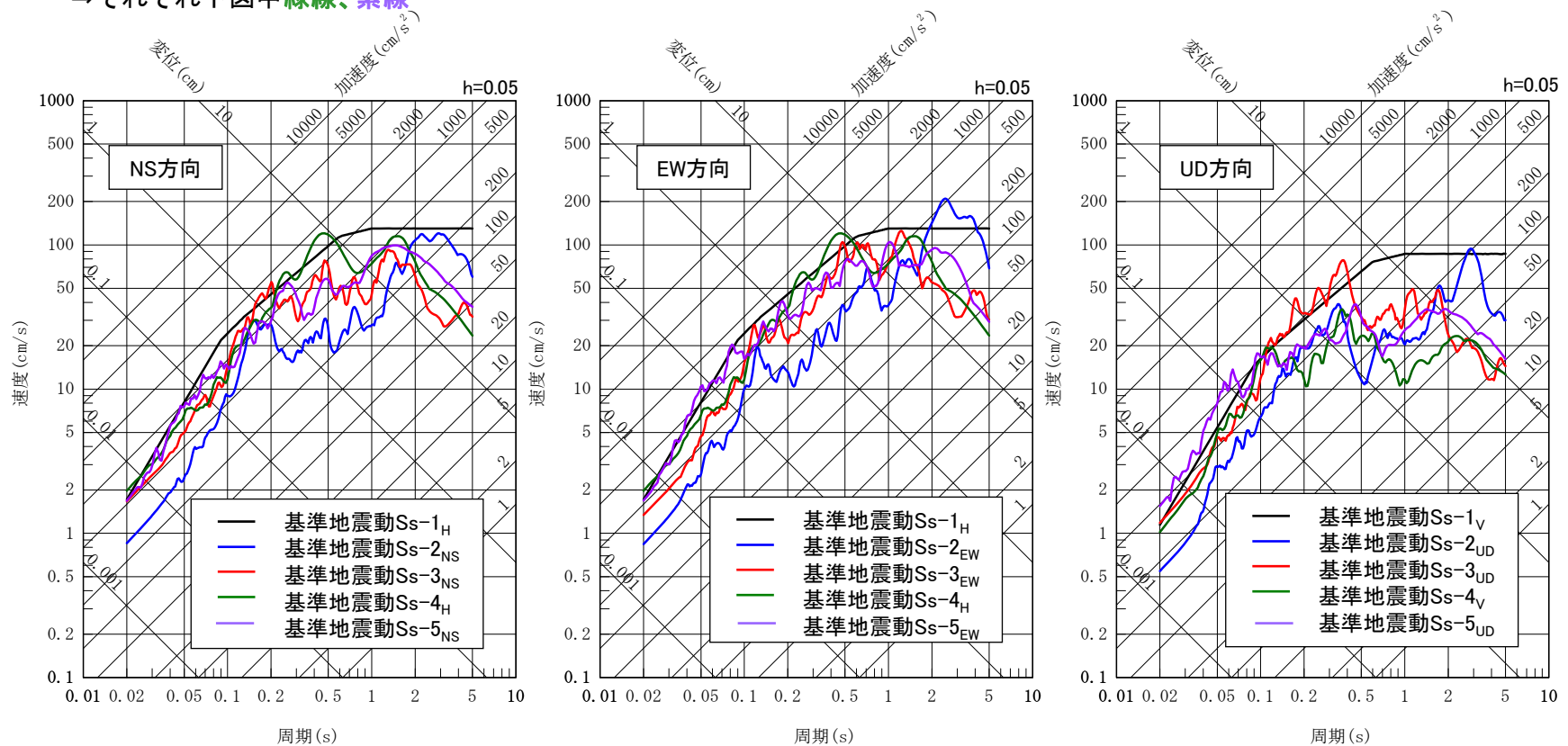


※既許可の地下構造モデルを使用していない

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

第402回審査会合資料より抜粋

- 新規規制基準を踏まえ、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」として、以下のとおり、基準地震動 S_s-1 ～ S_s-3 を策定。
 - ・ 基準地震動 S_s-1 は、検討用地震の応答スペクトルによる評価結果、及び旧耐震指針に基づく基準地震動 S_2 を包絡して設定。
 なお、鉛直方向の基準地震動 S_s-1_v は、水平方向の基準地震動 S_s-1_H の2/3として設定。 ⇒下図中**黒線**
 - ・ 「城山南断層による地震」及び「竹木場断層による地震」の評価結果のうち、基準地震動 S_s-1 を一部の周期で上回るものとして、断層傾斜角の不確かさを考慮したケースを、それぞれ基準地震動 S_s-2 、基準地震動 S_s-3 と設定。 ⇒下図中**青線、赤線**
- 上記の基準地震動 S_s-1 ～ S_s-3 に加え、「震源を特定せず策定する地震動」として、2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動を S_s-4 、2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム基礎上の観測記録を基準地震動 S_s-5 として考慮。
 ⇒それぞれ下図中**緑線、紫線**



基準地震動の応答スペクトル

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ 既許可の地震動評価への影響確認

- 既許可の基準地震動において、既許可の地下構造モデルを直接使用していない。
- 「断層モデルを用いた手法」による地震動評価のうち、ハイブリッド合成法（「経験的グリーン関数法＋理論的手法」）における理論的手法、及び経験的グリーン関数法の妥当性確認における統計的グリーン関数法では、地下構造モデルを使用していることから、標準応答スペクトル用モデルが既許可の地震動評価に与える影響について、以下の通り確認した。なお、標準応答スペクトル用モデルによる影響確認には、標準応答スペクトル用モデルの地震基盤相当面以深に、既許可の地下構造モデルの層を追加したモデル（標準応答スペクトル用モデルを反映したモデル）を用いる。

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ① 「経験的グリーン関数法＋理論的手法」の地震動評価への影響確認結果

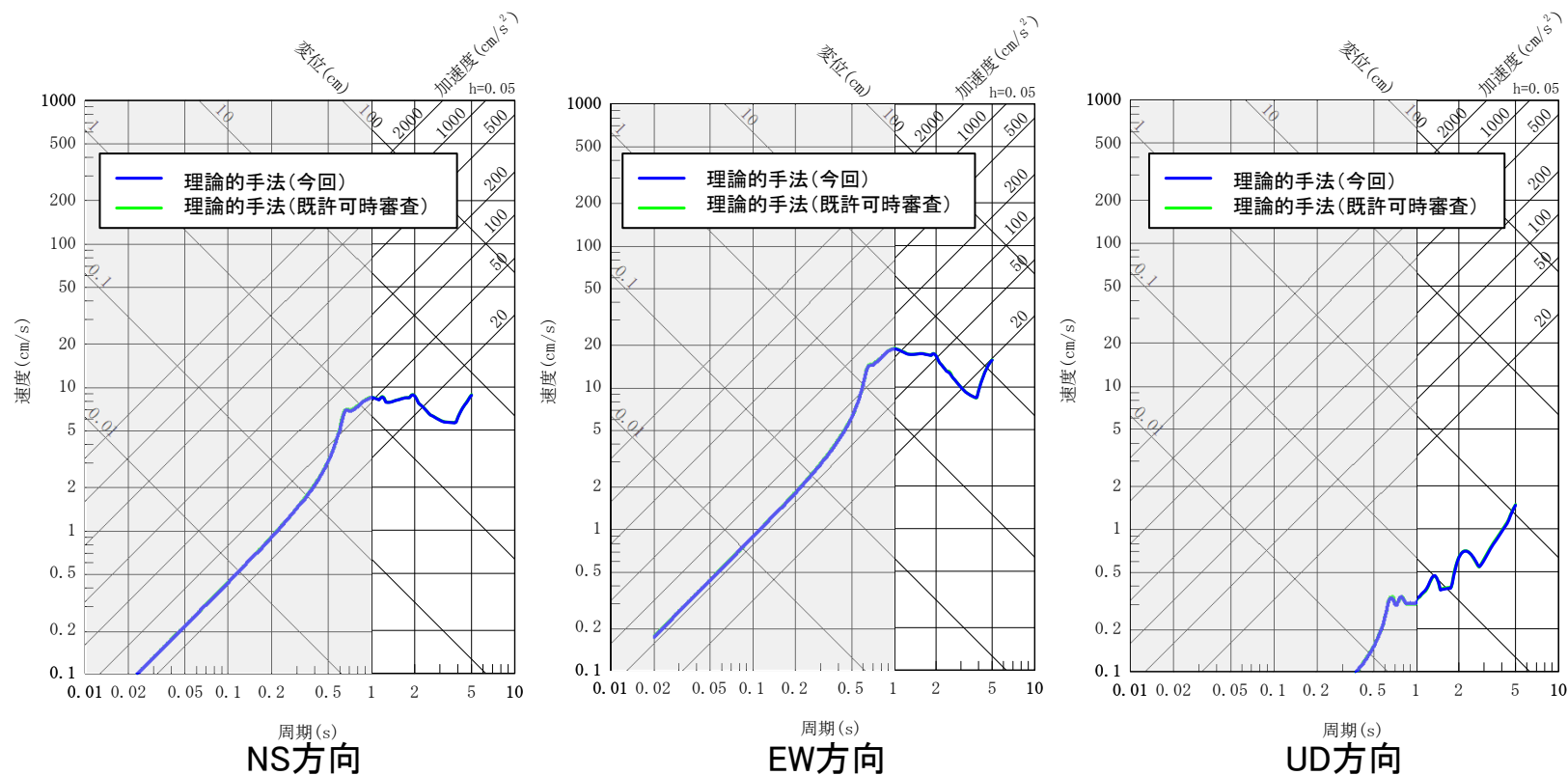
- 「経験的グリーン関数法＋理論的手法」の地震動評価への影響がないことを下記の通り確認。
 - 既許可において、長周期帯では短周期帯に比べ、地盤減衰（Q値）が地震動評価結果に与える影響が少ないことから、既許可の地下構造モデルの地盤減衰（Q値）は、慣用値（ $V_s/15 \sim V_s/10$ ）等を基に設定。
 - 既許可において、基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 は、長周期帯において、経験的グリーン関数法による地震動評価結果がハイブリッド合成法における理論的手法による地震動評価結果を上回る（205～206頁）ため、経験的グリーン関数法により策定。
 - 基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 として策定した「城山南断層による地震」及び「竹木場断層による地震」の「断層傾斜角の不確かさを考慮したケース」を代表ケースとして、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルを用いた理論的手法の長周期帯の評価結果と既許可審査時の理論的手法の長周期帯の評価結果を比較した結果、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルを用いた評価結果が、既許可時評価結果を上回らないことを確認した。（197～198頁）
 - また、上記代表ケースについて、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルの理論的手法の長周期帯の評価結果と経験的グリーン関数法によるハイブリッド合成法の評価結果と既許可審査時のハイブリッド合成法による評価結果を比較した結果、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルを用いた評価結果が、既許可時評価結果を上回らないことを確認した。（199頁）
 - 標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルのハイブリッド合成法の評価結果と既許可審査時の経験的グリーン関数法による評価結果を比較した結果、経験的グリーン関数法による地震動評価結果が標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルのハイブリッド合成法の評価結果を上回ることを確認した。（200～203頁）
 - 以上より、既許可時のハイブリッド合成法による評価結果と経験的グリーン関数法による評価結果の関係性に変化はないと判断し、既許可時と同様に「断層モデルを用いた手法」による基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 は経験的グリーン関数法の評価結果を採用する。

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ 理論的手法による地震動評価

- 標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルは、既許可モデルに比べて地盤減衰が大きいいため、標準応答スペクトル用モデルを用いた理論的手法の長周期帯の評価結果（青線）は、既許可時の理論的手法の長周期帯の評価結果（緑線）以下となることを確認。（図上では両者が重なっているように見えるが、数値により確認）

◆ 「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース（Ss-3の代表ケース）

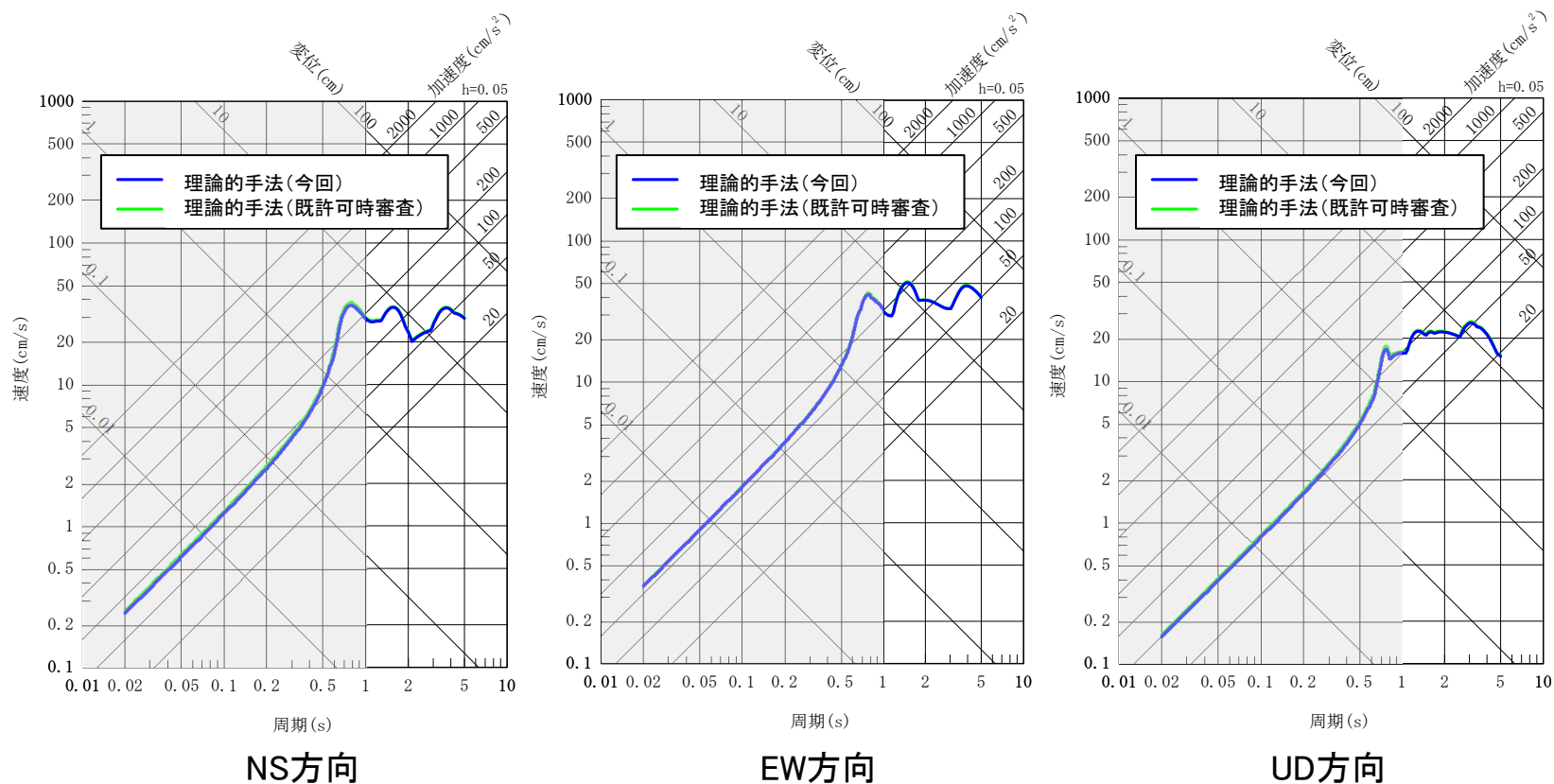


【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ 理論的手法による地震動評価

- 標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルは、既許可モデルに比べて地盤減衰が大きいいため、標準応答スペクトル用モデルを用いた理論的手法の長周期帯の評価結果（青線）は、既許可時の理論的手法の長周期帯の評価結果（緑線）以下となることを確認。（図上では両者が重なっているように見えるが、数値により確認）

◆ 「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース（Ss-2の代表ケース）



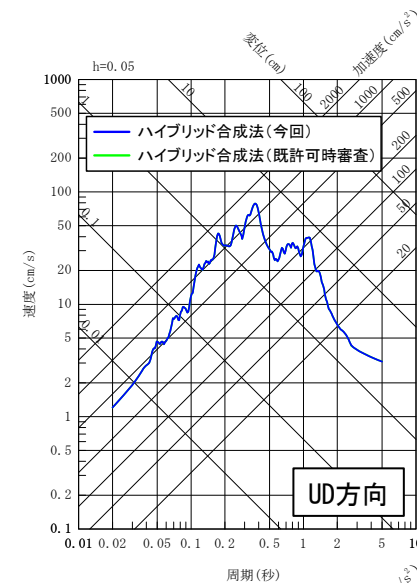
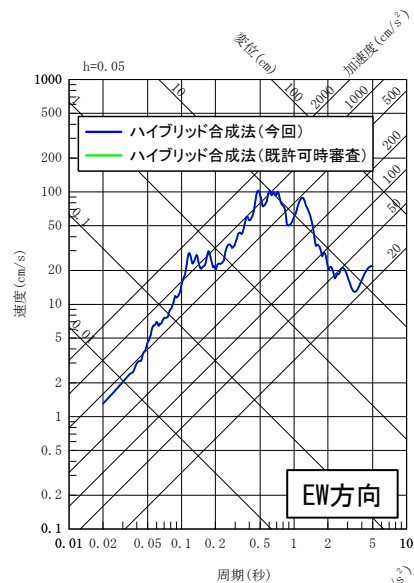
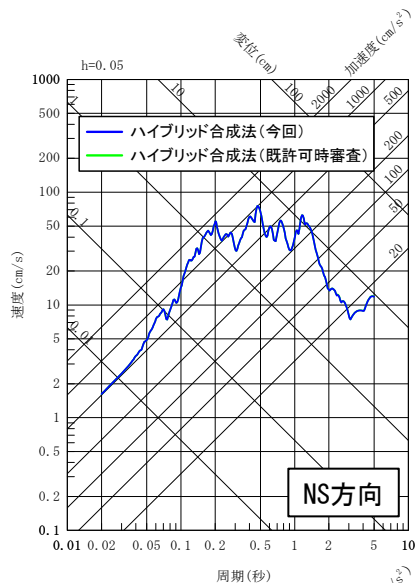
【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ハイブリッド合成法による地震動評価（代表ケース）

- 標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルは、既許可モデルに比べて地盤減衰が大きいいため、197～198頁の理論的手法による評価結果と同様に、標準応答スペクトル用モデルを用いたハイブリッド合成法による評価結果（青線）は、既許可時のハイブリッド合成法による評価結果（緑線）以下となることを確認。（図上では両者が重なっているように見えるが、数値により確認）。

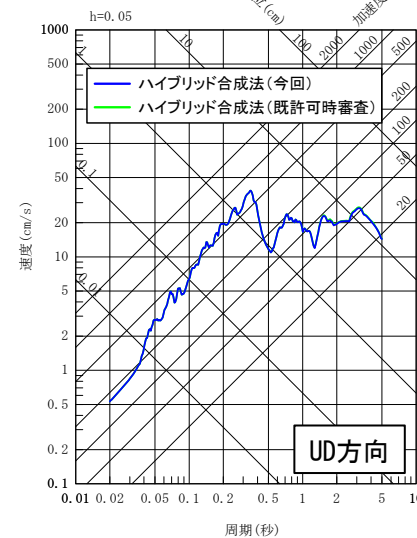
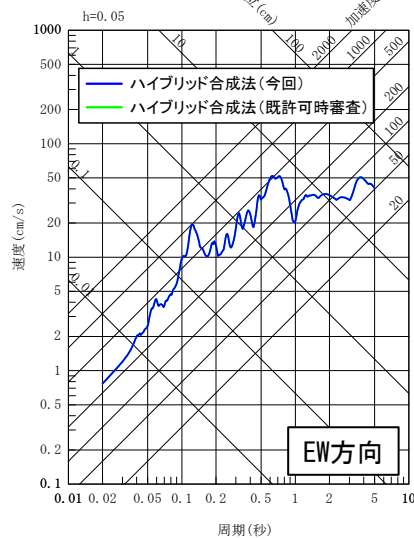
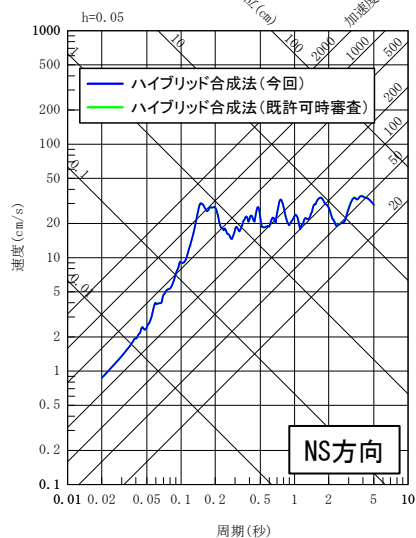
◆ 「竹木場断層による地震」

断層傾斜角の不確かさを
考慮したケース
(Ss-3の代表ケース)



◆ 「城山南断層による地震」

断層傾斜角の不確かさを
考慮したケース
(Ss-2の代表ケース)



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

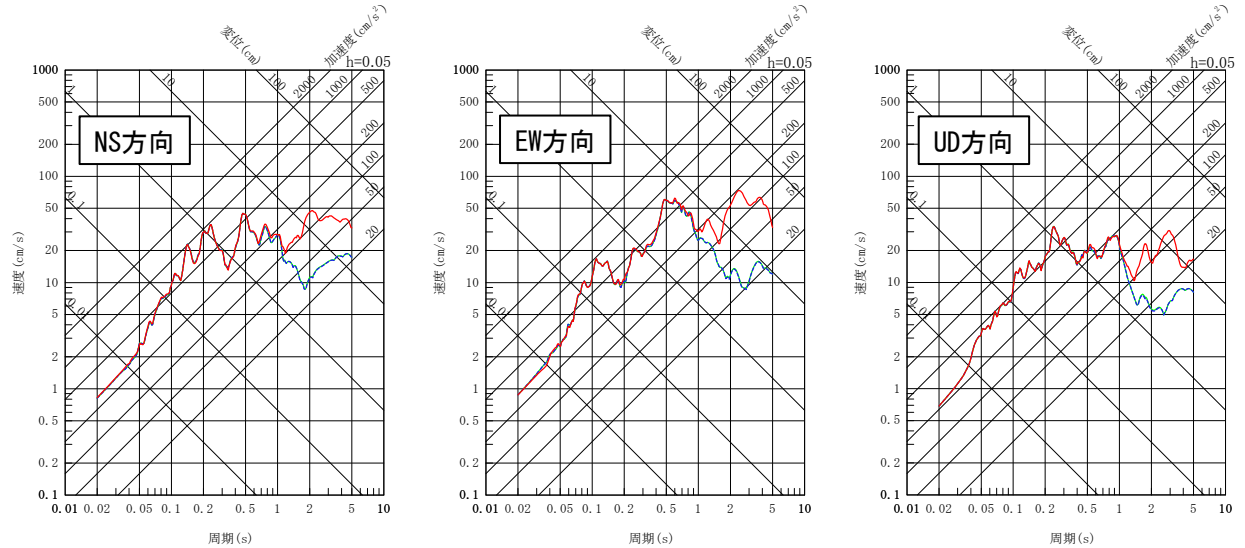
■ ハイブリッド合成法及び経験的グリーン関数法による地震動評価

- 199頁の代表ケースと同様に、既許可時の経験的グリーン関数法による評価結果が標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルのハイブリッド合成法による評価結果を上回ることから、両者の関係性に変化はないことを確認。

◆ 「竹木場断層による地震」

基本ケース

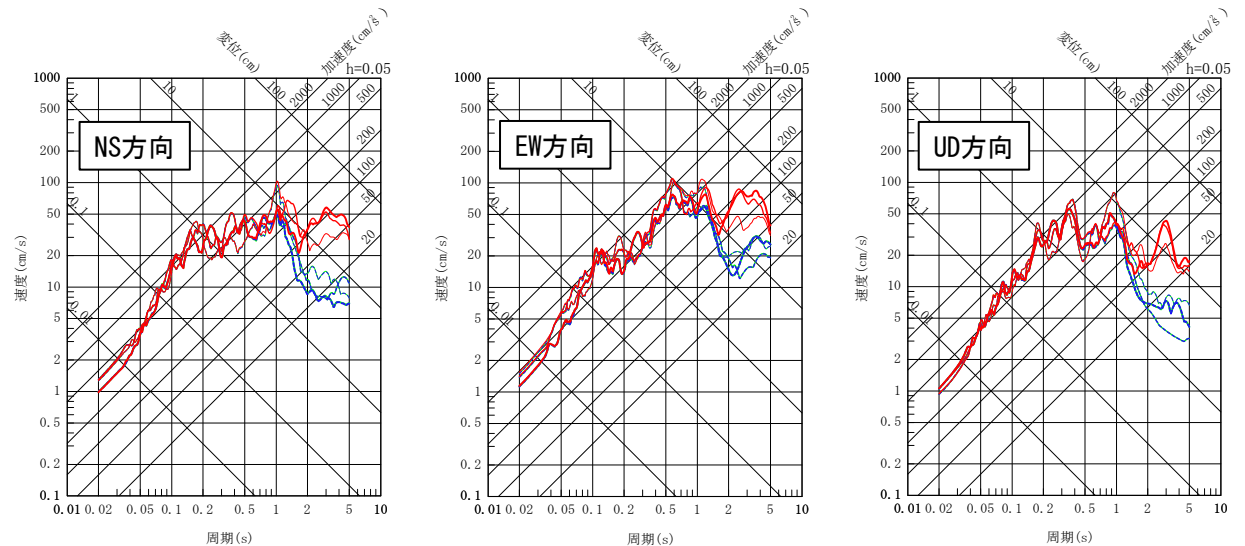
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 0
- ハイブリッド合成法 No. 0
- 経験的グリーン関数法 No. 0



◆ 「竹木場断層による地震」

応力降下量の不確かさを考慮したケース

- ハイブリッド合成法(既許可) No. 4
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 5
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 6
- ハイブリッド合成法 No. 4
- ハイブリッド合成法 No. 5
- ハイブリッド合成法 No. 6
- 経験的グリーン関数法 No. 4
- 経験的グリーン関数法 No. 5
- 経験的グリーン関数法 No. 6



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ハイブリッド合成法及び経験的グリーン関数法による地震動評価

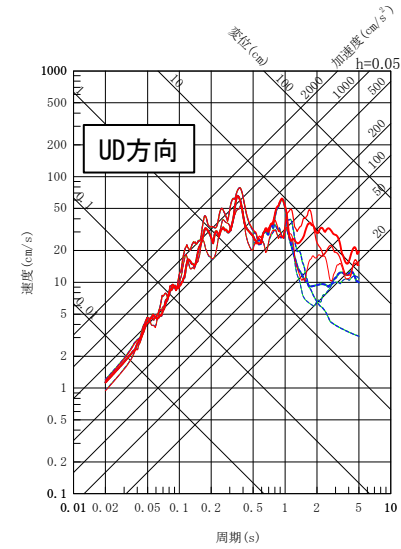
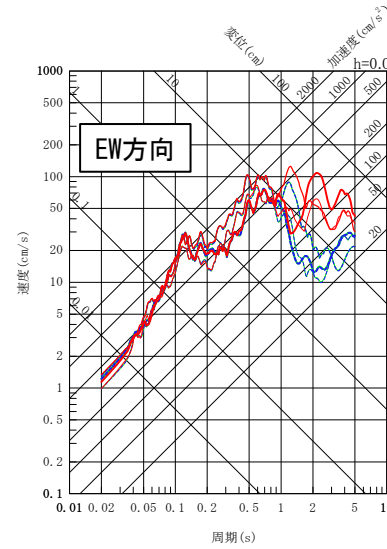
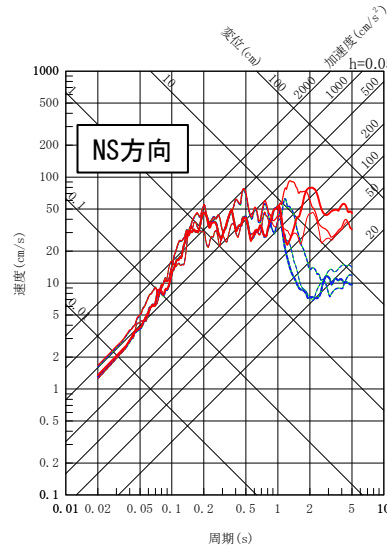
- 199頁の代表ケースと同様に、既許可時の経験的グリーン関数法による評価結果が標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルのハイブリッド合成法による評価結果を上回ることから、両者の関係性に変化はないことを確認。

◆ 「竹木場断層による地震」

断層傾斜角の不確かさを

考慮したケース

- ハイブリッド合成法(既許可) No. 7
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 8
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 9
- - - ハイブリッド合成法 No. 7
- - - ハイブリッド合成法 No. 8
- - - ハイブリッド合成法 No. 9
- 経験的グリーン関数法 No. 7
- 経験的グリーン関数法 No. 8
- 経験的グリーン関数法 No. 9

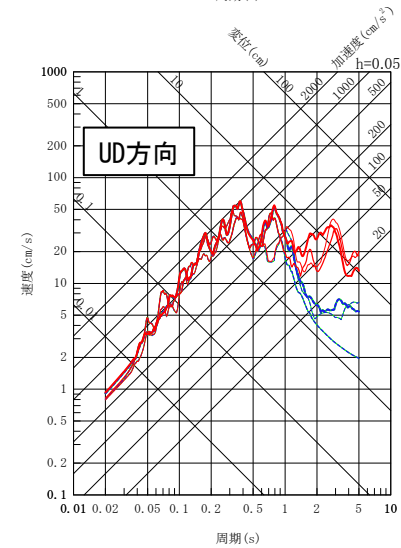
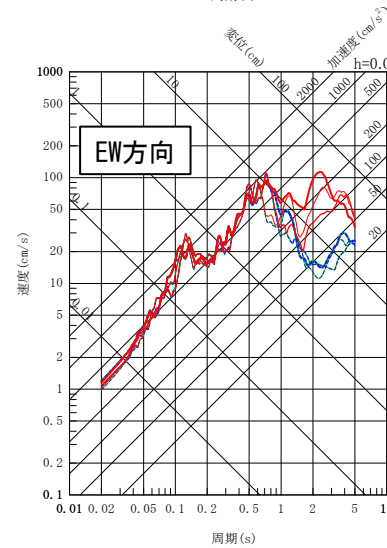
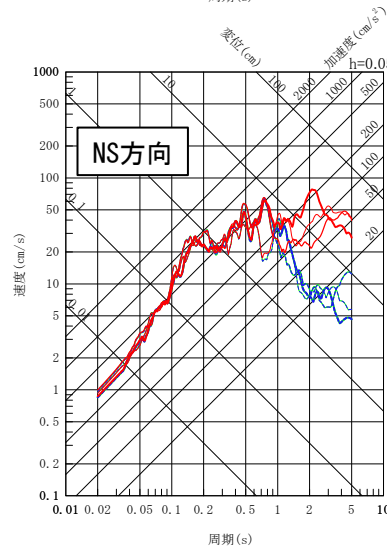


◆ 「竹木場断層による地震」

断層の長さ及び震源断層の拡がりの

不確かさを考慮したケース

- ハイブリッド合成法(既許可) No. 10
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 11
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 12
- - - ハイブリッド合成法 No. 10
- - - ハイブリッド合成法 No. 11
- - - ハイブリッド合成法 No. 12
- 経験的グリーン関数法 No. 10
- 経験的グリーン関数法 No. 11
- 経験的グリーン関数法 No. 12



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

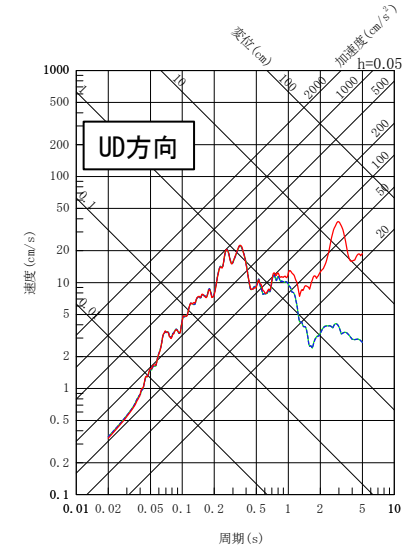
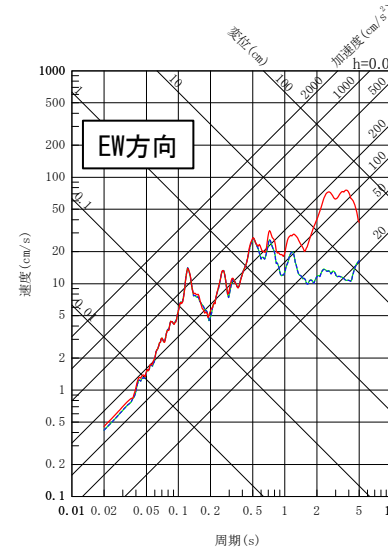
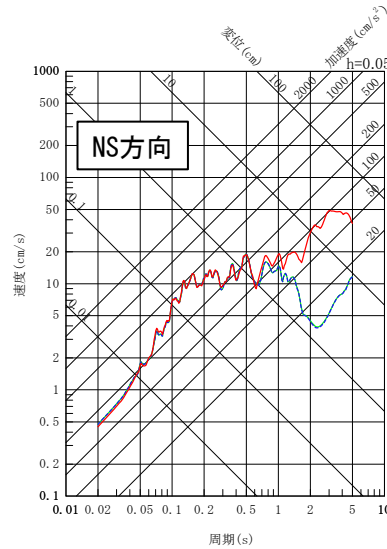
■ ハイブリッド合成法及び経験的グリーン関数法による地震動評価

- 199頁の代表ケースと同様に、既許可時の経験的グリーン関数法による評価結果が標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルのハイブリッド合成法による評価結果を上回ることから、両者の関係性に変化はないことを確認。

◆ 「城山南断層による地震」

基本ケース

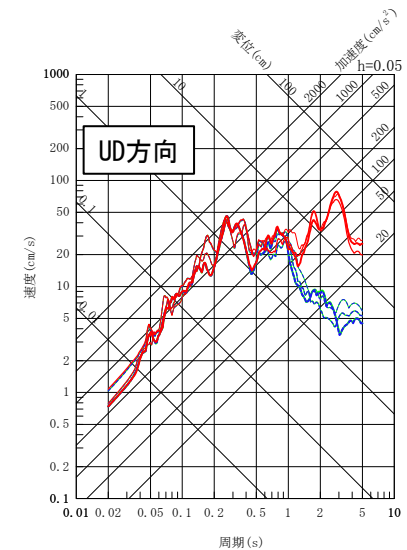
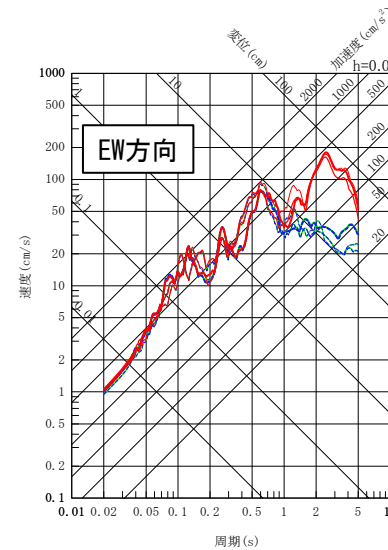
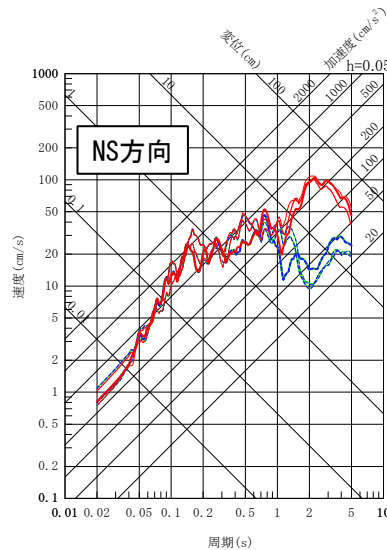
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 0
- ハイブリッド合成法 No. 0
- 経験的グリーン関数法 No. 0



◆ 「城山南断層による地震」

応力降下量の不確かさを考慮したケース

- ハイブリッド合成法(既許可) No. 4
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 5
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 6
- ハイブリッド合成法 No. 4
- ハイブリッド合成法 No. 5
- ハイブリッド合成法 No. 6
- 経験的グリーン関数法 No. 4
- 経験的グリーン関数法 No. 5
- 経験的グリーン関数法 No. 6



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ハイブリッド合成法及び経験的グリーン関数法による地震動評価

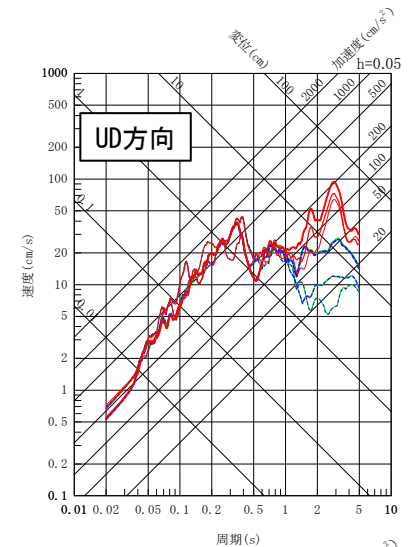
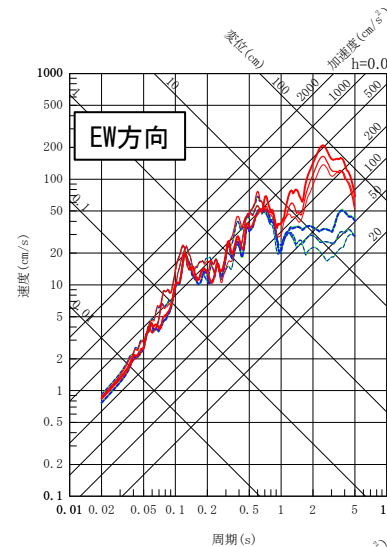
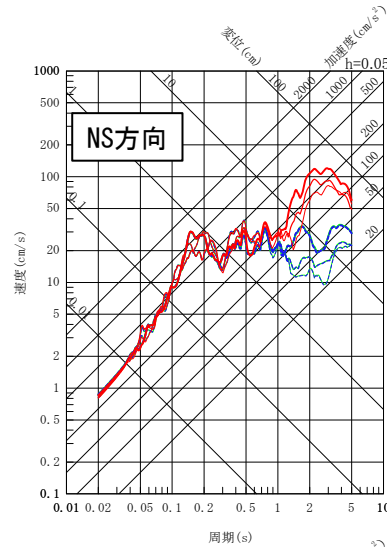
- 199頁の代表ケースと同様に、既許可時の経験的グリーン関数法による評価結果が標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルのハイブリッド合成法による評価結果を上回ることから、両者の関係性に変化はないことを確認。

◆ 「城山南断層による地震」

断層傾斜角の不確かさを

考慮したケース

- ハイブリッド合成法(既許可) No. 7
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 8
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 9
- - - ハイブリッド合成法 No. 7
- - - ハイブリッド合成法 No. 8
- - - ハイブリッド合成法 No. 9
- 経験的グリーン関数法 No. 7
- 経験的グリーン関数法 No. 8
- 経験的グリーン関数法 No. 9

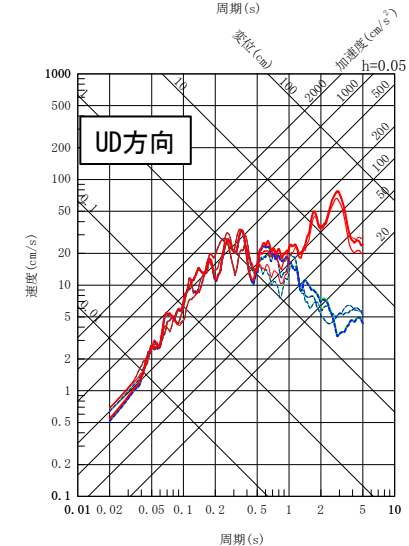
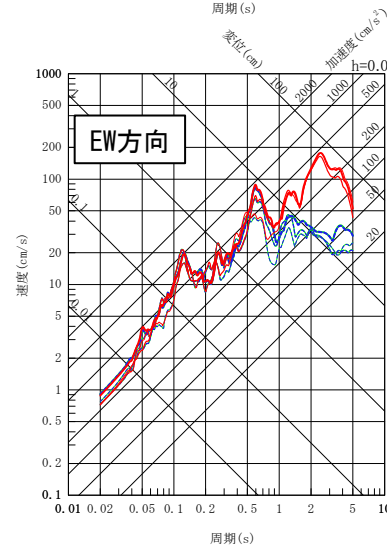
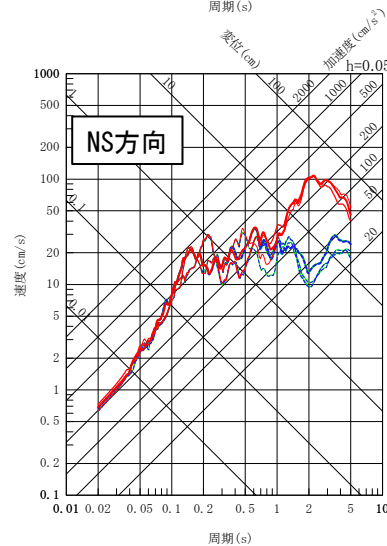


◆ 「城山南断層による地震」

断層の長さ及び震源断層の拡がりの

不確かさを考慮したケース

- ハイブリッド合成法(既許可) No. 10
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 11
- ハイブリッド合成法(既許可) No. 12
- - - ハイブリッド合成法 No. 10
- - - ハイブリッド合成法 No. 11
- - - ハイブリッド合成法 No. 12
- 経験的グリーン関数法 No. 10
- 経験的グリーン関数法 No. 11
- 経験的グリーン関数法 No. 12

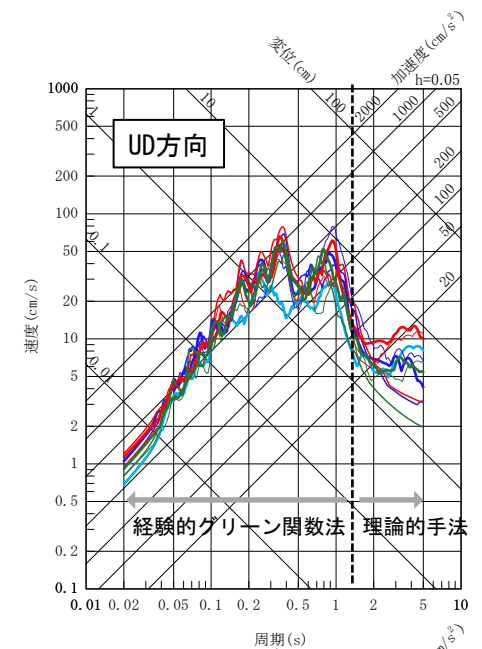
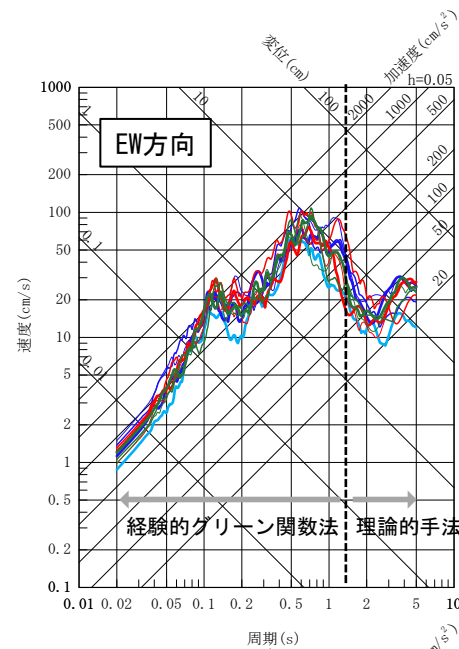
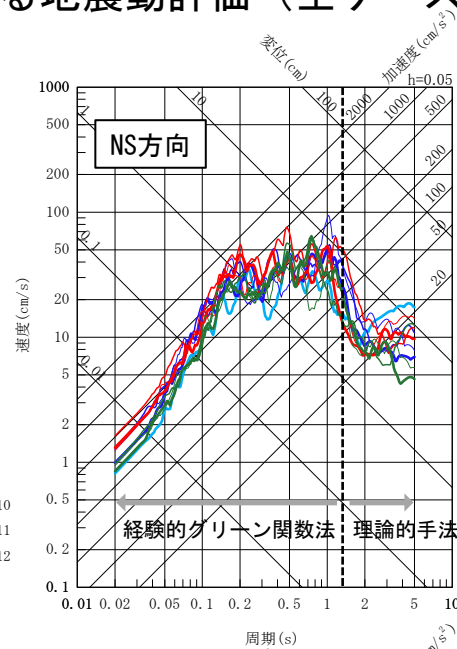


【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ハイブリッド合成法による地震動評価（全ケース）

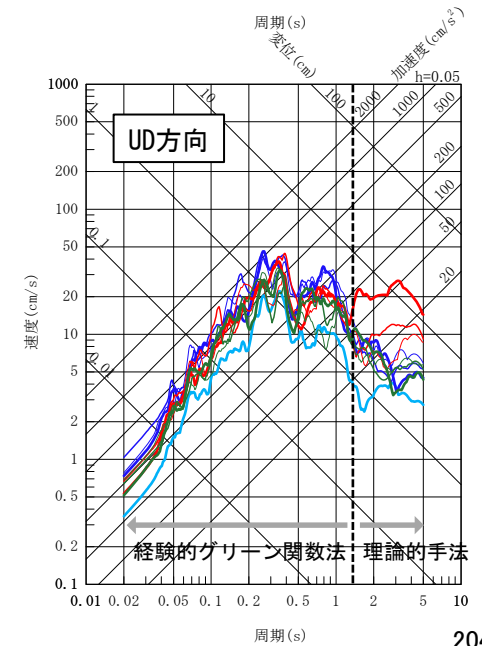
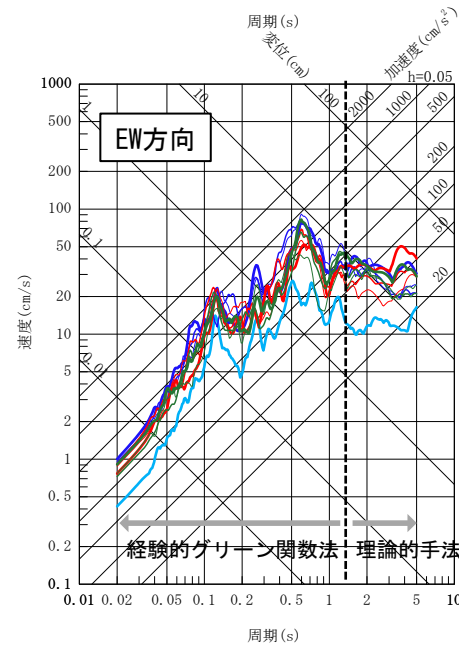
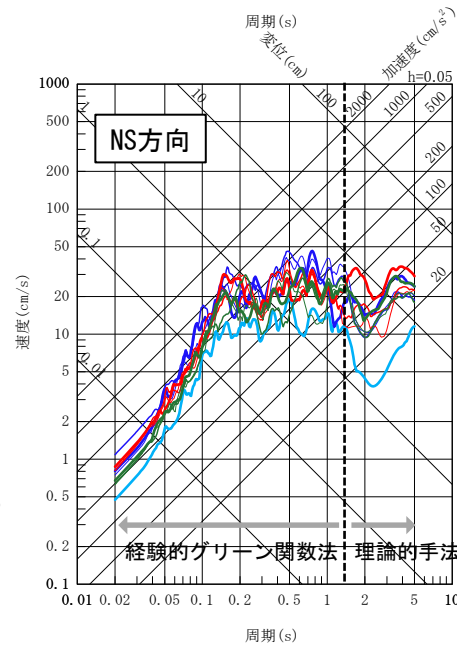
「竹木場断層による地震」 ハイブリッド合成法

- 基本ケース No.0
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.4
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.5
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.6
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.7
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.8
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.9
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.10
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.11
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.12



「城山南断層による地震」 ハイブリッド合成法

- 基本ケース No.0
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.4
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.5
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.6
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.7
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.8
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.9
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.10
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.11
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.12



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

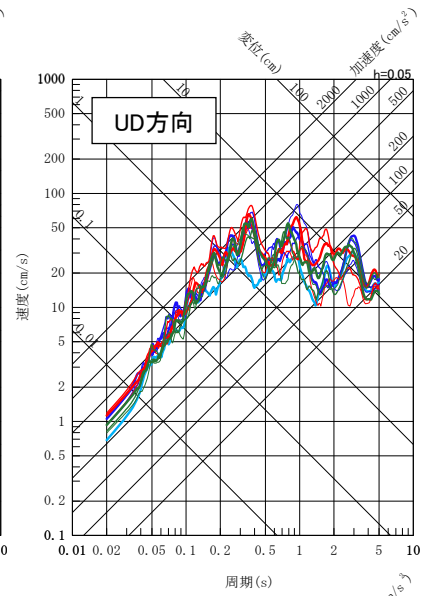
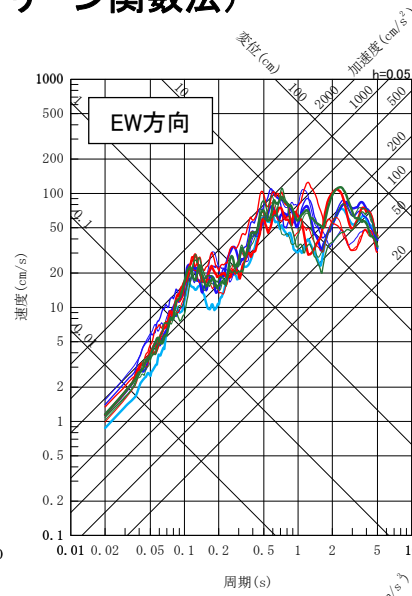
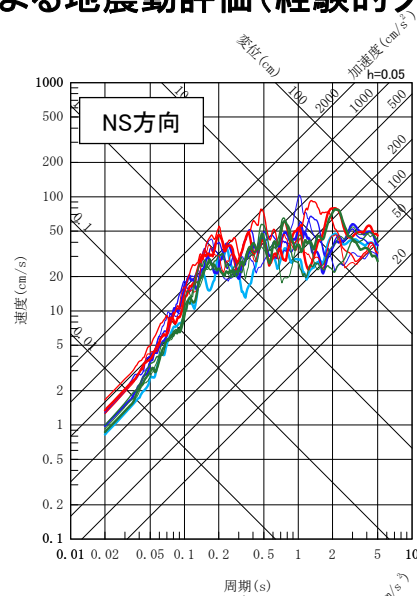
■ 既許可時審査における経験的グリーン関数法による地震動評価

第402回審査会合資料より抜粋

断層モデルを用いた手法による地震動評価(経験的グリーン関数法)

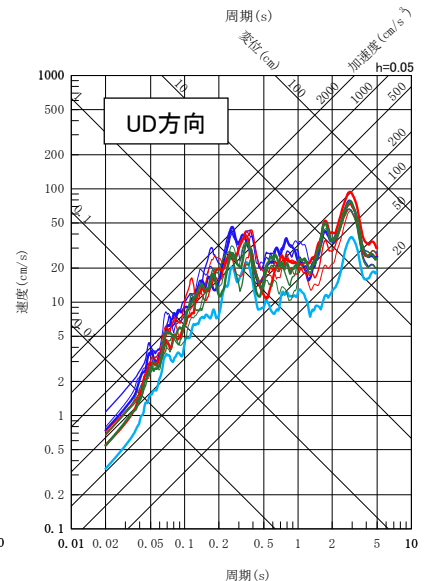
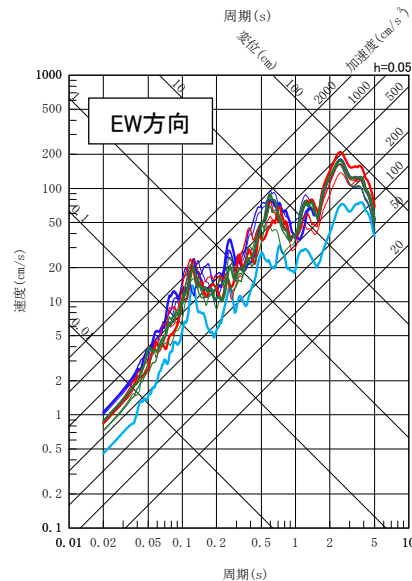
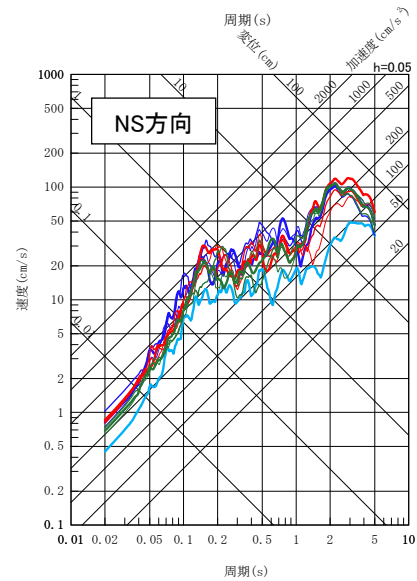
「竹木場断層による地震」 経験的グリーン関数法

- 基本的なケース No.0
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.4
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.5
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.6
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.7
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.8
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.9
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.10
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.11
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.12



「城山南断層による地震」 経験的グリーン関数法

- 基本的なケース No.0
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.4
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.5
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.6
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.7
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.8
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.9
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.10
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.11
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.12



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

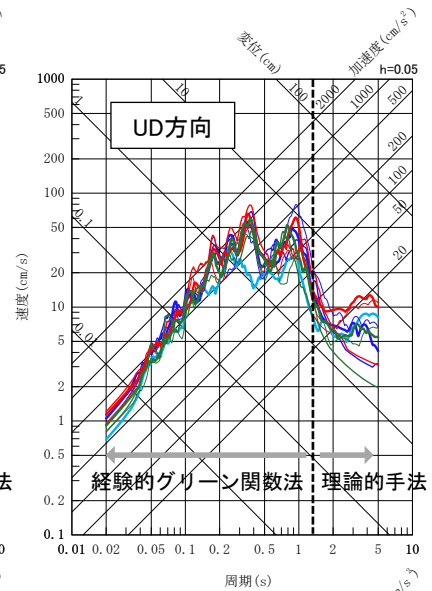
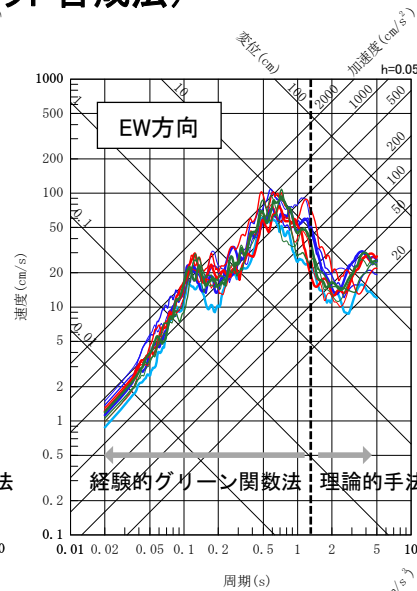
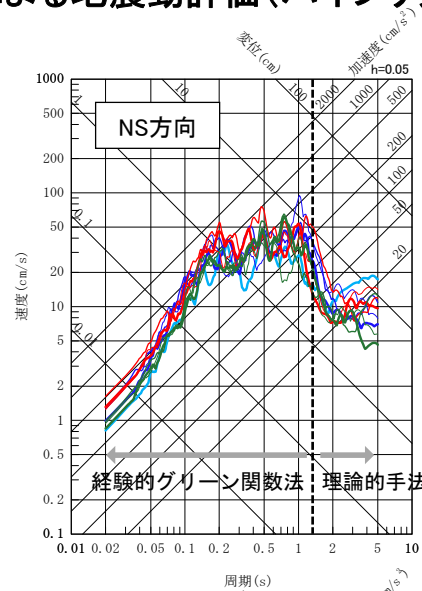
■ 既許可時審査におけるハイブリッド合成法による地震動評価

第402回審査会合資料より抜粋（一部修正）

断層モデルを用いた手法による地震動評価(ハイブリッド合成法)

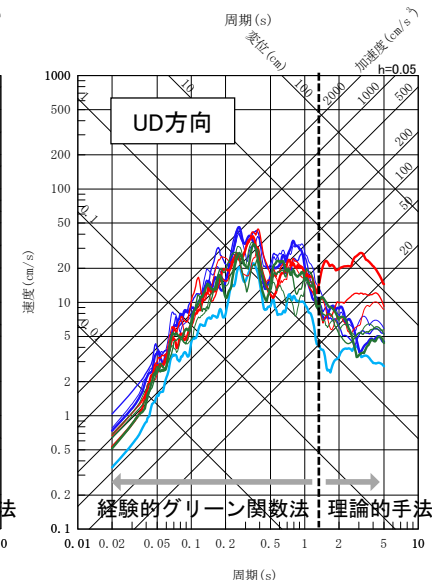
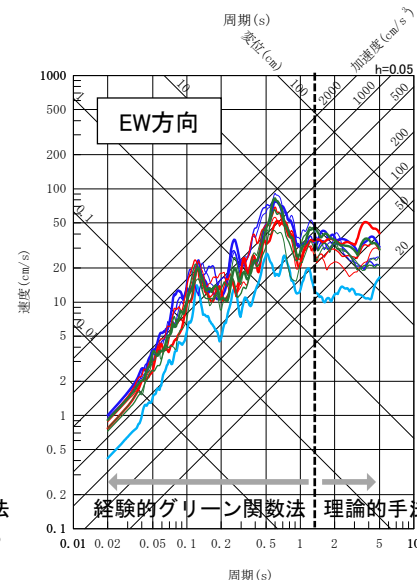
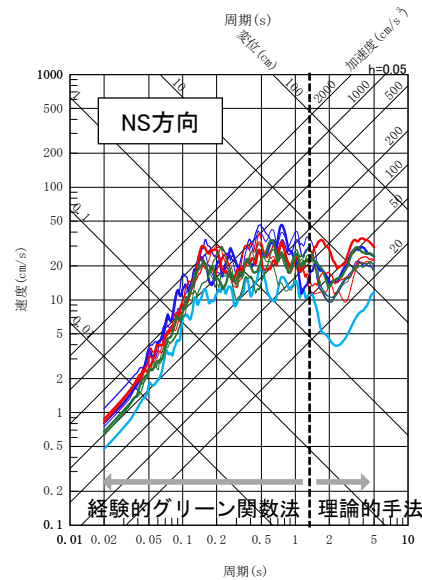
「竹木場断層による地震」 ハイブリッド合成法

- 基本的なケース No.0
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.4
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.5
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.6
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.7
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.8
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.9
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.10
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.11
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.12



「城山南断層による地震」 ハイブリッド合成法

- 基本的なケース No.0
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.4
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.5
- 不確かさを考慮したケース(応力降下量) No.6
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.7
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.8
- 不確かさを考慮したケース(断層傾斜角) No.9
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.10
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.11
- 不確かさを考慮したケース(断層長さ及び震源断層の拡がり) No.12



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ②経験的グリーン関数法の地震動評価への影響確認結果

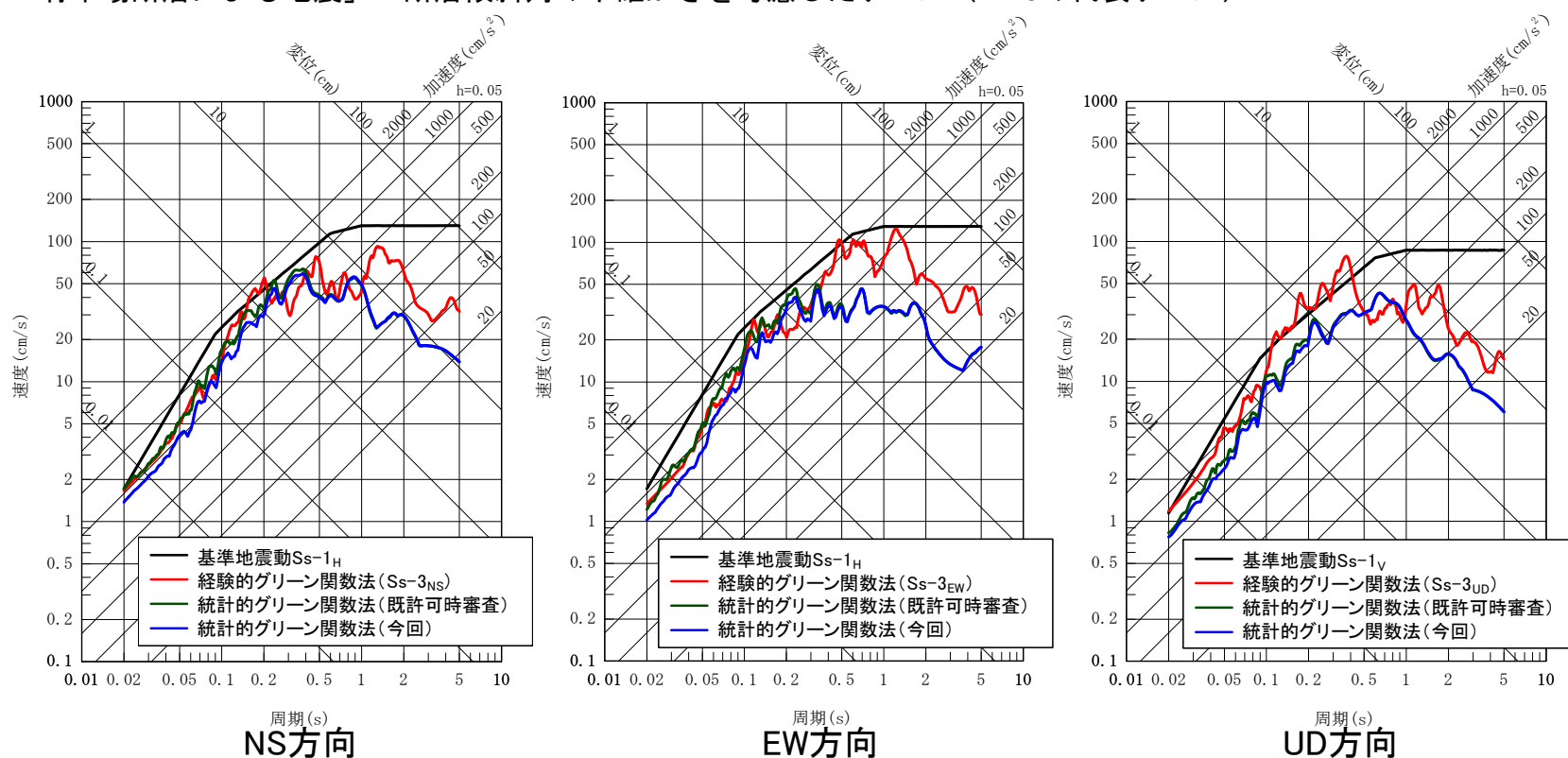
- 経験的グリーン関数法の地震動評価への影響がないことを下記の通り確認。
 - 既許可時審査において、基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 として策定した「城山南断層による地震」及び「竹木場断層による地震」の「断層傾斜角の不確かさを考慮したケース」を代表ケースとして、経験的グリーン関数法の評価結果と統計的グリーン関数法の評価結果との比較により、経験的グリーン関数法の評価結果の妥当性を確認。
(210～211頁)
 - 既許可時審査と同様に、上記代表ケースにおいて、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルを用いた統計的グリーン関数法による評価結果と既許可時の統計的グリーン関数法による評価結果を比較した結果、標準応答スペクトル用モデルを反映したモデルの統計的グリーン関数法の評価結果（青線）は、短周期側で既許可時の統計的グリーン関数法の評価結果（緑線）を下回ることを確認した。（208～209頁）
 - 経験的グリーン関数法（赤線）と統計的グリーン関数法（緑線、青線）の関係性に変化はない。
 - » 長周期側では、既許可時審査と同様に、経験的グリーン関数法の評価結果（赤線）は、統計的グリーン関数法の評価結果（青線）を上回る。
 - » 短周期側では、既許可時審査と同様に、経験的グリーン関数法の評価結果（赤線）は、統計的グリーン関数法の評価結果（青線）と概ね同等である。
 - 以上より、経験的グリーン関数法の評価結果の妥当性は変わらないため（208～209頁）、既許可時と同様に「断層モデルを用いた手法」による基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 は経験的グリーン関数法の評価結果を採用する。

【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ② 経験的グリーン関数法の地震動評価への影響確認結果

- 経験的グリーン関数法（赤線）と統計的グリーン関数法（緑線、青線）の関係性に変化はない。
 - » 長周期側では、既許可時審査と同様に、経験的グリーン関数法の評価結果（赤線）は、統計的グリーン関数法の評価結果（青線）を上回る。
 - » 短周期側では、既許可時審査と同様に、経験的グリーン関数法の評価結果（赤線）は、統計的グリーン関数法の評価結果（青線）と概ね同等である。

◆ 「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース（Ss-3の代表ケース）

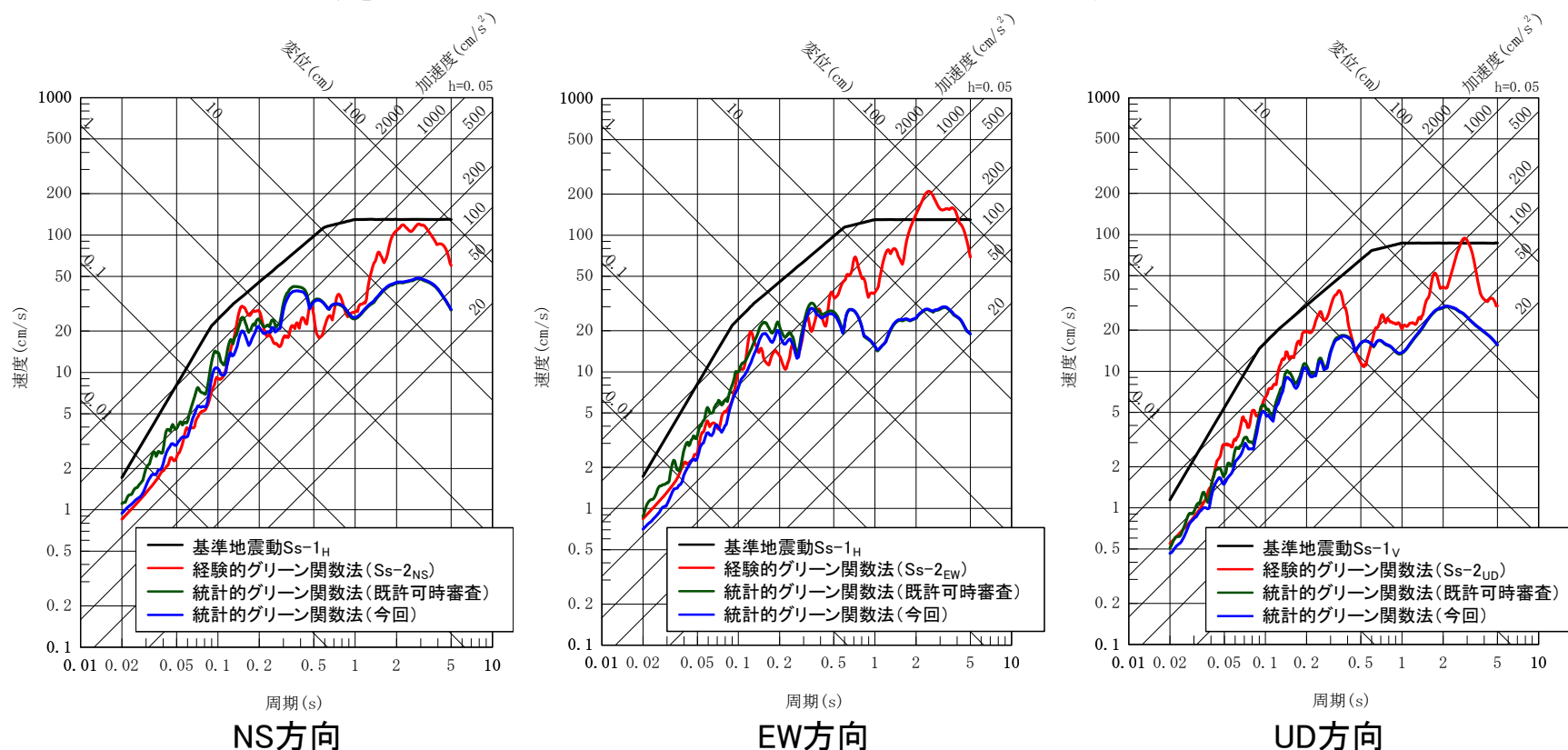


【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

■ ② 経験的グリーン関数法の地震動評価への影響確認結果

- 経験的グリーン関数法（赤線）と統計的グリーン関数法（緑線、青線）の関係性に変化はない。
 - » 長周期側では、既許可時審査と同様に、経験的グリーン関数法の評価結果（赤線）は、統計的グリーン関数法の評価結果（青線）を上回る。
 - » 短周期側では、既許可時審査と同様に、経験的グリーン関数法の評価結果（赤線）は、統計的グリーン関数法の評価結果（青線）と概ね同等である。

◆ 「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース（Ss-2の代表ケース）



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

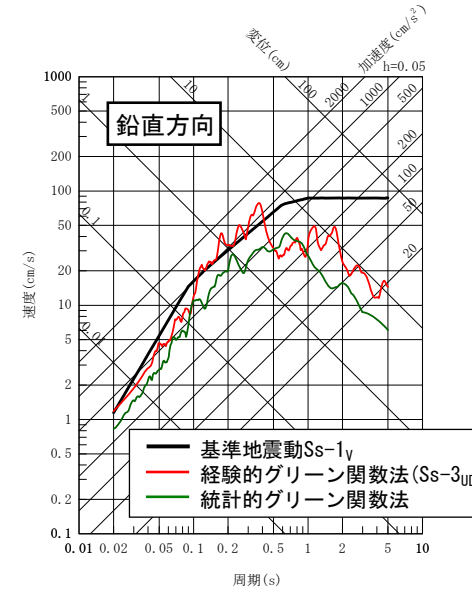
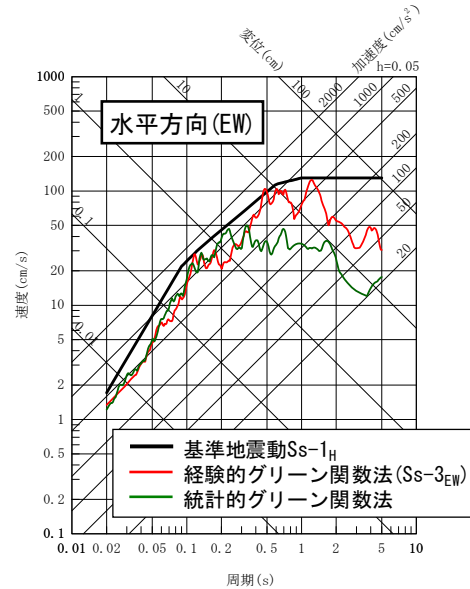
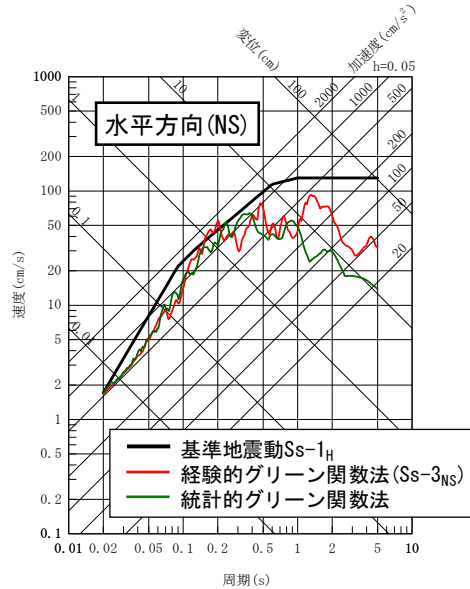
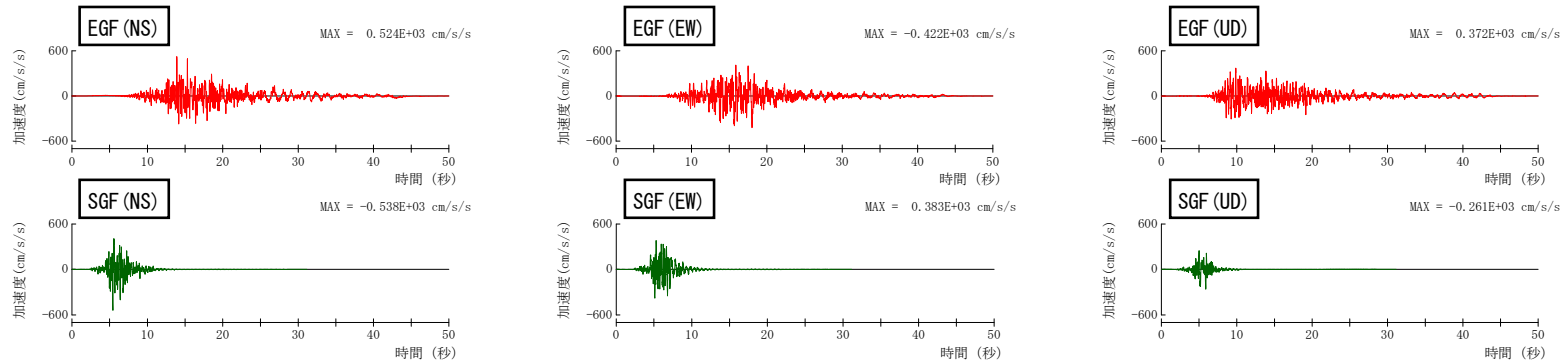
■ 既許可時審査における経験的グリーン関数法の妥当性確認

第402回審査会合資料より抜粋

統計的グリーン関数法による地震動評価

- 統計的グリーン関数法による地震動評価で用いる要素地震については、Boore(1983)⁴⁶⁾による理論スペクトルと佐藤(2004)⁴⁷⁾による経時特性を用いて、地震基盤における地震波を作成。
- 地震基盤における地震波を一次元波動論により、解放基盤波を作成。
- 上記の要素地震を用い、Dan et al.(1989)³⁰⁾により波形合成を行った。

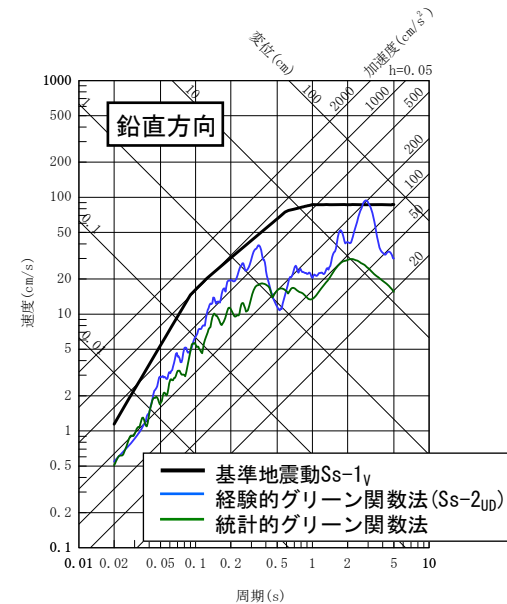
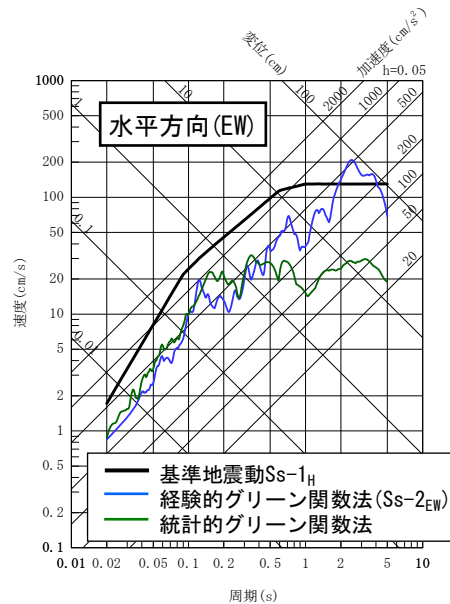
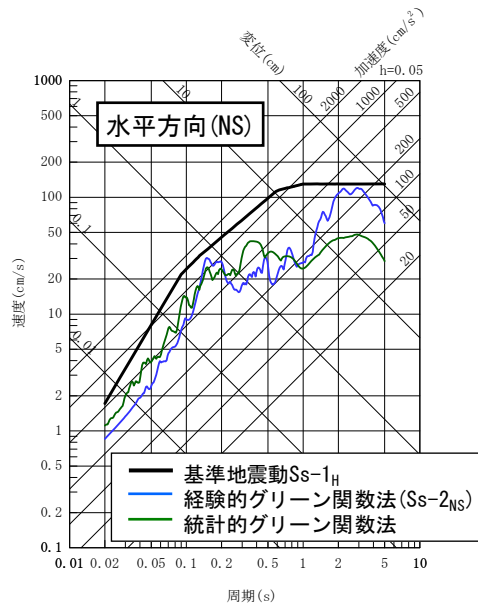
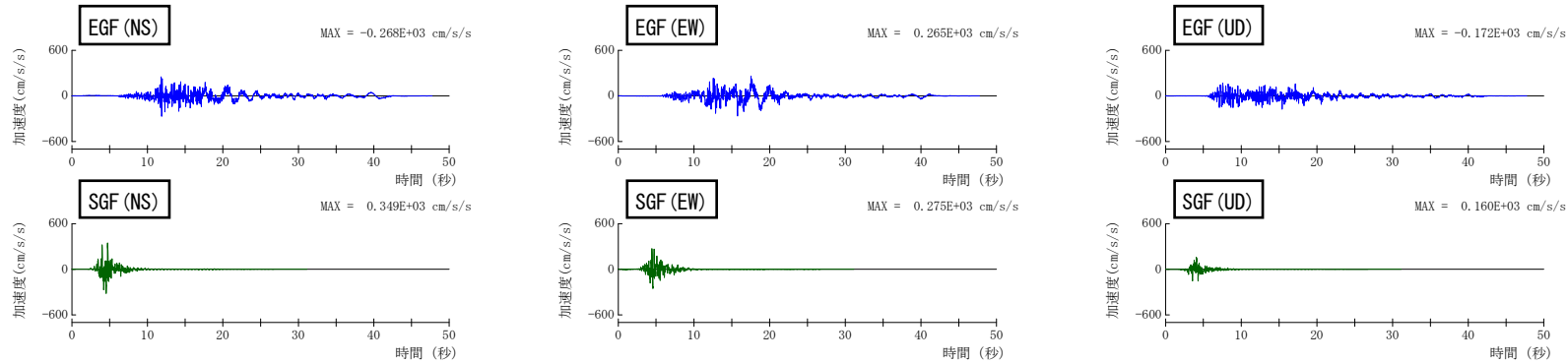
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認

第402回審査会合資料より抜粋

「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



- P137に示した観測記録のフーリエ振幅スペクトルと理論スペクトルの傾向と同様、経験的グリーン関数法による評価結果は、低振動数側（長周期側）において、統計的グリーン関数法による評価結果を上回る。
- なお、統計的グリーン関数法による評価結果は、基準地震動Ss-1に包絡される結果となった。

【参考①】 既許可の地下構造モデル

【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデル

- 既許可では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、長周期帯の理論的手法による地震動評価への適用を目的に、解放基盤以深の地下構造モデルを設定。（214～218頁）
- 既許可では、設定にあたって、鉛直アレイ及び微動アレイ観測による確認を実施。（219～222頁）

既許可における長周期帯の理論的手法に用いる一次元地下構造モデル

EL. 解放基盤表面	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q 値
-15m	0.0	2.35	1350	3000	100	岩石試験結果 を基に設定	試掘坑内弾性波試験 結果を基に設定	慣用値 (Vs/15～ Vs/10) を基に設定
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	100	上層の 岩石試験結果 を基に設定	PS検層結果 を基に設定	
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	100			
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	100	地震調査委員会(2007) ³⁾ を基に設定	慣用値 (Vs/15～ Vs/10) 及び 地震調査委 員会(2007、 2003) ^{3)、18)} を基に 設定※	
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200			
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300			
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003) ¹⁸⁾ を基に設定		
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500			
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500			

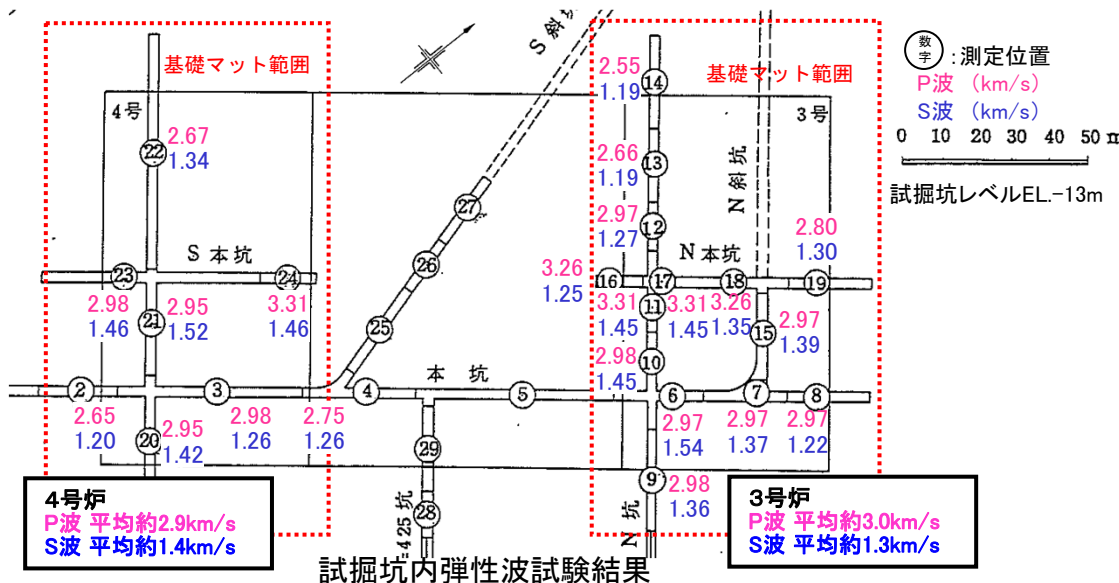
※地震調査委員会(2007、2003)^{3)、18)}のQ値が慣用値(Vs/15～Vs/10)を大きく上回る層については、地震調査委員会(2007、2003)^{3)、18)}を基に設定

【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定（解放基盤表面EL. -15m～EL. -50mまで）

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q値
解放基盤表面	-15m	2.35	1350	3000	100	岩石試験結果を基に設定	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定	
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	100	上層の岩石試験結果を基に設定	PS検層結果を基に設定	慣用値 (Vs/15～Vs/10) を基に設定
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	100			
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	100			
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	地震調査委員会(2007) ³⁾ を基に設定		慣用値 (Vs/15～Vs/10) 及び地震調査委員会(2007、2003) ^{3)、18)} を基に設定
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300			
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003) ¹⁸⁾ を基に設定		
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500			
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500			

- P波速度及びS波速度は、3号炉及び4号炉基礎マット範囲における試掘孔内弾性波試験結果の平均値を基に設定。
- 密度 ρ は岩石試験結果を基に設定。
- 地盤減衰 (Q値) は慣用値 (Vs/15～Vs/10) を基に設定。



- 3号炉弾性波試験結果
P波 平均約3.0km/s、S波 平均約1.3km/s
- 4号炉弾性波試験結果
P波 平均約2.9km/s、S波 平均約1.4km/s



- 3号炉及び4号炉の弾性波試験を踏まえ地震動評価上以下の通り設定する。
P波 3.0km/s
S波 1.35km/s

【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -50m ~EL. -200mまで)

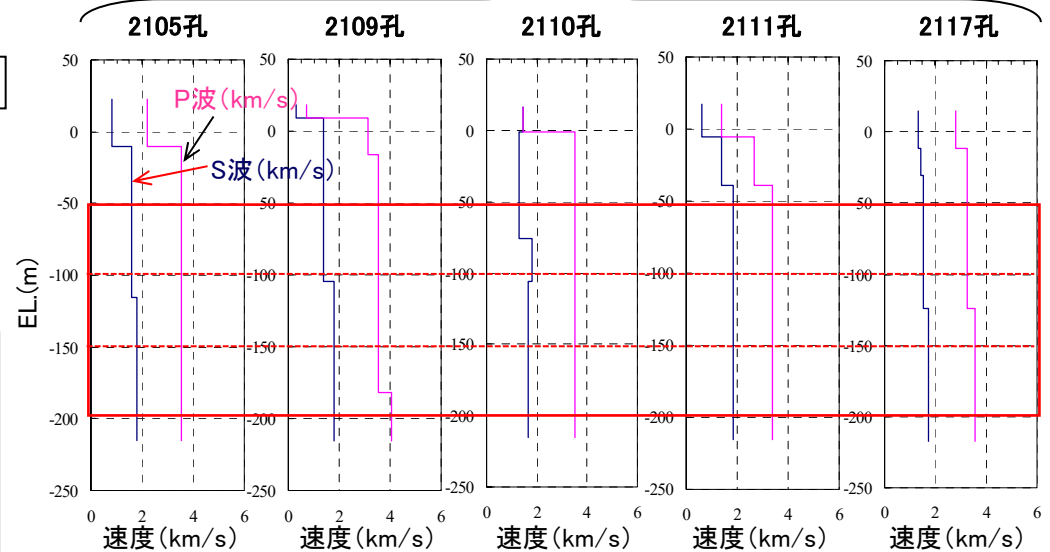
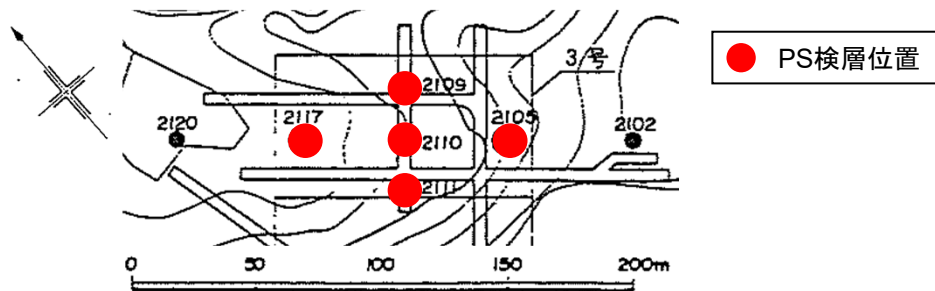
EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q値
解放基盤表面						岩石試験結果を基に設定	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定	
-15m	0.0	2.35	1350	3000	100	上層の岩石試験結果を基に設定	PS検層結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~Vs/10) を基に設定
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	100			
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	100			
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	100			
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	地震調査委員会(2007) ³⁾ を基に設定		慣用値 (Vs/15~Vs/10) 及び地震調査委員会(2007、2003) ^{3)、18)} を基に設定
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300			
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003) ¹⁸⁾ を基に設定		
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500			
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500			

PS検層結果

3号側				
ボーリング孔番	2105、2109、2110、2111、2117			
標高	P波速度	S波速度	動ポアソン比	動弾性係数
EL. (m)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	ν_d	$E_d (\times 10^8 \text{ kg/cm}^2)$
-15--50	3.35	1.45	0.38	1.45
-50--100	3.44	1.57	0.37	1.68
-100--150	3.47	1.73	0.33	1.98
-150以深	3.65	1.77	0.35	2.10

↑ 平均値

PS検層位置



- P波速度及びS波速度は、3号炉基礎マット範囲におけるPS検層結果の平均値を基に設定。
- 密度 ρ はEL. -15m~EL. -200mでS波速度とP波速度に大きな変化が見られないこと、及びEL. -200m~EL. -1804mまでの地震調査委員会(2007)³⁾の密度(2.40g/cm³)を考慮し、上層の岩石試験結果を基に設定。
- 地盤減衰(Q値)は慣用値(Vs/15~Vs/10)を基に設定。

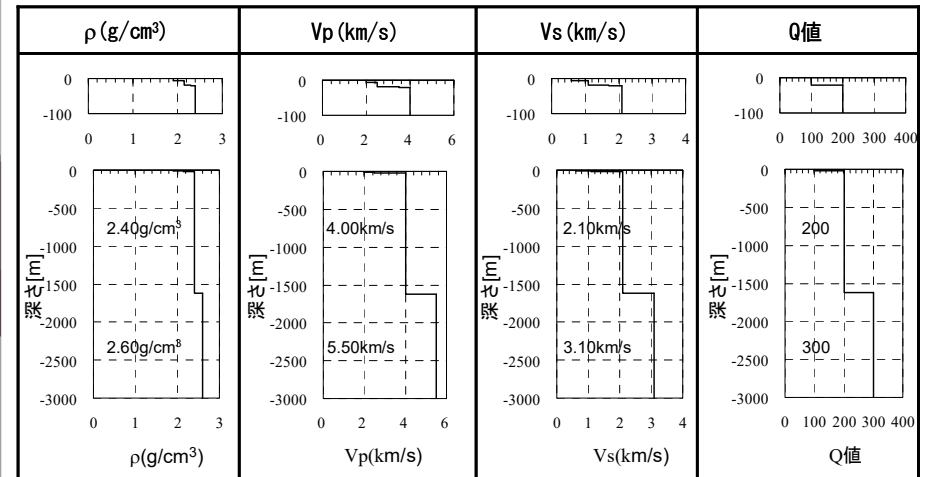
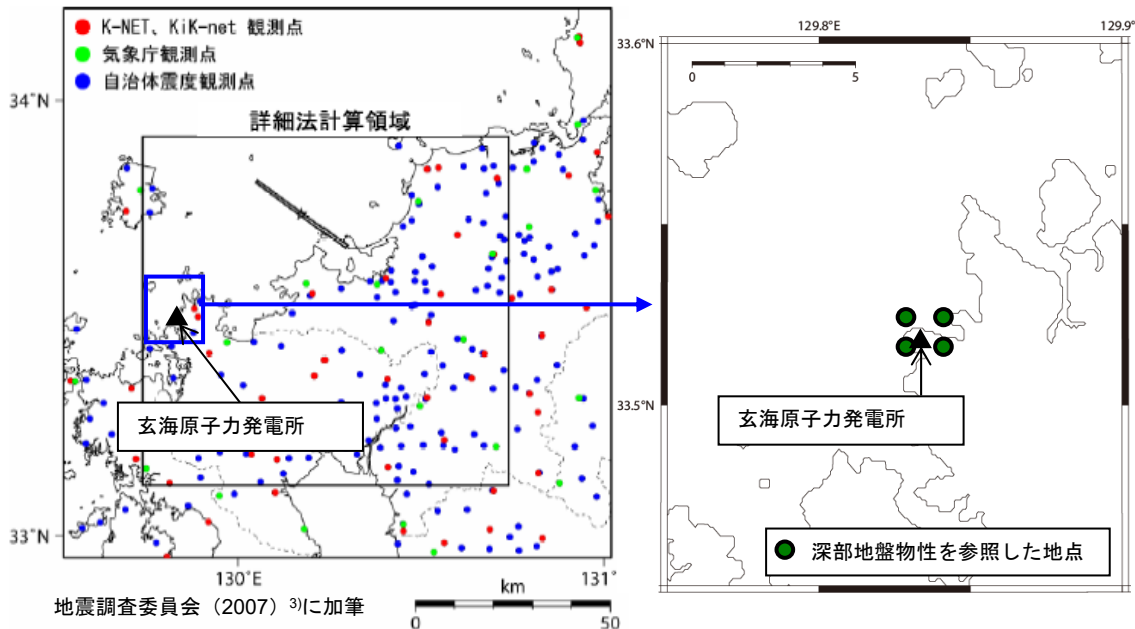
【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 地下構造モデルの設定 (EL. -200m~EL. -3015mまで)

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q値
解放基盤表面								
-15m	0.0	2.35	1350	3000	100	岩石試験結果を基に設定	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定	
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	100	上層の岩石試験結果を基に設定	PS検層結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~Vs/10) を基に設定
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	100			
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	100			
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200			
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300	地震調査委員会(2007) ³⁾ を基に設定		
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003) ¹⁸⁾ を基に設定		慣用値 (Vs/15~Vs/10) 及び地震調査委員会(2007、2003) ^{3)、18)} を基に設定
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500			
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500			

- P波速度、S波速度及び密度は、地震調査委員会(2007)³⁾を基に設定する。
- 地震調査委員会(2007)³⁾における詳細法(ハイブリッド法)の計算領域に、玄海原子力発電所周辺も含まれており、玄海原子力発電所周辺の深い地盤構造の物性値が示されている。
- 地震調査委員会(2007)³⁾における地盤構造のうち玄海原子力発電所を囲む4地点での物性値を参照しP波速度、S波速度及び密度を設定する。また、4地点の層厚の平均値等を基に層境界を設定する(次頁)。
- 地盤減衰(Q値)は地震調査委員会(2007)³⁾のQ値が同等であることを確認し、慣用値(Vs/15~Vs/10)を基に設定。

地震調査委員会(2007)³⁾による物性値

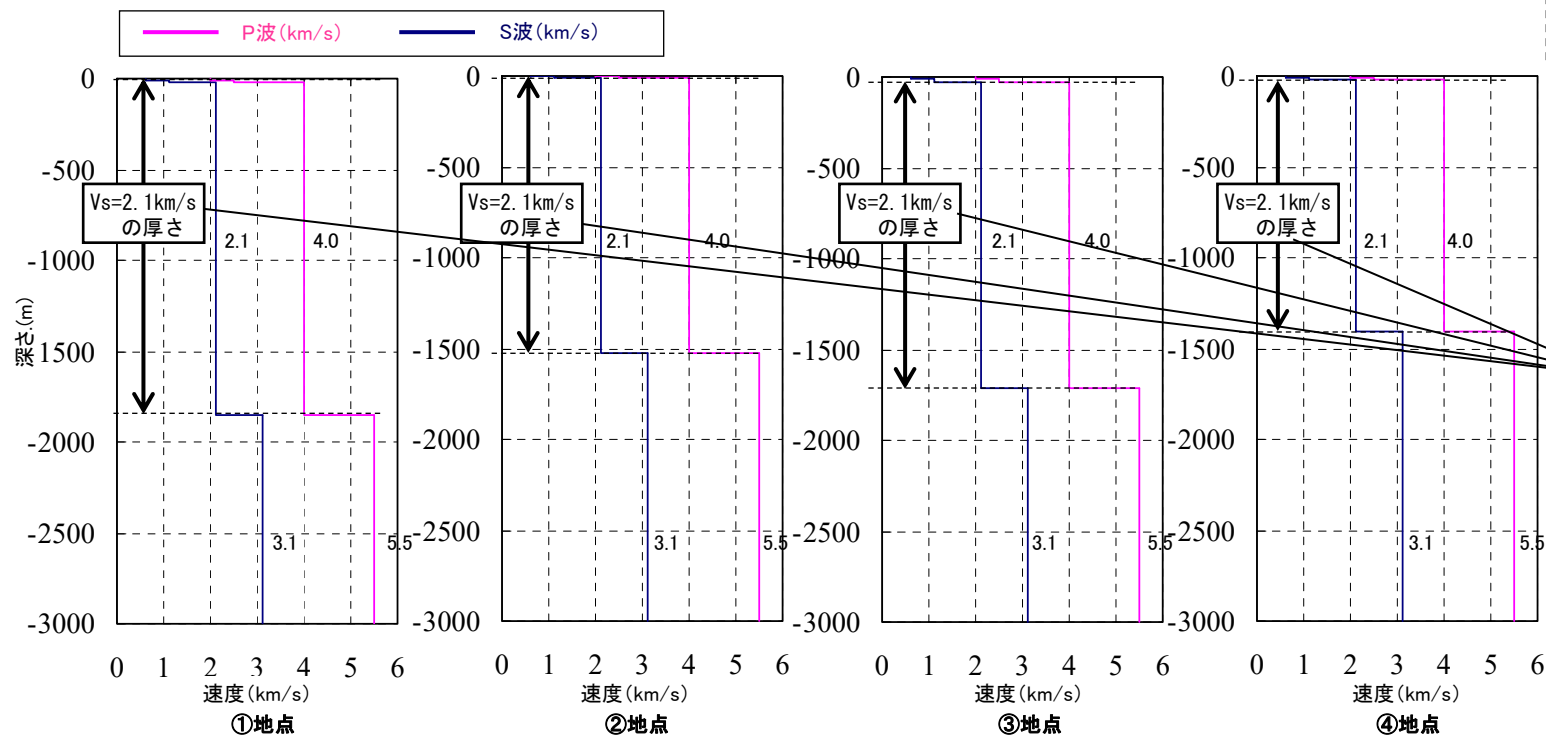
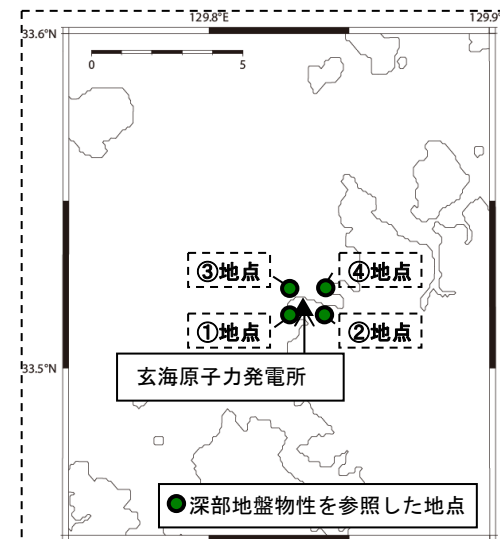


※層厚は4地点の平均値

【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 地下構造モデルの設定 (EL. -200m~EL. -3015mまで)

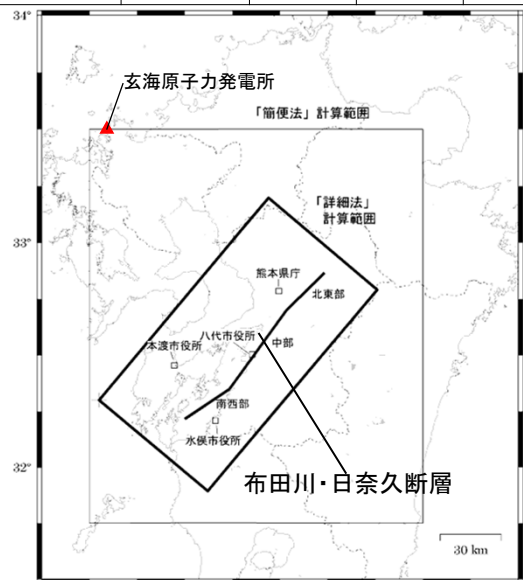
- 地震調査委員会(2007)³⁾では、各種物理探査結果、PS検層データ(K-NET, KiK-net)、ボーリング調査結果、地形・地質解釈資料等を整理し、地震観測記録に基づく調整を行い、深い地盤構造が示されている。
- 玄海原子力発電所のEL. -200m以深の第5層 ($V_s=2.1\text{km/s}$) の層境界は、地震調査委員会(2007)³⁾による玄海原子力発電所周辺の4地点の $V_s=2.1\text{km/s}$ に対応する地盤厚さの平均値を基にEL. -200mからEL. -1804mとする。
- 第5層 ($V_s=2.1\text{km/s}$) の下層の第6層 ($V_s=3.1\text{km/s}$) は、地震調査委員会(2003)¹⁸⁾により3km以深の地下構造が示されていることから解放基盤表面から深さ3kmに境界を設定し、EL. -1804mから-EL. -3015mまでとする。



【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 地下構造モデルの設定 (EL. -3015m以深)

EL. 解放基盤表面	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q値
-15m	0.0	2.35	1350	3000	100	岩石試験結果を基に設定	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~Vs/10) を基に設定
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	100	上層の 岩石試験結果 を基に設定	PS検層結果 を基に設定	
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	100			
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	100			
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	地震調査委員会(2007) ³⁾ を基に設定	慣用値 (Vs/15~Vs/10) 及び 地震調査委 員会(2007、 2003) ^{3)、18)} を基に設定	
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300			
-3015m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003) ¹⁸⁾ を基に設定		
-20015m	-20.0	3.00	3800	6600	500			
-33015m	-33.0	3.30	4300	7600	500			



地震調査委員会(2003)¹⁸⁾に加筆

- P波速度、S波速度及び密度は、地震調査委員会(2003)¹⁸⁾を基に設定。
 - 地震調査委員会(2003)¹⁸⁾では、布田川・日奈久断層帯の地震を想定した地震動評価を実施しており、地震基盤より深い地下構造モデルが示されている。その中では、Zhao et al. (1992)³⁰⁾、八木原ら(2001)³¹⁾の文献に基づき、上面深さを上部地殻3km、下部地殻17km、上部マントル33kmとした地下構造モデルを示している。
 - 玄海原子力発電所の震源モデルは、地震発生層(Vp=5.8km/s~6.4km/s程度)を、保守的に厚さ17km(上端深さ-3km、下端深さ-20km)と設定していることを踏まえ、下部地殻は上面深さ20kmと設定する。
- 地盤減衰(Q値)は慣用値を基本とするが、EL. -20015m以深は地震調査委員会(2003)¹⁸⁾のQ値が慣用値(Vs/15~Vs/10)を大きく上回るため、地震調査委員会(2003)¹⁸⁾を基に設定。

地震調査委員会(2003)¹⁸⁾による各層のモデルパラメータ

名称	上面深度 (km)	層厚 (km)	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	Q
上部地殻	3	14	3.5	5.9	2.70	300
下部地殻	17	16	3.8	6.6	3.00	500
上部 マントル	33	∞	4.3	7.6	3.30	500

【参考①】既許可の地下構造モデル

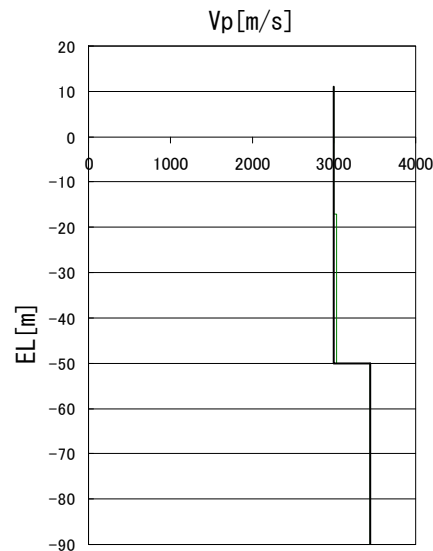
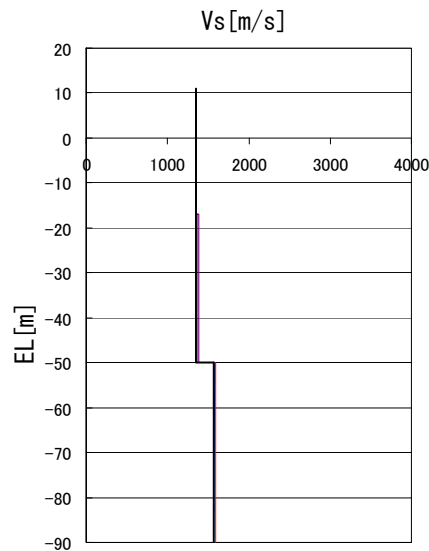
■鉛直アレイによる浅部地下構造モデルの確認

第402回審査会合資料

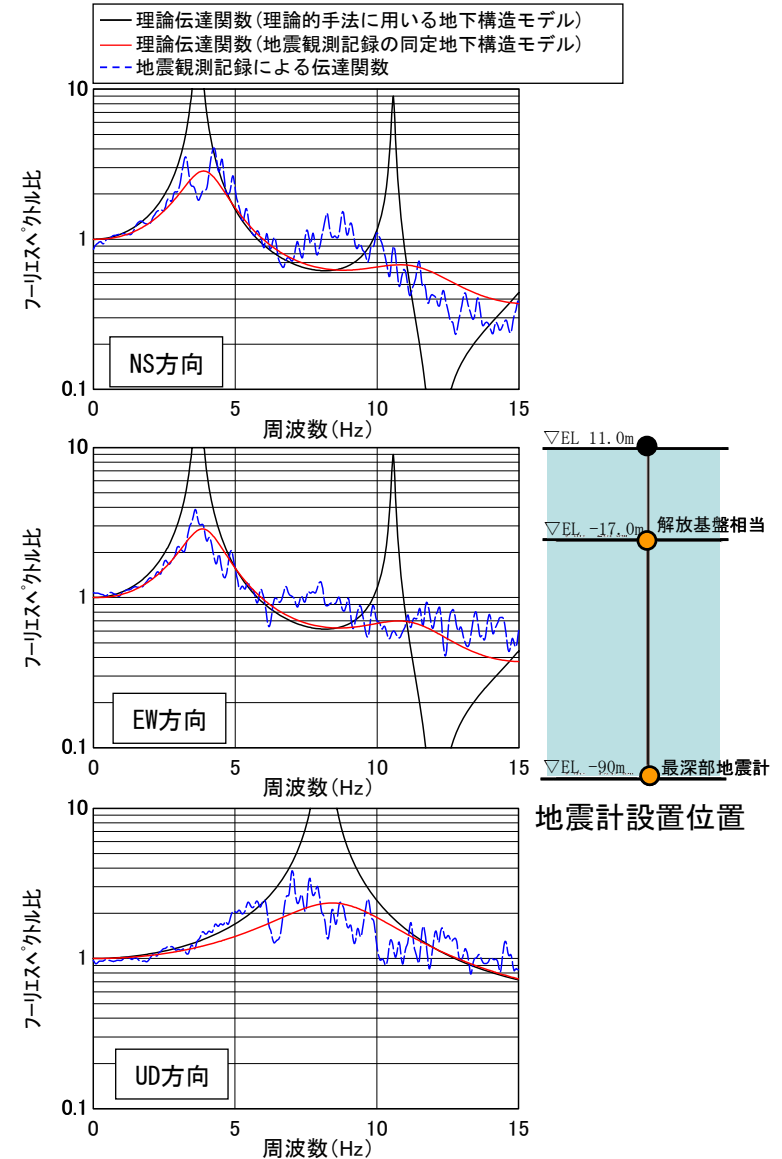
- ・ 主な7地震の地震観測記録を用いて同定された地盤の速度構造から算出される伝達関数は、地震観測記録の伝達関数と整合する。
- ・ 同定された地盤の速度構造は、基準地震動策定において、長周期側の理論的手法による地震動評価に用いる地下構造モデルの速度構造と整合することを確認した。

— : 理論的手法に用いる地下構造モデル
 — : 地震観測記録により同定された地下構造モデル(NS方向)
 — : 地震観測記録により同定された地下構造モデル(EW方向)

— : 理論的手法に用いる地下構造モデル
 — : 地震観測記録により同定された地下構造モデル(UD方向)



速度構造の比較

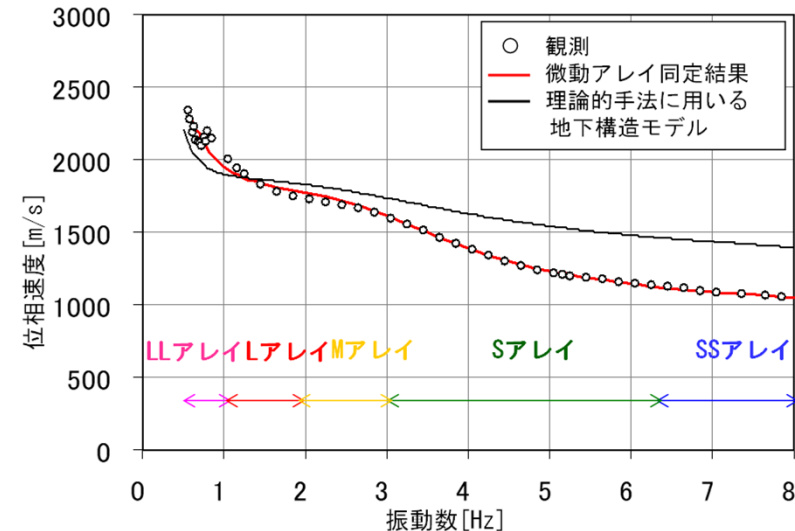
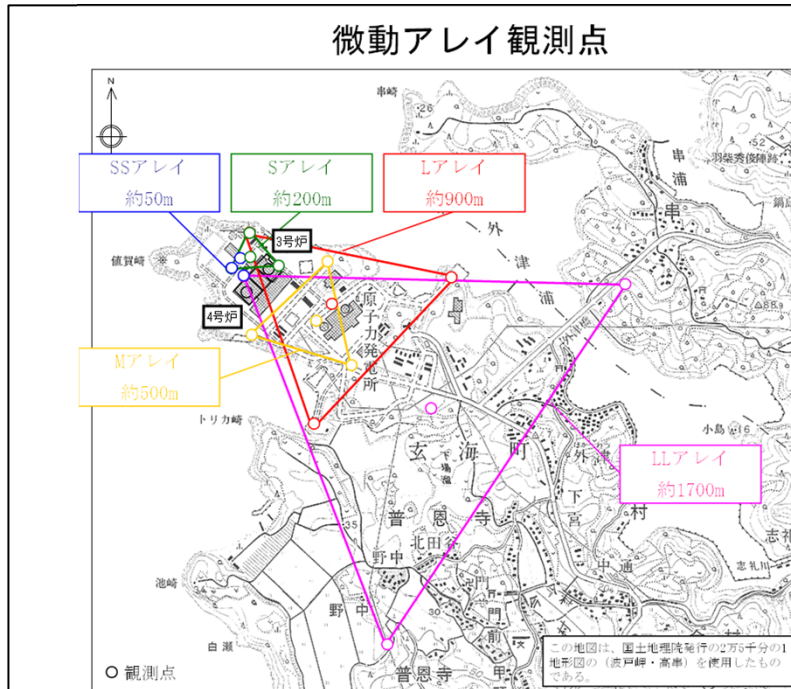


伝達関数 (EL. -17m/EL. -90m) の比較

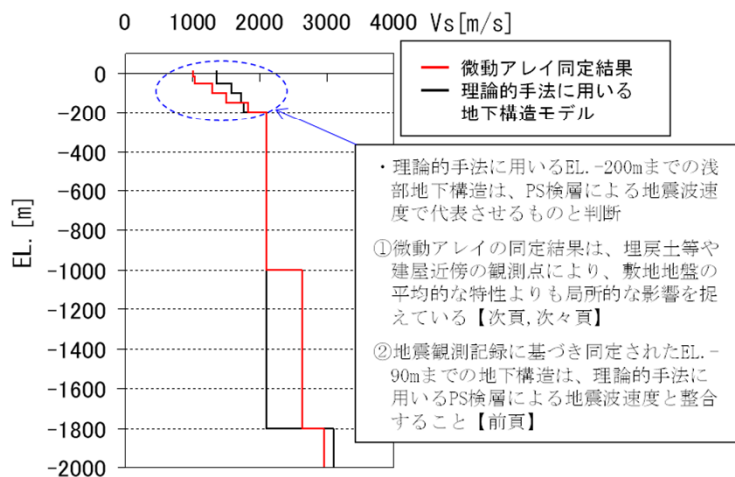
【参考①】 既許可の地下構造モデル

■ 微動アレイ観測による地下構造モデルの確認

第402回審査会合資料



観測分散曲線と理論分散曲線



せん断波速度の同定結果

- ・敷地の地下構造の把握のため、一辺が約1700mのLLアレイ、約900mのLアレイ、約500mのMアレイ、約200mのSアレイについて、それぞれの頂点3点、重心位置の計4点で微動観測を実施した。また高振動数を補間するために単点微動測定時の1辺約50mのL字型のSSアレイのデータを利用した。
- ・微動観測結果をもとに、アレイサイズに応じた振動数範囲で位相速度をもとめ、得られたそれぞれの位相速度を曲線で結ぶことにより観測の分散曲線を作成し、せん断波速度の同定を実施した。
- ・せん断波速度の同定結果によると、せん断波速度は表層から深くなるにつれ、大きくなり、標高約-1.8kmで約3.0km/sとなり、理論的方法に用いた地下構造モデルと傾向は概ね整合している。
- ・微動アレイの観測結果から同定された地下構造は、佐世保層群に相当すると考えられる $V_s=2100\text{m/s}$ の層が深さ約1kmまで分布しており、その傾向は文献調査の結果と整合している。

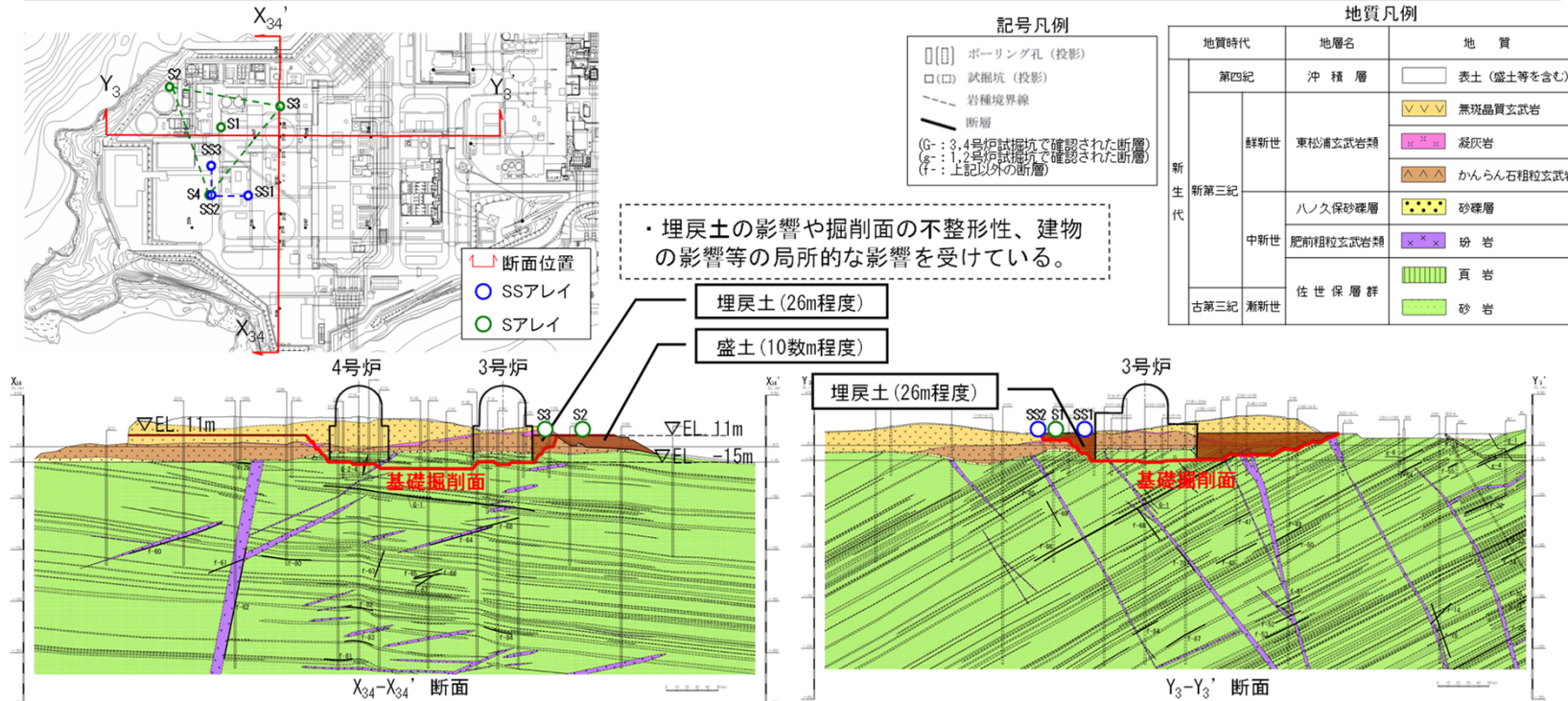
【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 微動アレイ観測による地下構造モデルの確認

第402回審査会合資料

- 微動アレイ観測に基づき同定されたEL. -200m以浅 (EL. -160m程度まで) のせん断波速度は、理論的手法による地震動評価に用いる地下構造モデルの速度構造よりも低い傾向にある。
- 微動アレイ観測によるEL. -200mまで浅部せん断波速度は、「Sアレイ」及び「SSアレイ」に基づくことから、両観測点の設置条件を再度確認した。
- 確認の結果、SSアレイ及びSアレイの観測点は、表層土上や建屋ごく近傍に設置されていることから、その局所的な影響により、敷地の平均的な振動特性を捉えていないと考えられるため、浅部はPS検層や地震観測記録に基づく評価結果で代表させる。

- ① Sアレイ、SSアレイの一部の観測点は、建設時の岩盤掘削面との境界や、埋戻土や盛土上に設置されており、敷地の平均的な特性よりも、局所的に掘削面の不整形性や埋土等の低速度層の影響を捉えていると考えられること。
- ② 観測点は、建屋ごく近傍に位置しているため、建物基礎による入力損失等の影響を受けており、他の観測点と比較して短周期側は精度が確保されていないと考えられること。



【参考①】既許可の地下構造モデル

■ 微動アレイ観測による地下構造モデルの確認

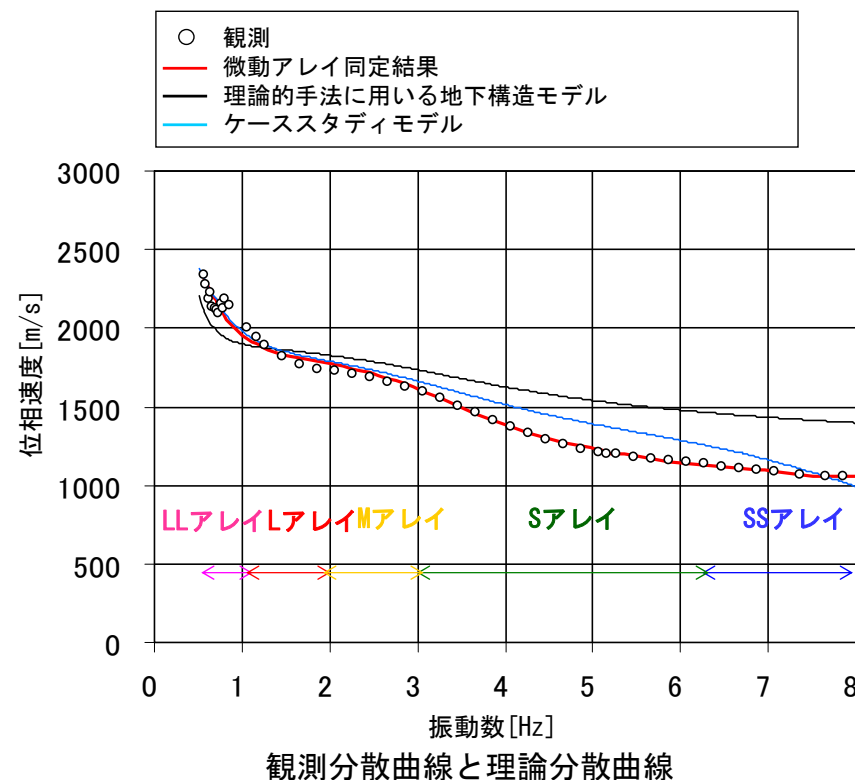
第402回審査会合資料

微動アレイ観測記録に基づく地盤構造の表層地盤の影響確認

- 埋戻土（表層土）の影響を確認するため、解放基盤EL. -15m以浅のせん断波速度のケーススタディを行った。
- 地震動評価モデルをベースとして、解放基盤表面のEL. -15mからEL. 11mまでに表層土層を加えて、深部の影響が現れないようEL. -150m以深は微動アレイ観測に基づくせん断波速度を用いて位相分散曲線を計算した。
- ケーススタディモデルの理論位相分散曲線の高振動数側は、概ね微動アレイ観測による位相分散曲線と整合する傾向となり、表層土の影響を確認できた。

	地震動評価		
	層	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)
地表EL. 11m	—	—	—
解放基盤表面	—	—	—
-15m	1	2.35	1.35
-50m	2	2.35	1.57
-100m	3	2.35	1.73
-150m	4	2.35	1.77
-200m	5	2.40	2.10
-1804m	6	2.60	3.10

	ケーススタディ		
	層	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)
EL. 11m	0	2.20	0.50
-15m	1	2.35	1.35
-50m	2	2.35	1.57
-100m	3	2.35	1.73
-150m	4	2.35	1.83
-200m	5	2.40	2.11
-1000m	6	2.40	2.63
-1804m	7	2.60	2.95

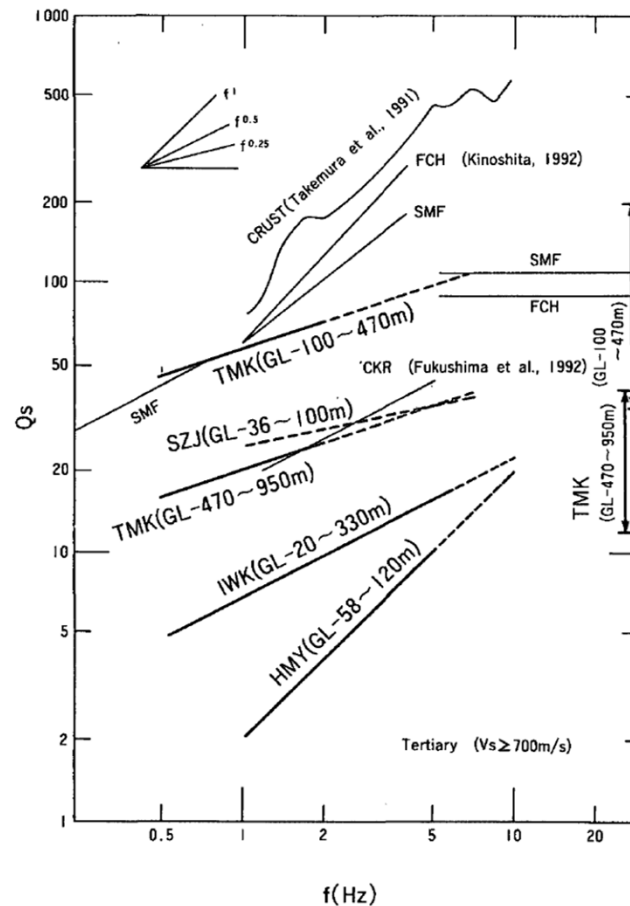


【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ 武村ほか(1993)⁵⁾の概要

- 第四紀層が比較的薄い堆積地盤の鉛直アレイ観測結果を用いて、スペクトル比の逆解析により地盤減衰の推定を行った結果、Q値は周波数とともに増加する傾向（周波数依存性）がみられたとされている。
- 富岡（TMK）におけるPS検層結果から推定された30Hz付近の値を今回求めた結果と考え合わせると、高周波数側でのQ値の頭打ちがみられたとされている。



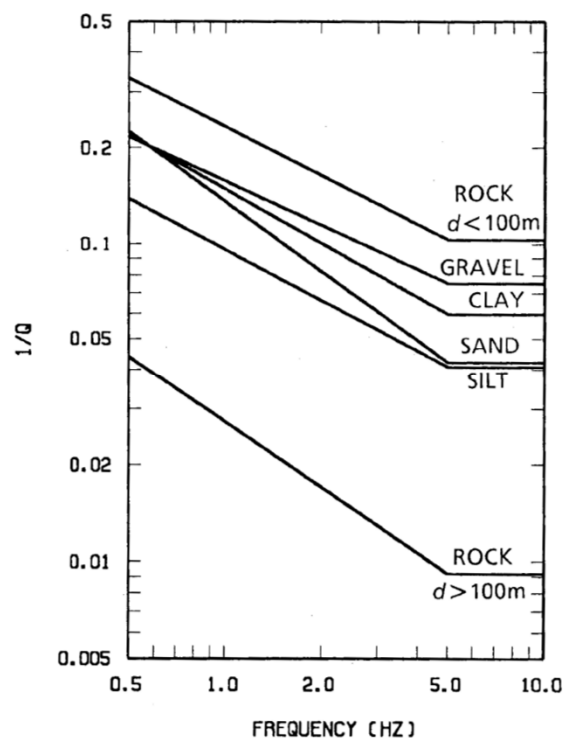
Vs=700m/s以上の深部におけるQ値の周波数依存性

武村ほか(1993)⁵⁾より抜粋

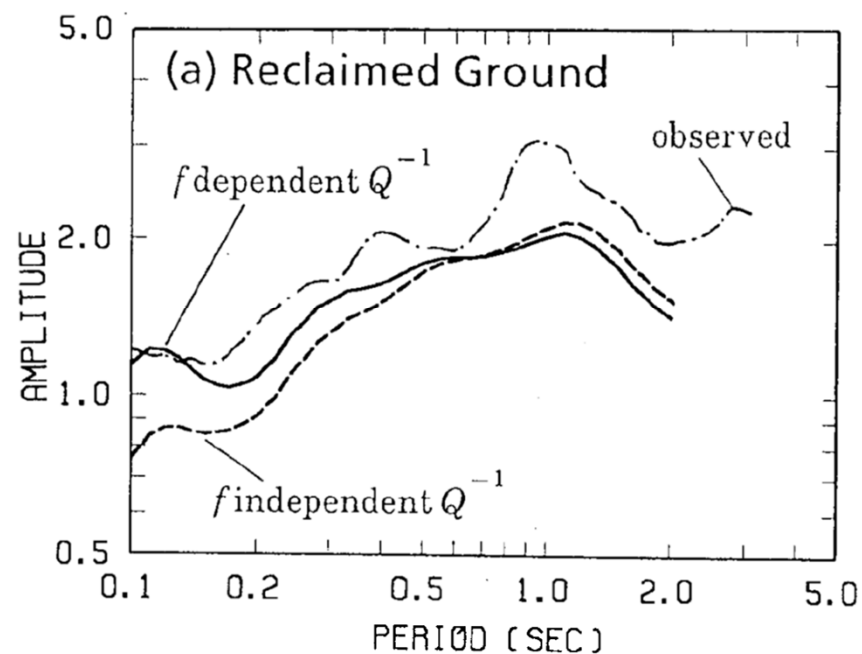
【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ 福島・翠川(1994)⁶⁾の概要

- 地盤減衰（ Q^{-1} 値）に関する数多くの既往研究結果に基づき、地盤減衰（ Q^{-1} 値）の関数モデルとして、対象とする周波数帯域（0.5Hz～5Hz）において周波数依存性を考慮したモデルが提案されている。
- 5Hz以上の高周波数帯域については、既往研究結果（武村ほか(1993)⁵⁾等）を踏まえ、地盤減衰（ Q^{-1} 値）を一定として設定している。
- 周波数依存性を考慮した地盤減衰（ Q^{-1} 値）を用いて計算した地盤増幅率は、周波数に依存しない地盤減衰（ Q^{-1} 値）を用いた場合に比べて、短周期領域（高周波数帯域）で、強震記録による地盤増幅率をよく説明しているとされている。



土質毎に設定した地盤減衰（ Q^{-1} 値）のモデル
（周波数依存を考慮）



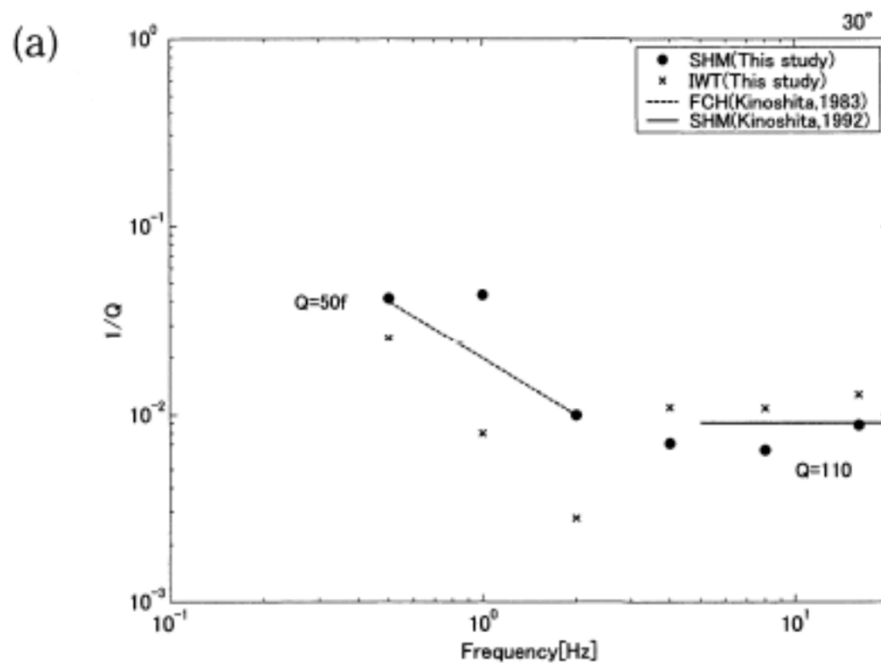
地盤増幅率の比較の例

福島・翠川(1994)⁶⁾より抜粋

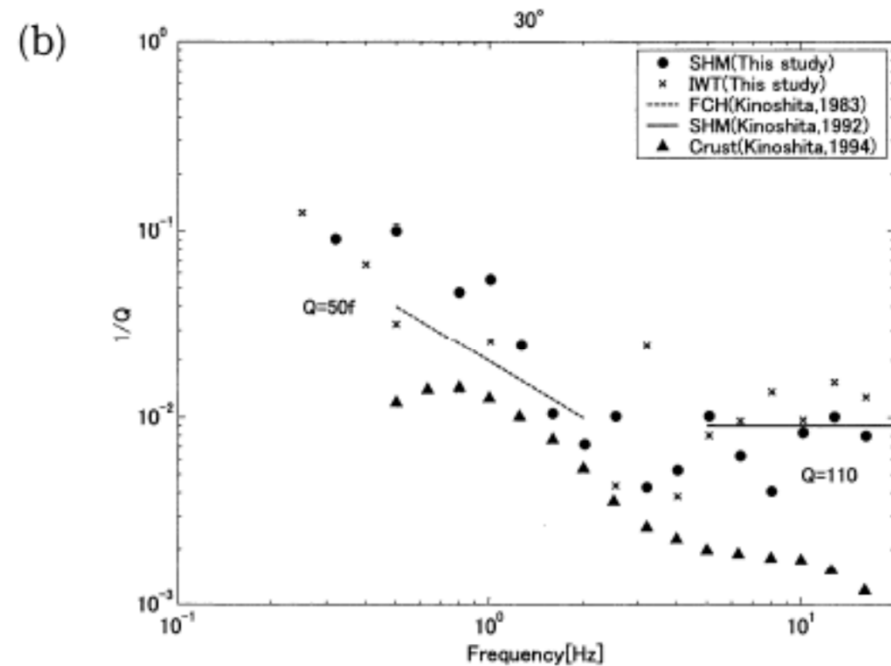
【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ 木下・大池(2002)⁷⁾の概要

- 関東平野に存在する深層ボーリングでの鉛直アレイを対象に、地盤減衰（ $1/Q$ ）の関数モデルを設定せずに地盤減衰（ $1/Q$ ）が同定されている。
- その結果、0.5~2Hzでは地盤減衰（ $1/Q$ ）が周波数とともに減少することを示している。一方で、2~16Hzにおいてほぼ一定の値となることが示されている。



(a) フーリエ振幅スペクトルをオクターブ帯域幅で平滑化した場合



(b) フーリエ振幅スペクトルを1/3オクターブ帯域幅で平滑化した場合

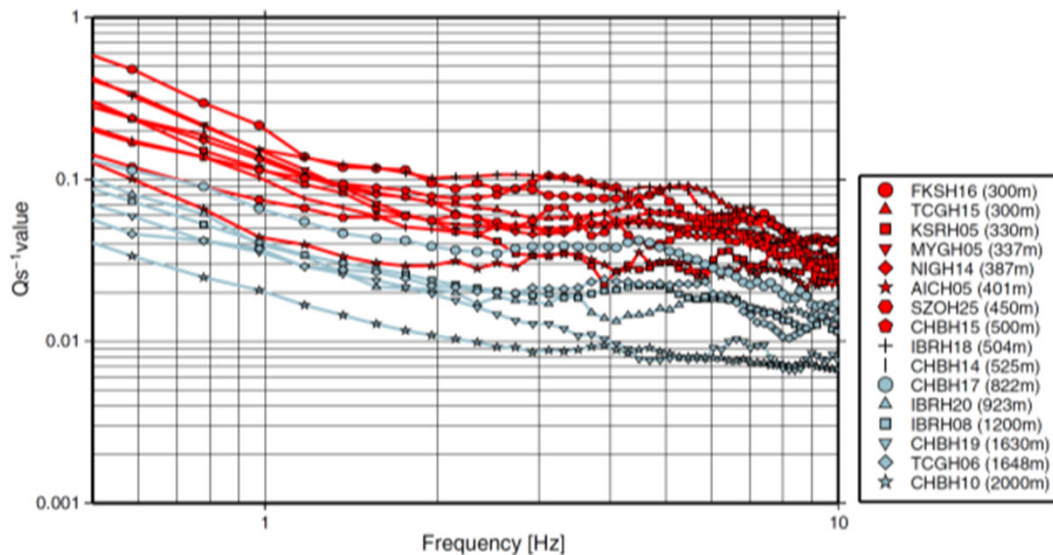
同定した地盤減衰（ $1/Q$ ）と既往研究による減衰定数の比較

木下・大池(2002)⁷⁾より抜粋

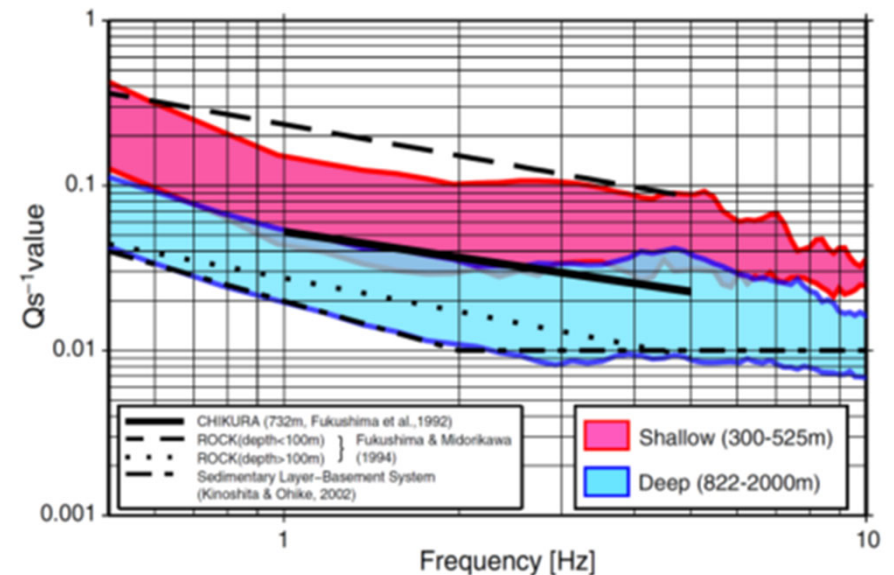
【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ Fukushima et al. (2016)⁸⁾の概要

- ボアホール記録のSH波を用いて地盤減衰（ Q_s^{-1} 値）を推定する方法として、デコンボリューションを用いた方法を提案し、KiK-netひたちなか（IBRH18）観測点を含む16箇所のKiK-net地中観測点を対象に、地盤減衰（ Q_s^{-1} 値）が推定されている。
- その結果、0.5~10Hzで安定して地盤減衰（ Q_s^{-1} 値）が得られ、約2~3Hzまでの振動数で減少するが、それより高い振動数ではほぼ一定になることが示されている。



16箇所のKiK-net地中観測点における地盤減衰（ Q_s^{-1} 値）の推定結果



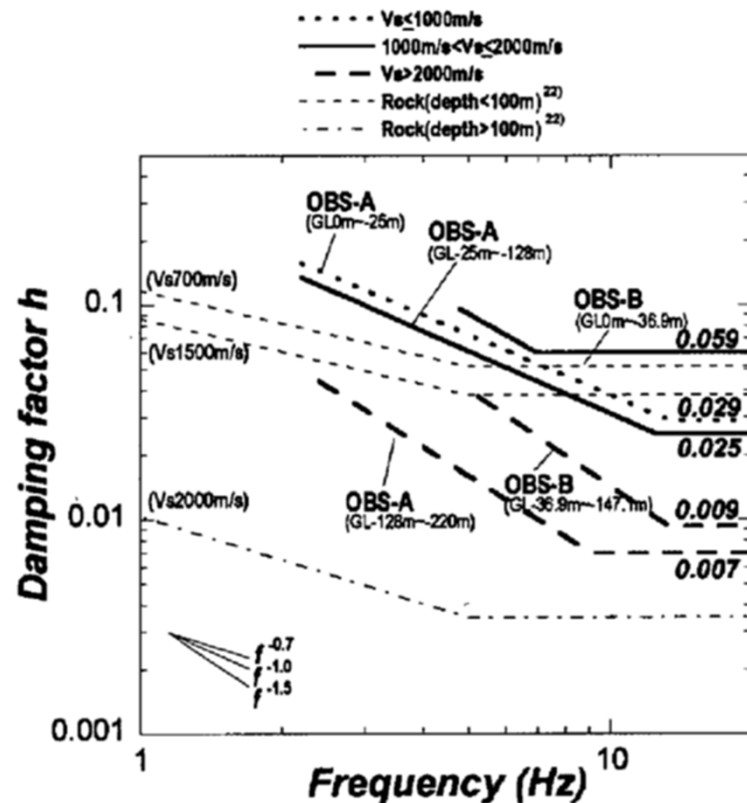
推定した地盤減衰（ Q_s^{-1} 値）と
既往研究による地盤減衰（ Q_s^{-1} 値）の比較

Fukushima et al.(2016)⁸⁾より抜粋

【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ 佐藤ほか(2006)⁹⁾の概要

- 岩盤の減衰定数には下限が存在することを示した木下・大池(2002)⁷⁾等の知見を踏まえ、スペクトル比の逆解析による岩盤の減衰定数の同定において、減衰定数がある周波数を境に、低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したモデルが提案されている。



減衰定数の同定結果と既往の経験式の比較

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)	0.33	0.94	13.4	0.2	15.1
2	20	2.00	600 (400-1200)					
3	35	2.37	1430 (1000-1800)					
4	68	2.37	1750 (1600-2000)					
5	92	2.38	1960 (1800-2400)	0.15	1.39	9.1		
6	-		2397					

() : 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)	0.68	1.25	7.0	12.8	28.8	19.3
2	17	2.1	1016						
3	8.6	2.55	1510 (1208-1812)						
4	9.6	2.55	1812						
5	18	2.66	2010 (1608-2412)	0.45	1.50	13.3			
6	25	2.7	2210 (1768-2652)						
7	27	2.68	2610 (1700-2610)						
8	40.2	2.68	2610						
9	-	2.68	2610						

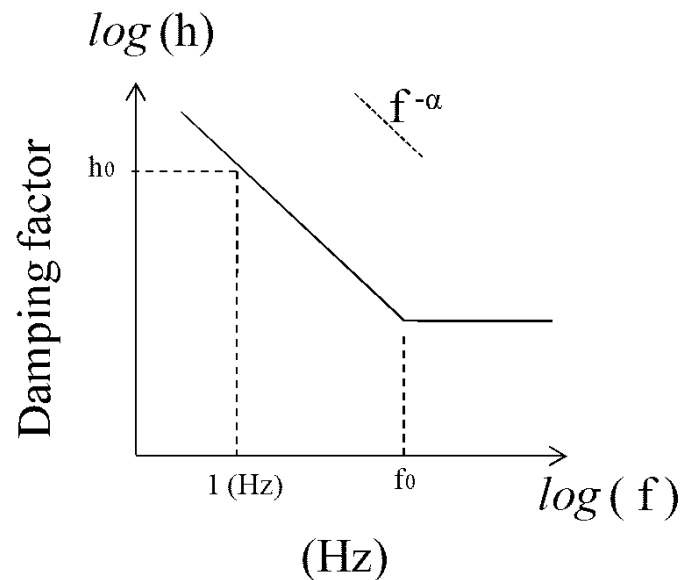
() : search limits for SA inversion

佐藤ほか(2006)⁹⁾より抜粋

【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ 佐藤(2012)¹⁰⁾の概要

- 既往研究で指摘されている地表に近い岩盤の減衰についての低周波数側（1～10Hz程度）では強い周波数依存が見られるが、高周波数側ではほとんど見られなくなる「10Hz付近での変移」を明確にすることを目的に、スペクトル比の逆解析から減衰を評価されている。
- バイリニア型周波数依存モデルを用いた評価から「10Hz付近での変移」の存在を明らかにしており、10～20Hzで周波数一定とすると既往の研究と調和的な結果とされている。また、この結果は、低周波数側の減衰を、単純に高周波数側に拡張することはできないとする指摘（Abercrombie(1998)¹¹⁾）とも整合しているとされている。



バイリニア型周波数依存モデルの概略図

S波重複反射波スペクトル比の逆解析による減衰の評価結果

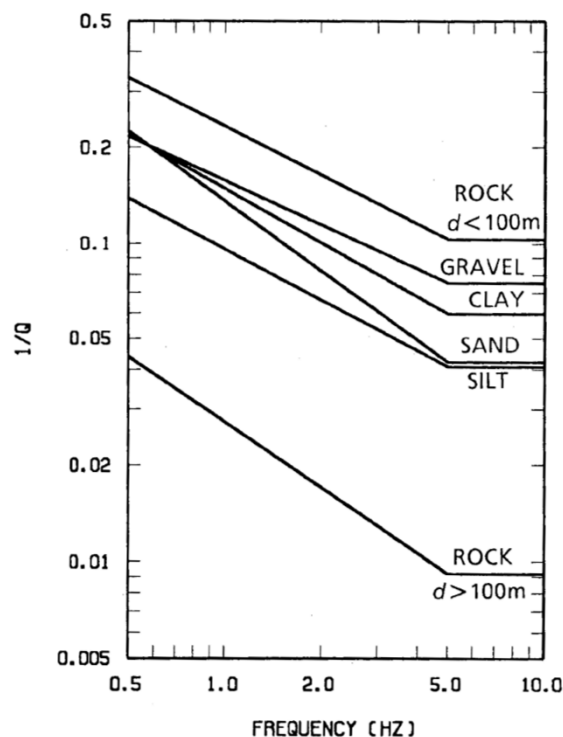
	GL(m)	Vs (m/s)	Damping factor $h(1/2Q_s)$			
			h_0	α	f_0	$h(f \geq f_0)$
(Gravel)	0 ~ -7	321	0.98	0.94	18.2	0.064
		480				
(Granite)	-7 ~ -340	889	0.34	0.76	19.5	0.035
		1595				
		1608				
		2398				

佐藤(2012)¹⁰⁾より抜粋

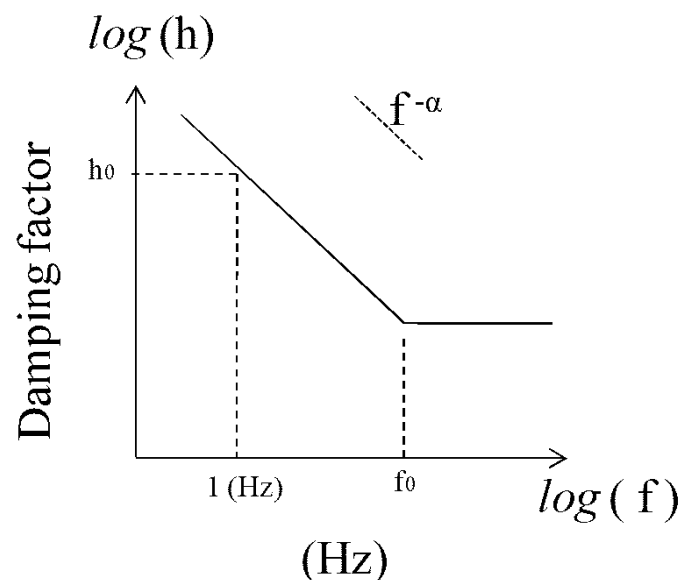
【参考②】地盤減衰（Q値）の周波数依存性及び上限に関する知見

■ 地盤減衰（Q値）の関数モデルの設定に関する知見の整理

- 伝達関数の逆解析に関する既往研究（例えば福島・翠川(1994)⁶⁾）では、対象とする周波数帯域で地盤減衰（Q値）が周波数のべき乗に比例する関数モデル（ $Q=Q_0*f^\alpha$ ）を用いている。
- 佐藤ほか(2006)⁹⁾では、ある周波数を境に、低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したバイリニア型の関数モデルが提案されている。
- Fukushima et al. (2016)⁸⁾では、複数のKiK-net観測点を対象に地震波のデコンボリューションを用いる方法により、関数モデルを仮定せずに地盤減衰（Q値）を推定している。



福島・翠川(1994)⁶⁾による地盤減衰（Q値）の関数モデル
（周波数依存を考慮）



佐藤(2012)¹⁰⁾による地盤減衰（Q値）の関数モデル
（周波数依存及び上限値を考慮）

【参考③】 ボーリング孔内Q値に関する知見

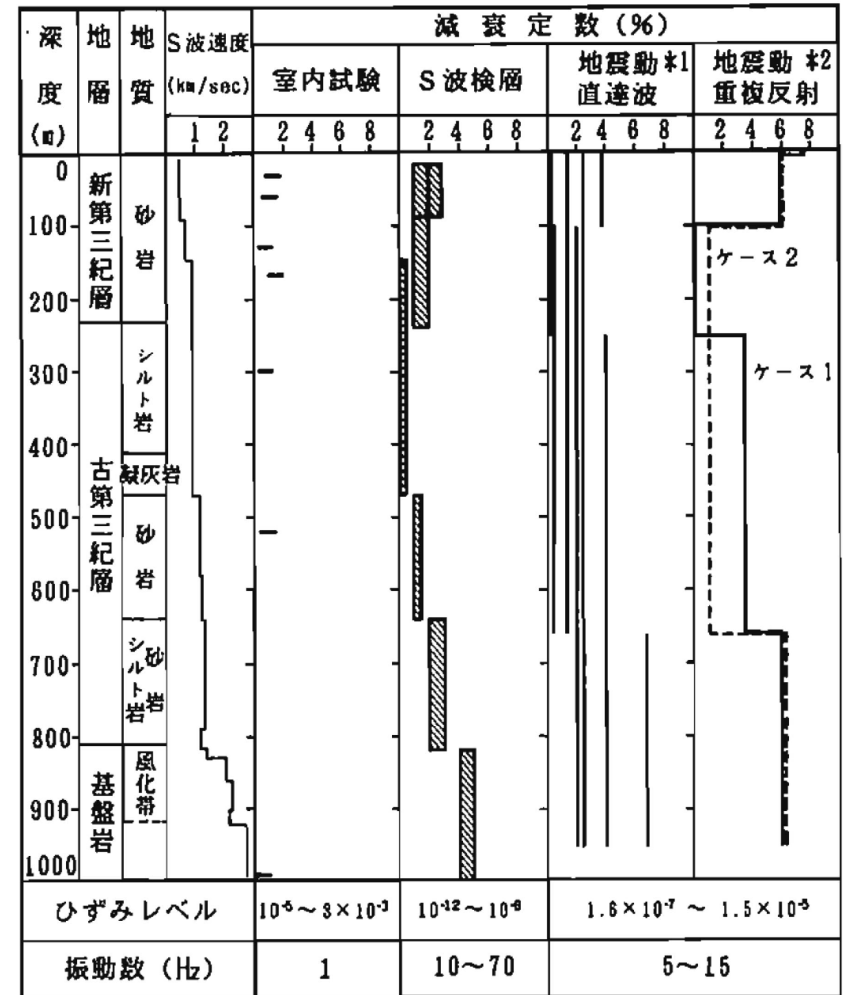
【参考③】ボーリング孔内Q値に関する知見

文献	概要
石田ほか(1987) ³²⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ S波検層による方法は、比較的純粋なSH波を発生させることができるが、一般に地震時に比べて、ひずみレベルが小さく、卓越振動数が高くなるという問題がある。 ・ 観測地震動を用いる方法は、地盤の地震応答解析を行なうときと同様の条件下で減衰性を評価できるという有利さはあるものの、地盤内での地震波動の伝播が非常に複雑であるため、観測地震動が解析の際に仮定した条件に適合するかどうかの問題である。 ・ S波検層と観測地震動の解析との関係は、ひずみレベルや振動数成分が異なるにも拘わらず、両者の全体の傾向は良く整合している。
小林ほか(2010) ³³⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ Q値測定は対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、且つひずみレベルが小さいという理解もあって、得られた減衰定数が地震動評価（耐震設計）に使われることはそう多くないのが現状。 ・ PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される減衰定数において、信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差、あるいはひずみレベルの違いによる差はほとんどない結果が示された。
小林ほか(2013) ³⁴⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ PS検層は地表人工震源による弾性波動を扱っていることから対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、周波数帯域の違いによる適用上の問題から、PS検層により得られたS波の減衰特性が地震動評価に使われることはそう多くはない。 ・ 鉛直アレー観測及びPS検層から評価されるS波の減衰定数は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側でほぼ一致し、評価手法の違いによる差はほとんどないことが示された。
佐藤(2010) ³⁵⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ PS検層による減衰定数は、スペクトル比の逆解析により得られた同定結果の下限値の周波数軸上の延長上に位置しており、両者が減衰定数の下限値において良く対応していることが分かる。 ・ バイリニア型の周波数依存モデルの妥当性と高周波数側への拡張性、ならびにPS検層によって減衰定数の下限値を推定できる可能性を示している。

【参考③】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 石田ほか(1987)³²⁾の概要

- 同一地点に対する室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰性の評価手法を示し、それらの結果の比較考察を実施。
- 観測地震動を用いる方法は、地盤の地震応答解析を行なうときと同様の条件下で減衰性を評価できるという有利さはあるものの、地盤内での地震波動の伝播が非常に複雑であるため、観測地震動が解析の際に仮定した条件に適合するかどうかの問題である。
- S波検層と観測地震動の解析との関係は、ひずみレベルや振動数成分が異なるにも拘わらず、両者の全体の傾向は良く整合している。S波検層で発生する波と地震動とは、地盤内での波の伝播の状況が対照的であり、両者のデータを用いて地盤の減衰を評価する方法は互いに弱点を補い合う関係にあるべきものと考えられる。



*1) 各観測点間ごとの値を示す

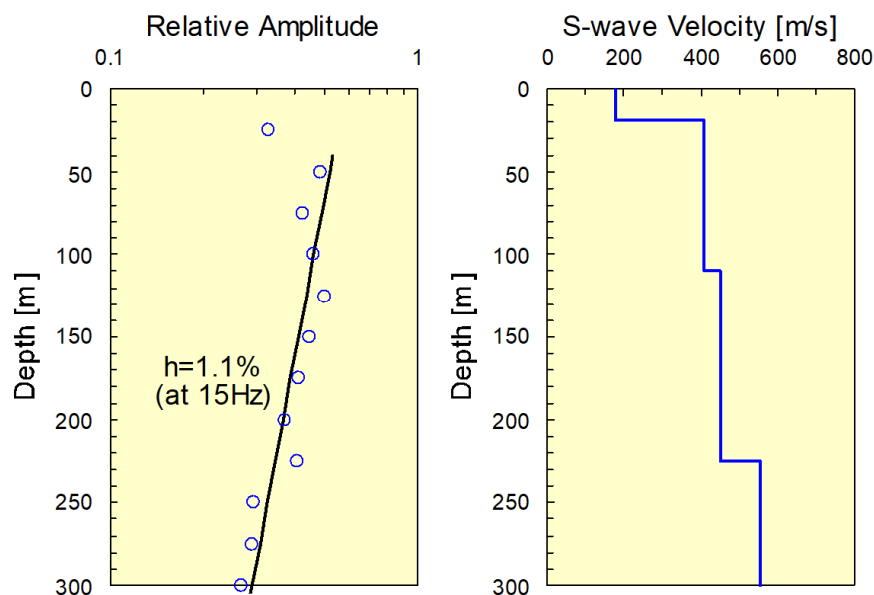
*2) 層分割の異なる2つの最適モデルを示す。

各種の手法による減衰定数の比較

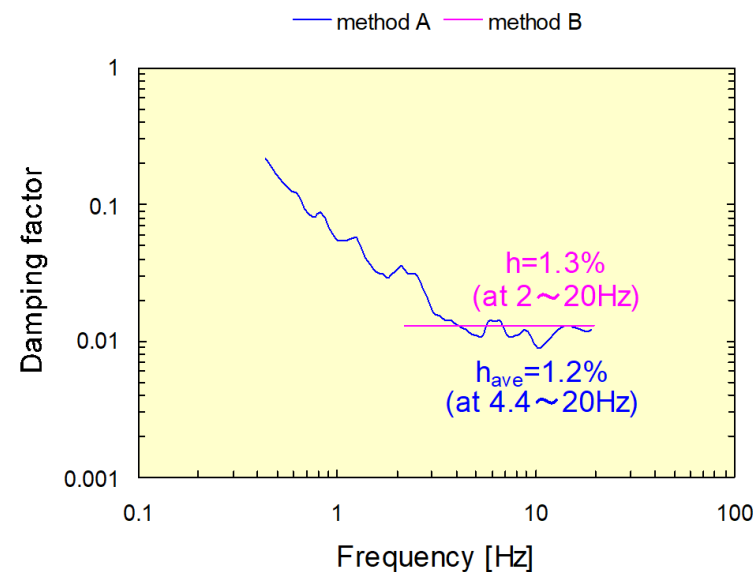
【参考③】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 小林ほか(2010)³³⁾の概要

- Q値測定は対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、且つひずみレベルが小さいという理解もあって、得られた減衰定数が地震動評価（耐震設計）に使われることはそう多くないのが現状。
- 防災科学技術研究所の基盤強震観測網（KiK-net）成田観測点を事例対象として、（PS検層による）Q値測定と鉛直アレー観測から評価されるS波の減衰定数の関係性を数値実験及び実データから検討。
- 成田観測点において、PS検層記録と鉛直アレー観測記録に基づき評価される15Hzにおける減衰定数は共に同程度の値（等価減衰定数1.1～1.3%）を有する。
- PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される減衰定数において、信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差、あるいはひずみレベルの違いによる差はほとんどない結果が示された。このことは、Q値測定により得られる地盤の減衰定数が地震動評価に適用できることを示唆している。



成田観測点のQ値解析結果及びS波速度構造



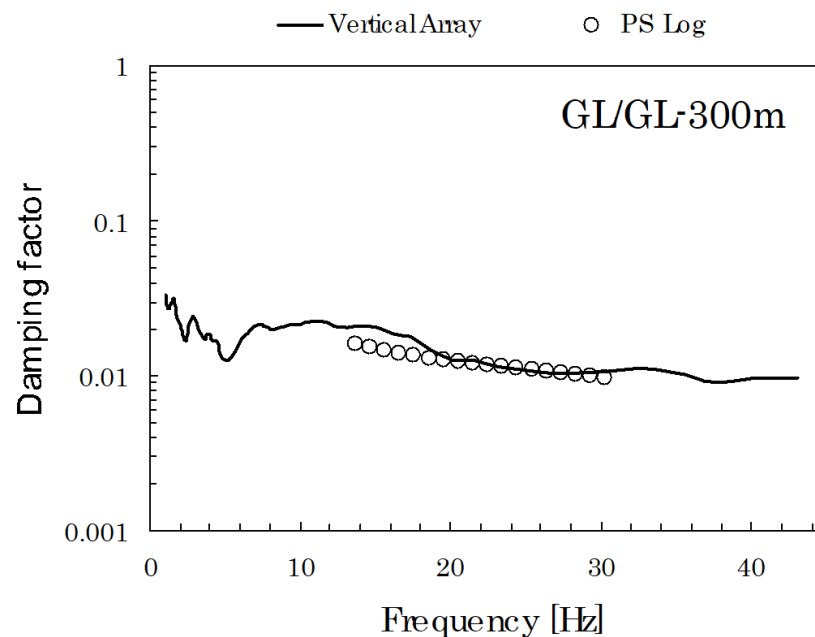
成田観測点の地盤同定解析結果

小林ほか(2010)³³⁾より抜粋

【参考③】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 小林ほか(2013)³⁴⁾の概要

- ほぼ水平な地質構造を持つ第四紀地盤テストフィールドにおいて、PS検層（ダウンホールPS検層）に基づく減衰定数の評価に関する実証試験を実施。
- 実証試験では、主として鉛直アレー観測による減衰定数の評価結果に対比させる形でPS検層の適用性を検討。
- 両手法から評価されるS波の減衰定数は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側でほぼ一致し、評価手法の違いによる差はほとんどないことが示された。

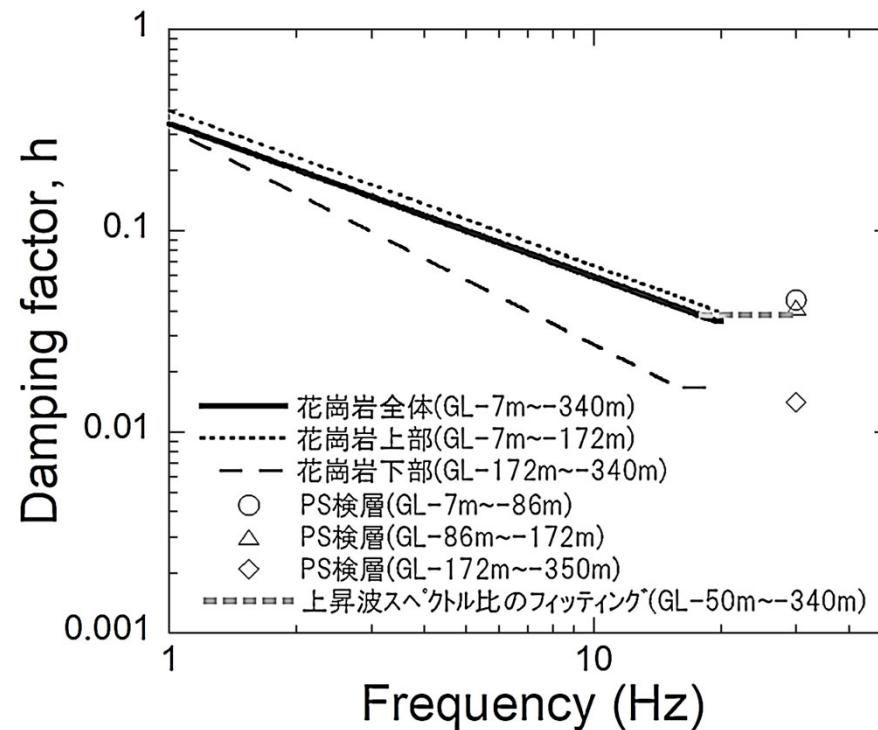


PS検層及び鉛直アレー記録に基づき推定された
S波の減衰定数の比較

【参考③】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 佐藤(2010)³⁵⁾の概要

- 花崗岩からなる硬質岩盤において鉛直アレイ観測とPS検層により得られるS波の減衰定数を比較検討。
- PS検層による減衰定数は、スペクトル比の逆解析により得られた同定結果の下限値の周波数軸上の延長上に位置しており、両者が減衰定数の下限値において良く対応していることが分かる。このことは、バイリニア型の周波数依存モデルの妥当性と高周波数側への拡張性、ならびにPS検層によって減衰定数の下限値を推定できる可能性を示している。



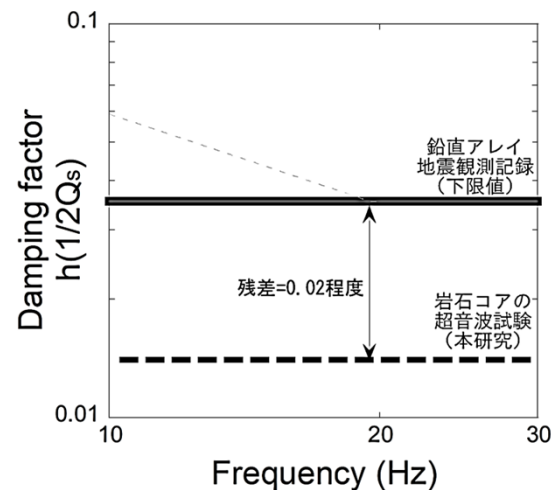
異なる手法による減衰定数の評価結果の比較

【参考④】 岩石コアQ値に関する知見

【参考④】 岩石コアQ値に関する知見

■ 佐藤・岡田 (2012)¹⁶⁾による知見

- 超音波試験によって評価した岩石コアの減衰について、岩石コア採取地点近傍の鉛直アレイ地震計の観測記録から評価した岩盤の減衰と比較することにより、亀裂やランダム性といった不均質な性質をもつ実際の岩盤と、亀裂などの顕著な不均質性のない岩石コアの減衰との差異から、評価地点の岩盤における減衰の付加量を検討。
- 鉛直アレイ地震観測記録による減衰は高々30Hzであるため、100kHz付近での減衰である岩石コアの超音波計測による評価結果とは、対象周波数が乖離している。
- 高々30Hzの鉛直アレイ地震観測記録による周波数に依存しない部分の減衰とkHzオーダーの岩石コアの超音波計測による減衰の比較は可能と考えられる。
- 鉛直アレイ地震観測記録を用いた評価結果による減衰定数の高周波数側の一定値と超音波を用いた岩石コア試験による評価結果は0.02程度の差異が見られ、鉛直アレイ地震観測による評価結果の方が大きい。
- 鉛直アレイ観測記録に基づき評価された減衰は、実際の岩盤を対象としているため、顕著な亀裂やランダム性の存在による減衰の付加効果が生じている。



鉛直アレイ観測記録に基づく減衰と岩石コアの超音波試験に基づく減衰の比較

※佐藤・岡田 (2012)¹⁶⁾より抜粋

【参考⑤】 友澤ほか（2021）の概要

【参考⑤】友澤ほか（2021）の概要

■ 友澤ほか（2021）³⁶⁾の概要

- 友澤ほか（2021）³⁶⁾※1では、九州地域で発生した地震の強震観測記録（K-NET、KiK-net及び硬質岩盤地点である玄海原子力発電所（GNK）と川内原子力発電所（SND））を収集し、九州地域の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性をブロックインバージョン解析により推定。

※1友澤ほか（2019a）³⁷⁾、³⁸⁾を査読付き論文として取り纏めたもの

- その際に、九州地域では活火山が存在し、減衰構造が均質でない可能性も考えられるため、伝播経路特性の不均質性を考慮。（友澤ほか（2019b）³⁹⁾では、火山帯周辺では伝播経路特性が複雑であることから、観測記録を震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性に分離する際には、伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することの重要性を指摘。）
- 検討に用いた観測記録は、以下の方針により選定（36地震・216観測点の3380記録）。
 - 震源深さ20km以内の内陸地殻内地震
 - M_J4.8以上の地震
（ただし、対象地震の地域の偏りを避けるため2016年熊本地震の震源域はM_J5.5以上）
 - K-NET地表観測記録、KiK-net地中観測記録、川内原子力発電所地表観測記録、玄海原子力発電所地表観測記録を対象
 - 地表の最大加速度が三成分とも200cm/s²以下（地盤の非線形化の影響を避けるため）
 - 等価震源距離200km以内

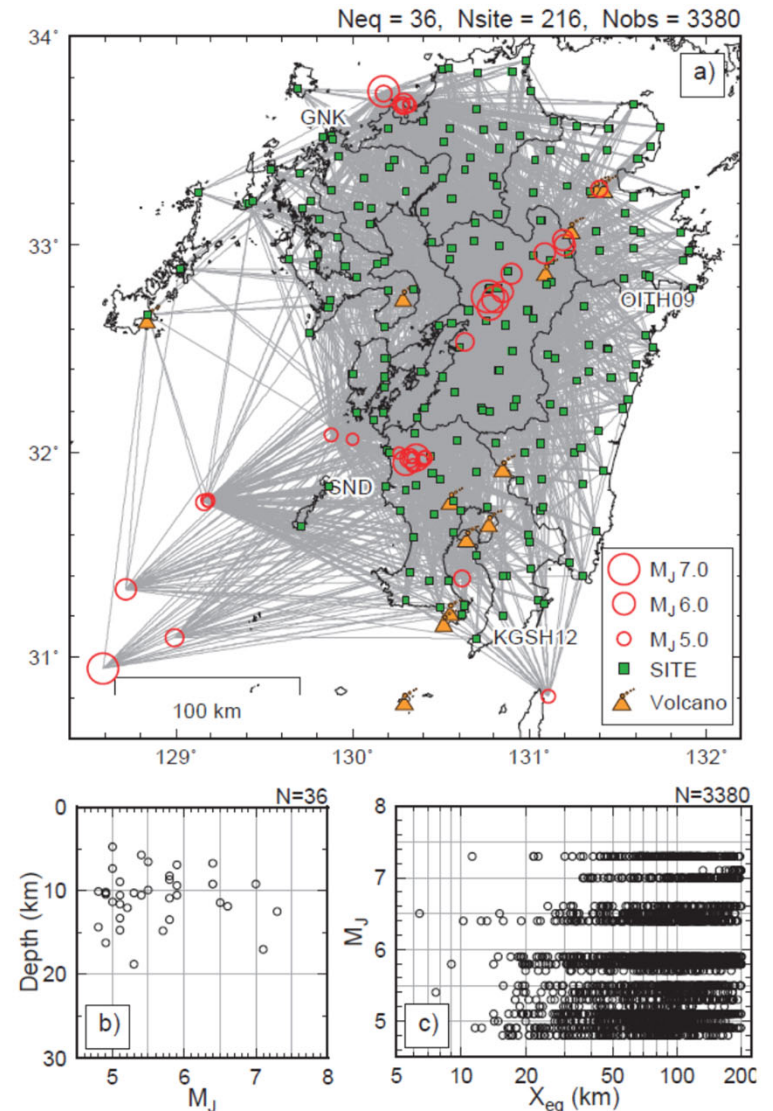


Fig.1 Dataset used in this study. a) Epicenters (○) and sites (■). Location of volcano is also shown. b) M_J vs focal depth, c) Equivalent hypocentral distance vs M_J

※友澤ほか（2021）³⁶⁾より抜粋

【参考⑤】友澤ほか（2021）の概要

■ 検討に用いた地震

- 友澤ほか(2021)³⁶⁾において、検討に用いた36地震の諸元を下記に示す。

検討に用いた地震諸元（計36地震）

番号	地震名	発生日	Mj	震源深さ (km)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	11.9
②	鹿児島県北西部	1997年3月26日	4.9	10.2
③	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	14.8
④	鹿児島県北西部	1997年4月4日	4.8	14.3
⑤	鹿児島県北西部	1997年4月5日	5.2	12.0
⑥	鹿児島県北西部	1997年4月9日	5.1	10.5
⑦	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	9.2
⑧	鹿児島県北西部	1997年5月14日	5.1	8.9
⑨	鹿児島県北西部	2003年4月12日	4.9	10.3
⑩	鹿児島県北西部	2003年11月30日	4.8	10.1
⑪	九州南西沖	2004年12月12日	5.1	14.7
⑫	九州南西沖	2004年12月13日	4.9	16.2
⑬	九州南西沖	2004年12月14日	5.3	18.8
⑭	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	9.2
⑮	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	10.5
⑯	福岡県中部	2005年4月10日	5.0	4.7
⑰	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	13.5
⑱	福岡県中部	2005年4月20日	5.1	13.3

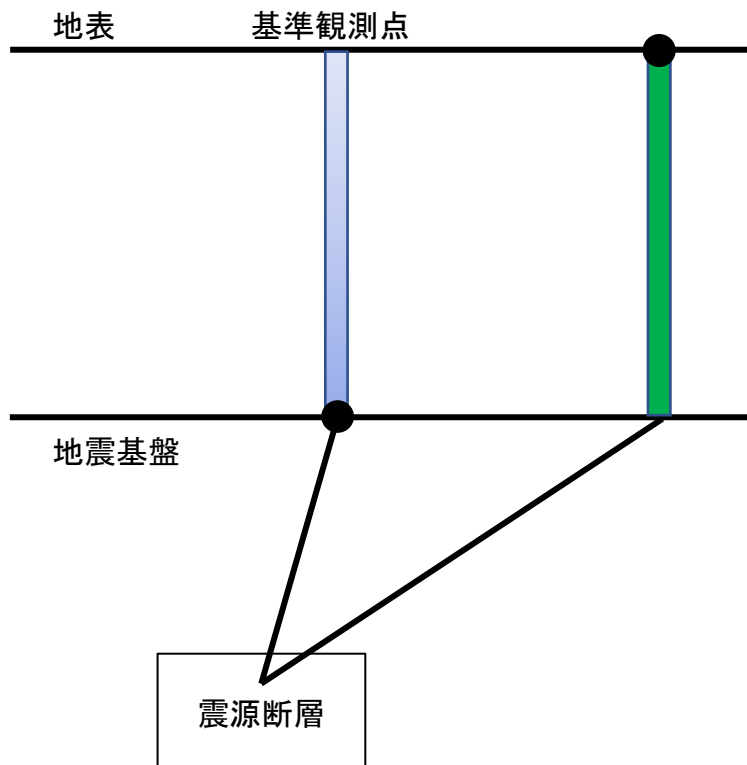
番号	地震名	発生日	Mj	震源深さ (km)
⑲	福岡県中部	2005年5月2日	5.0	11.4
⑳	天草灘	2006年2月4日	5.1	11.6
㉑	天草灘	2012年8月17日	4.9	10.5
㉒	種子島近海	2015年8月17日	5.0	7.4
㉓	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	17.0
㉔	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	9.4
㉕	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	11.4
㉖	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	8.3
㉗	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	6.7
㉘	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	12.5
㉙	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	10.6
㉚	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	6.9
㉛	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	10.9
㉜	大分県中部	2016年4月16日	5.4	5.7
㉝	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	8.6
㉞	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	10.0
㉟	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	6.5
㊱	鹿児島湾	2017年7月11日	5.3	10.2

【参考⑤】友澤ほか（2021）の概要

■ 一般的なスペクトルインバージョン解析

- 一般的なスペクトルインバージョン解析では、観測されたフーリエ振幅スペクトルから震源スペクトル、伝播経路のQ値、地盤増幅率を推定する。
 - 伝播経路のQ値は、全領域均質な減衰構造を仮定。
 - 1つの基準観測点の理論増幅率で拘束。
- フーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ は以下の式でモデル化。

$$F_{mn}(f) = \frac{\pi f^2 R_{\theta\phi} F_s}{\rho \beta^3} S_m(f) \frac{1}{X_{mn}} \exp\left(-\frac{\pi X_{mn} f}{Q(f) \bar{\beta}}\right) G_n(f)$$



推定するパラメータ

- $S_m(f)$: m 地震の震源スペクトル
- $Q(f)$: Q値（全領域均質な減衰構造を仮定）
- $G_n(f)$: n 地点の地盤増幅率

既知パラメータ

- ρ : 震源媒質の密度
- β : 震源媒質のS波速度
- $R_{\theta\phi}$: 震源放射特性係数
- F_s : 自由表面による増幅
- $\bar{\beta}$: 伝播経路の平均S波速度
- X_{mn} : m 地震の n 観測点への震源距離

【参考⑤】友澤ほか（2021）の概要

■ ブロックインバージョン解析

- 友澤ほか(2021)³⁶⁾のブロックインバージョン解析の一般的なスペクトルインバージョン解析との主な相違点は以下の通り。
 - 伝播経路のQ値は、領域を分割・統合し、不均質な減衰構造を仮定。
 - 2つの基準観測点の理論増幅率で拘束。
- フーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ は以下の式でモデル化。

$$F_{mn}(f) = \frac{\pi f^2 R_{\theta\phi} F_s}{\rho \beta^3} S_m(f) \frac{1}{(X_{mn})^\gamma} \prod_{j=1}^J \exp\left(-\frac{\pi x_{mnj} f}{Q_j(f) \bar{\beta}}\right) \sqrt{\frac{\rho \beta}{\rho_b \beta_b}} G_n(f)$$

推定するパラメータ

- $S_m(f)$: m 地震の震源スペクトル
- $Q_j(f)$: j 番目の領域のQ値
- $G_n(f)$: n 地点の地盤増幅率

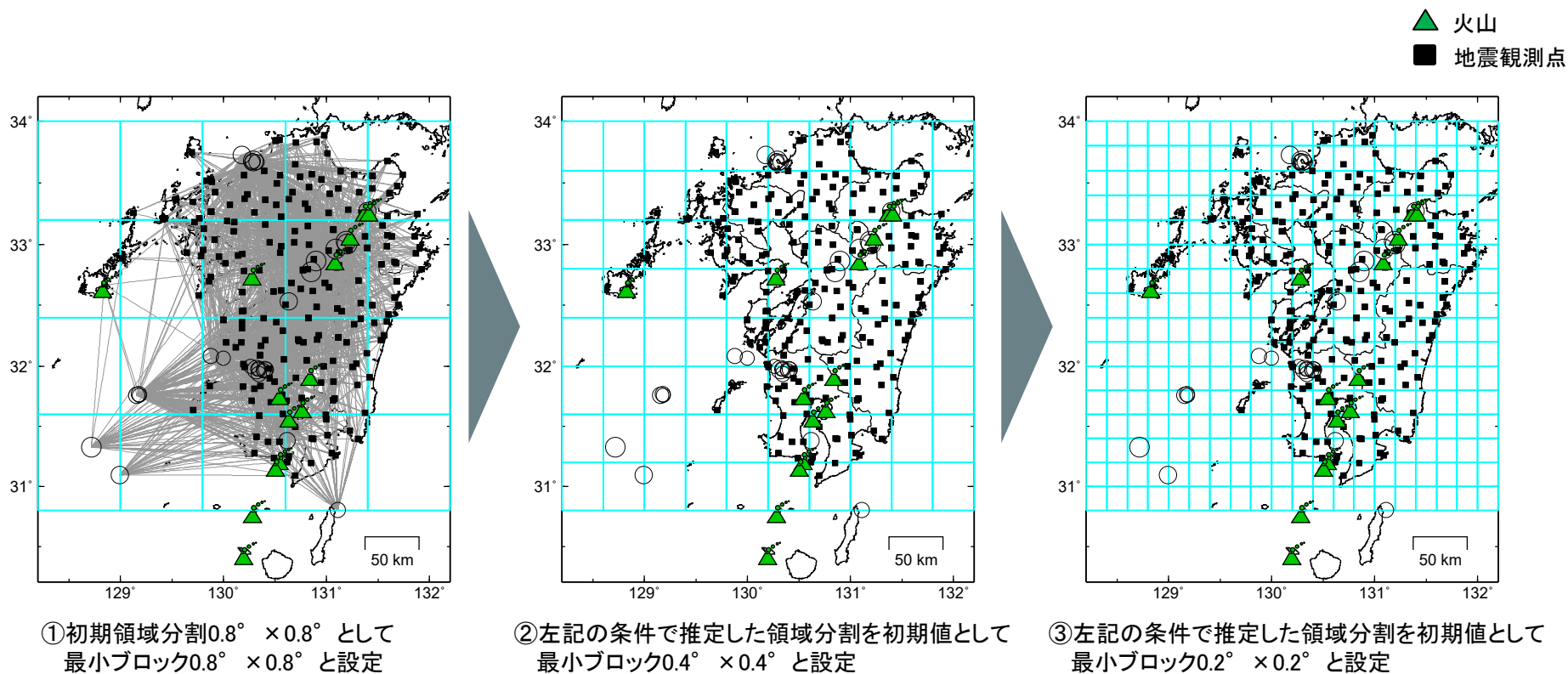
既知パラメータ

- ρ : 震源媒質の密度 (=2.7g/cm³)
- β : 震源媒質のS波速度 (=3.4km/s)
- $R_{\theta\phi}$: 震源放射特性係数 (=0.63)
- F_s : 自由表面による増幅 (=2)
- $\bar{\beta}$: 伝播経路の平均S波速度 (=3.4km/s)
- X_{mn} : m 地震の n 観測点への震源距離
- x_{mnj} : j 番目の領域の伝播距離
- γ : 幾何減衰項
- ρ_b : 地震基盤の密度 (=2.65g/cm³)
- β_b : 地震基盤のS波速度 (=3.2km/s)

【参考⑤】 友澤ほか（2021）の概要

■ 不均質減衰構造の推定

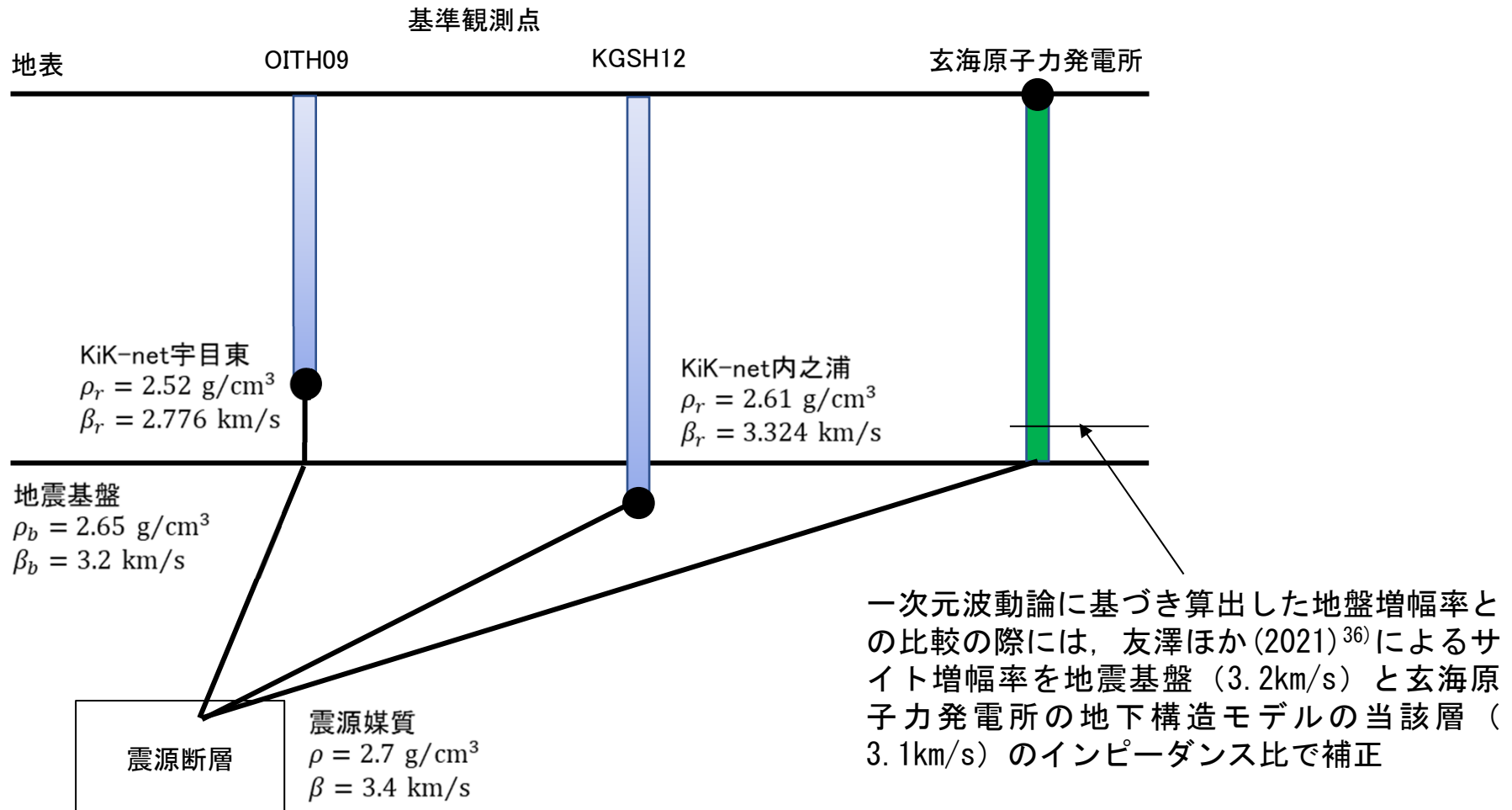
- 領域分割の推定においては、まずは、ブロックサイズを大きく設定し、広域な不均質減衰構造を求め、徐々に最小ブロックサイズを小さくして、より詳細な不均質減衰構造を推定。



【参考⑤】友澤ほか（2021）の概要

■ 基準観測点

- 友澤ほか(2021)³⁶⁾では、KiK-net宇目東(OITH09)とKiK-net内之浦(KGSH12)の2観測点を基準観測点として選定し、その地中観測点位置の理論増幅特性(E+F)/2Eを拘束条件として震源特性とサイト増幅特性のトレードオフを解消。
- 地震基盤から基準観測点の地中観測点への増幅率はインピーダンス比を考慮。



【参考⑤】 友澤ほか（2021）の概要

- 笠松ほか(2014)⁴⁰⁾の最適化地盤モデルによると、基準観測点として選定したKiK-net宇目東(OITH09)とKiK-net内之浦(KGSH12)の地中観測点位置は、地震基盤と見なせるため、基準観測点に適していると判断。
- 笠松ほか(2014)⁴⁰⁾では、観測点の地表／地中の伝達関数を算定し、それに鉛直入射を仮定した一次元波動論を当てはめる逆解析に基づいて最適化を検討。

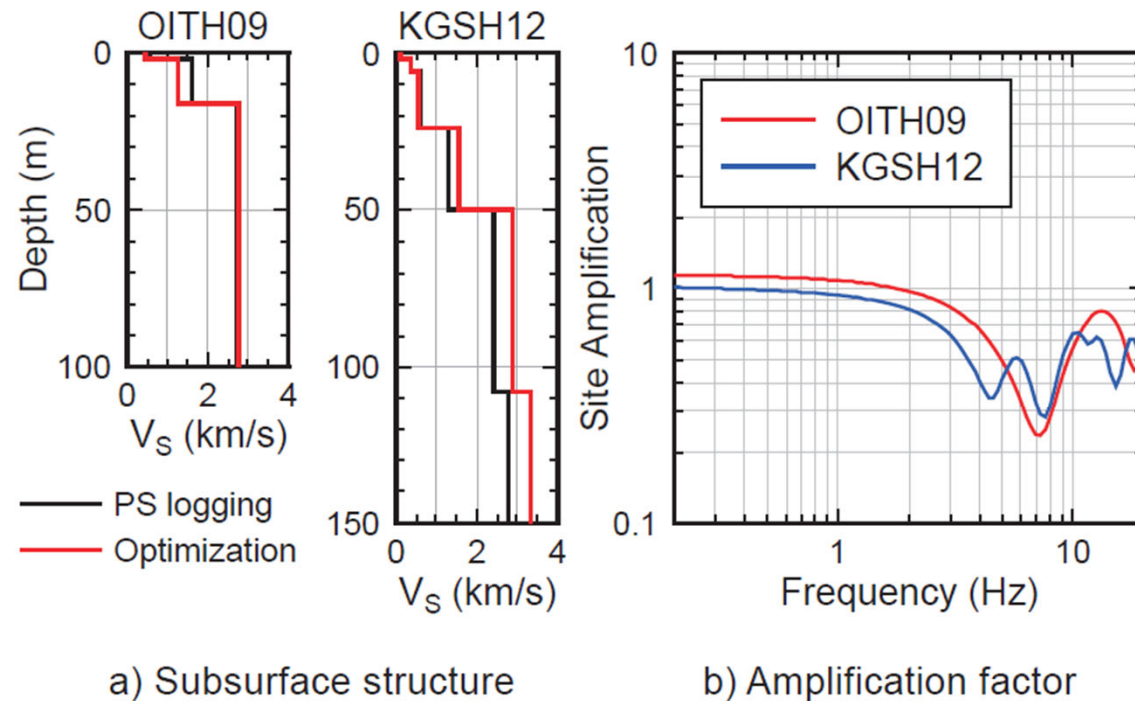


Fig. 2 Subsurface structure of reference stations and theoretical amplification factors as constraint condition

【参考⑤】 友澤ほか（2021）の概要

■ 不均質減衰構造の推定結果

- 伝播経路特性の不均質減衰構造の推定結果によると、鹿児島県の霧島山、桜島、開聞岳周辺、大分県の九重山、湯布院周辺、長崎県の西方で周辺よりも相対的に減衰が大きい領域が推定。

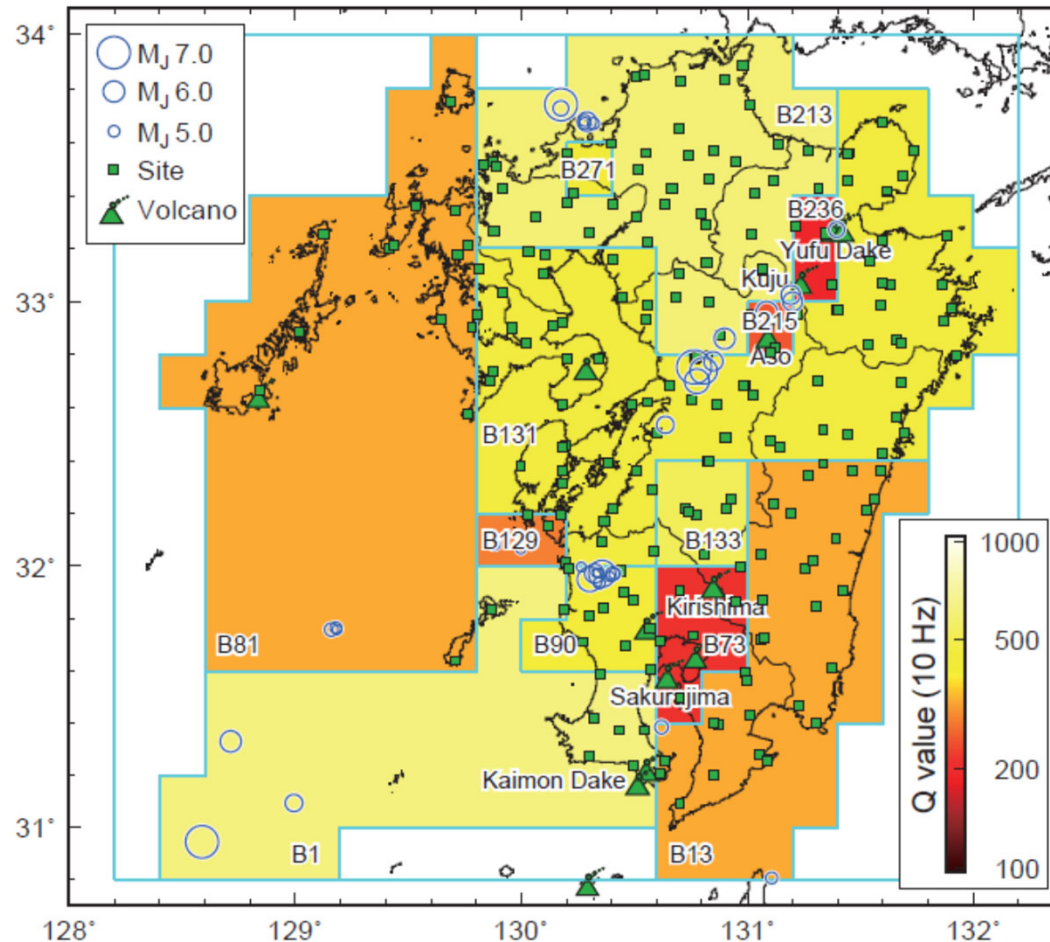


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure

※友澤ほか（2021）³⁶⁾より抜粋

【参考⑤】友澤ほか（2021）の概要

■ サイト増幅率の推定結果

- 岩盤相当の観測点において、推定したサイト増幅率と地盤モデルに基づく理論増幅率を比較した結果、均質な減衰構造を仮定した場合よりも不均質減衰構造を仮定した場合の残差が小さく、理論増幅率との対応がよいことを確認。

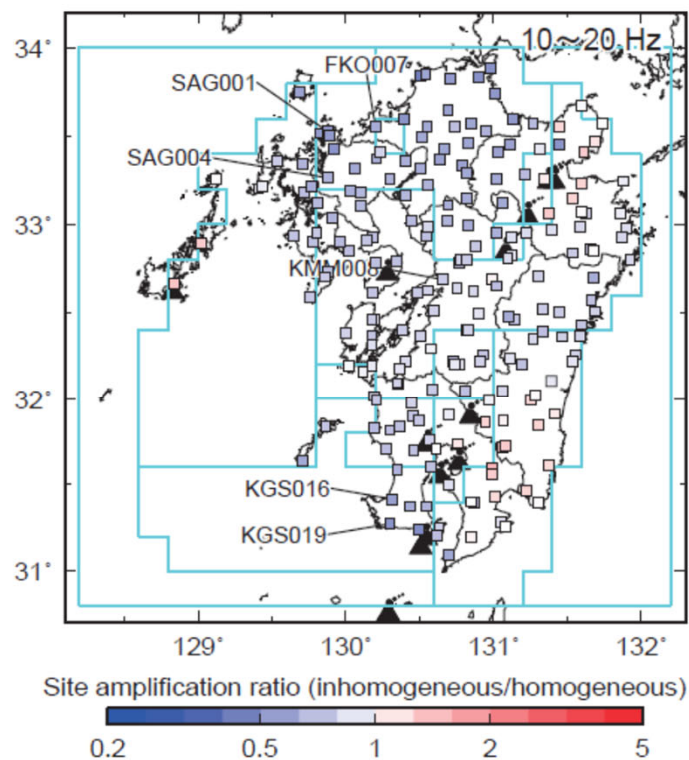


Fig.13 Spatial distribution of site amplification ratio

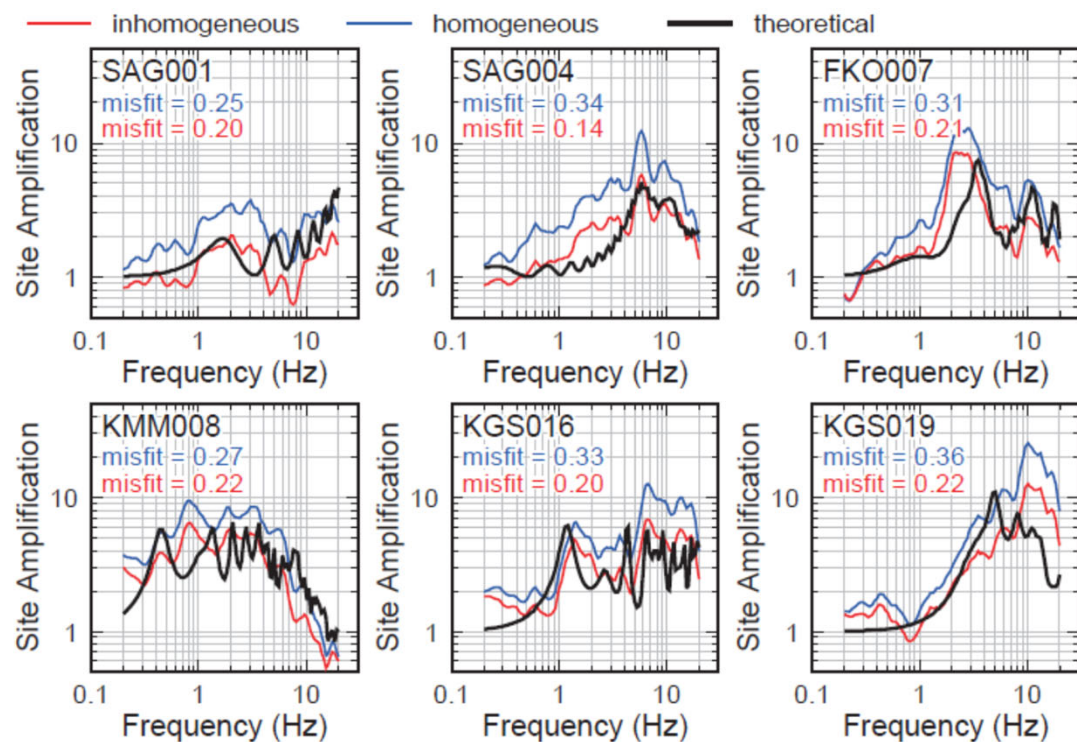


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

【参考⑤】 友澤ほか（2021）の概要

■ 回帰残差の比較

- 全領域で均質な減衰構造を仮定してスペクトルインバージョン解析を行った場合と、ブロックインバージョン解析により減衰構造に不均質性を考慮した場合の回帰残差の標準偏差を比較。
- 伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することにより、特に高周波数側でばらつきの値が最大15%低減。

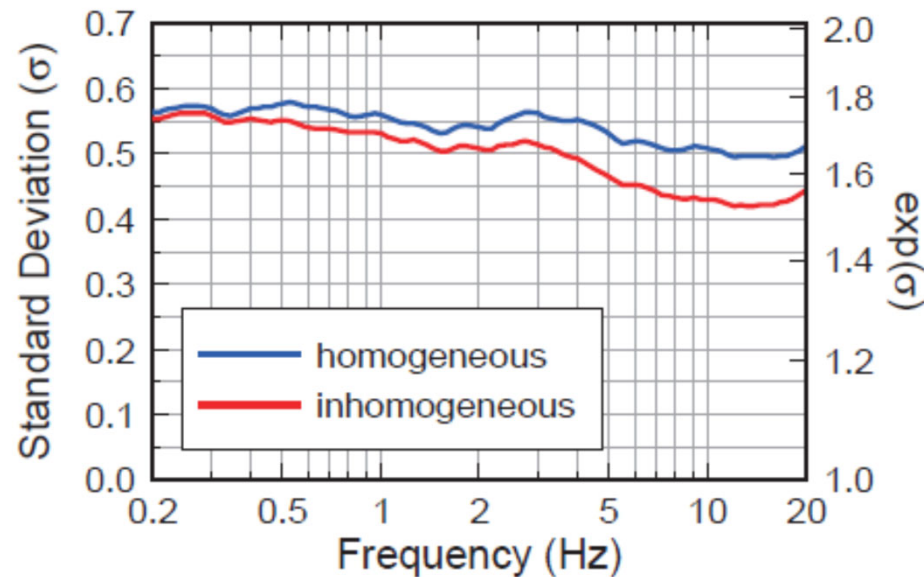


Fig.15 Comparison of standard deviation

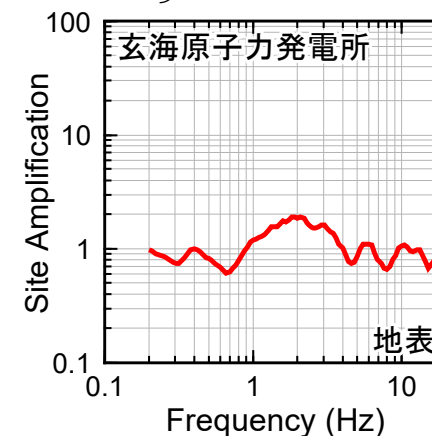
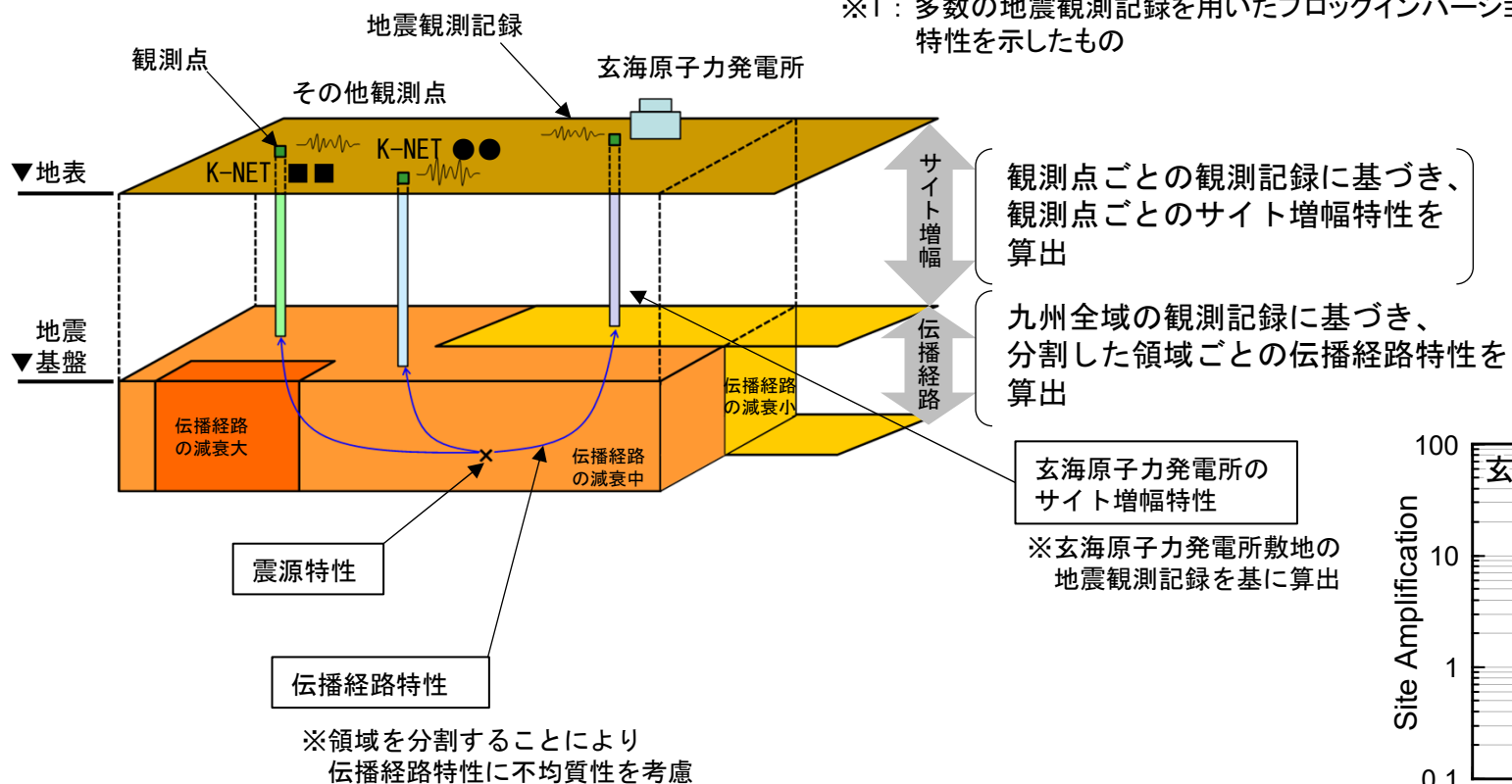
【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認

【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認

■ 友澤ほか(2021)³⁶⁾に基づく経験的地盤増幅率を用いた検討

- 参考として、より一層の説明性の向上を目的に、「経験的地盤増幅率による検討」により、最深部地震計 (EL. -90m) からEL. -200mまでの範囲で設定した地盤減衰 ($Q=12.5$) に矛盾がないことを確認する。
- 玄海原子力発電所の経験的地盤増幅率は、友澤ほか(2021)³⁶⁾によるサイト増幅率^{※1}を用いる。
 - 友澤ほか(2021)³⁶⁾では、玄海原子力発電所敷地の地震観測記録を基に、地震基盤から地表までのサイト固有の増幅率を算出。
 - 友澤ほか(2021)³⁶⁾のサイト増幅率は、伝播経路特性に不均質性を考慮したことで高い精度で算出された玄海原子力発電所敷地の地盤増幅特性である。

※1：多数の地震観測記録を用いたブロックインバージョン解析により算出した平均的な特性を示したもの

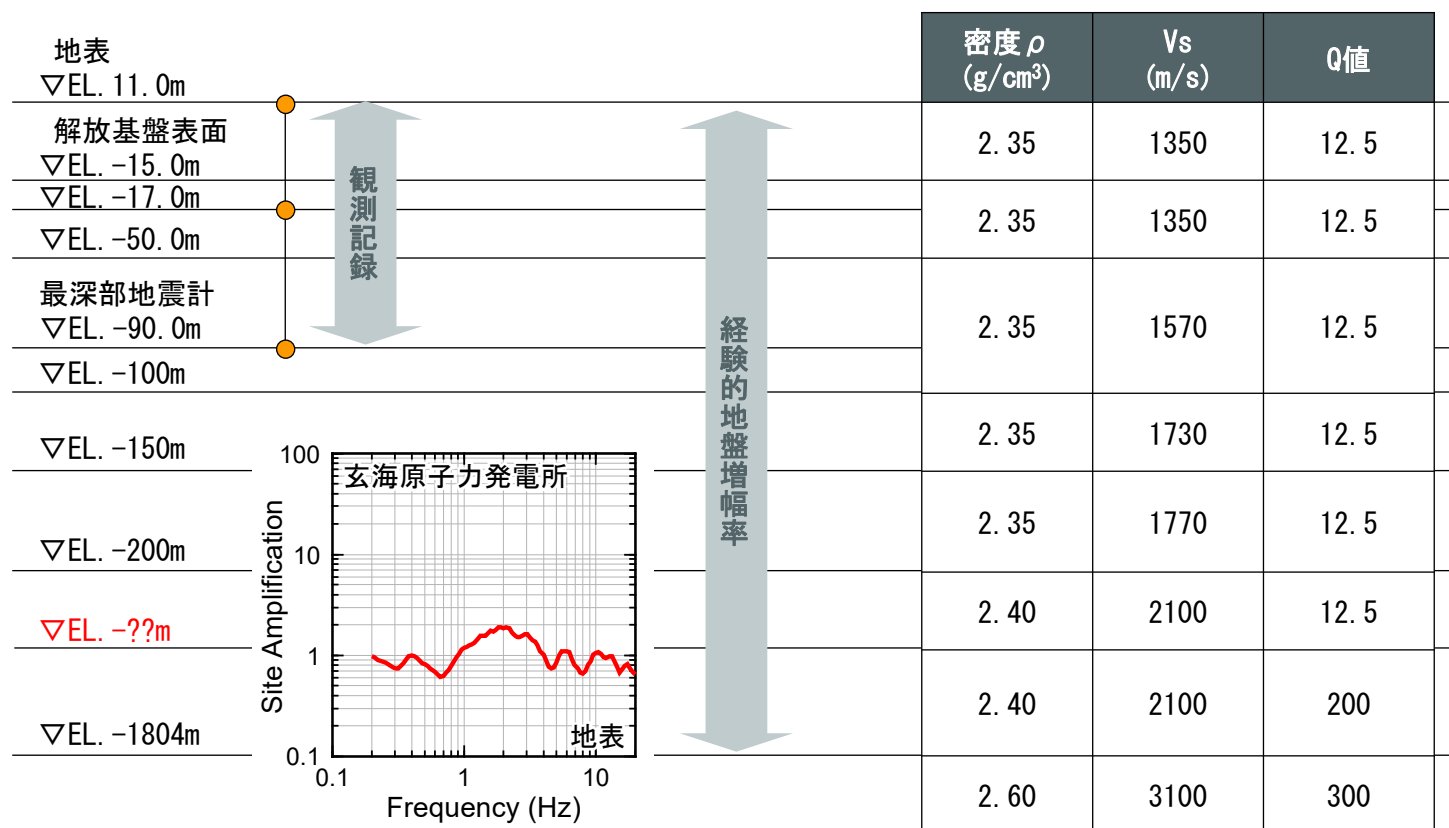


友澤ほか(2021)³⁶⁾による震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性のイメージ

【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認

■ 経験的地盤増幅率を用いたQ=12.5層下面深度の探索

- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）について、より一層の説明性の向上を目的として、玄海原子力発電所の経験的地盤増幅率を用いて、Q=12.5の層下面深度を変数とした検討を実施する。
- 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）は、2.2.1項で設定したQ=12.5に設定する。
- 経験的地盤増幅率と理論増幅率の残差が最小となるQ=12.5の層下面深度を探索する。



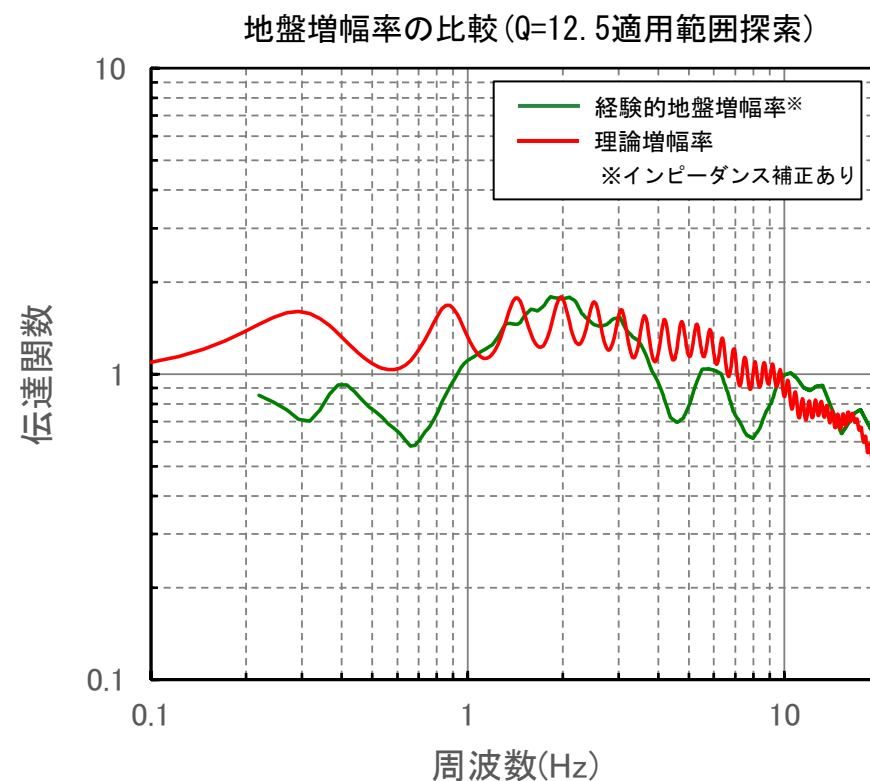
【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認

■ Q=12.5層下面深度の探索結果

- 探索の結果、残差が最小となるQ=12.5の層下面深度はEL. -260m。

- 参考として、より一層の説明性の向上を目的に、「経験的地盤増幅率による検討」により、最深部地震計（EL. -90m）からEL. -200mまでの範囲で設定した地盤減衰（Q=12.5）に矛盾がないことを確認した。

地表 ▽EL. 11.0m	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Q値
解放基盤表面 ▽EL. -15.0m	2.35	1350	12.5
▽EL. -17.0m			
▽EL. -50.0m			
最深部地震計 ▽EL. -90.0m	2.35	1570	12.5
▽EL. -100m	2.35	1730	12.5
▽EL. -150m			
▽EL. -200m			
▽EL. -260m	2.40	2100	12.5
	2.40	2100	200
▽EL. -1804m	2.60	3100	300

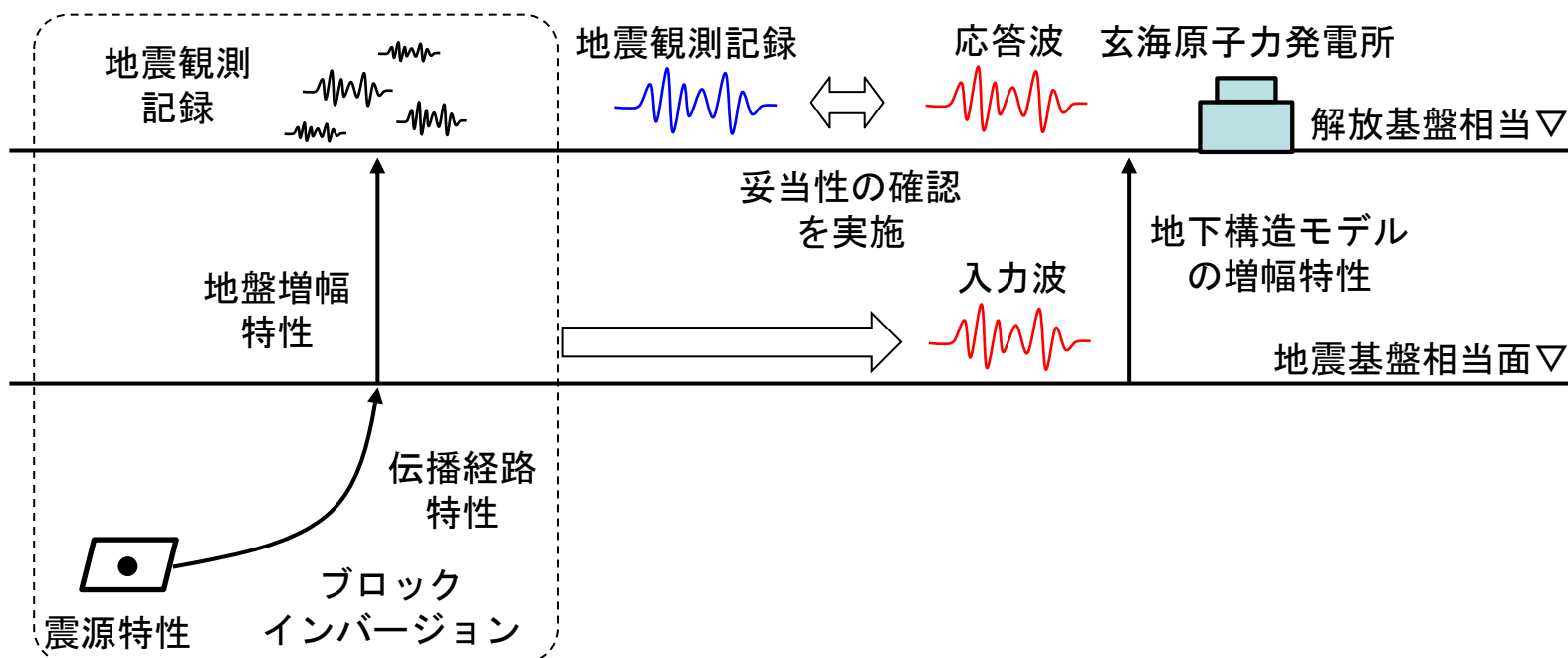


【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 設定した地下構造モデルのブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

- 深部を含む全体の地下構造モデルについて、より一層の説明性の向上を目的として、友澤ほか（2021）³⁶⁾によるブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認により、深部を含む全体を見ても、観測事実に基づいて浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを確認する。
- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認する。
 - ブロックインバージョン結果を用いた地震波は、地震基盤相当面においてブロックインバージョン結果を用いて作成した地震波を入力波として、「2.3 地下構造モデルの設定」において設定した地下構造モデルを用いて次元波動論に基づいて算出する。



ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認のイメージ

設定した地下構造モデル

解放基盤表面 ▽EL. -15m	Vs	Q値
▽EL. -50m	1350	12.5
▽EL. -100m	1570	12.5
▽EL. -150m	1730	12.5
▽EL. -200m	1770	12.5
地震基盤相当面 ▽EL. -1804m	2100	200
	3100	300

【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ ブロックインバージョン結果を用いた地震波作成

- 地震観測記録の応答スペクトルによる確認において対象とした19地震を対象に、深部を含む全体の地下構造モデルについて、より一層の説明性の向上を目的として、深部を含む全体を見ても、浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを確認する。
- ブロックインバージョンは、観測記録に対する、震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性を掛け合わせた計算結果の残差が最小となるよう、3つの特性を分離する手法であり、個別の観測記録との残差が存在する（参考⑧、⑨）。これを踏まえ、(1)に加え(2)に基づき地震波を作成する。

(1) 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波（257～263頁）

- 個別の震源特性を用いるため、ブロックインバージョンで検討されている地震にしか適用できない。
- 震源特性に伝播経路特性を乗じるため、破壊伝播効果などの残差は含まれない。
- 残差の大小関係により、作成した地震波が過小もしくは過大評価されるため、更に、対象とした19地震から、残差が1.0に近い適切な地震を選定する。

(2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波（264～275頁）

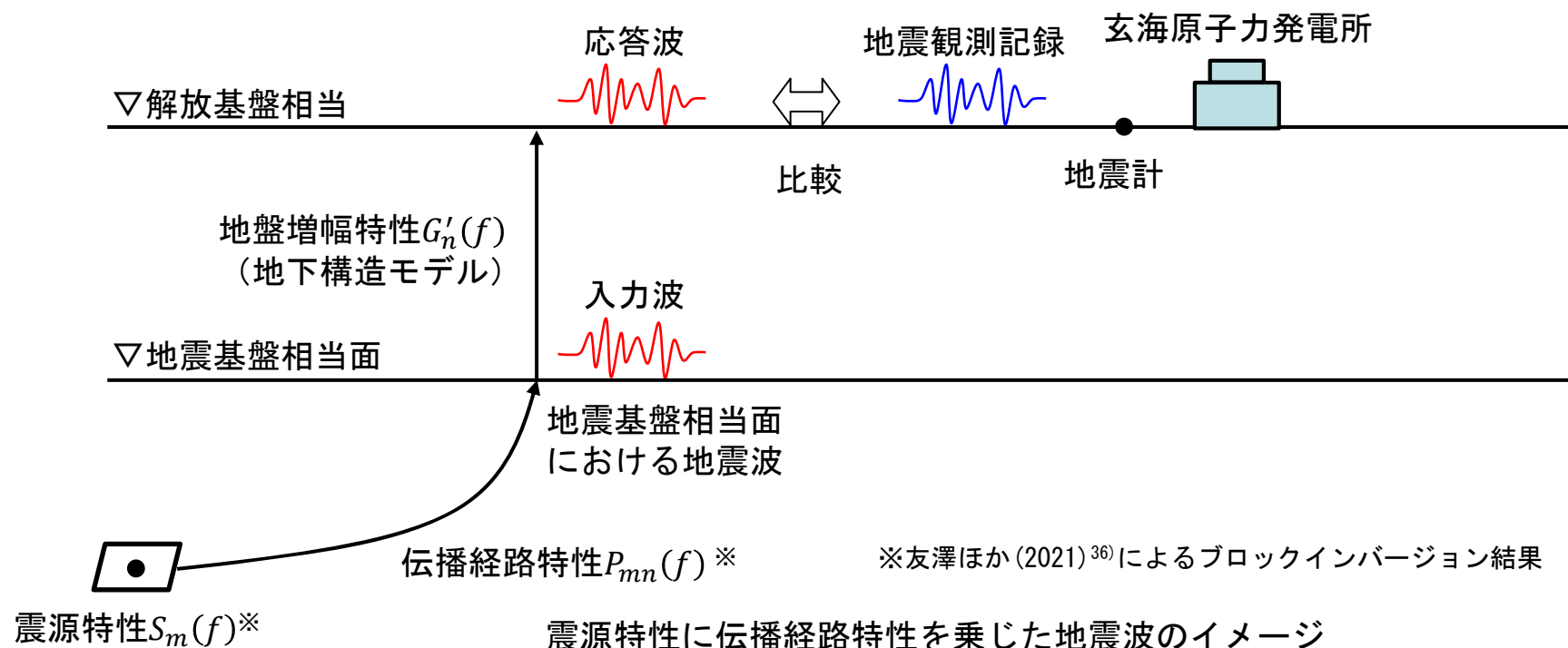
- どの地震に対しても1つの地盤増幅特性を用いるため、観測記録があれば、どの地震でも適用できる。
- 観測記録の地盤増幅特性を用いるため、破壊伝播効果などの残差が含まれる。
- 19地震全てを対象とする。

【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

(1) 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認

- 友澤ほか(2021)³⁶⁾によるブロックインバージョン結果における震源特性に伝播経路特性を乗じて、地震基盤相当面における地震波を作成する。
- 地震基盤相当面における地震波（上下）は、地震基盤相当面における地震波（水平）に、地震観測記録を基に算出した上下成分の水平成分に対する比率による補正を実施し、作成する。
- 作成した地震波を地震基盤相当面に入力し、地下構造モデルを用いて一次元波動論により応答波を算出。
- 算出した応答波と地震観測記録を比較して、浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを確認する。
- 算出した応答波のフーリエ振幅スペクトル $C_{mn}(f)$ は下式の通りであり、残差 $E_{mn}(f)$ が含まれない。

$$C_{mn}(f) = S_m(f)P_{mn}(f)G'_n(f) \quad \text{※}m\text{は地震に対する添え字、}n\text{は観測点に関する添え字}$$



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 検討対象地震の選定方法

- 本方法で用いる震源特性は、ブロックインバージョンの検討対象地震の震源特性を用いるため、地震観測記録の応答スペクトルによる確認において対象とした19地震のうち15地震から選定する。
- 本方法では、作成する地震波が過小もしくは過大評価にならないよう、更に上記15地震から残差が1.0に近い地震を対象とする。
- 算出した応答波のフーリエ振幅スペクトルと地震観測記録のフーリエ振幅スペクトルの適合度をAnderson(2004)¹³⁾による指標 (GOF : Goodness Of Fit) で評価し、GOFがan excellent fitとなる地震のうち、全周期帯に亘って残差が1.0から大きく乖離していない地震を対象地震として選定する。

本方法で対象とした地震諸元 (計15地震)

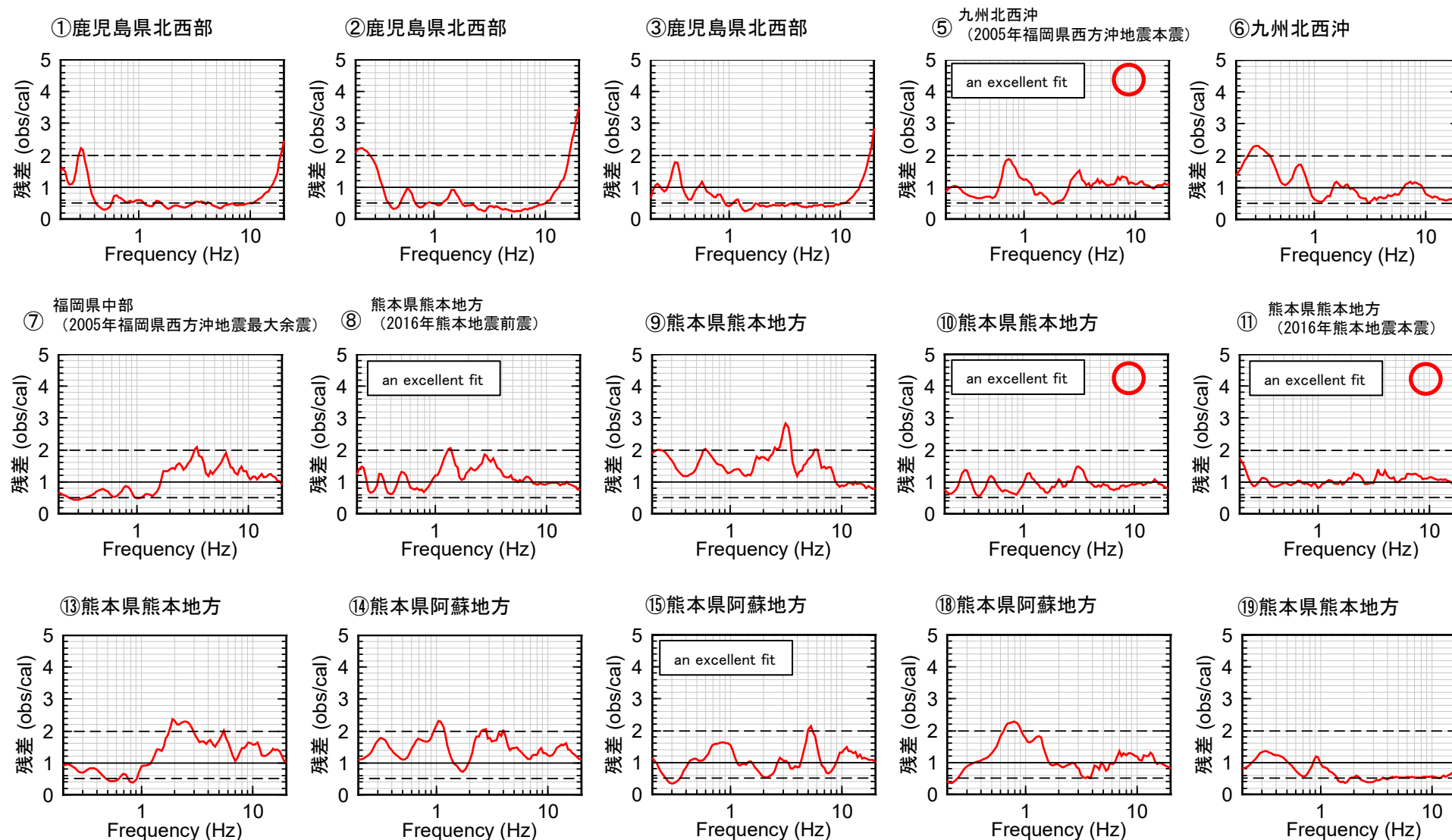
番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 検討対象地震の選定結果

- 全15地震のうち、GOFがan excellent fitとなる地震は5地震。
- このうち、全周期帯に亘って残差が1.0から大きく乖離していない地震として3地震を選定。

選定した3地震の図に
○印を記載

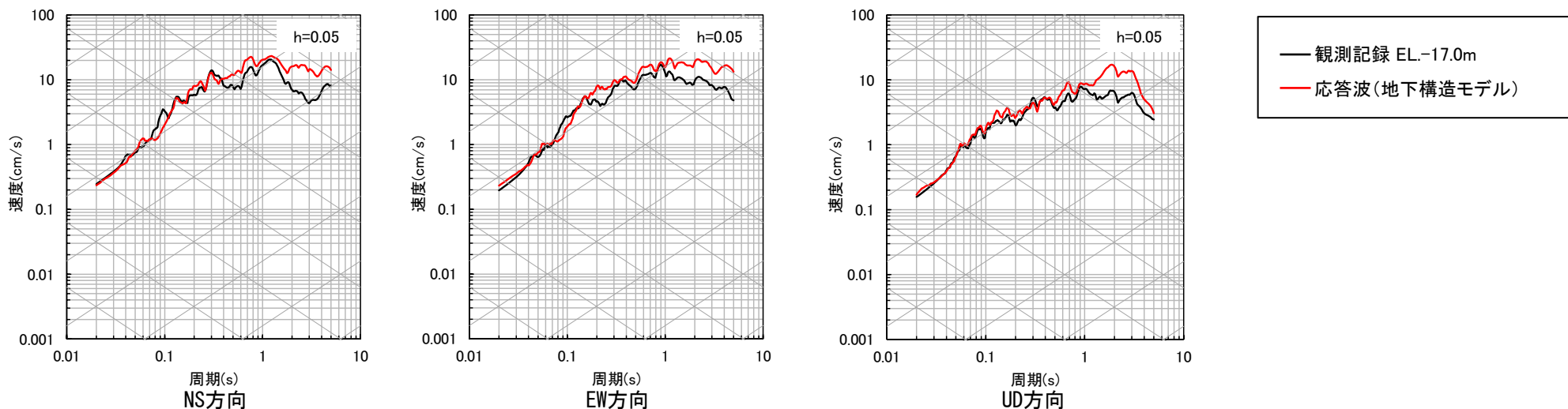


【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/2)

- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。(260～261頁参照)

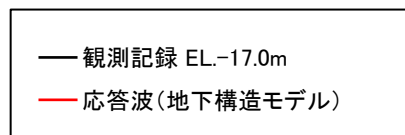
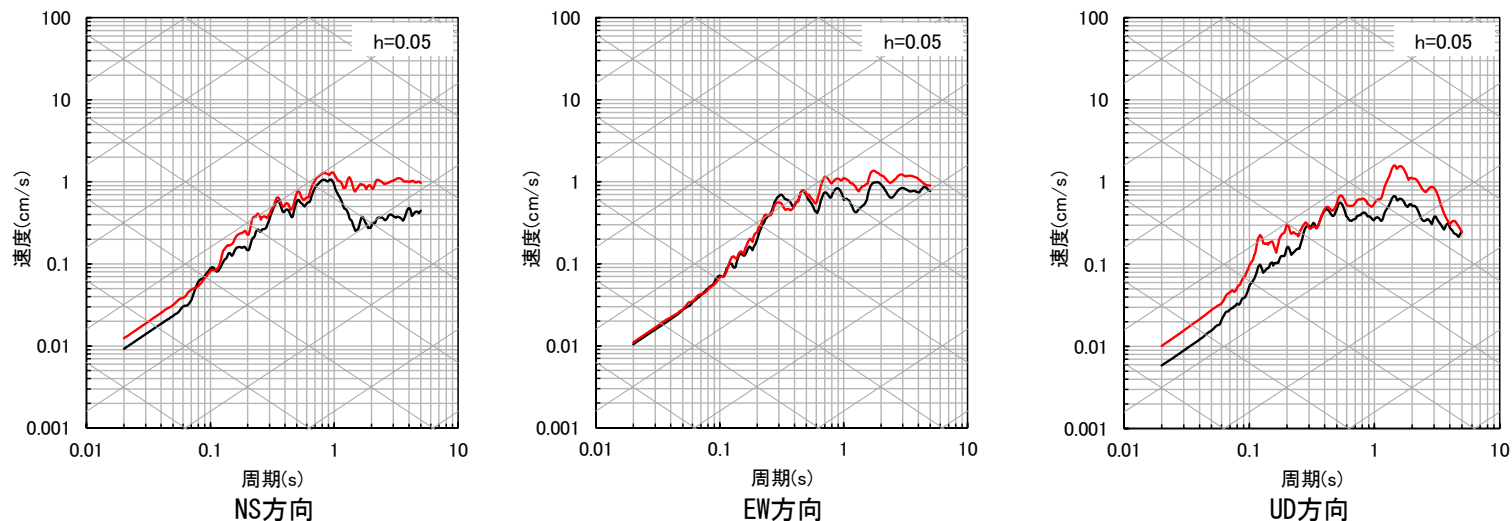
⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



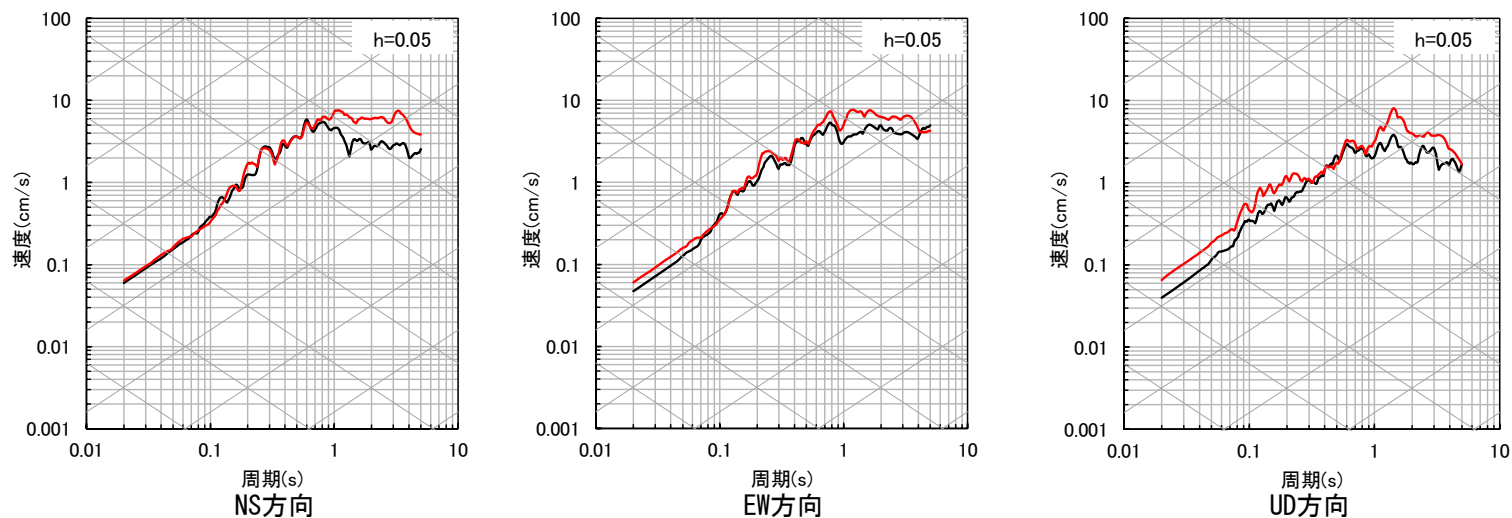
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/2)

⑩ 熊本県熊本地方



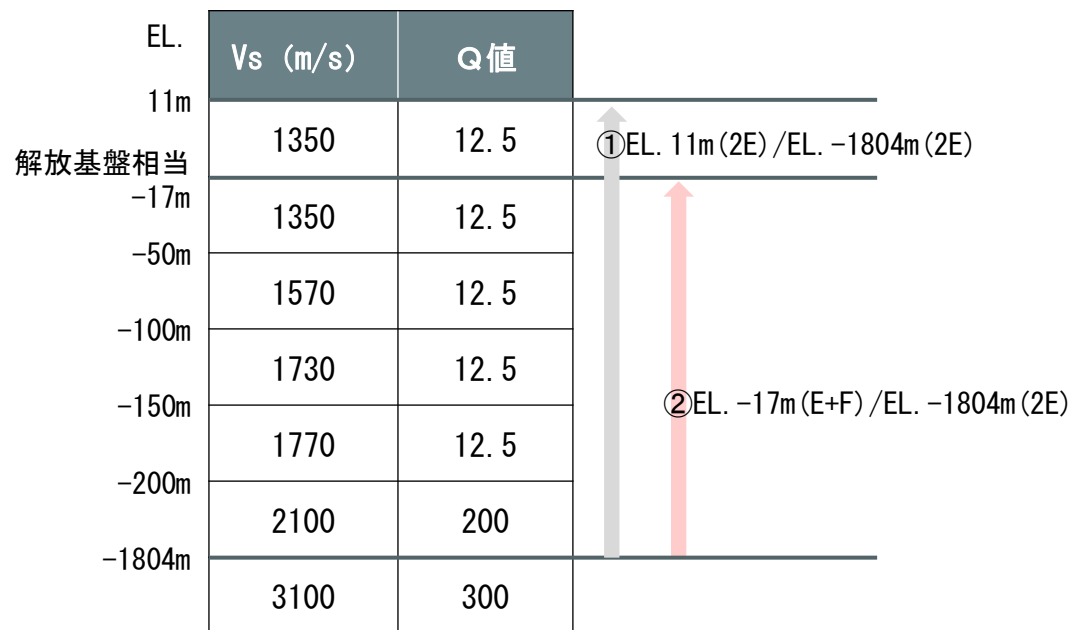
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



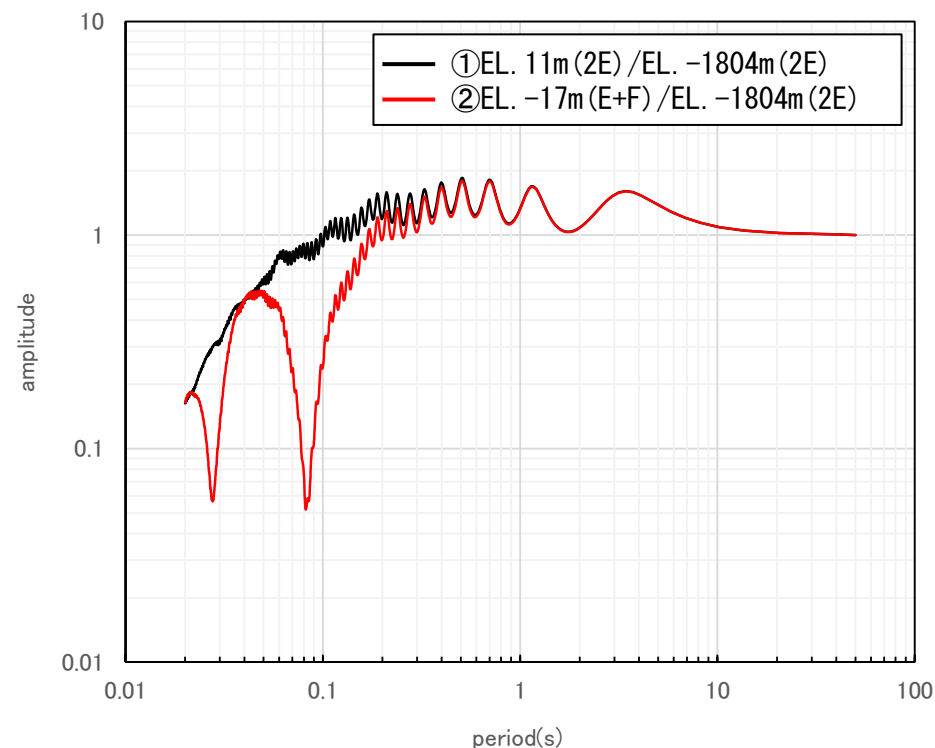
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 理論伝達関数（水平方向）の比較

- 256～261頁における応答スペクトルの比較では、解放基盤相当（EL. -17m）のE+F波で比較しているため、表層からの反射波の影響が含まれる。
- 反射波の影響を確認するため、①EL. -1804m（2E）と地表（2E）の理論伝達関数、②EL. -1804m（2E）と解放基盤相当（E+F）の理論伝達関数を比較すると、②では0.1秒付近に反射波による大きなトラフが存在するが、①では存在しない。
- 以上より、解放基盤相当の応答波（E+F）は、反射波の影響による0.1秒の大きなトラフにより、0.1秒付近において地震波が増幅されず、応答波（E+F）が観測記録（E+F）を下回る結果になったと考えられるため、次頁で反射波の影響を受けていない地表において算出した応答波（2E）で比較する。



※解放基盤表面 (EL. -15.0m) 上に層を追加

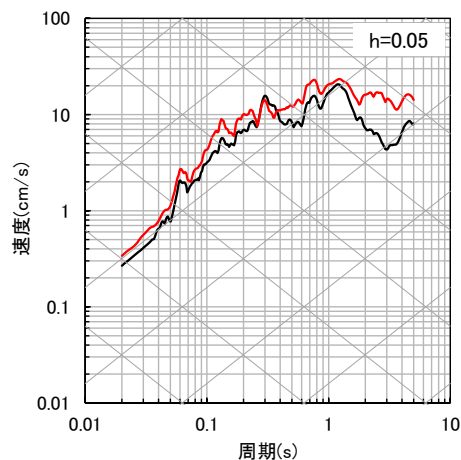
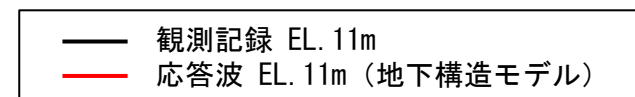


理論伝達関数

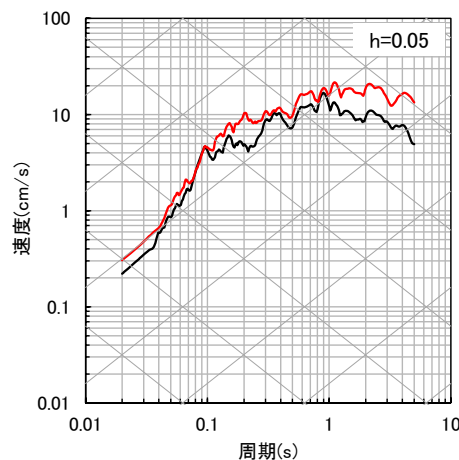
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 地表面における応答スペクトル (2E) の比較

- ⑤九州北西沖の地震 (2005年福岡県西方沖地震本震) および⑪熊本県熊本地方の地震 (2016年熊本地震本震) を用いて、反射波の影響を受けていない地表面 (EL. 11m) において算出した応答波 (2E) と観測記録 (2E) を比較。
- 比較の結果、地下構造モデルを用いた応答波は、観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。

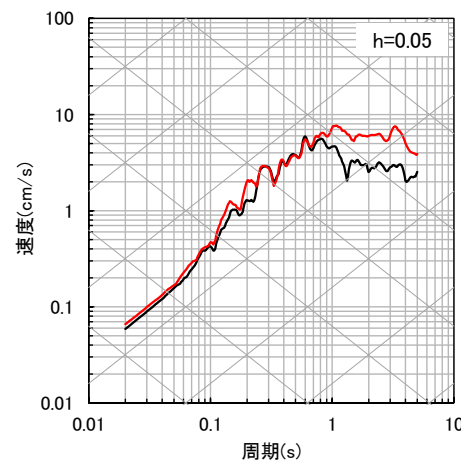


NS方向

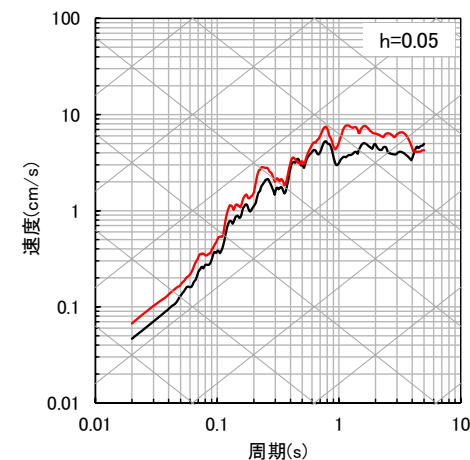


EW方向

⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



NS方向



EW方向

⑪熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)

【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

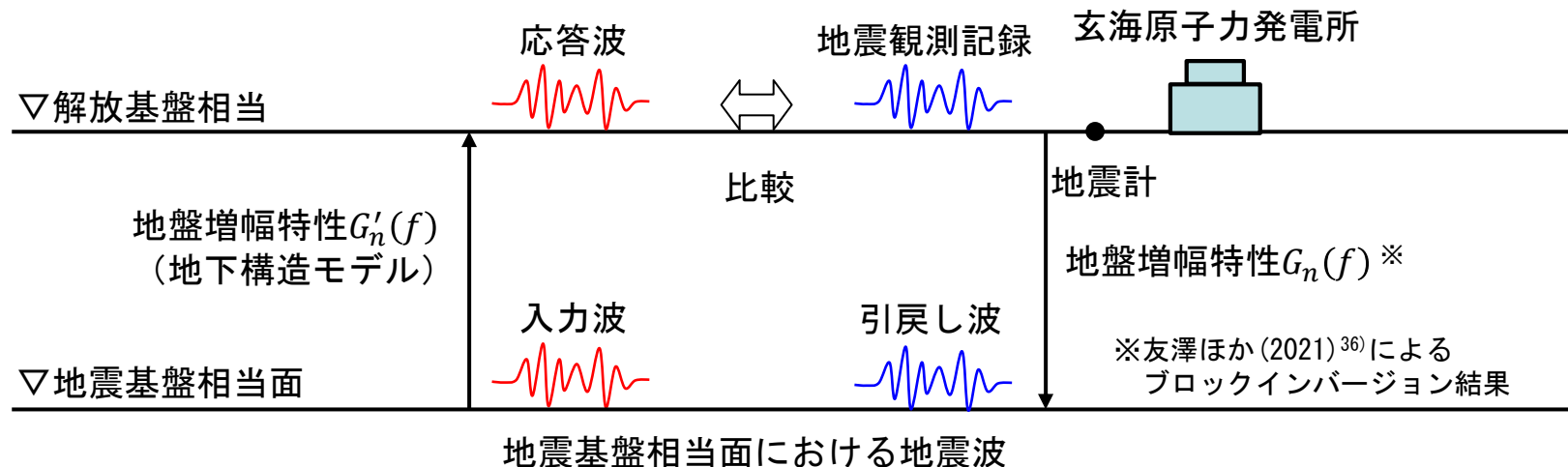
(2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波

- 地震観測記録（地表）を、友澤ほか(2021)³⁶⁾によるブロックインバージョン結果における地盤増幅特性で除して、地震基盤相当面における地震波を作成する。
- 地震基盤相当面における地震波（上下）は、地震基盤相当面における地震波（水平）に、地震観測記録を基に算出した上下成分の水平成分に対する比率による補正を実施し、作成する。
- 作成した地震波を地震基盤相当面に入力し、地下構造モデルを用いて次元波動論により応答波を算出する。
- 算出した応答波と地震観測記録を比較して、浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを確認する。
- 算出した応答波のフーリエ振幅スペクトル $C'_{mn}(f)$ は下式の通りであり、残差 $E_{mn}(f)$ が含まれる。

$$C'_{mn}(f) = \frac{O_{mn}(f)}{G_n(f)} * G'_n(f) = \frac{F_{mn}(f)E_{mn}(f)}{G_n(f)} * G'_n(f) = \frac{S_m(f)P_{mn}(f)G_n(f)E_{mn}(f)}{G_n(f)} * G'_n(f)$$

$$= S_m(f)P_{mn}(f)G'_n(f)E_{mn}(f)$$

※ m は地震に対する添え字、 n は観測点に関する添え字



地盤増幅特性により引き戻した地震波のイメージ

【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 検討対象地震

- 本方法では、どの地震に対しても1つの地盤増幅特性を用いることから、観測記録があれば地震波の作成は可能であるため、網羅性の観点から、地震観測記録の応答スペクトルによる確認において対象とした19地震を対象とする。

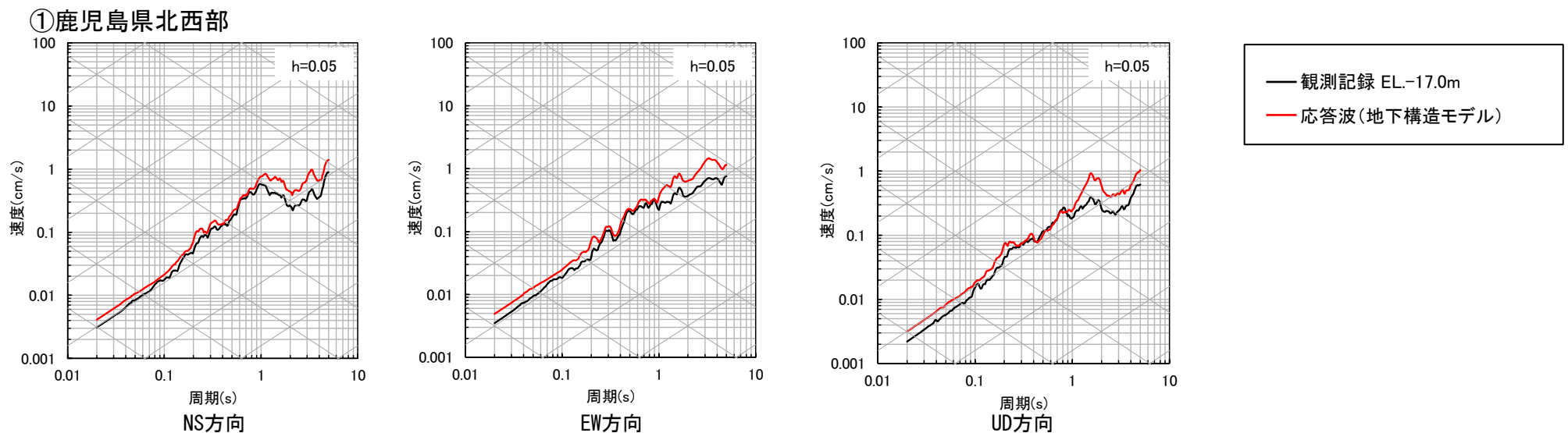
本方法で対象とした地震諸元（計19地震）

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

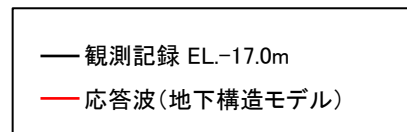
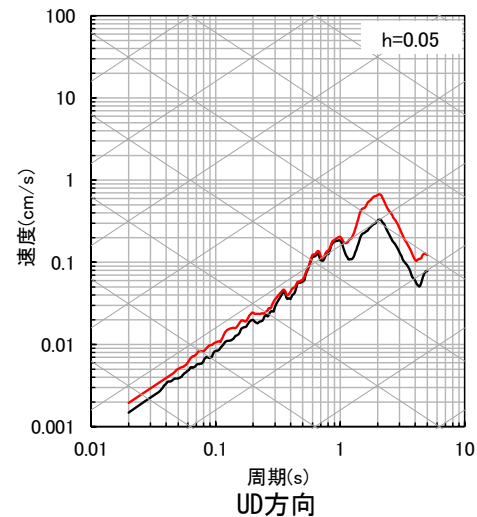
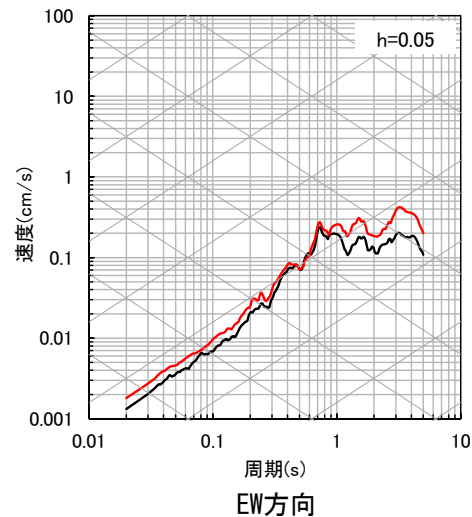
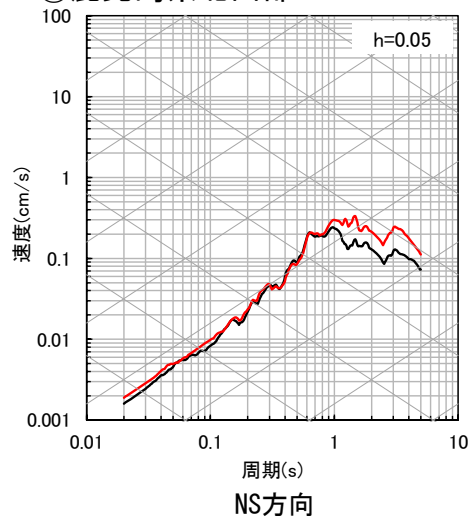
- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。(266～275頁参照)



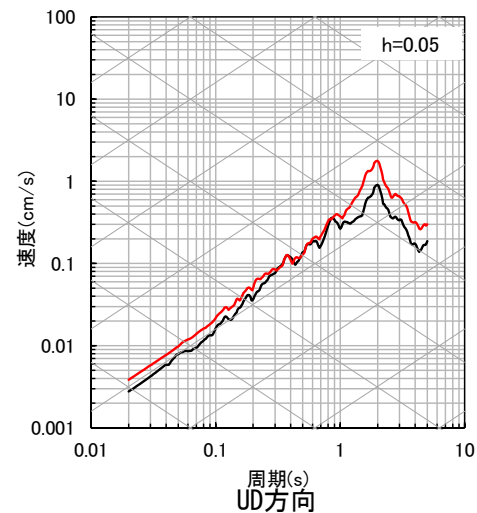
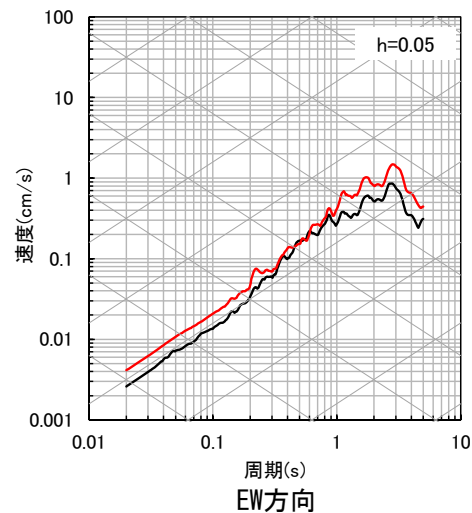
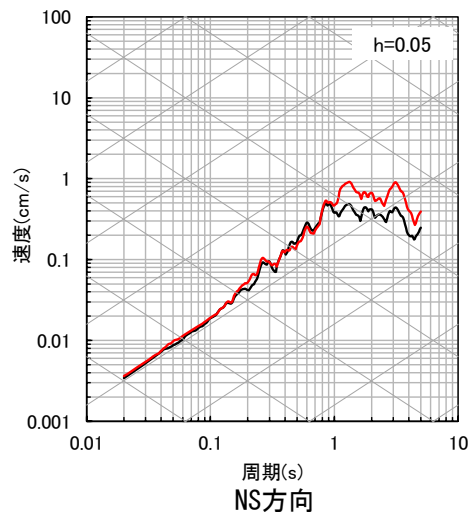
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

②鹿児島県北西部



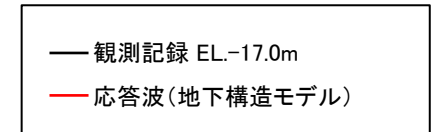
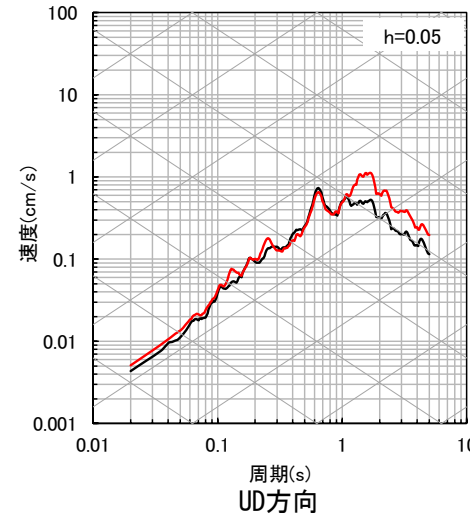
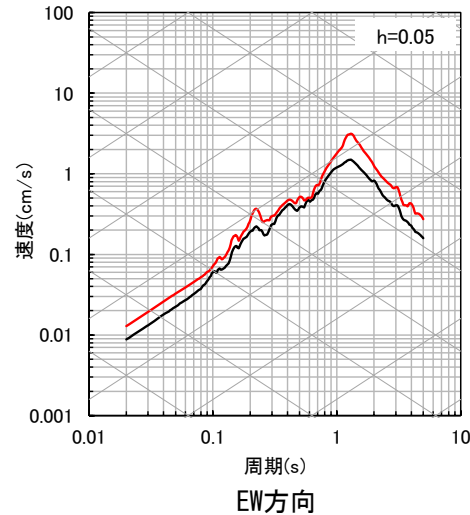
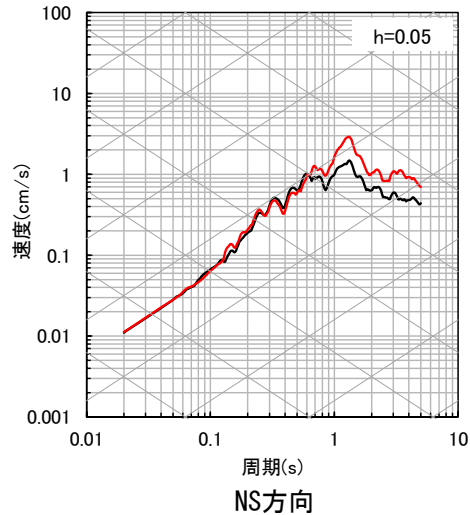
③鹿児島県北西部



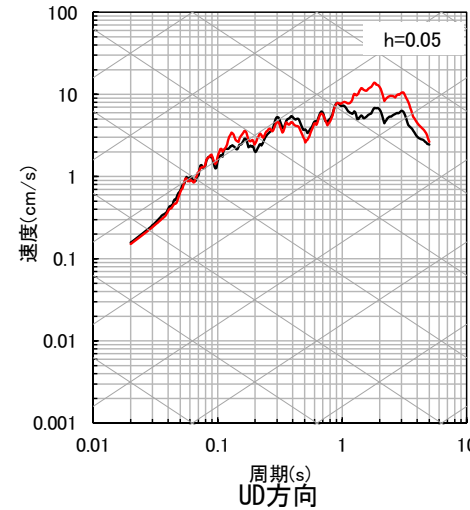
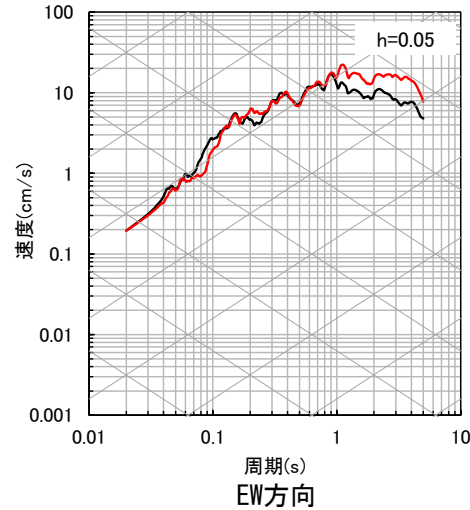
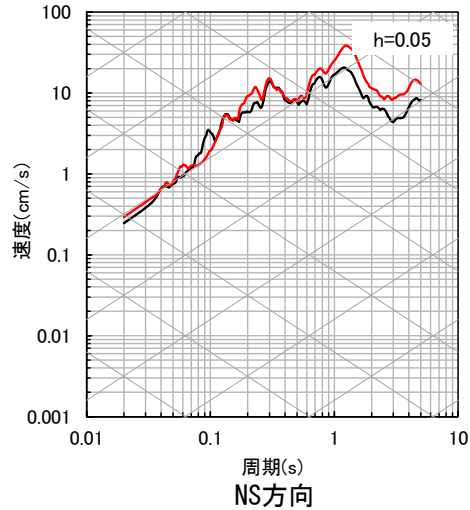
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

④山口県



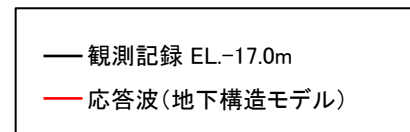
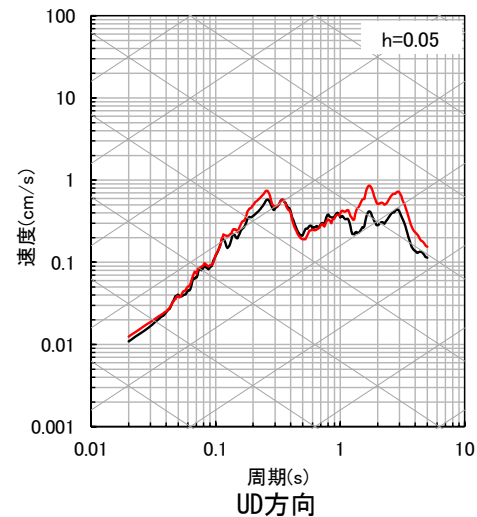
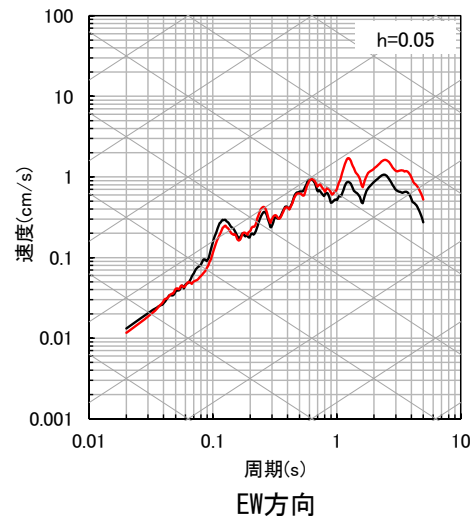
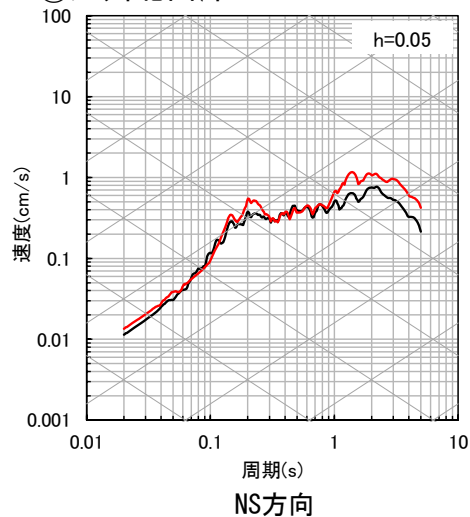
⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



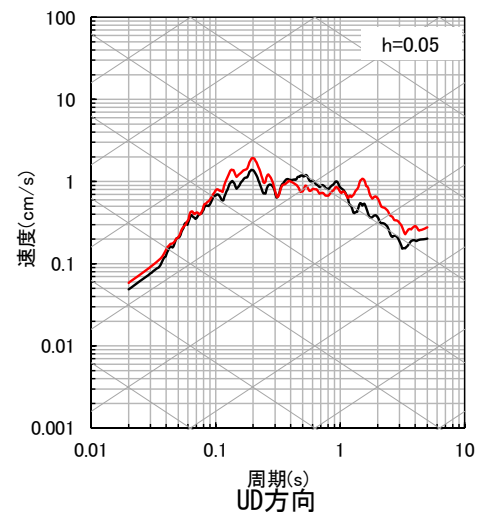
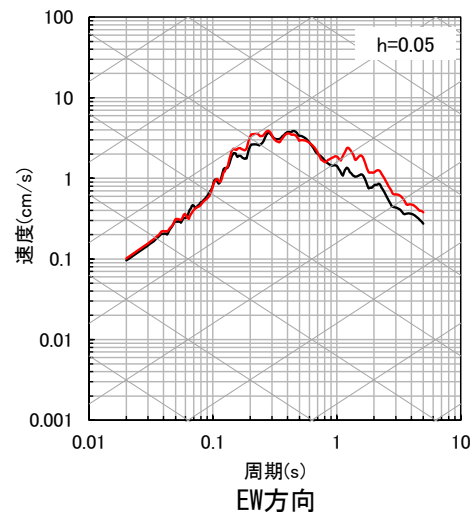
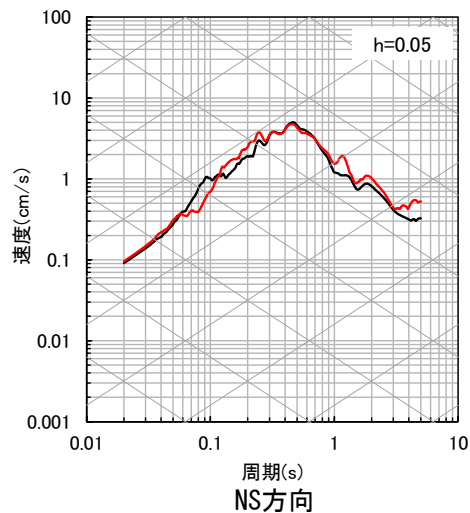
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑥九州北西沖



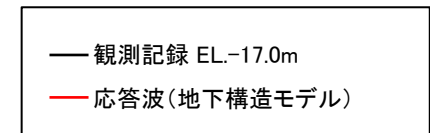
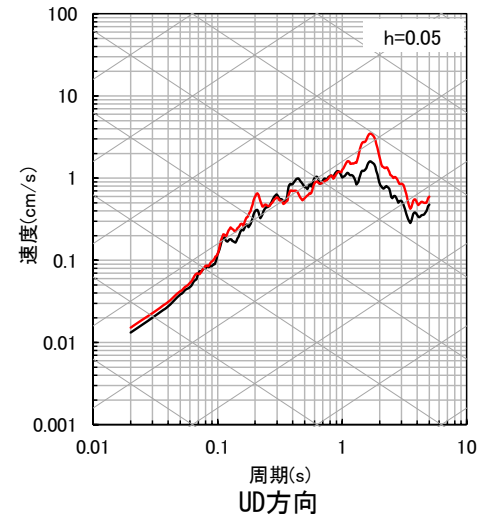
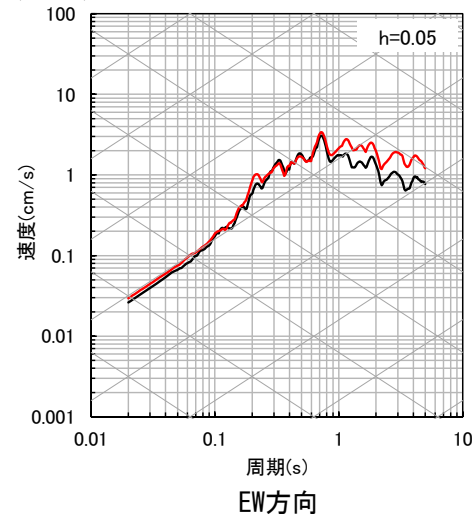
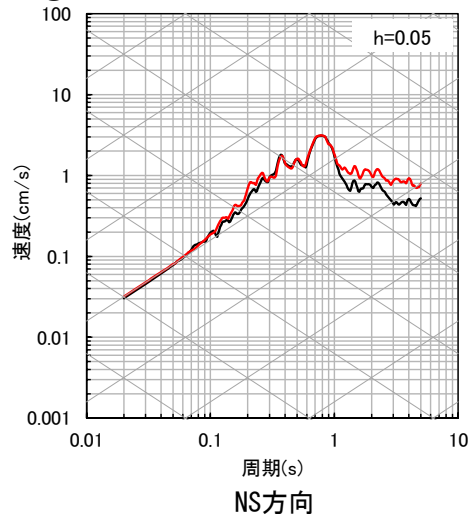
⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



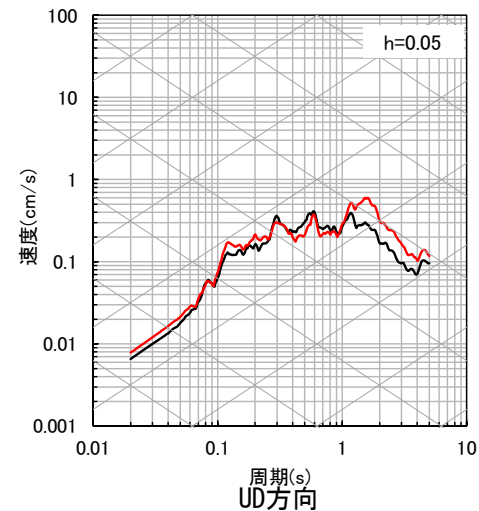
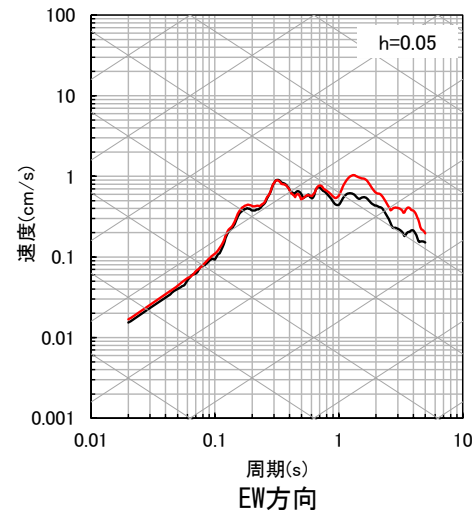
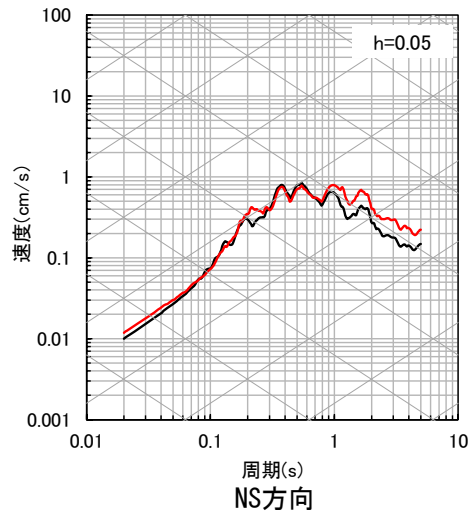
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



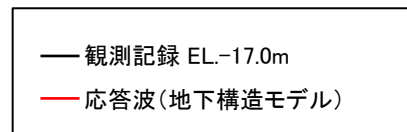
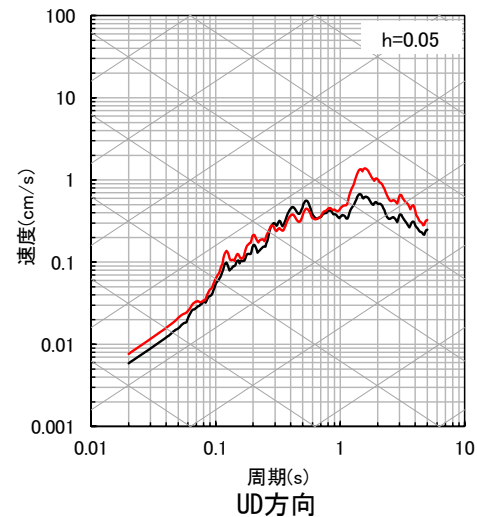
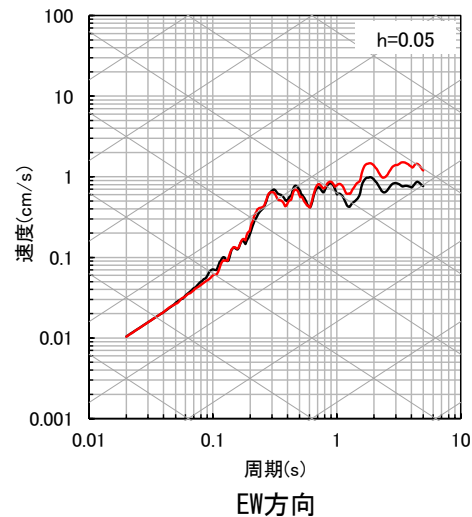
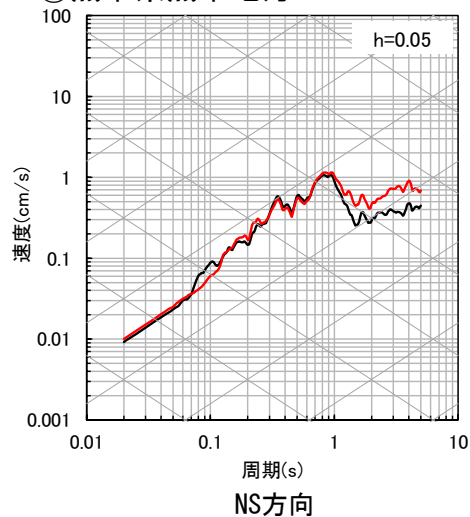
⑨ 熊本県熊本地方



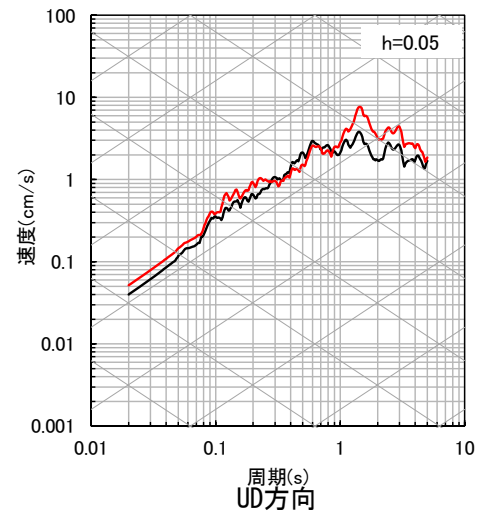
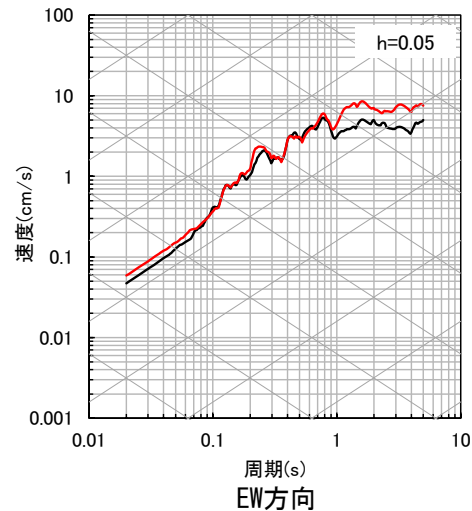
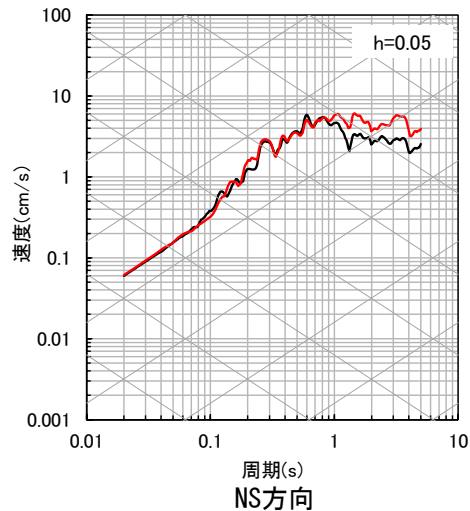
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑩ 熊本県熊本地方



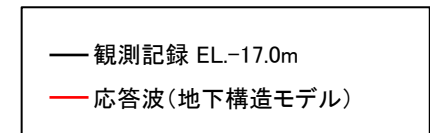
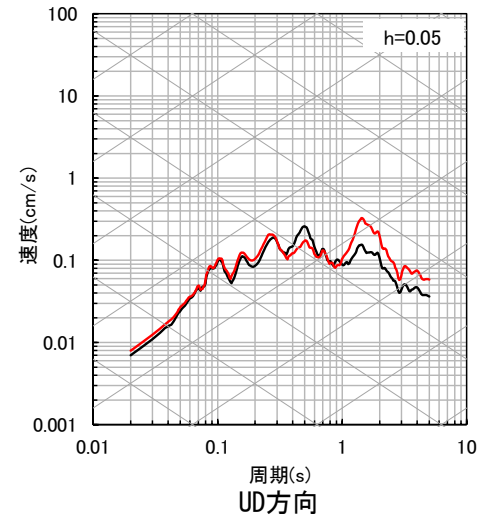
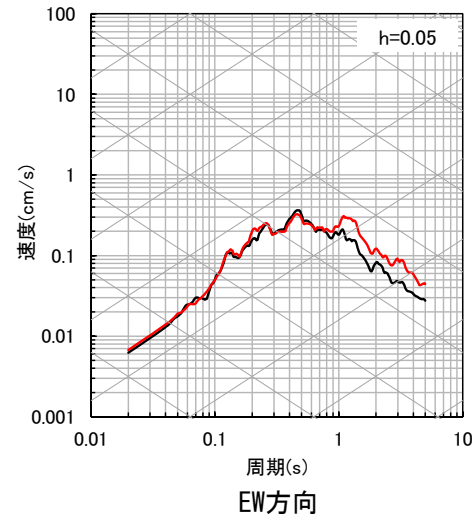
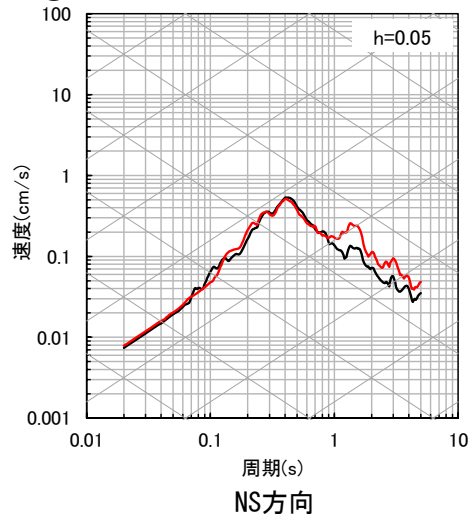
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



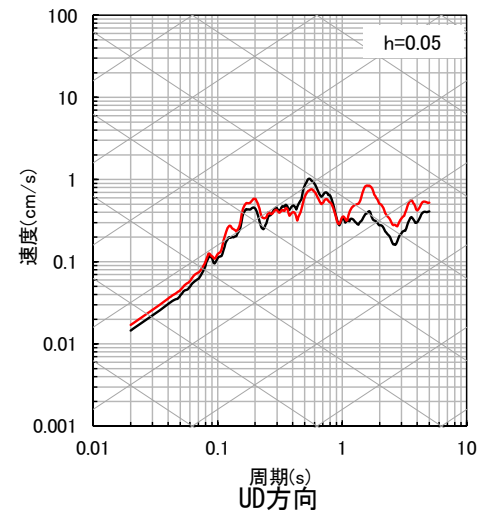
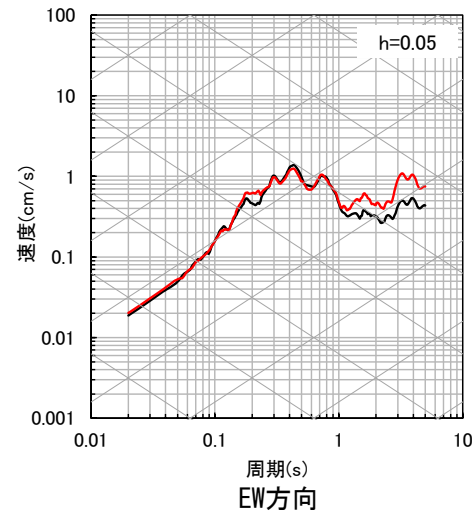
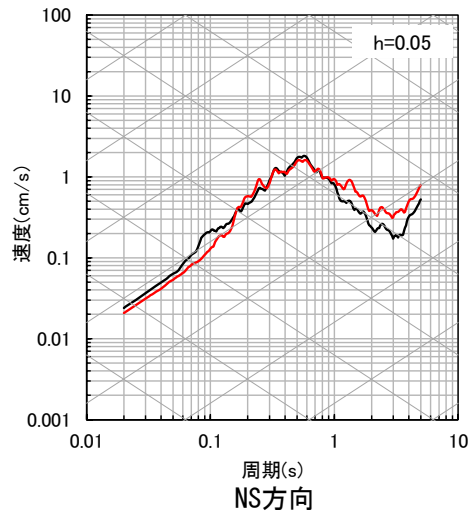
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑫ 熊本県熊本地方



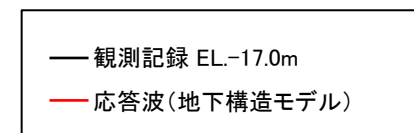
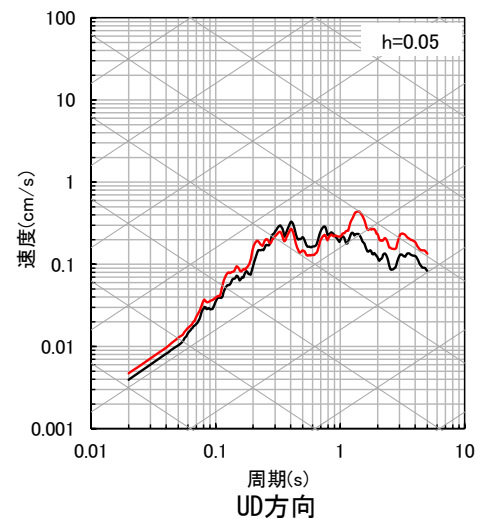
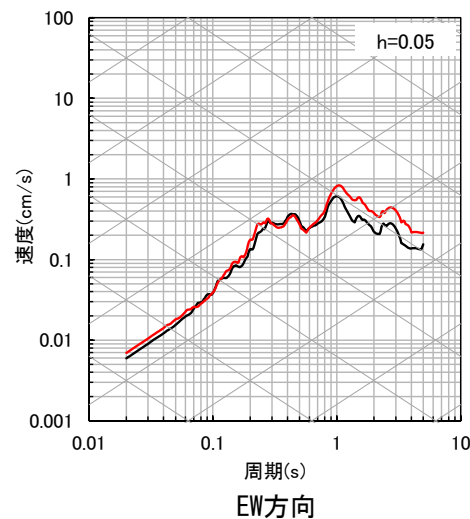
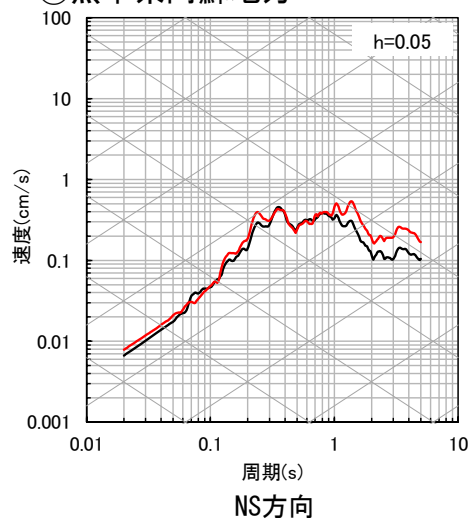
⑬ 熊本県熊本地方



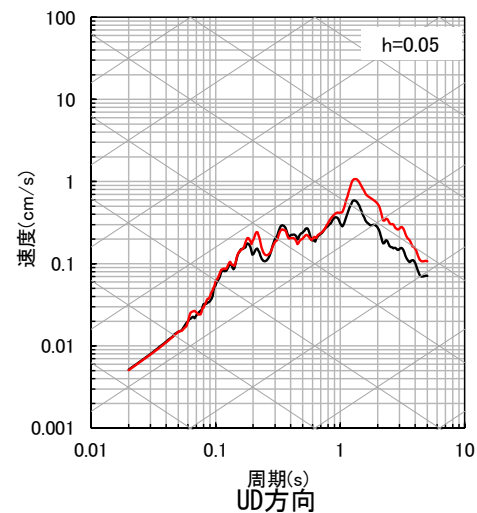
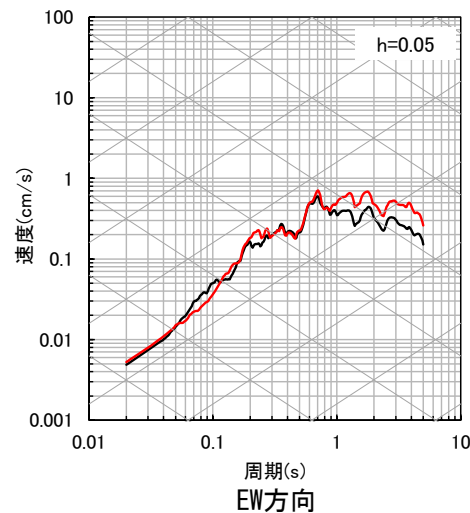
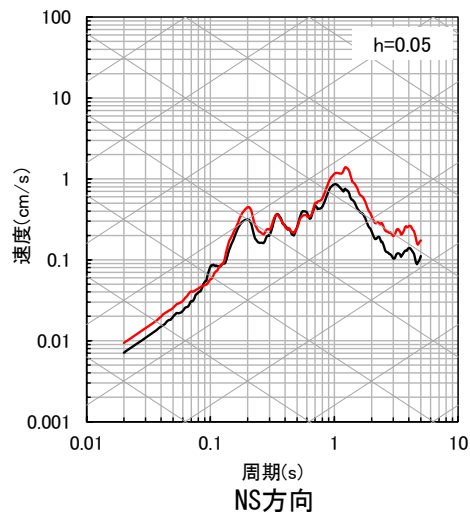
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑭ 熊本県阿蘇地方



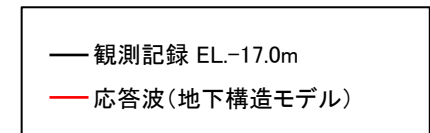
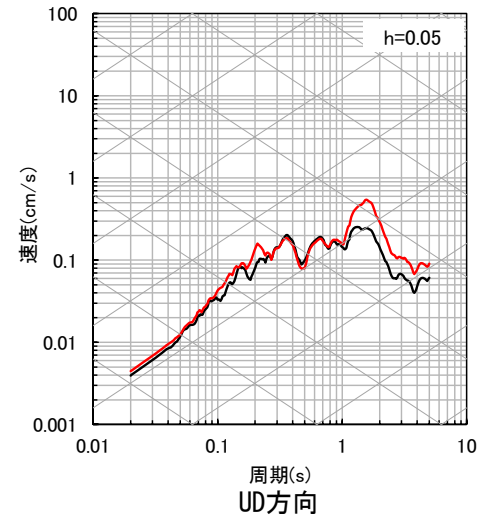
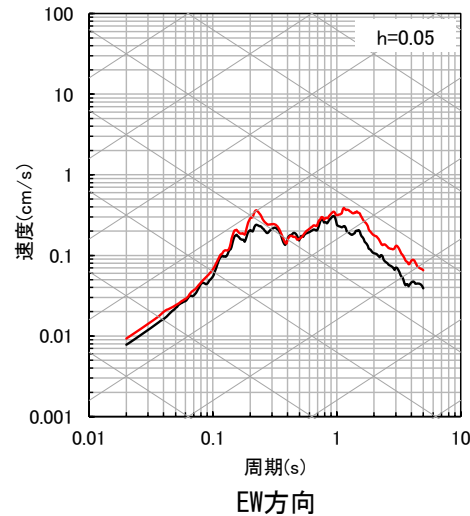
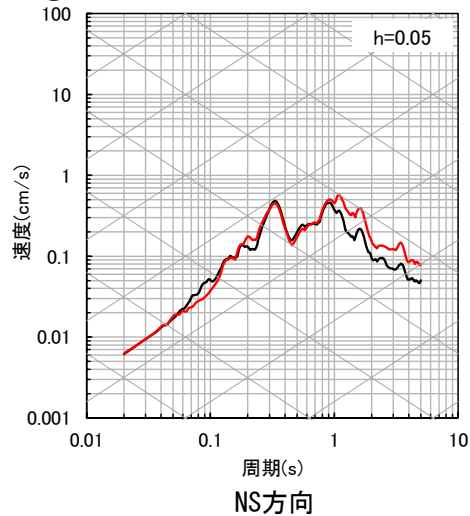
⑮ 熊本県阿蘇地方



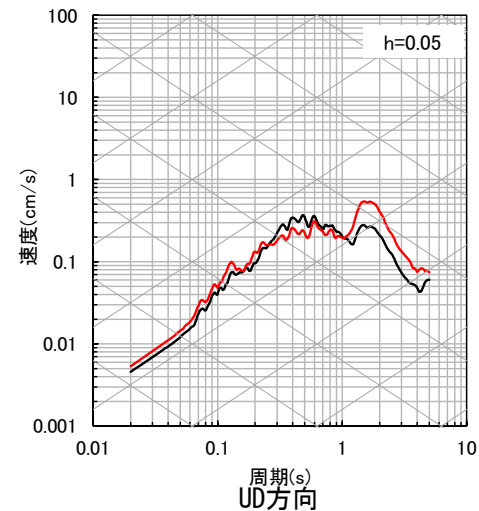
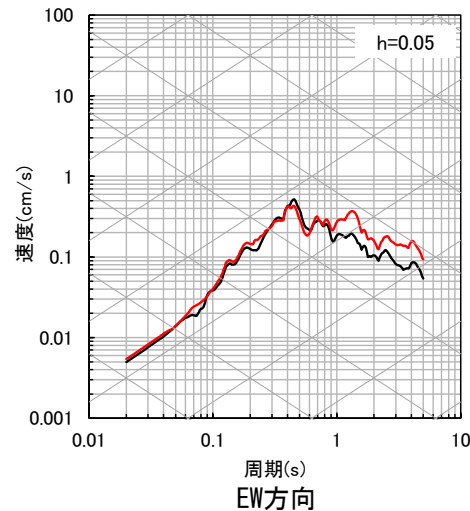
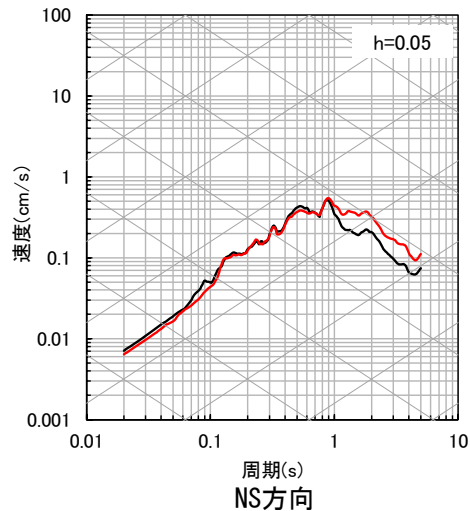
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑩ 熊本県熊本地方



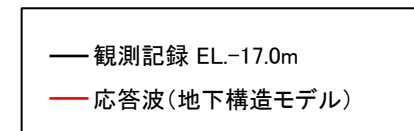
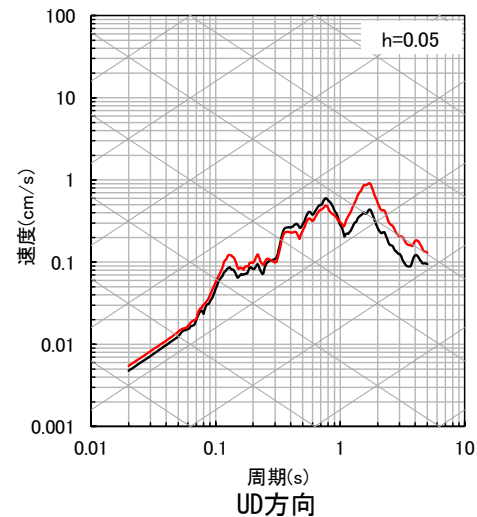
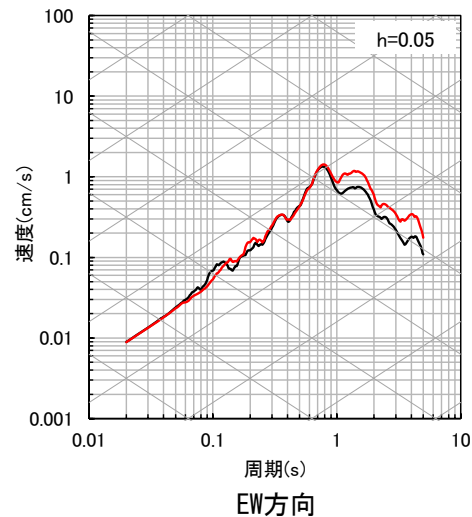
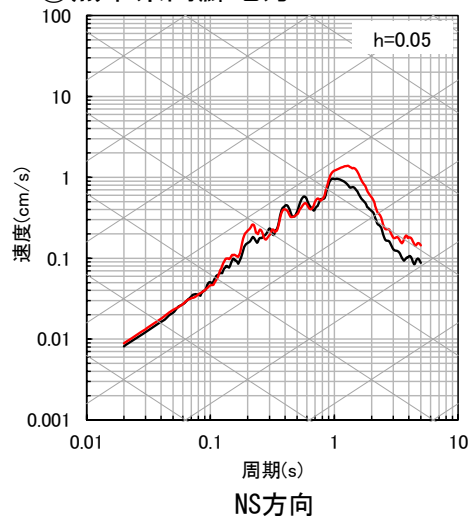
⑪ 熊本県熊本地方



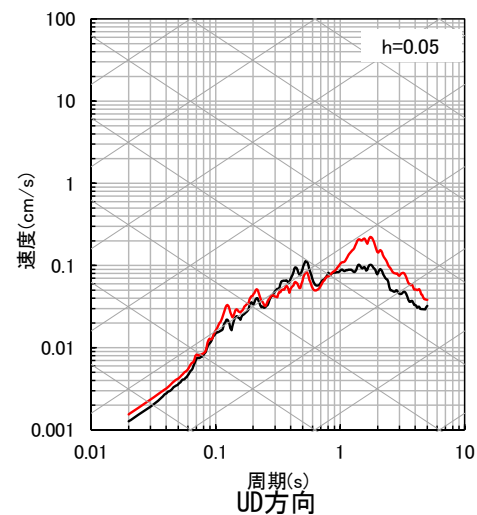
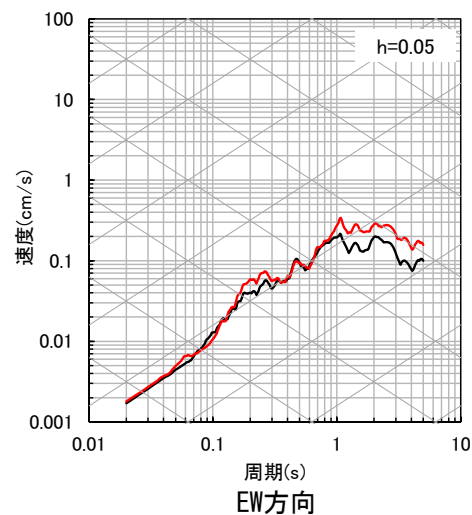
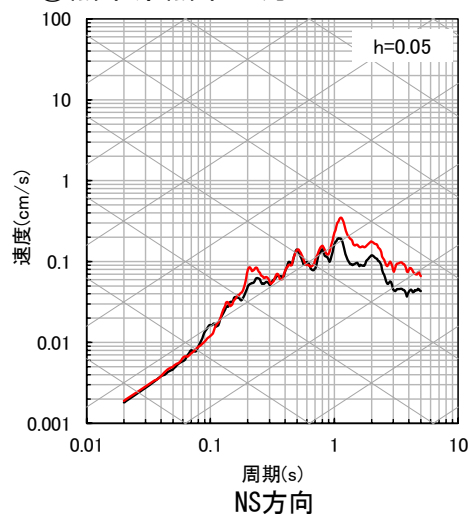
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

⑱ 熊本県阿蘇地方



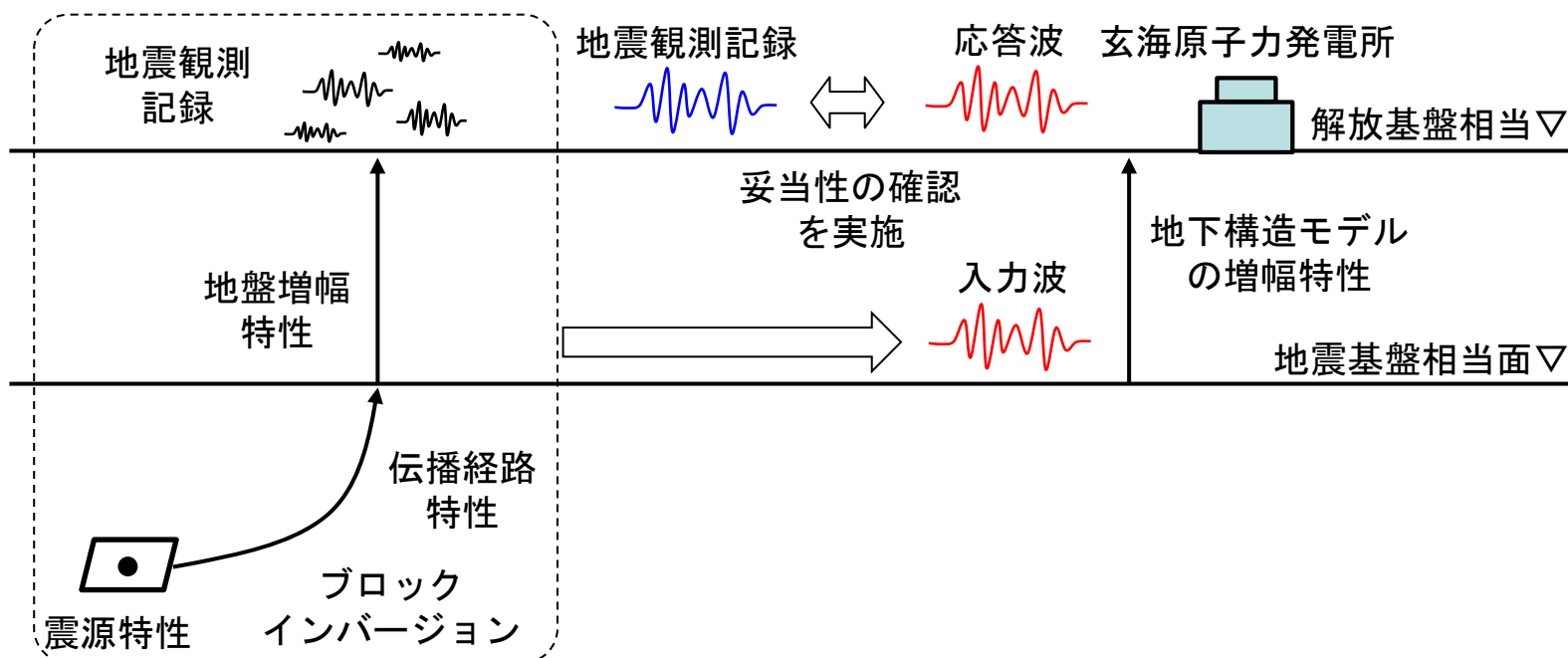
⑲ 熊本県熊本地方



【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 標準応答スペクトル用モデルのブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

- 前頁までで確認した「設定した地下構造モデルのブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認」と同様の方法により、標準応答スペクトル用モデルの深部を含む全体を見ても、観測事実に基づいて浅部で確認した地下構造モデルの妥当性に矛盾がないことを確認する。
- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認する。
 - ブロックインバージョン結果を用いた地震波は、地震基盤相当面においてブロックインバージョン結果を用いて作成した地震波を入力波として、標準応答スペクトル用モデルを用いて次元波動論に基づいて算出する。



ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認のイメージ

解放基盤表面 ▽EL. -15m	標準応答 スペクトル用 モデル	
	Vs	Q値
▽EL. -50m	1350	12.5
▽EL. -90m	1570	12.5
▽EL. -100m	1570	16.7
▽EL. -150m	1730	16.7
▽EL. -200m	1770	16.7
地震基盤相当面 ▽EL. -1804m	2100	200
	3100	300

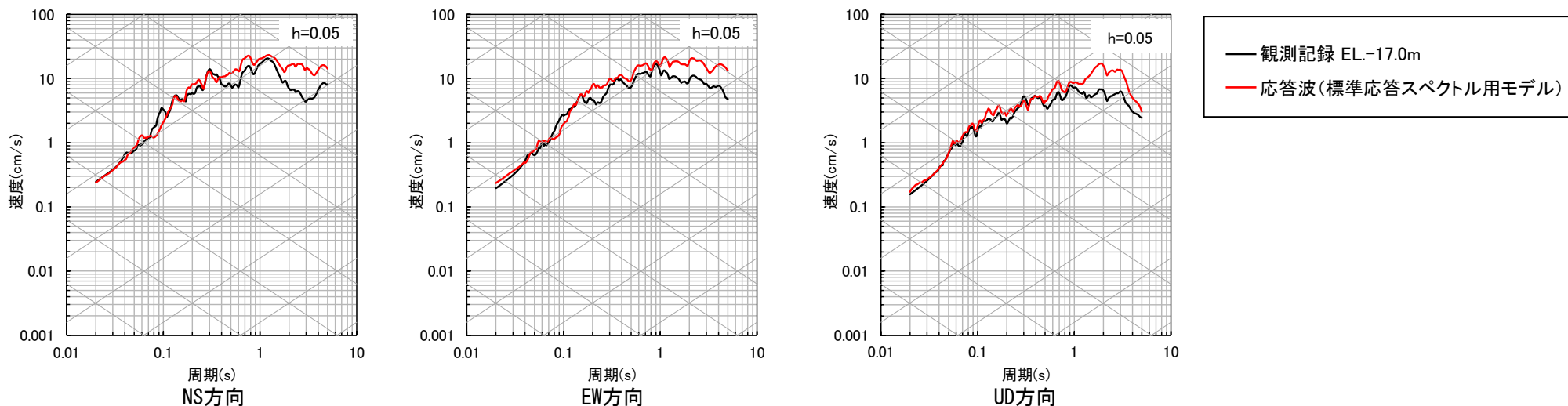
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

(1) 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/2)

- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。(277~278頁参照)

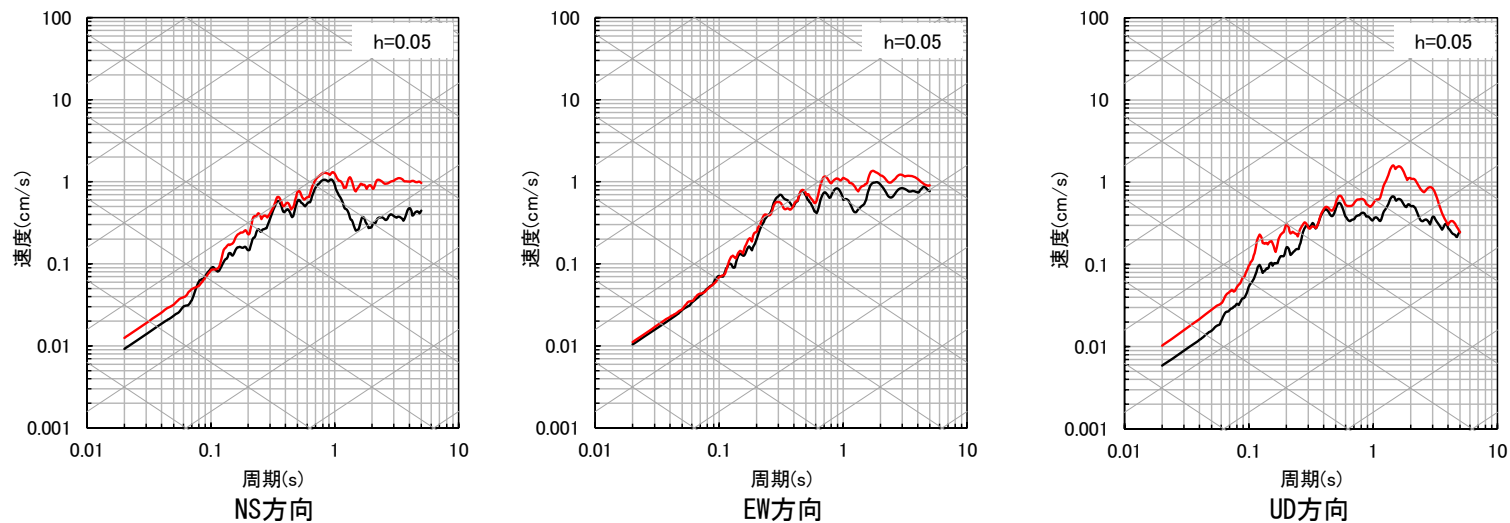
⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



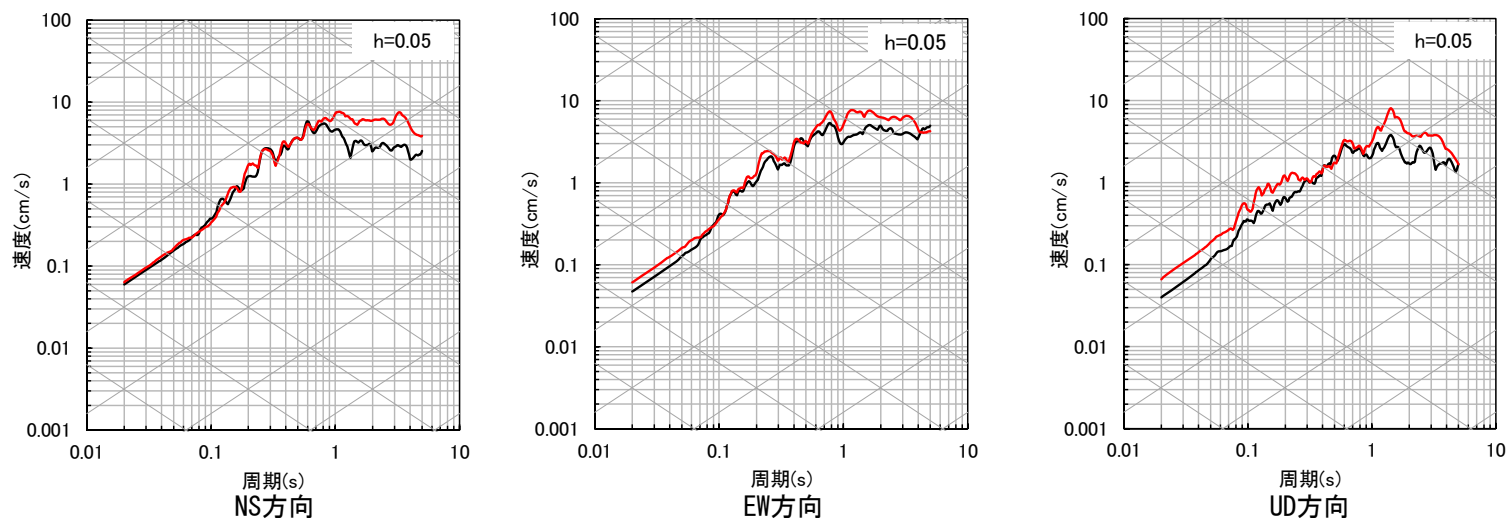
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/2)

⑩ 熊本県熊本地方



⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



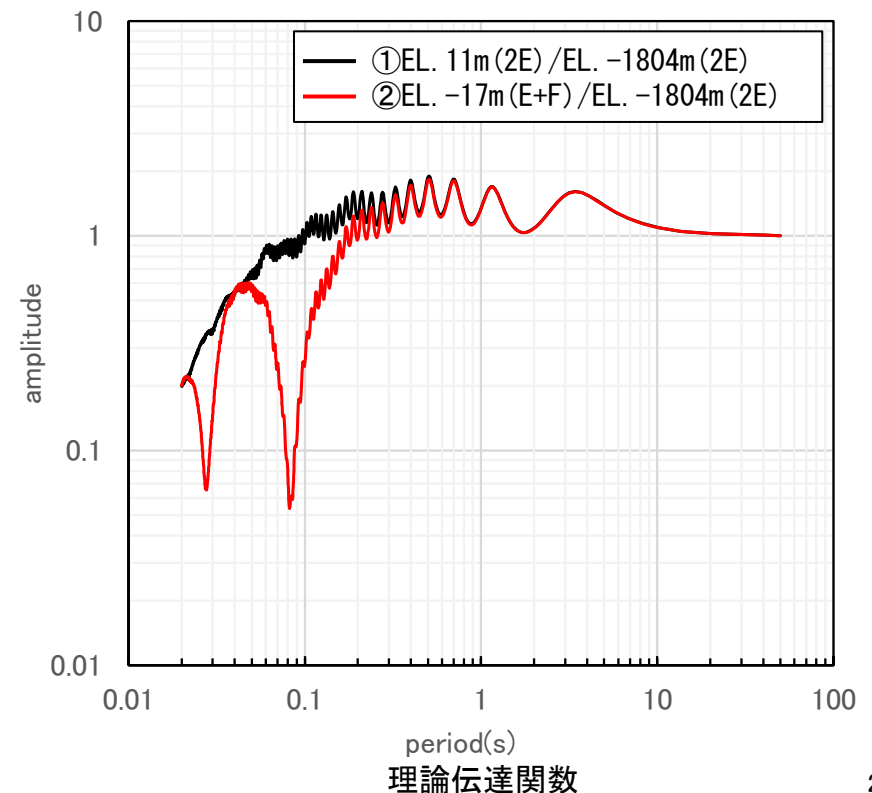
【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 理論伝達関数（水平方向）の比較

- 277～278頁における応答スペクトルの比較では、解放基盤相当（EL. -17m）のE+F波で比較しているため、表層からの反射波の影響が含まれる。
- 反射波の影響を確認するため、①EL. -1804m（2E）と地表（2E）の理論伝達関数、②EL. -1804m（2E）と解放基盤相当（E+F）の理論伝達関数を比較すると、②では0.1秒付近に反射波による大きなトラフが存在するが、①では存在しない。
- 以上より、解放基盤相当の応答波（E+F）は、反射波の影響による0.1秒の大きなトラフにより、0.1秒付近において地震波が増幅されず、応答波（E+F）が観測記録（E+F）を下回る結果になったと考えられるため、次頁で反射波の影響を受けていない地表において算出した応答波（2E）で比較する。

EL.	Vs (m/s)	Q値	
11m			
解放基盤相当			
-17m	1350	12.5	①EL. 11m(2E)/EL. -1804m(2E)
-50m	1570	12.5	
-90m	1570	16.7	
-100m	1730	16.7	②EL. -17m(E+F)/EL. -1804m(2E)
-150m	1770	16.7	
-200m	2100	200	
-1804m	3100	300	

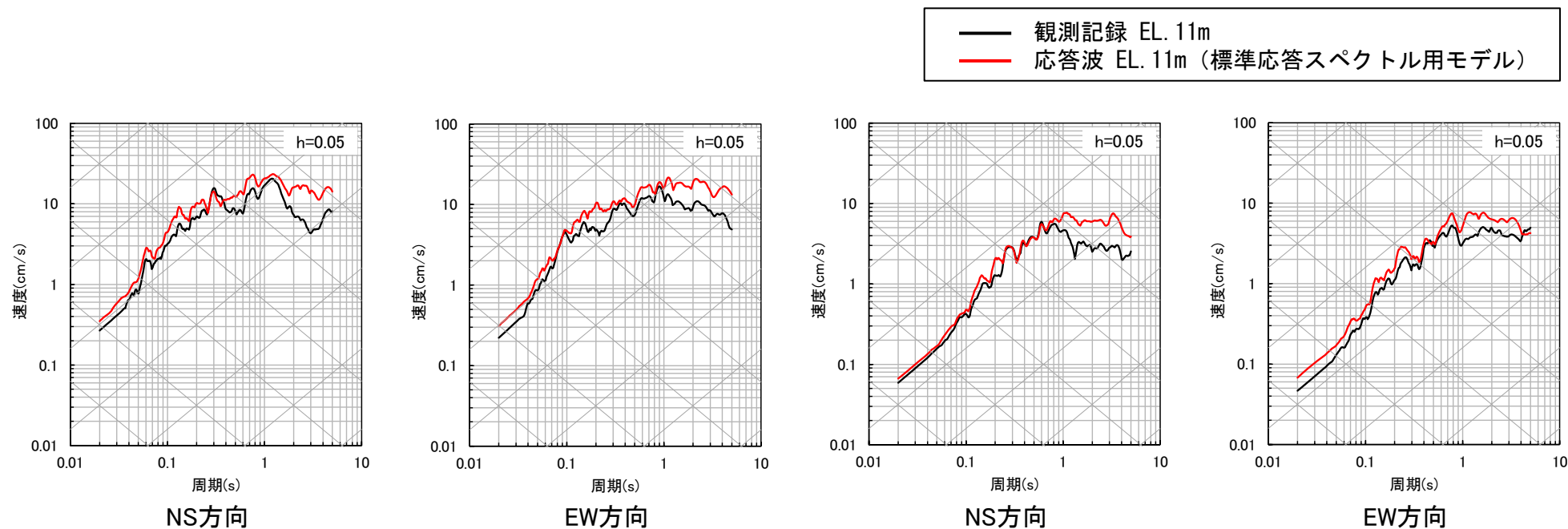
※解放基盤表面(EL. -15.0m)上に層を追加



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 地表面における応答スペクトル（2E）の比較

- ⑤九州北西沖の地震（2005年福岡県西方沖地震本震）および⑪熊本県熊本地方の地震（2016年熊本地震本震）を用いて、反射波の影響を受けていない地表面（EL. 11m）において算出した応答波（2E）と観測記録（2E）を比較。
- 比較の結果、標準応答スペクトル用モデルを用いた応答波は、観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。



⑤九州北西沖(2005年福岡県西方沖地震本震)

⑪熊本県熊本地方(2016年熊本地震本震)

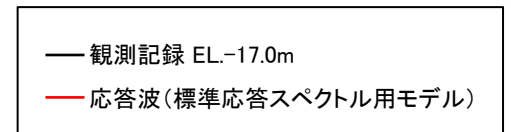
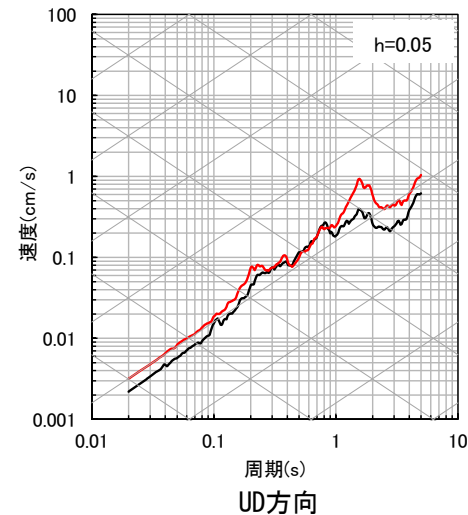
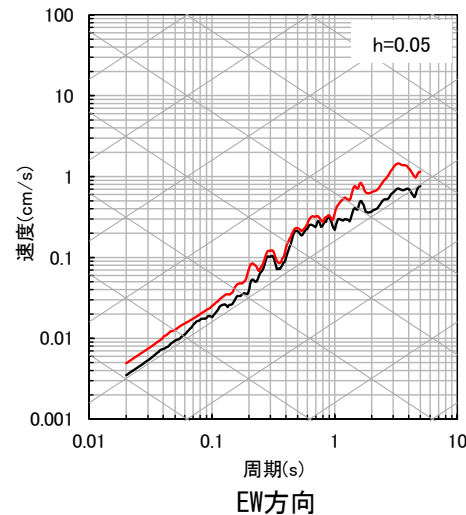
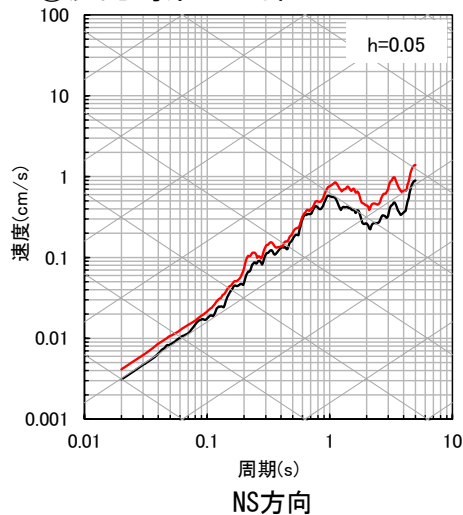
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

(2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。(281~290頁参照)

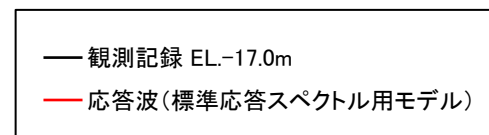
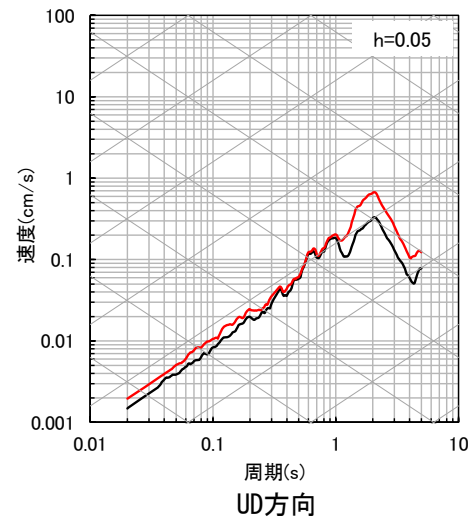
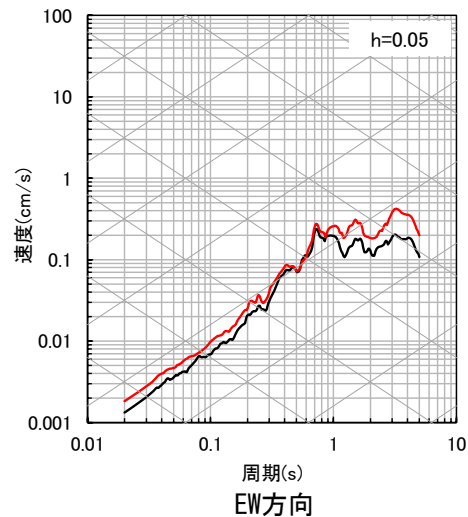
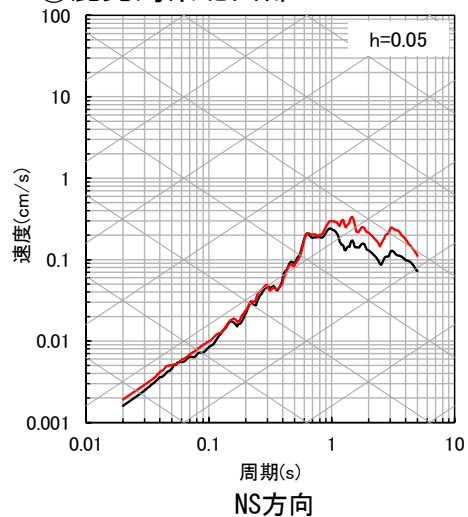
① 鹿児島県北西部



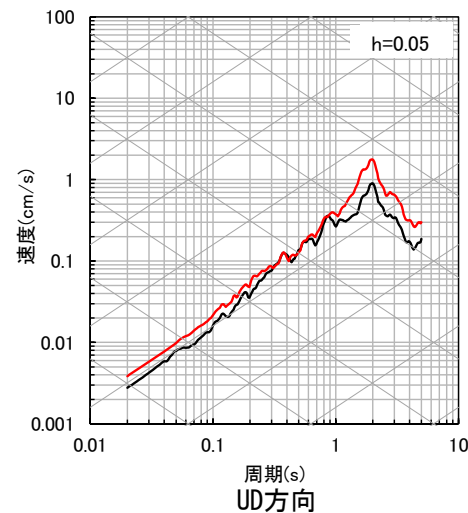
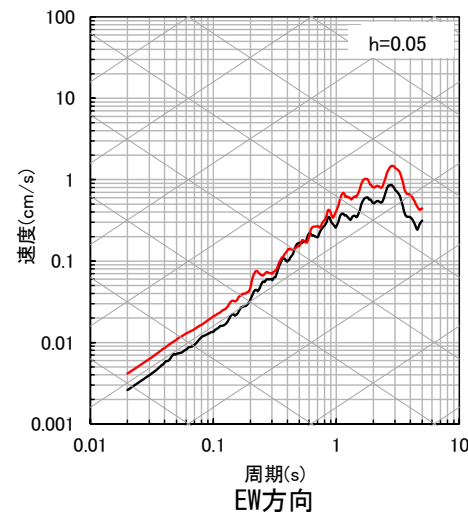
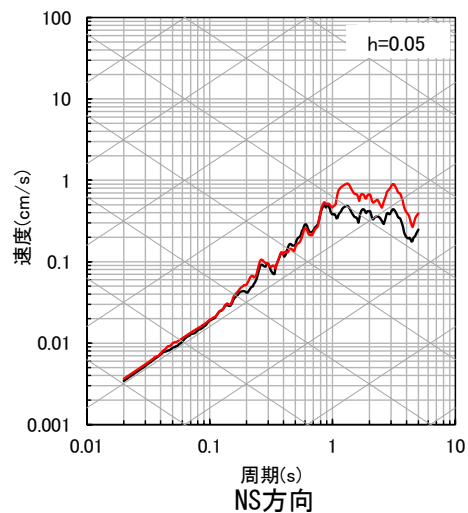
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

② 鹿児島県北西部



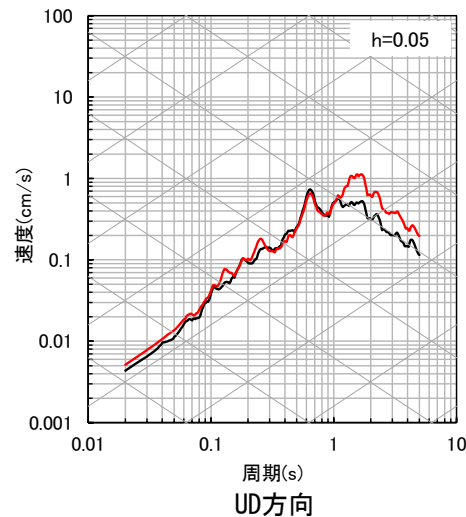
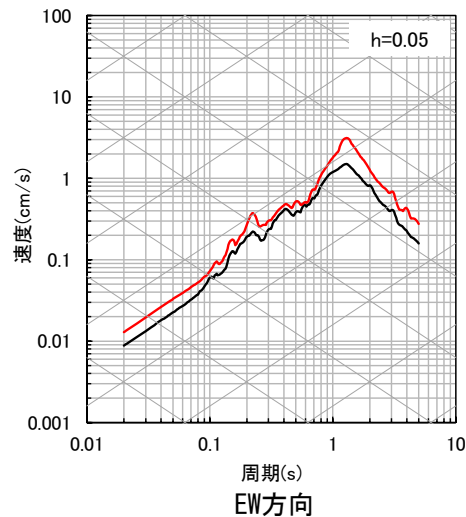
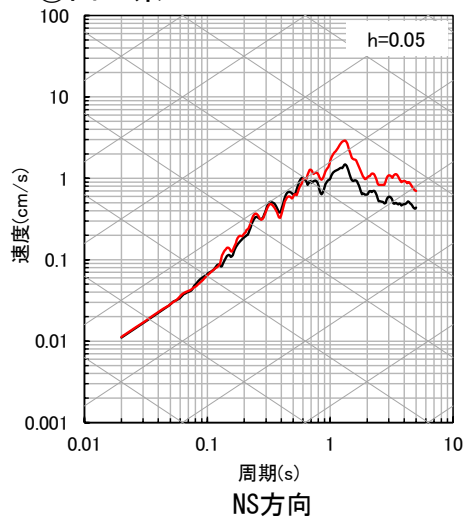
③ 鹿児島県北西部



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

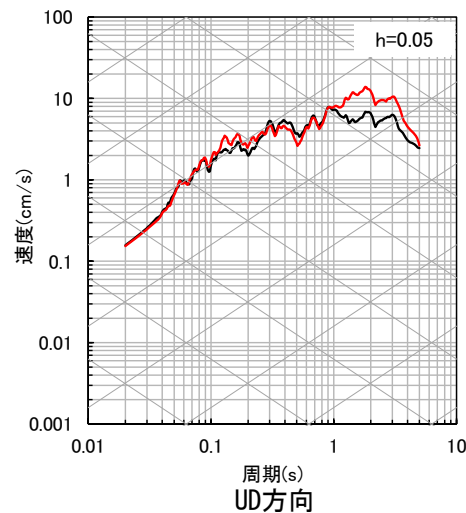
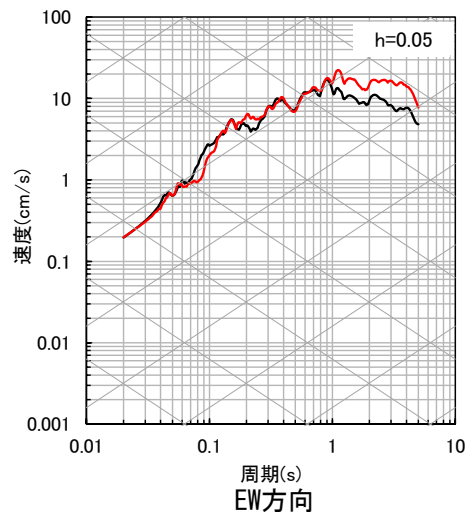
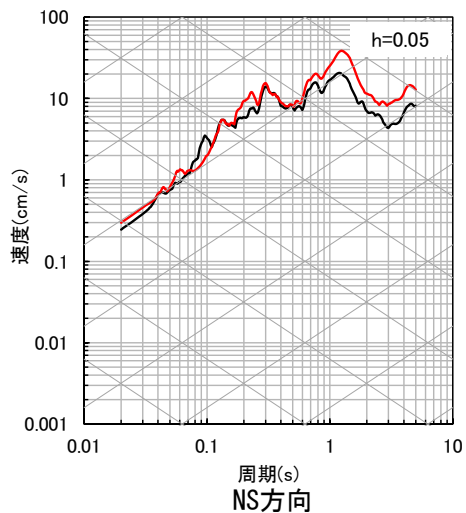
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

④山口県



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

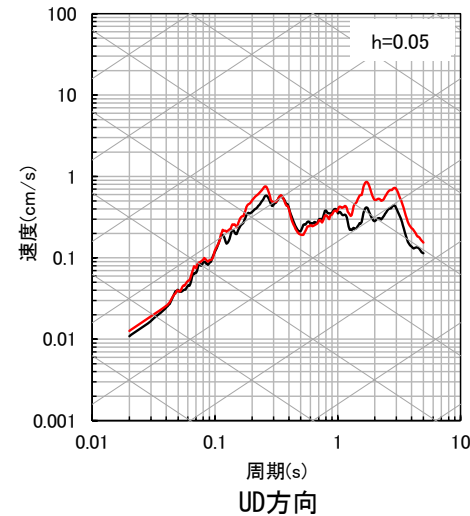
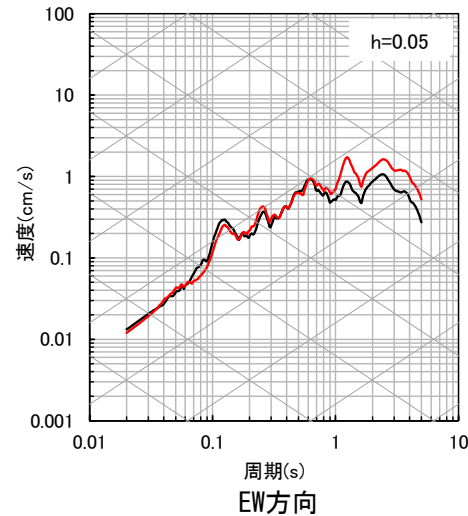
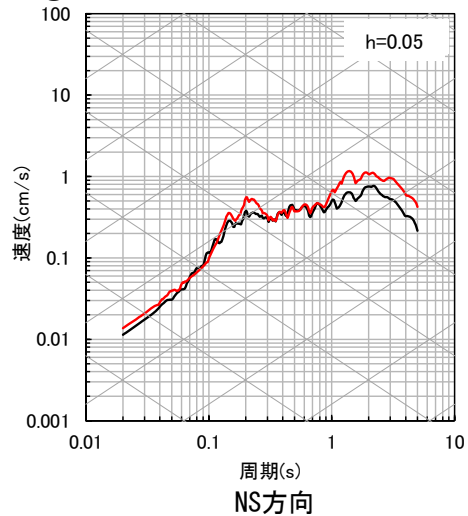
⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



【参考⑦】ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

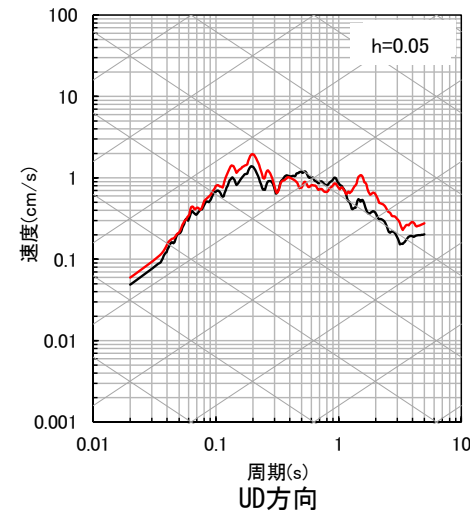
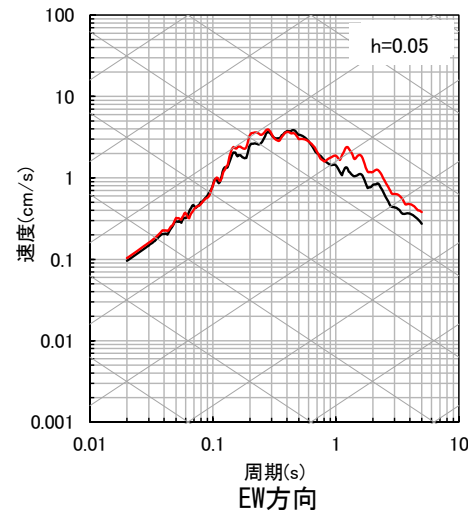
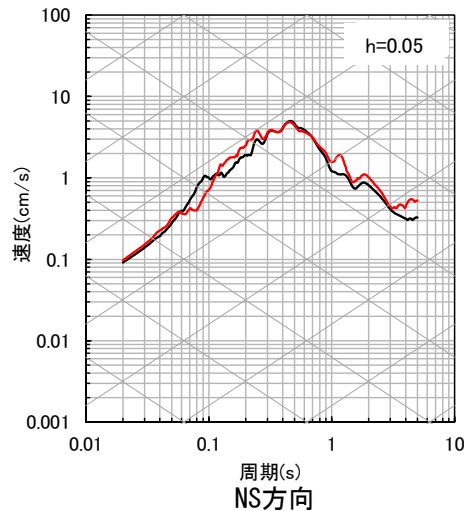
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑥九州北西沖



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

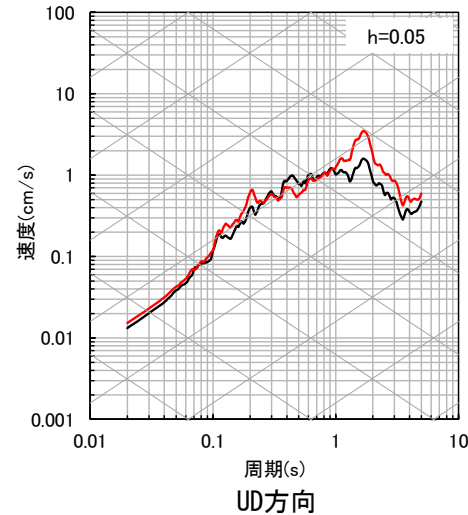
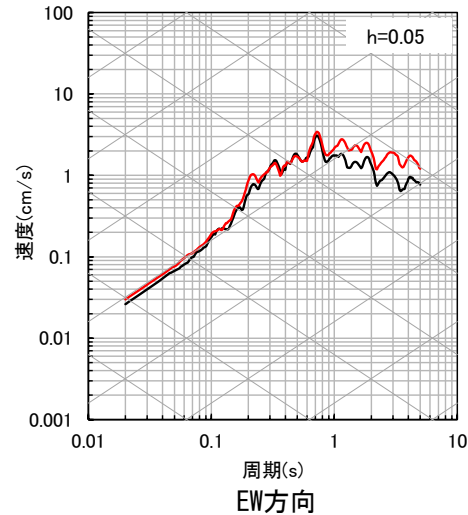
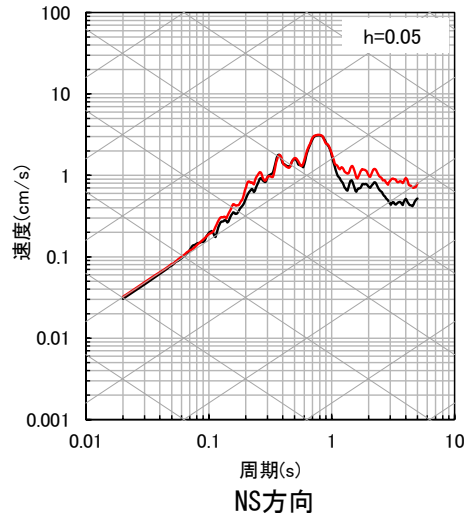
⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

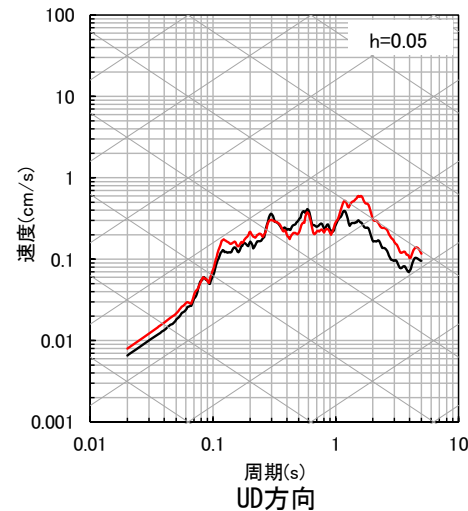
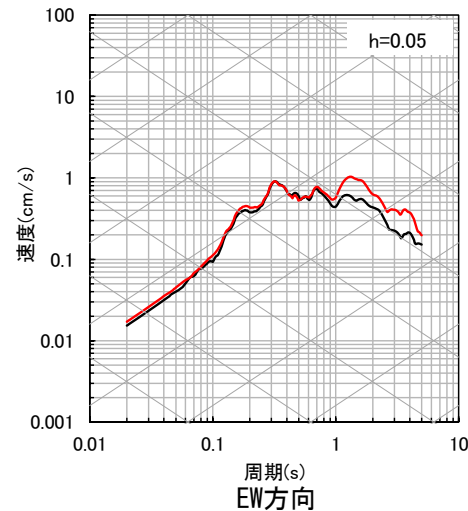
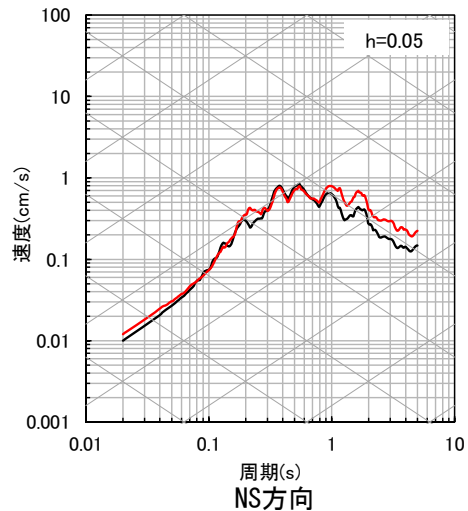
■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

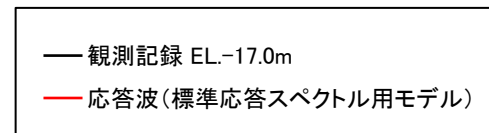
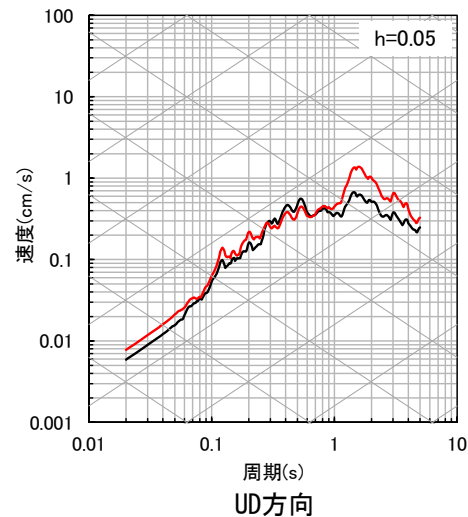
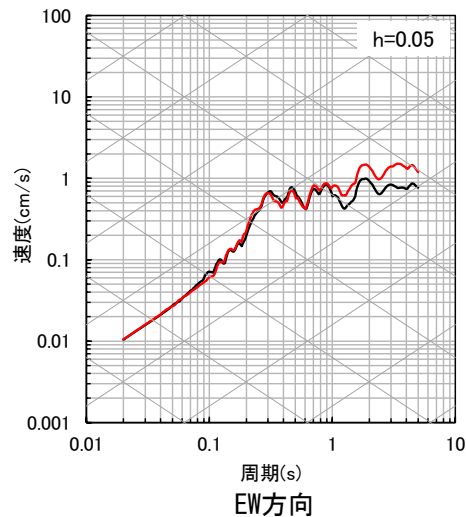
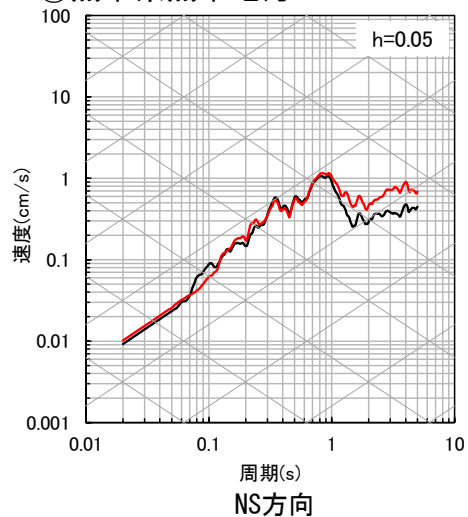
⑨ 熊本県熊本地方



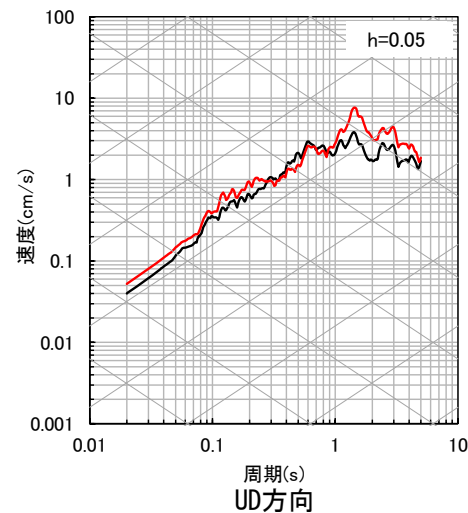
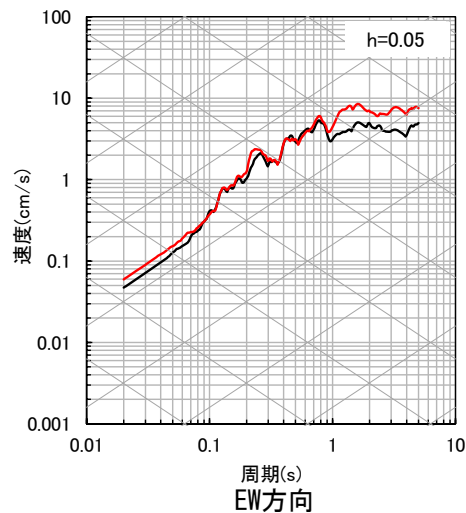
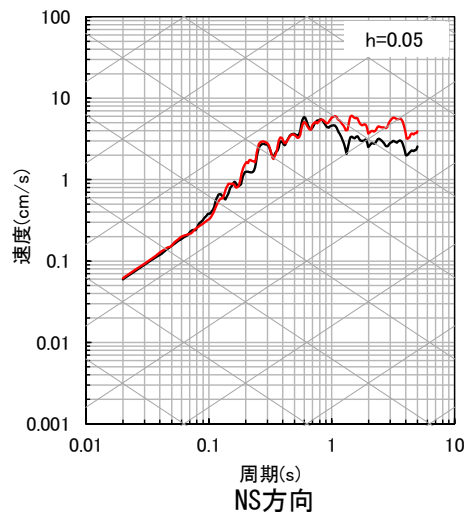
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑩ 熊本県熊本地方



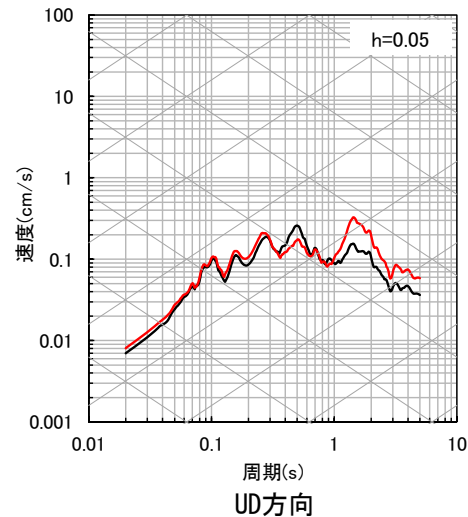
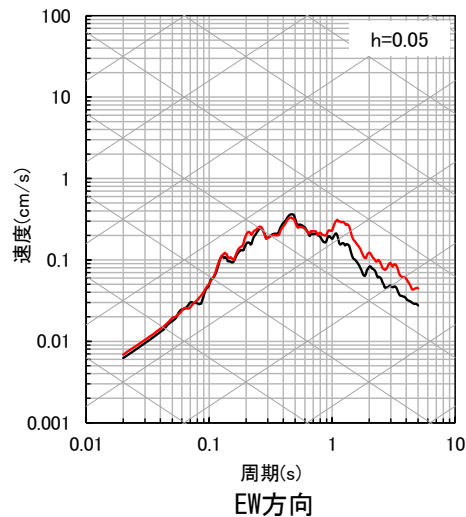
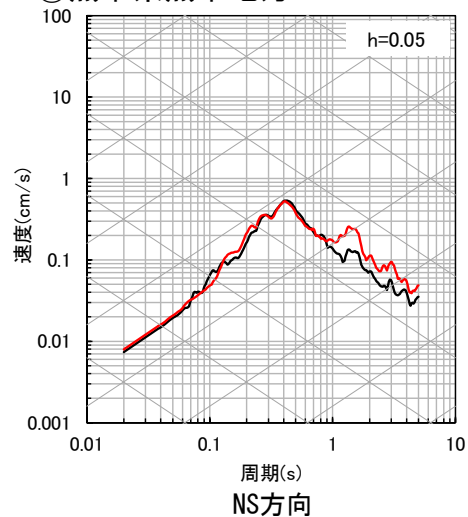
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

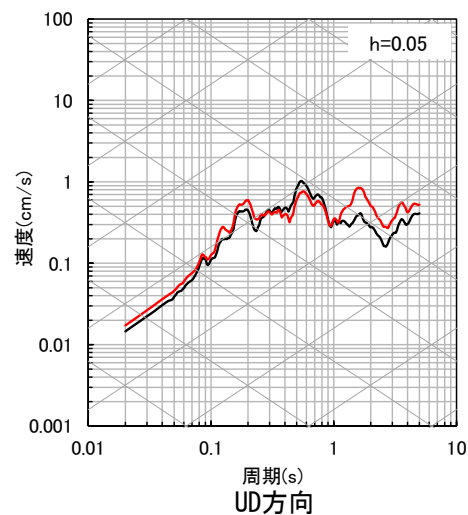
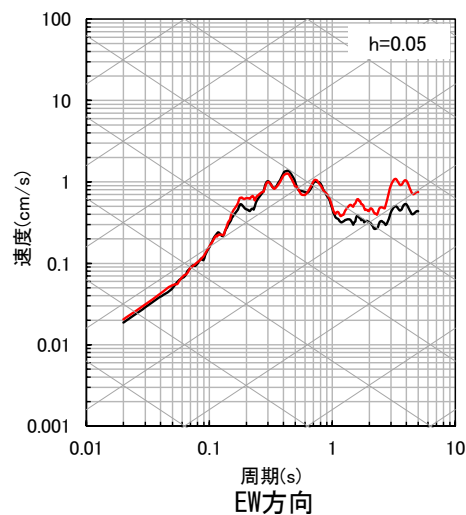
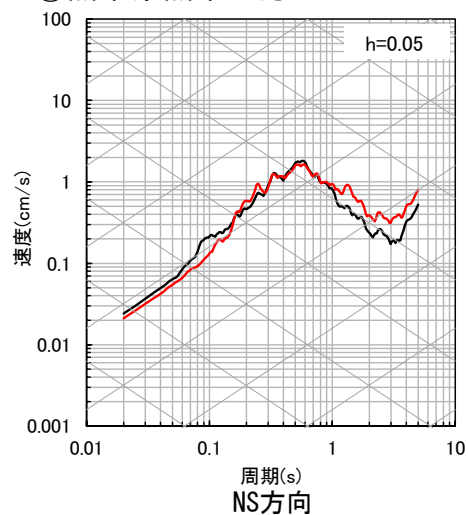
■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑫ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

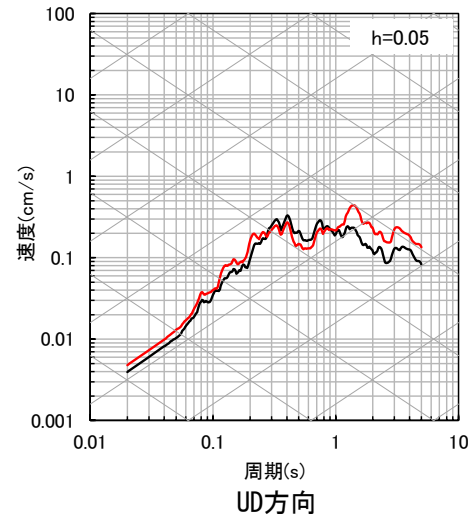
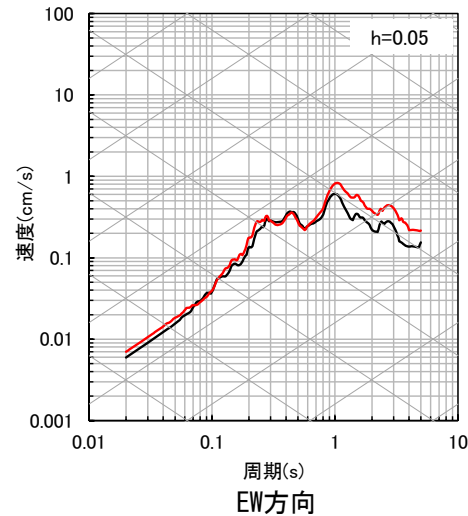
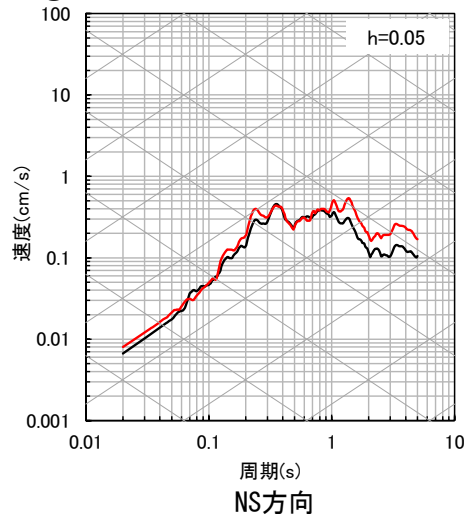
⑬ 熊本県熊本地方



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

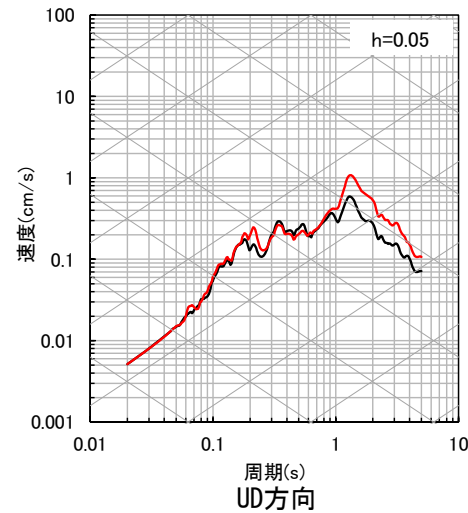
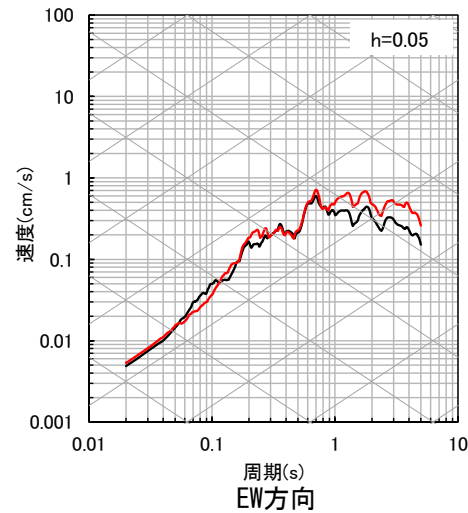
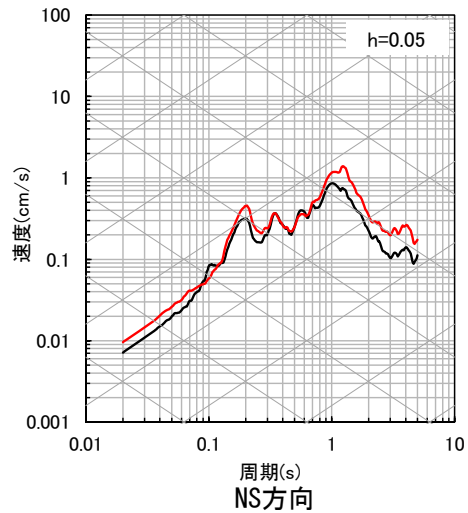
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑭ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

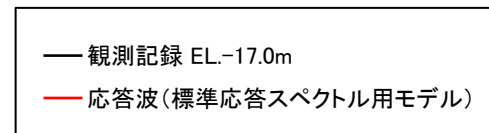
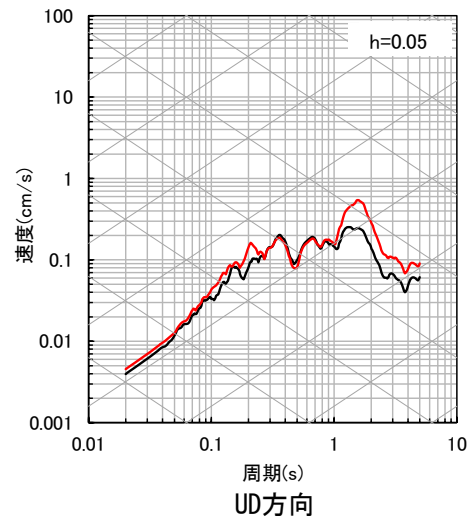
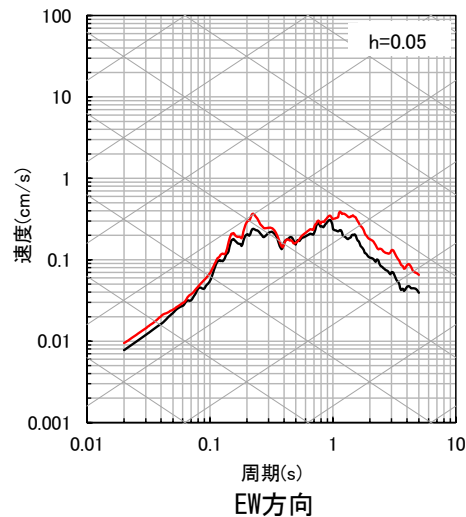
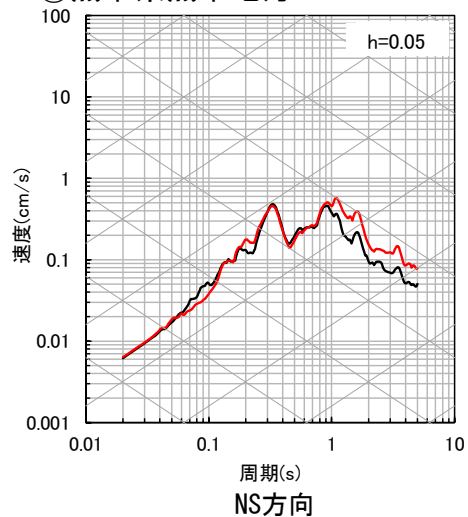
⑮ 熊本県阿蘇地方



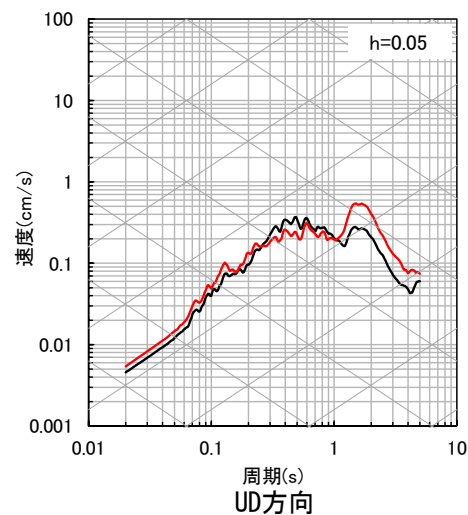
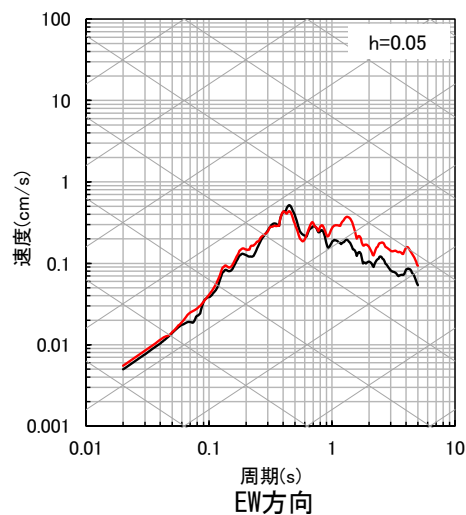
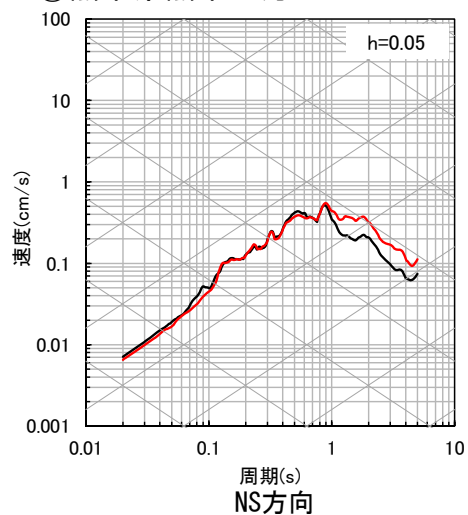
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑩ 熊本県熊本地方



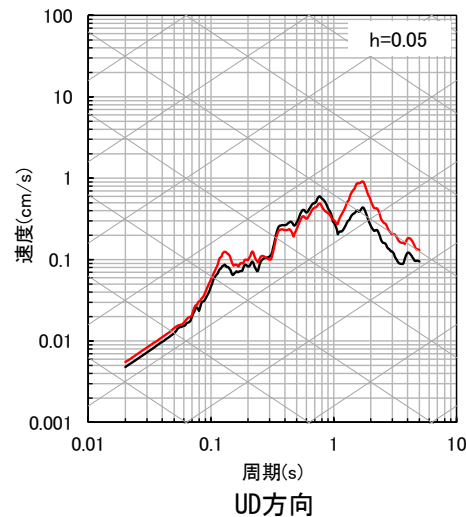
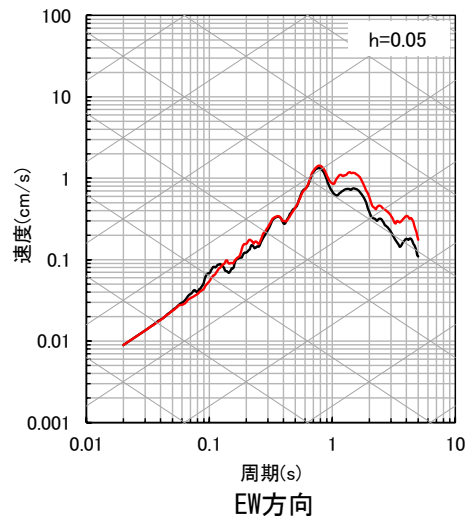
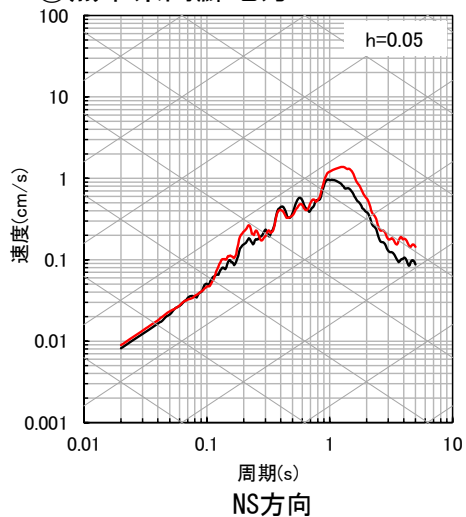
⑪ 熊本県熊本地方



【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

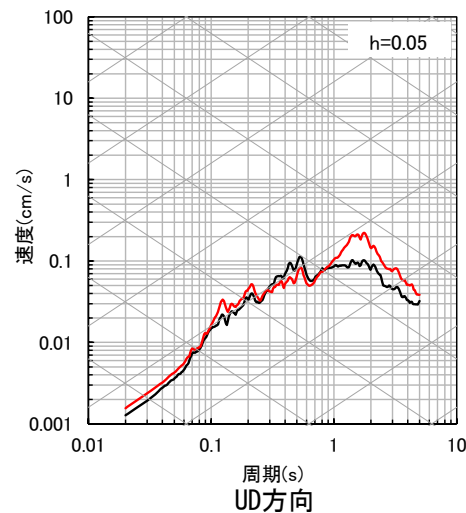
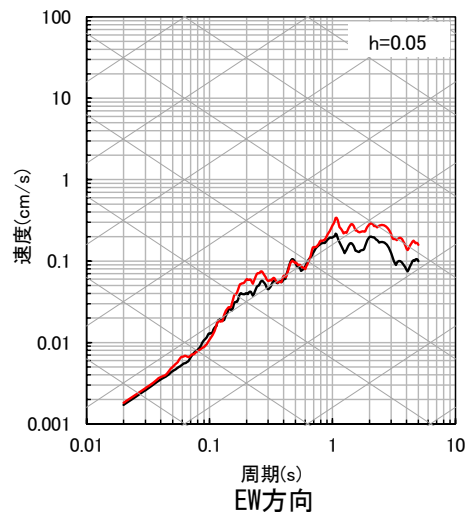
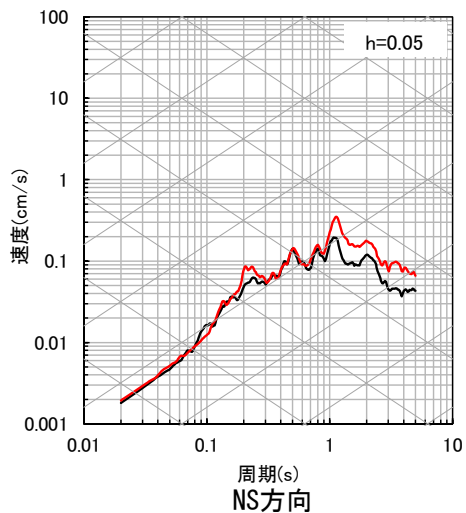
■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

⑱ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

⑲ 熊本県熊本地方



【参考⑧】 友澤ほか（2021）のブロックインバージョン結果の確認

【参考⑧】 友澤ほか（2021）のブロックインバージョン結果の確認

(1) 伝播経路特性 $P_{mn}(f)$

- 伝播経路特性の不均質減衰構造の推定結果によると、鹿児島県の霧島山、桜島、開聞岳周辺、大分県の九重山、湯布院周辺、長崎県の西方で周辺よりも相対的に減衰が大きい領域が推定。
- 1997年鹿児島県北西部地震、2005年福岡県西方沖地震、2016年熊本地震の周辺で個別に検討された既往研究によるQ値と大きく乖離しないことが確認されている。

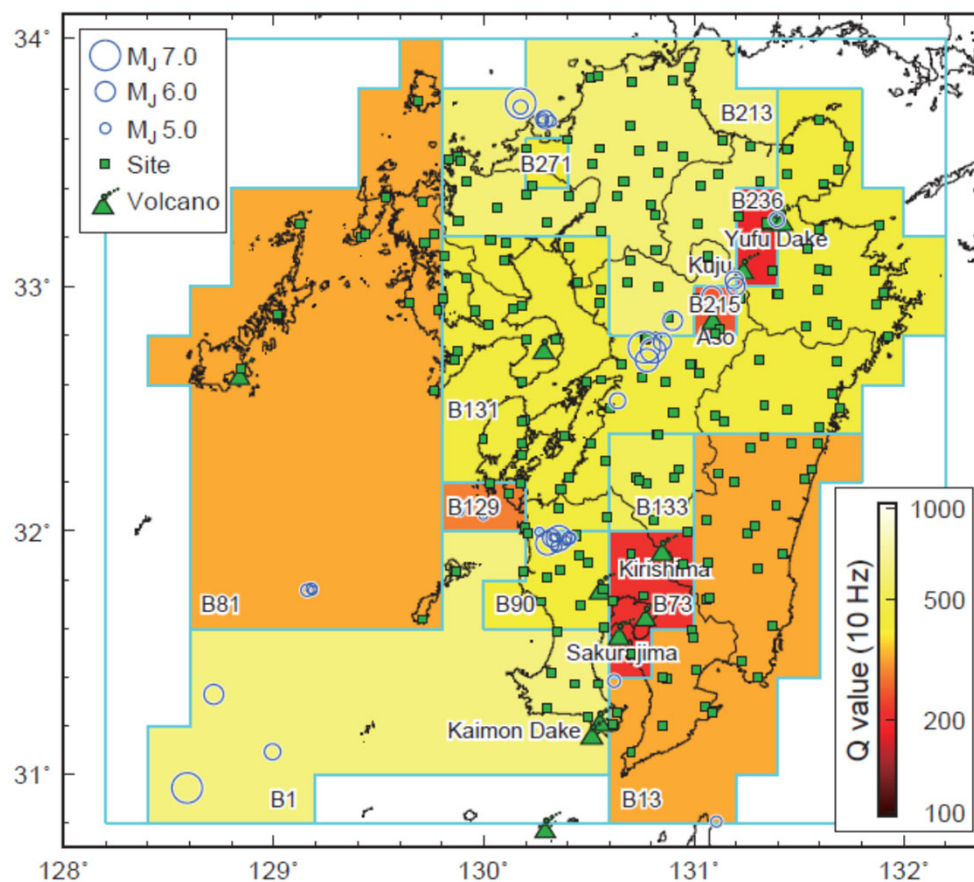


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure

※友澤ほか（2021）³⁶⁾より抜粋

【参考⑧】 友澤ほか (2021) のブロックインバージョン結果の確認

(2) 震源特性 $S_m(f)$

- ・ 1997年鹿児島県北西部地震、2005年福岡県西方沖地震、2016年熊本地震の地震規模の大きな主な地震を対象に、推定した震源スペクトルとフィッティングした ω^{-2} モデルとの比較の結果 (Fig. 9)、いずれの地震も ω^{-2} モデルとの対応関係はよいことが確認されている。
- ・ 本論文で推定した M_0 は、F-netの M_0 と比較すると多くの地震で一定の範囲で推定されており (Fig. 10)、短周期レベルについても既往の研究と同様の傾向になるとされている (Fig. 12)。

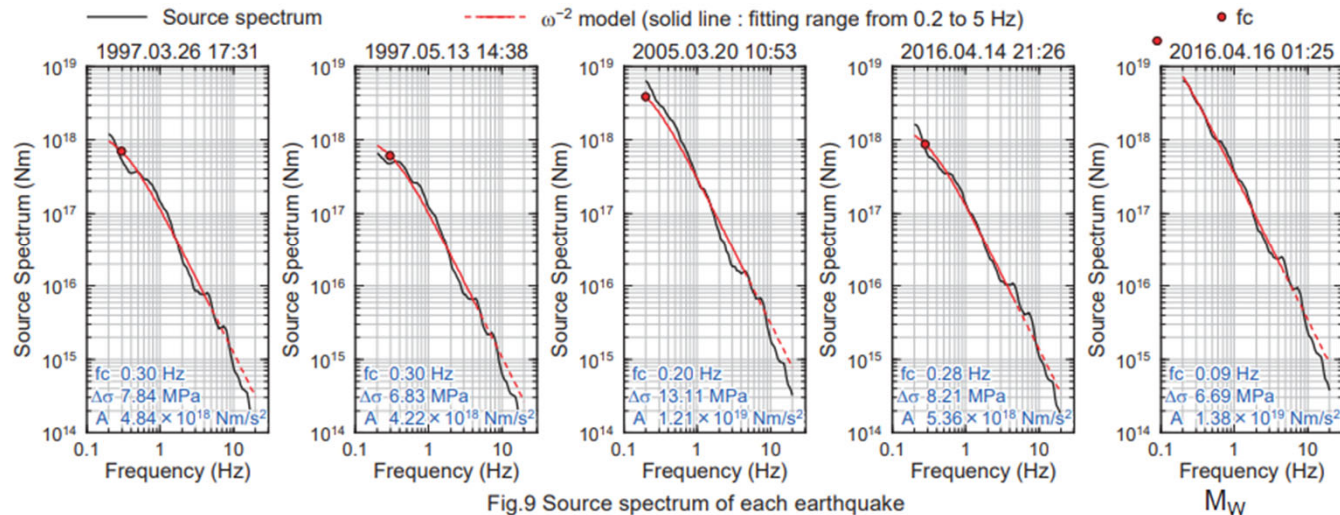


Fig.9 Source spectrum of each earthquake

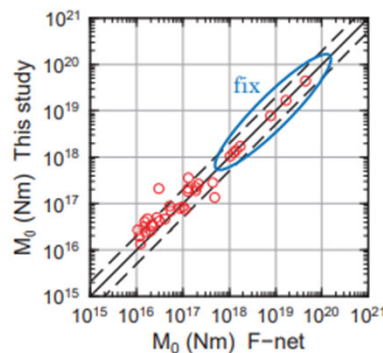


Fig.10 Comparison of M_0 of F-net to that of this study

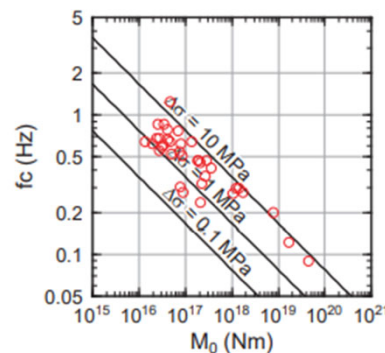


Fig.11 Scaling relation between M_0 and f_c

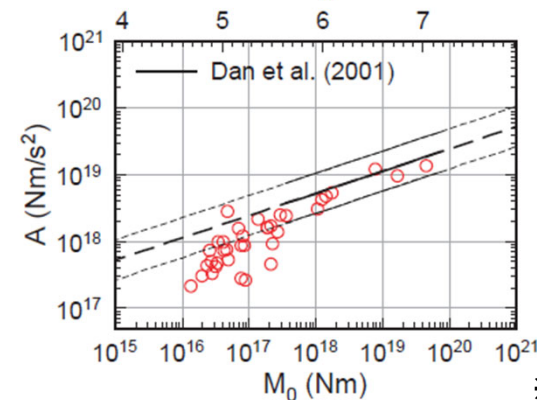


Fig.12 Scaling relation between M_0 and A

※友澤ほか (2021) ³⁶⁾より抜粋

【参考⑧】 友澤ほか（2021）のブロックインバージョン結果の確認

(3) 地盤増幅特性 $G_n(f)$

- 岩盤相当の観測点において、推定したサイト増幅率と地盤モデルに基づく理論増幅率を比較した結果、均質な減衰構造を仮定した場合よりも不均質減衰構造を仮定した場合の残差が小さく、理論増幅率との対応がよいことを確認しており、既往の文献に基づく均質な減衰構造よりも改善する傾向がみられている。

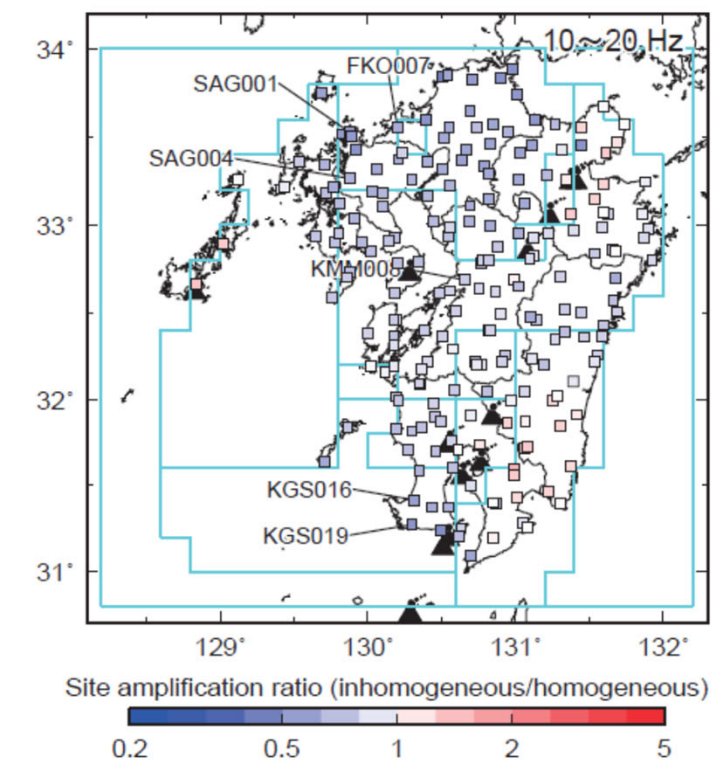


Fig.13 Spatial distribution of site amplification ratio

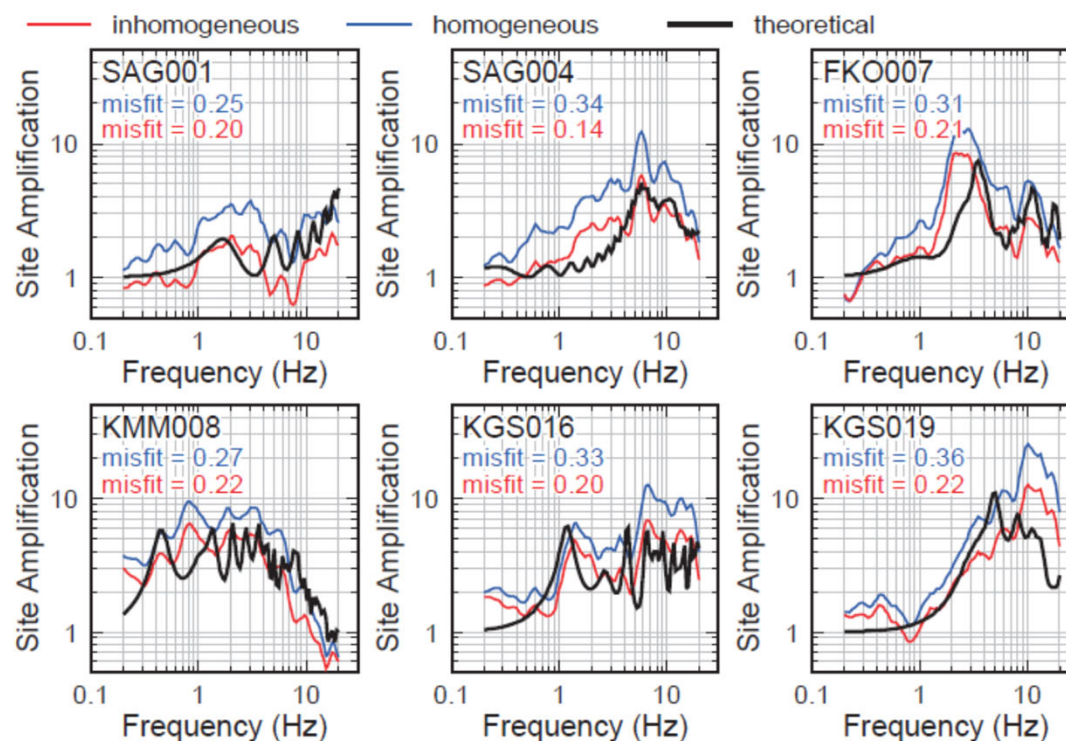


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

■ ブロックインバージョンにおける残差による3つの特性の分離

- ブロックインバージョンでは、 m 地震・ n 観測点のフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ は、震源特性 $S_m(f)$ 、伝播経路特性 $P_{mn}(f)$ 、地盤増幅特性 $G_n(f)$ の3つのスペクトル成分によりモデル化。

$$F_{mn}(f) = S_m(f)P_{mn}(f)G_n(f) \quad ※mは地震に対する添え字、nは観測点に関する添え字$$

- ブロックインバージョンにおける震源特性 $S_m(f)$ 、伝播経路特性 $P_{mn}(f)$ 、地盤増幅特性 $G_n(f)$ の3つのパラメータは、 m 地震・ n 観測点の観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差の二乗和が最小になるように分離される。

$$O_{mn}(f) = F_{mn}(f)E_{mn}(f) = S_m(f)P_{mn}(f)G_n(f)E_{mn}(f)$$

- 友澤ほか(2021)³⁶⁾では、ブロックインバージョンによる分離された3つの特性が、既往研究から得られた知見などを踏まえ、適切であることが確認されている。(参考⑧)

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

■ ブロックインバージョン解析における残差の要因

- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ は下式で表される。

$$E_{mn}(f) = O_{mn}(f) / F_{mn}(f) \quad \text{※}m\text{は地震に対する添え字、}n\text{は観測点に関する添え字}$$

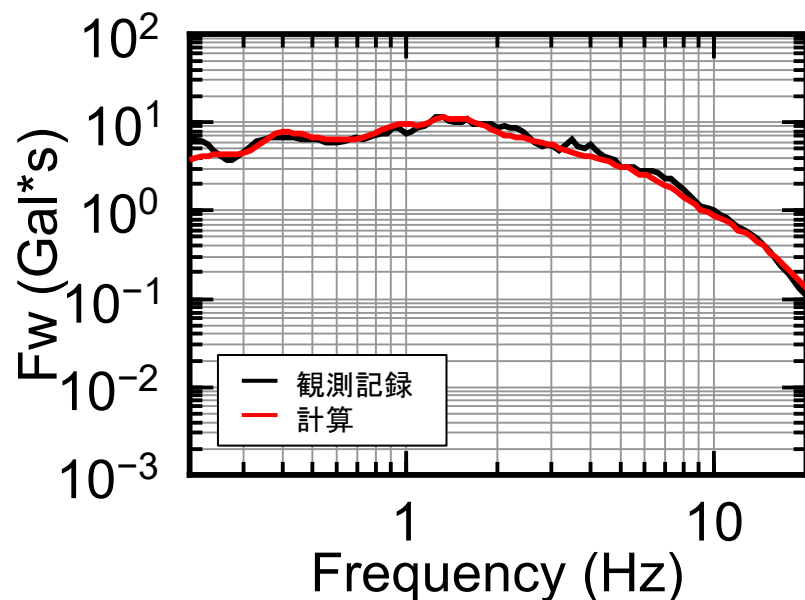
- 地震ごと、観測点ごとに残差 $E_{mn}(f)$ は異なるため、ブロックインバージョン結果を用いた地下構造モデル全体の妥当性確認における地震基盤相当面の地震波の作成では、この残差 $E_{mn}(f)$ の取扱いに留意する必要がある。
- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ は、下記の要因等が考えられる。
 - 震源の破壊伝播効果、放射特性
 - 表面波などのS波部分以外の波形
 - 各特性の推定誤差 など
- 残差 $E_{mn}(f)$ が1.0に近いほど、観測記録 $O_{mn}(f)$ と計算 $F_{mn}(f)$ が一致する。

$$O_{mn}(f) = F_{mn}(f)E_{mn}(f) \quad \text{※}m\text{は地震に対する添え字、}n\text{は観測点に関する添え字}$$

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

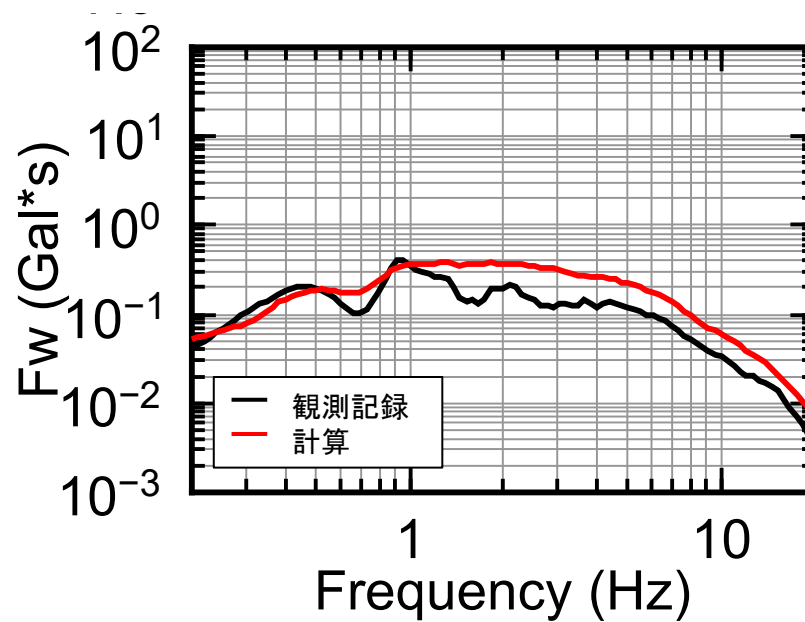
■ 地震ごとの残差について

- 破壊伝播効果などの影響を受けている地震では、観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ に差がみられ、残差 $E_{mn}(f)$ が1.0から乖離する。



残差が1.0に近い地震の例

⑪熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）



残差が1.0から乖離した地震の例

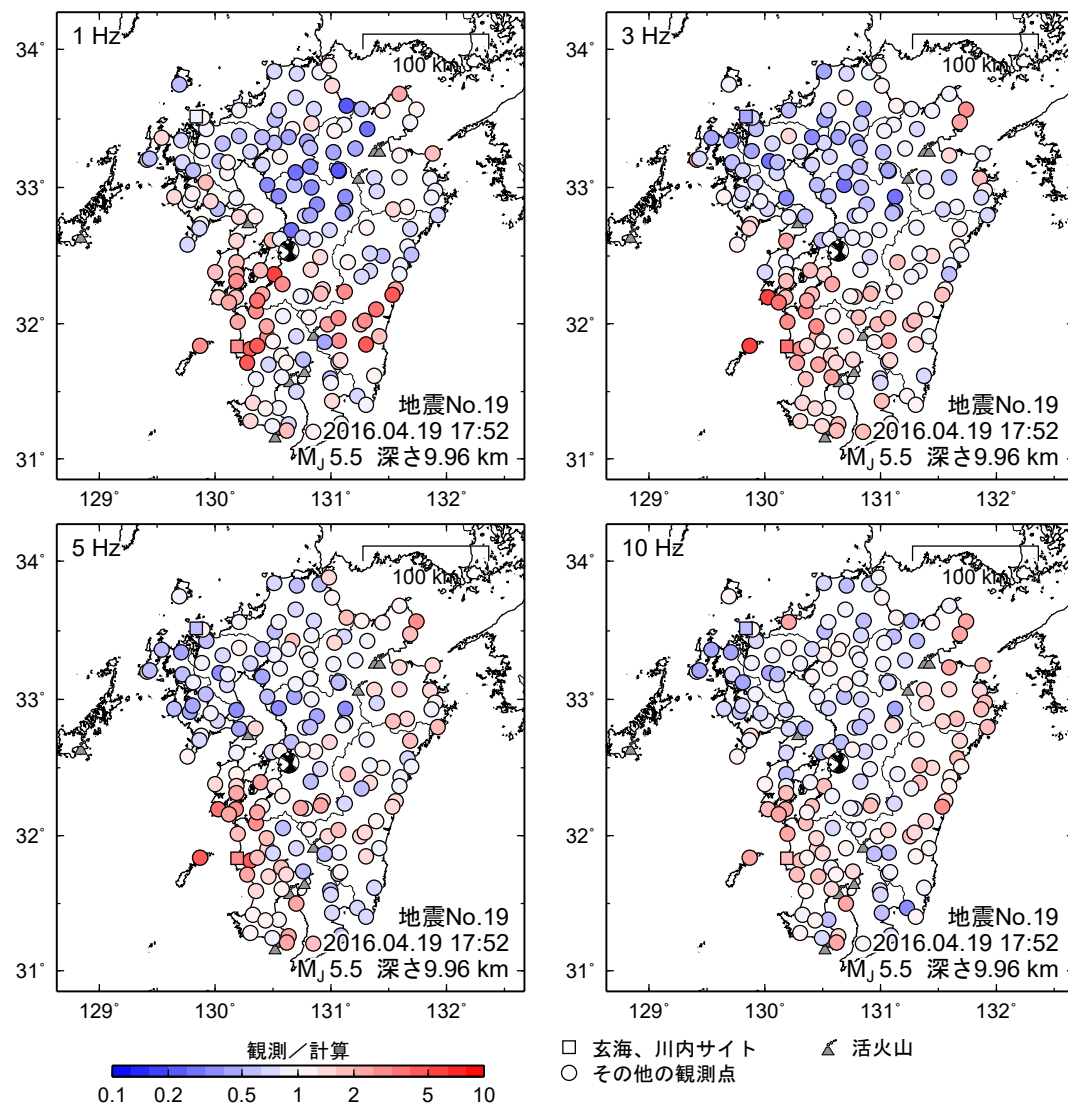
⑲熊本県熊本地方の地震

玄海原子力発電所の地震ごとのフーリエ振幅スペクトルの比較の例

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

■ 観測点ごとの残差の空間分布

- ブロックインバージョン解析において、震源特性 $S_m(f)$ は全観測点の平均的な特性を算出したものであり、方位性を有する破壊伝播効果等は考慮されていない。観測点ごとの残差の空間分布に偏りがある場合、破壊伝播効果などの影響を受けていると考えられる。



①9 熊本県熊本地方の地震

残差の空間分布の例

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査以降、継続的に敷地地盤において地震観測を実施。敷地で得られた地震観測記録は76地震から156地震に増加している（302頁）。今回、既許可以降取得した地震観測記録を含めて、以下の①、②についてデータの更新を実施。

- ①地震の到来方向による増幅特性
- ②地震観測記録とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルの比

- ①・②のデータを更新した結果は以下のとおり。

①地震の到来方向による増幅特性の検討（303～306頁）

- ・ 既許可時審査と同様に、地震の到来方向による特異な地盤増幅の傾向は見られない。
- ・ ただし、南方向は2016年熊本地震により数が増加し、既許可時審査に比べて短周期側の比率が大きくなる傾向があるが、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示している。

②地震観測記録とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルの比率（307～309頁）

- ・ 既許可時審査と同様に、全周期帯で概ね1を下回る傾向。
- ・ ただし、①の検討において、伝播距離が近い場合、短周期側の比率が大きくなる傾向があるため、伝播距離の違いが短周期側の比率に与える影響について検討した結果、伝播距離が近い地震は短周期側の比率が大きくなる傾向にあるが、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示しており、概ね1を下回る傾向は変わらないことを確認。

- 以上、①・②を踏まえ、①地震の到来方向による特異な地盤増幅の傾向はなく、②地震観測記録とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルの比率が概ね1を下回る傾向は変わらず、観測記録の補正係数を用いない既許可の判断が変わるものではないことを確認。

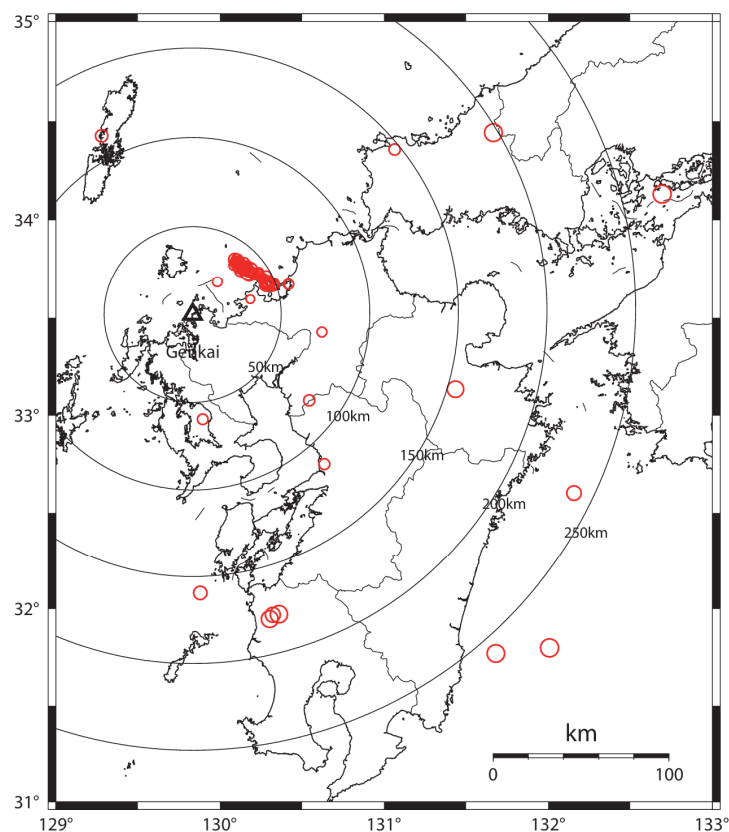
※なお、既許可以降に得られた地震観測記録は地下構造モデルの設定に用いていること、及び既許可と比較して震央距離が同程度からやや近い地震観測記録が増加したことを踏まえ、既許可審査時以降に取得した地震観測記録を①・②において参照する。

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査から敷地で得られた地震観測記録は76地震から156地震に増加。
- 既許可時審査以降に増加した地震観測記録を含め、①地震の到来方向による増幅特性の検討及び②地震観測記録とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルの比についてデータを更新。

計76地震

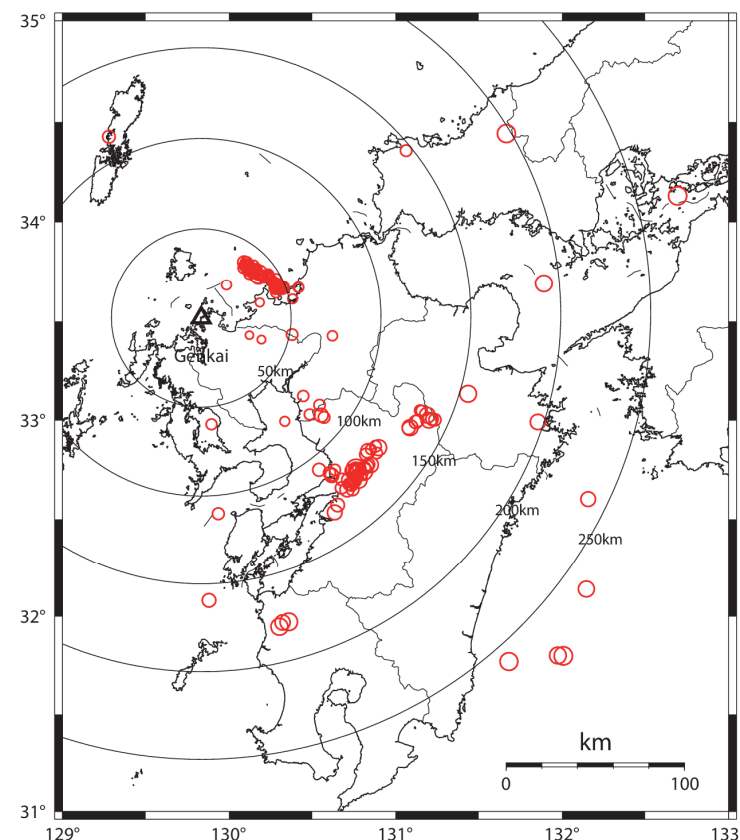
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

計156地震

※2000年鳥取県西部地震等は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

+80地震

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

①地震の到来方向による増幅特性について

- 既許可時審査と同様に、敷地で得られた地震観測記録のうちM5.0以上の内陸地殻内地震及び内陸地殻内地震以外の地震を対象に、地震の到来方向による増幅特性について検討を実施。
- 敷地で得られたM5.0以上の地震観測記録は既許可時審査から23地震増加。(下表参照:ハッチ部は既許可審査時の地震)

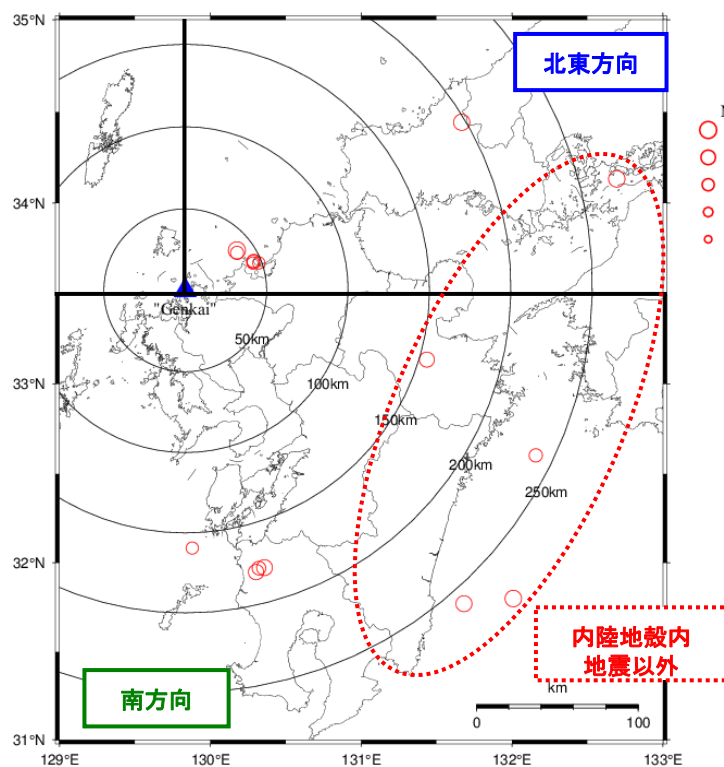
到来方向	地震名	発生日	M	震央距離(km)	深さ(km)
内陸地殻内地震以外	日向灘	1996年10月19日	6.9	279	34.0
	日向灘	1996年12月3日	6.7	260	38.0
	瀬戸内海安芸灘	2001年3月24日	6.7	273	46.5
	日向灘	2006年3月27日	5.5	240	34.8
	大分県西部	2006年6月12日	6.2	155	145.2
	伊予灘	2014年3月14日	6.2	192	78.0
	日向灘	2014年8月29日	6.0	265	18.2
	大分県南部	2015年7月13日	5.7	197	58.0
	日向灘	2019年5月10日	6.3	277	25.0
北東方向	山口県	1997年6月25日	6.6	198	8.3
	鳥取県西部	2000年10月6日	7.3	377	9.0
	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	9.2
	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	10.5
	福岡県中部	2005年4月10日	5.0	45	4.7
	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	13.5
	福岡県中部	2005年4月20日	5.1	45	13.3
	福岡県中部	2005年5月2日	5.0	48	11.4

到来方向	地震名	発生日	M	震央距離(km)	深さ(km)
南方向	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	11.9
	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	14.8
	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	9.2
	天草灘	2006年2月4日	5.1	159	11.6
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	8.0
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.0	126	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.1	125	14.0
	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	7.0
	熊本県熊本地方	2016年4月15日	5.0	125	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	12.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.3	126	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	15.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	11.0
	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	7.0
	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	16.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	12.0
	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	9.0
	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	10.0
	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.0	130	11.0
	熊本県熊本地方	2016年8月31日	5.2	115	13.0
	熊本県熊本地方	2019年1月3日	5.1	86	10.0

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

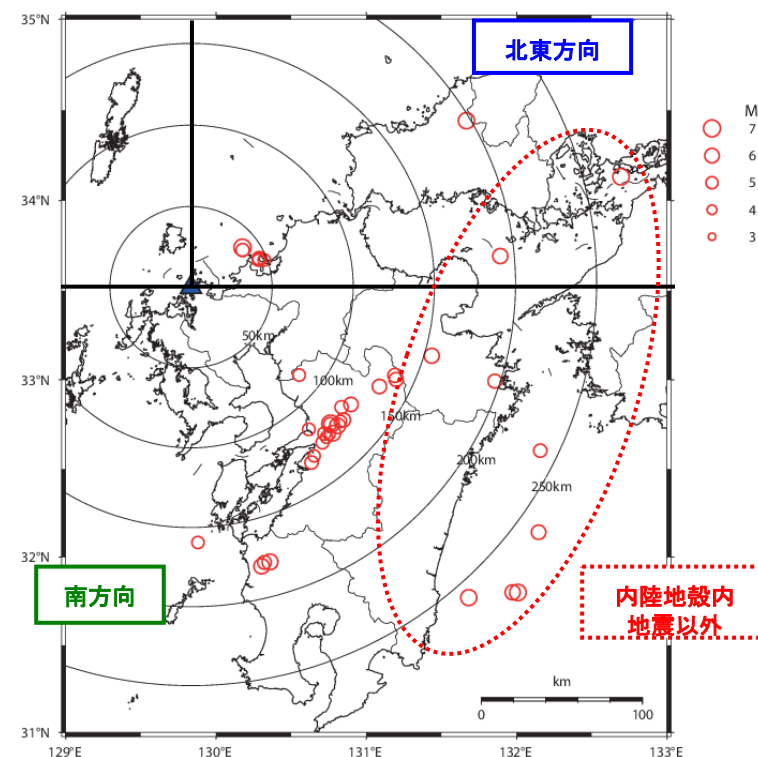
- 既許可時審査以降、計23の地震観測記録が増加している。地震観測記録の内訳は以下の通り。
 - 北東方向の地震観測記録は増加していない。
 - 南方向の地震観測記録は、19地震増加している。(2016年熊本地震前震・本震・余震)
 - 内陸地殻内地震以外の地震観測記録は4地震増加している。

方向	既許可時審査	既許可時審査以降
北東方向	8	8 (0)
南方向	4	23 (+19)
内陸地殻内地震以外	5	9 (+4)



※2000年鳥取県西部地震は図の枠外

敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

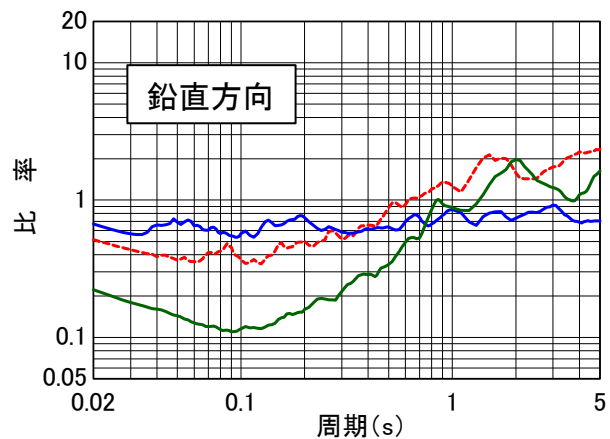
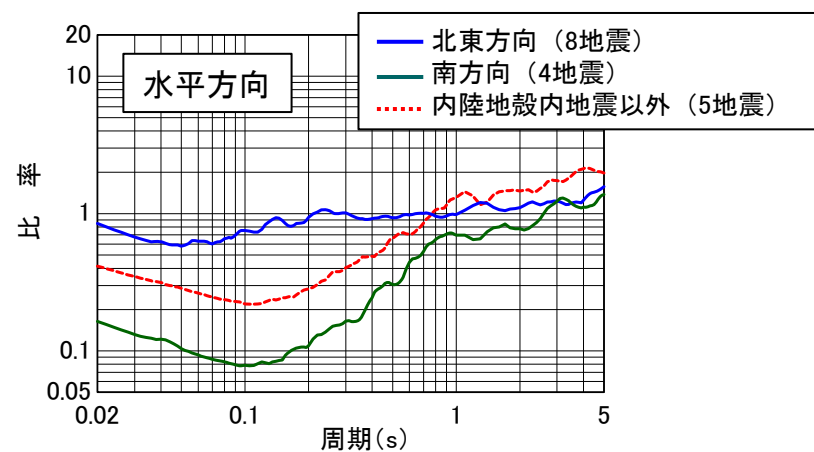


※2000年鳥取県西部地震は図の枠外

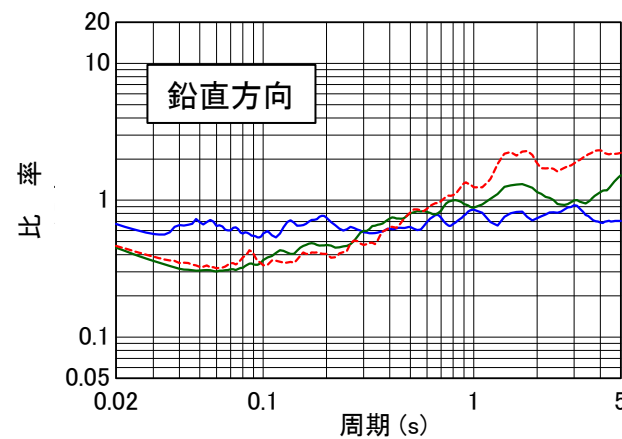
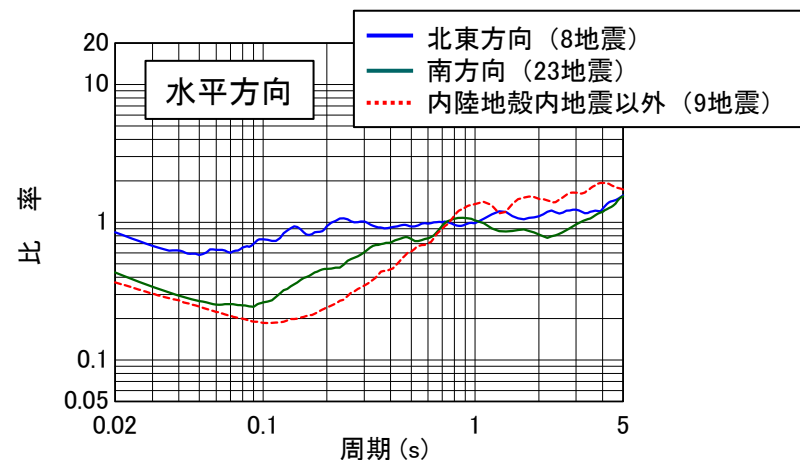
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査以降に取得した23地震を加えたM5.0以上の地震により、敷地地盤で得られた地震観測記録（EL.11m）と Noda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルの比を到来方向別に比較・検討した結果、各方向のばらつきはあるが、短周期側で概ね1を下回っており、特異な地盤増幅がないことを確認した。
- ただし、南方向は2016年熊本地震により数が増加し、既許可時審査に比べて短周期側の比率が大きくなる傾向があるため、次頁でこれらの要因を分析する。



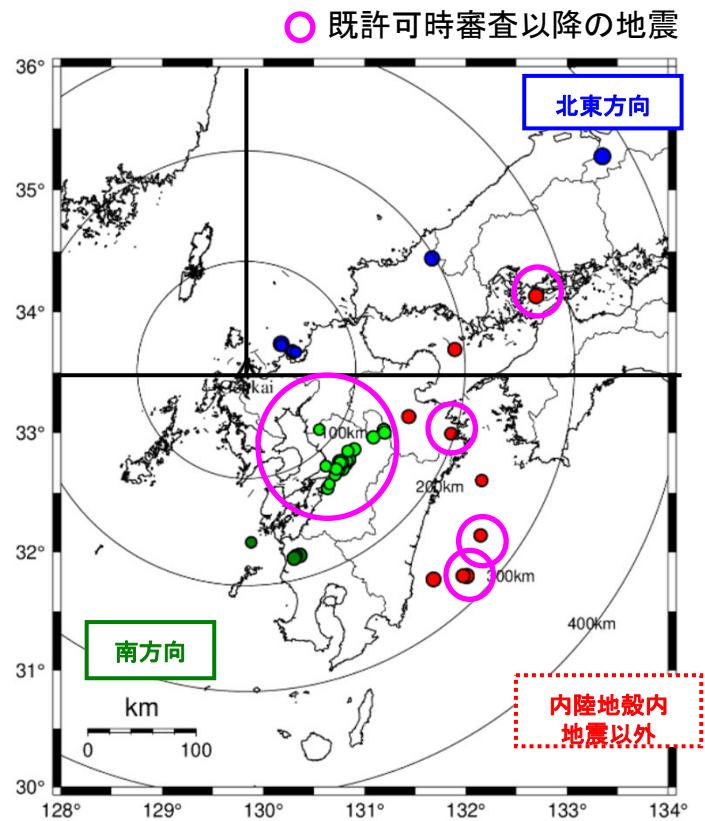
既許可時評価
(観測開始～既許可時審査)



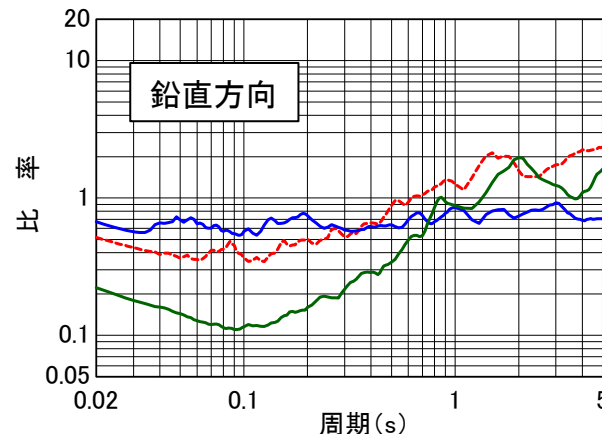
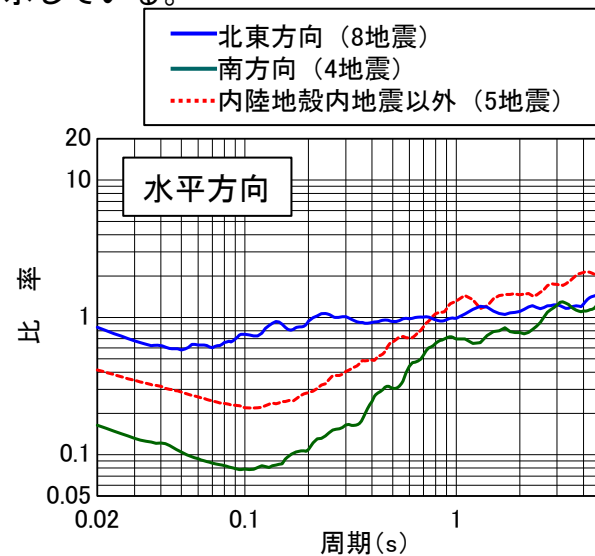
今回評価
(観測開始～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

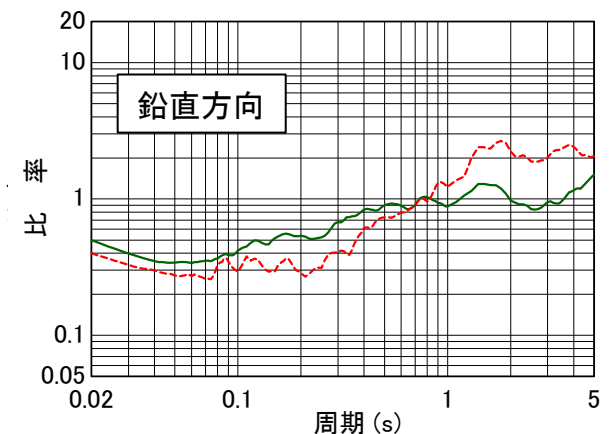
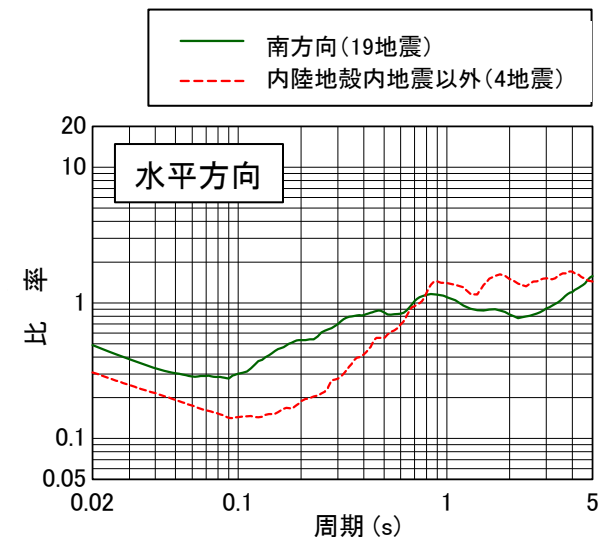
- ここでは、短周期側の比率が大きい傾向が見られた南方向に着目して、既許可時審査時と既許可時審査から2019年度までの比を算出。
- 既許可時審査の南方向では1997年鹿児島県北西部地震の地震群（震央距離180km程度）が主であり、伝播距離の減衰効果により短周期側が小さい比率になっていた。一方、既許可時審査以降の南方向は、2016年熊本地震の地震群（震央距離120～130km程度）が主であり、1997年鹿児島県北西部地震の地震群より震央距離がやや近いため、伝播距離の減衰効果がなく、短周期側の比が大きくなったと考えられる。
- いずれも、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示している。



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)



既許可時評価
(観測開始～既許可時審査)



今回評価
(既許可時審査～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

②地震観測記録とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルの比較

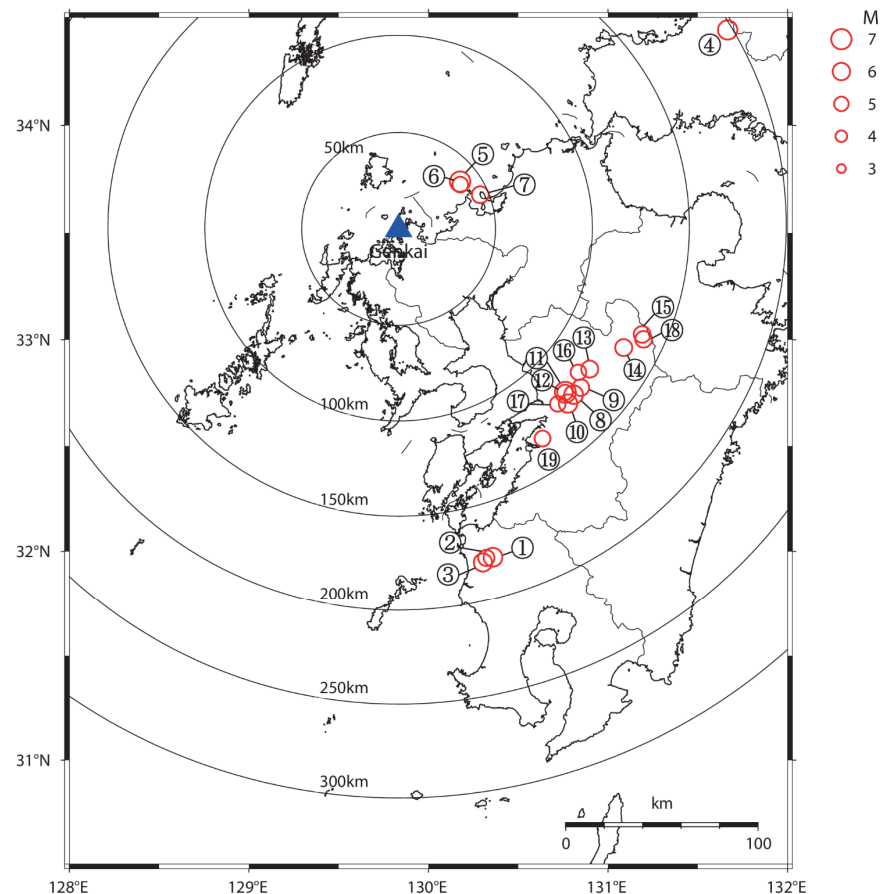
- 既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震^{*}の地震観測記録とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルとの比を算定。

^{*} Noda et al. (2002)²⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km以内の内陸地殻内地震を選定

地震諸元 (計19地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

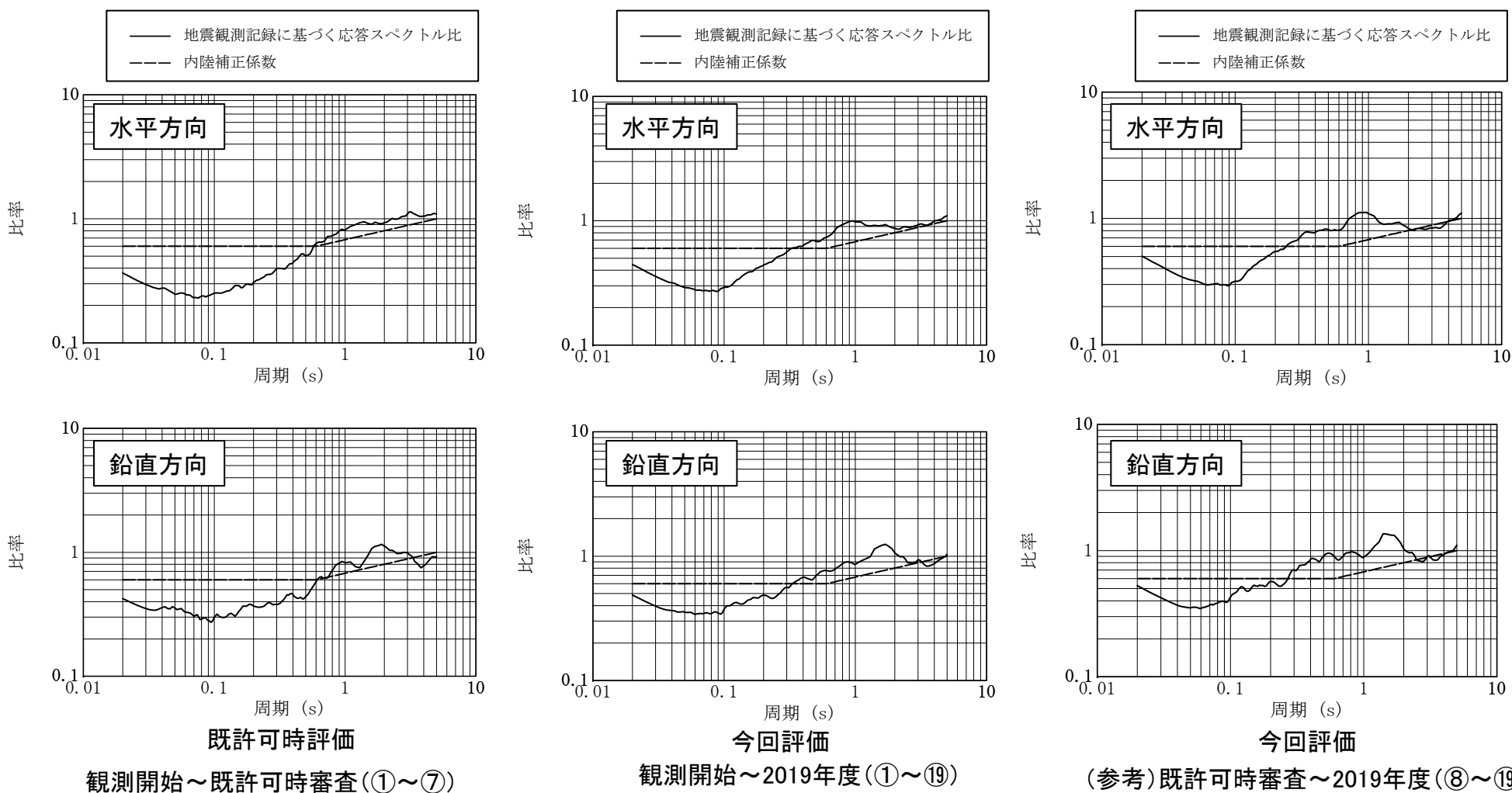
既許可時審査
↑
↓
今回新たに追加



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度) (計19地震)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査までと2019年度までに敷地地盤で得られた内陸地殻内地震の地震観測記録（M5.4以上の地震、震央距離200km程度以内）とNoda et al. (2002)²⁾による応答スペクトルとの比を比較・検討した結果、全周期帯で概ね1を下回る傾向であることを確認した。
- なお、既許可時審査に比べて、若干短周期側の比率が大きくなっているが、①で示したとおり、2016年熊本地震の地震群が増加したことによる伝播距離の減衰効果によるものであり、特異な傾向の変化ではない。



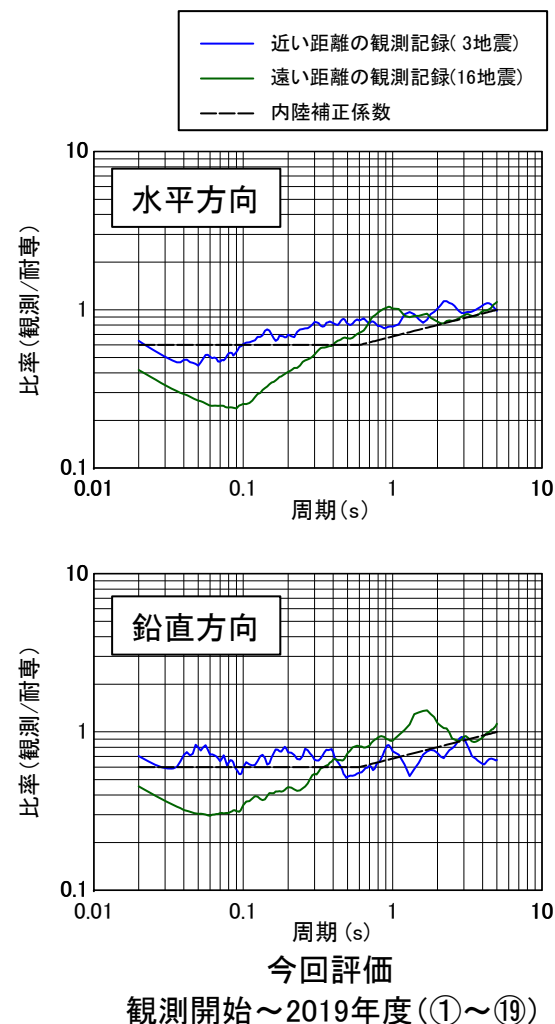
【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- ①の検討において、伝播距離が近い場合、短周期側の比率が大きくなる傾向があるため、伝播距離の違いが短周期側の比率に与える影響について検討を実施。伝播距離が近い3地震(⑤⑥⑦)と、遠い16地震(①~④, ⑧~⑱)に分類。
- 検討した結果、伝播距離が近い地震(青線)は、伝播距離が遠い地震(緑線)より短周期側の比率が大きくなる傾向にあるが、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示しており、概ね1を下回る傾向は変わらないことを確認した。

伝達関数(周波数依存型)による
地盤同定に用いた地震諸元(計19地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離(km)	入射角(°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

既許可時審査
↑
今回新たに追加
↓



【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

- 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動評価の記載について、不確かさ及び保守性に関する記載を充実
- 既許可時のまとめ資料のうち、各記載の該当箇所を整理。

今 回

7.5.6.2 震源を特定せず策定する地震動

(2) 検討対象地震の選定と震源近傍の観測記録の収集

b. 「全国共通に考慮すべき地震動」 (Mw6.5程度未満の地震)

(a) 2004年北海道留萌支庁南部地震

(中略)

□2004年北海道留萌支庁南部地震では、震源近傍のK-NET港町観測点において□佐藤ほか(2013)⁽²⁵⁾により、ボーリング調査等による精度の高い地盤情報が得られて□おり、信頼性の高い基盤地震動が推定されている。これらを参考に地盤モデルの不確かさを踏まえて基盤地震動を算定する。敷地の解放基盤表面のS波速度は、K-NET港町観測点のS波速度0.938km/sを上回る1.35km/sであることから、敷地の解放基盤波は保守的にK-NET港町観測点の基盤地震動を採用する。この解放基盤波にさらに保守性を考慮した上で□地震動を設定する。

(以下略)

①2004年北海道留萌支庁南部地震に関する地盤モデルの不確かさに関する記載 (313頁、314頁)

②敷地の解放基盤波を保守的に設定するため、K-NET港町観測点のS波速度の0.938km/sを上回る1.35km/sの敷地の解放基盤波として、K-NET港町観測点の基盤地震動を採用する旨を記載。(312頁)

③K-NET港町観測点の基盤地震動を採用した解放基盤波に、当社の読み取りである不確かさを考慮してさらに余裕(10ガル程度)を持たせた地震動を2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動として考慮した旨の記載 (313頁、315頁)

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

2004年北海道留萌支庁南部地震の「震源を特定せず策定する地震動」への反映

第89回審査会合
資料再掲

[検討全体の流れ](電力大での検討)

佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見

- ・ ボーリング、PS検層により、深さ-41mまでの地盤モデルを構築
- ・ 室内試験により、非線形性に係るデータも取得
- ・ それらのデータにより、解放基盤波 ($V_s=938$ m/s)を推計 **【P343】**

解放基盤波の妥当性に係るこれまでの整理

- ・ はぎとり手法 (SHAKE)における不確かさの検討 (有効ひずみの補正係数 α のケーススタディ)
- ・ その他のはぎとり手法による検討
- ・ 観測事実 (H/Vスペクトル)再現の試み
- ⇒ 現状の解放基盤波の妥当性 (観測事実をよく説明できること)を確認

今後の取り組み

- ・ 深さ-6m以深で追加取得したデータ (非線形特性等)を踏まえた妥当性の確認
- ・ 深さ-500mまでのボーリングデータを踏まえた、より深い (硬い: 当社解放基盤相当)位置での解放基盤波の確認

現時点における当社としての判断 (当社独自の判断)

- ・ 佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見 [現位置で直接確認したデータに基づいていること]、これまでの整理 [手法の不確かさについての確認]から、現状の解放基盤波の信頼性は高いと考えられる
- ・ また、当社解放基盤 (川内: $V_s=1500$ m/s、玄海: $V_s=1350$ m/s)よりも軟らかい位置での地震動であり、現状の解放基盤波は保守性を有している
- ・ これらの妥当性・保守性については、今後の取り組みによって更に明らかになっていくもの
- ・ しかしながら、それまでにはある程度の時間が必要
- ・ よって、それが明らかとなっていく途上である現時点においては、一定の余裕を持たせた地震動を「震源を特定せず策定する地震動」として新たに設定し、それによって施設の安全性を確認していくこととする

＜新たな地震動の設定の考え方＞

- ・ 一定の余裕を持たせた地震動を設定することを目標とし、パラメータスタディを実施

【P344~P352】

- ・ その結果を踏まえ、「震源を特定せず策定する地震動」として設定

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

第89回審査会合
資料再掲

- 2004年北海道留萌支庁南部地震の現状の解放基盤波については、現時点においては、更なるデータによってその妥当性・保守性が明らかになっていく途上であることに鑑み、当社独自に一定の余裕（保守性）を持たせた地震動を設定することを目標として、以下の流れで整理・検討を実施した。

【余裕を持たせた地震動を設定するための対象となるパラメータの選定】

- ・ 佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見においては、深さ-6mまでの非線形特性に係るデータを取得し、深さ-41mにおける解放基盤波を推計している。
- ・ 現在、深さ-6m以深の非線形特性について、追加取得したデータを基に更なる検討が進められているところ。
- ・ 深さ-6m以深の非線形特性を考慮する場合、傾向としては、減衰の増大によるはざとり結果(地震動レベル)の増大、剛性の低下によるはざとり結果(地震動レベル)の低下が見られることが想定される。

この2つの傾向が深さ-41mでのはざとり結果にどのような影響を与えるかは今後の更なる検討を待たねばならないが、現状の解放基盤波が観測事実(H/Vスペクトル等)をよく説明できていることを踏まえると、大きな変動をもたらすものとはならないと考えられる。

- ・ ここでは、上記の2点の傾向を踏まえ、はざとり結果(地震動レベル)が大きくなるパラメータ:減衰のみを対象として、そのパラメータスタディを実施し、余裕を持たせた地震動を設定することとした。
- ・ なお、現在-41m以深(-500mまで)のボーリングデータを踏まえた更なる検討も進められているが、現状よりも硬い岩盤上での解放基盤波の推計であり、地震動レベルはより小さくなる方向であることから、ここでは考慮しないこととした。

佐藤ほか(2013)⁷⁾における地震動評価モデル

上面深さ(m)	P波速度 Vp(m/s)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10 ³ kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	457	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5		200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1		200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5						
2	952	290	2.00	1.0	0.01	礫2
3		290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
4		370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5		400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
6		473	2.00	1.0	0.01	—
7	1722	549	2.00	9.0	0.01	—
16		604	2.06	7.0	0.01	—
23		653	2.06	18.0	0.01	—
38						
41	2215	938	2.13	—	0.01	—

【余裕を持たせた地震動の設定】

- ・ 深さ-6m～-41m範囲の減衰定数について、既往の知見を踏まえたパラメータスタディを実施。
- ・ その結果を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定。

①
③

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

第89回審査会合
資料再掲

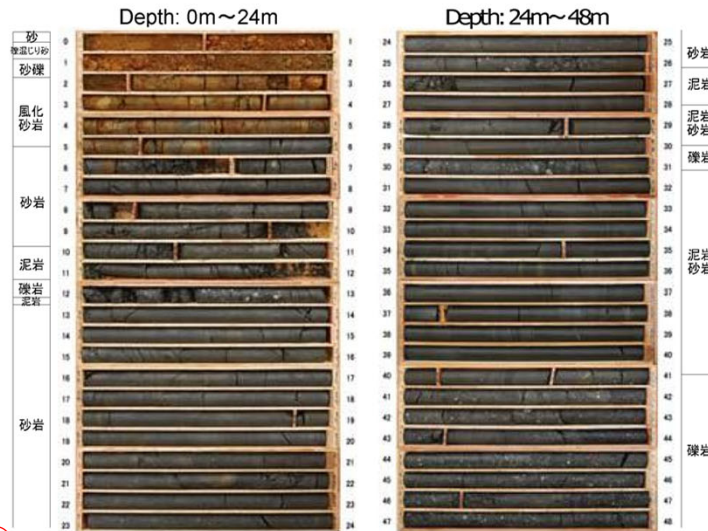
■ 前頁での知見の整理を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定するための減衰の値を以下のとおり判断。

・ 前々頁の知見では、岩盤の亀裂やランダム性等の不均質性の影響により、室内試験の結果よりも減衰が大きくなる場合があるとの指摘。

・ 佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見では、留萌のボーリングコア写真からは深さ-6m以深は比較的均質な性状であることが見て取られ、深さ-6mまでの室内試験結果による非線形特性からも減衰の値は1%程度以下であることが見て取れる。すなわち、ある程度の不均質性を考えたとしても、岩盤としての減衰はそれほど大きなものではないと推察される。

・ しかしながら、深さ-6m以深の減衰については、現在、定量的なデータの評価が進められている途上であり、現時点で確定的に判断することは難しい。

・ よって、前頁で整理した減衰の実例を参考として、**3%まで減衰を大きくしたパラメータスタディを実施し、その結果を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定することと判断。**



① 佐藤ほか(2013)⁷⁾におけるボーリングコア写真（左：深さ0m~24m、右：深さ24m~48m）

佐藤ほか(2013)⁷⁾における地震動評価モデル

上面深度 (m)	P波速度 Vp(m/s)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10 ³ kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	457	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5		200	2.00	0.5	0.03	凍湿じり砂
1		200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5	952	290	2.00	1.0	0.01	礫2
2						風化砂岩1
3		290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
4		370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5		400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
6	1722	473	2.00	1.0	0.01	—
7		549	2.00	9.0	0.01	—
16		604	2.06	7.0	0.01	—
23		653	2.06	18.0	0.01	—
38	—					
41	—					
41	2215	938	2.13	—	0.01	—

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

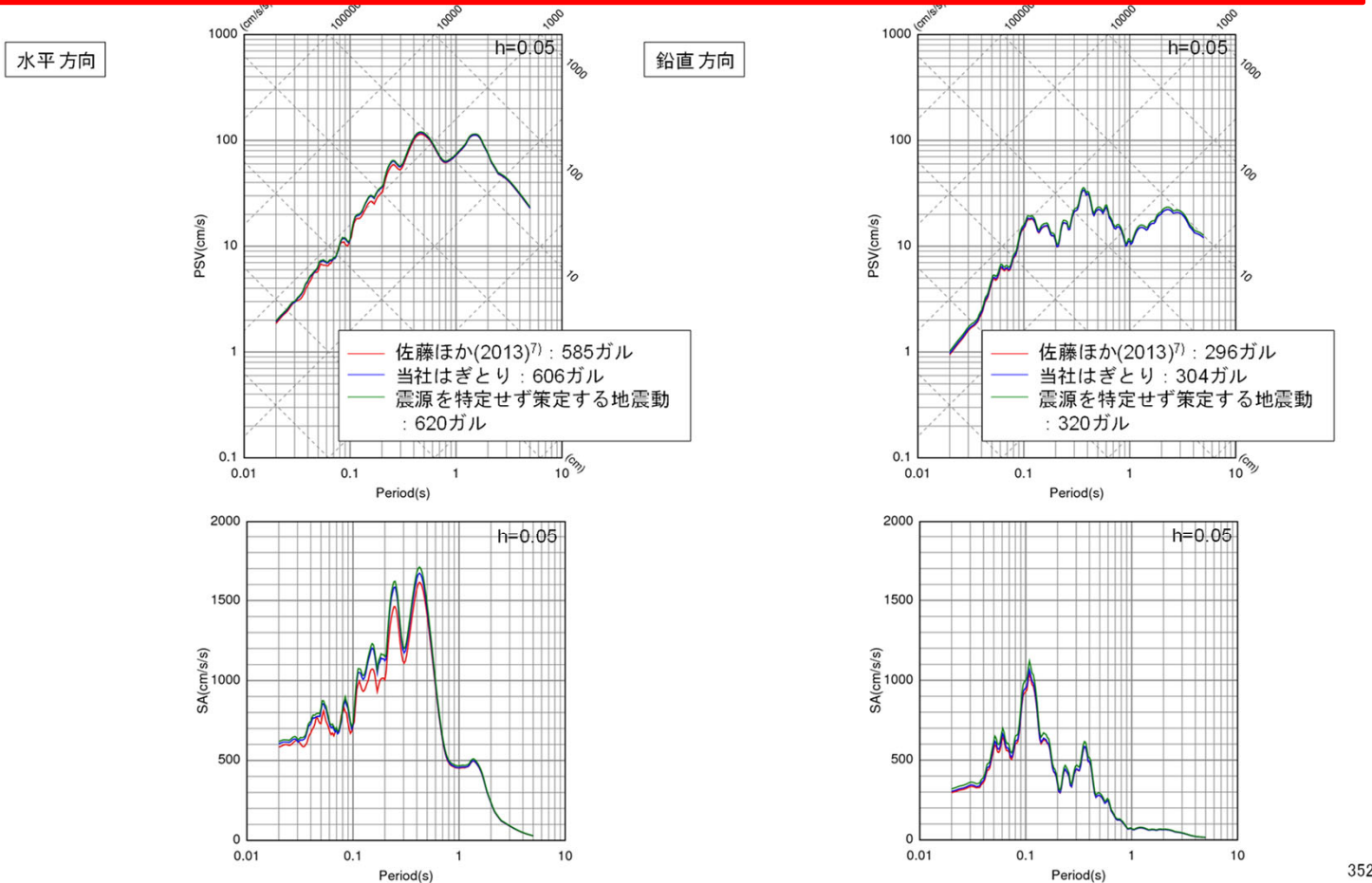
平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

第89回審査会合
資料再掲

■ 前頁までの検討に対し、当社独自の'読み取り'による解析であることの不確かさを踏まえ、さらに余裕(10ガル程度)を持たせた下記の地震動を震源を特定せず策定する地震動として考慮する。

③



【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

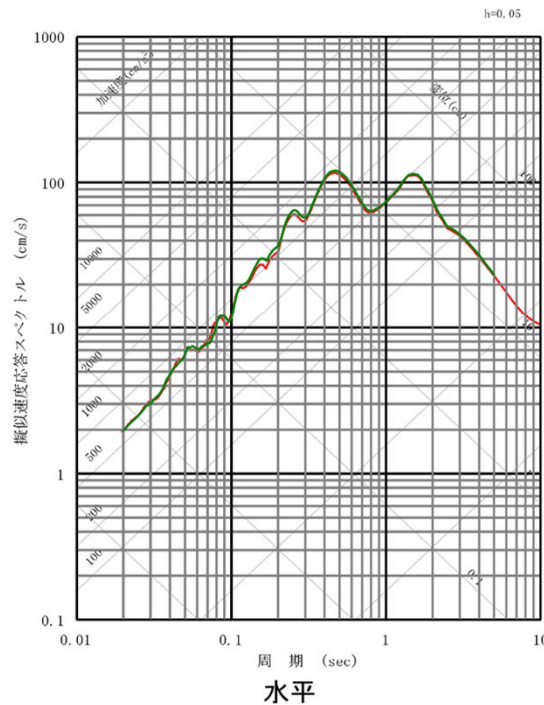
- 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動（以下、「留萌地震動」とする。）の策定にあたり、当社川内及び玄海では、佐藤ほか(2013)⁴¹⁾の図の“読み取り”により地盤モデルを設定している。
- 他社原子力発電所（硬岩サイト）では、水平動については、佐藤ほか(2013)⁴¹⁾による数値データに基づき、上下動については、佐藤ほか(2013)⁴¹⁾以降に再測定したPS検層に基づき、地盤モデルを設定している。
- 上記の通り、設定した地盤モデルはそれぞれ異なるが、当社川内及び玄海と他社原子力発電所の留萌地震動について比較した結果、地震動レベルは概ね同等であることを確認済みである。

5. 震源を特定せず策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

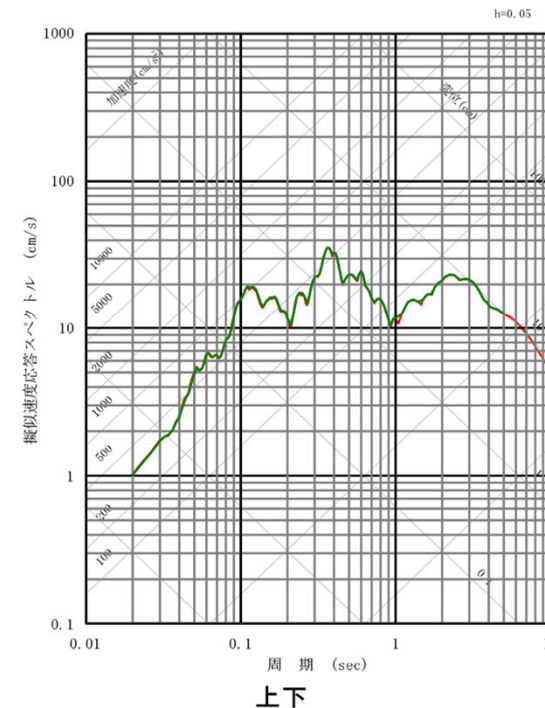
101

■ 2004年北海道留萌支庁南部地震の評価結果



【当社】

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動



【他社原子力発電所（硬岩サイト）】

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

第131回審査会合
資料1-3 高浜発電所
地震動評価について
に加筆

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考】 川内原子力発電所及び玄海原子力発電所と他社の留萌地震動の策定の比較

- ・ 当社川内及び玄海と他社原子力発電所の留萌地震動の策定に関する違いは以下のとおり。

当社川内及び玄海と他社原子力発電所（硬岩サイト）の留萌地震動の策定の違い

	当社（川内・玄海）	他社（硬岩サイト）
水平動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)⁴¹⁾の非線形特性のうち礫混じり砂の非線形特性について、<u>佐藤ほか(2013)⁴¹⁾の図の“読み取り”</u>による値を設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（319頁）し、等価線形化法によりはぎとり波（<u>606ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に余裕を考慮して、620ガルの基準地震動を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)⁴¹⁾の非線形特性のうち礫混じり砂の非線形特性について、<u>佐藤ほか(2013)⁴¹⁾による数値データに基づき</u>設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（321頁）し、等価線形化法によりはぎとり波（<u>609ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、620ガルの基準地震動を策定
上下動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)⁴¹⁾のP波速度、地盤減衰について、<u>佐藤ほか(2013)⁴¹⁾の図の“読み取り”</u>による値を設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（320頁）し、線形解析によりはぎとり波（<u>304ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に余裕を持たせて、320ガルの基準地震動を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)⁴¹⁾以降に、<u>再測定を実施したPS検層に基づき地盤モデルを再設定</u>（321頁）し、線形解析によりはぎとり波（<u>306ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、320ガルの基準地震動を策定

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考】 当社の留萌地震動に用いた地盤モデル（水平動）

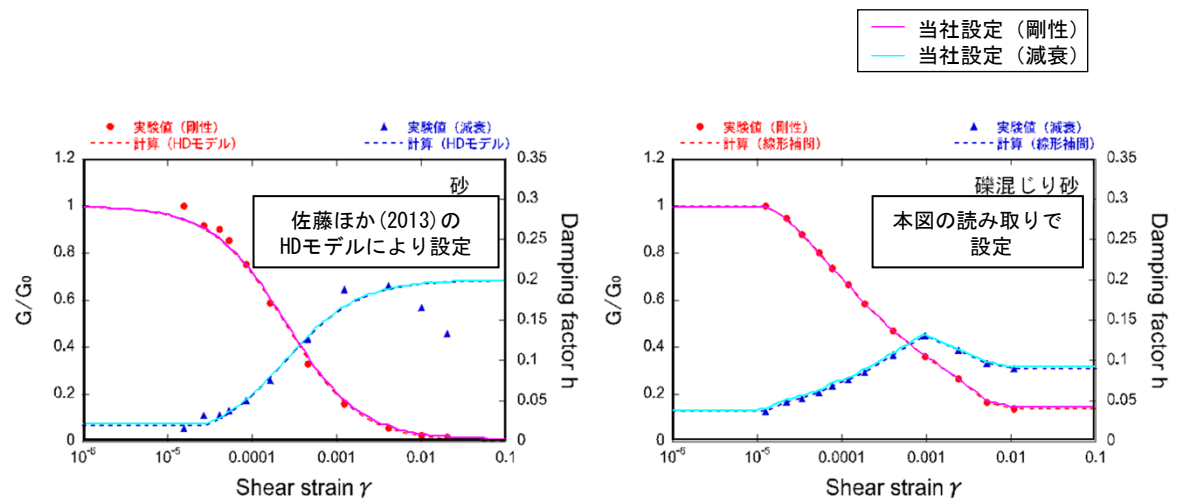
- ・ 礫混じり砂の非線形特性については、佐藤ほか（2013）⁴¹⁾の図の読み取りで設定（礫混じり砂以外はHD（Hardin-Drnevich）モデルにより設定）
- ・ EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定

当社独自に設定した初期モデル

上面深度 (m)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10^3kg/m^3)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5	200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1	200	2.00	1.0	0.02	礫1
2	290	2.00	1.0	0.01	礫2
3	290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
4	370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5	400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
6	473	2.00	1.0	0.03	—
7	549	2.00	9.0	0.03	—
16	604	2.06	7.0	0.03	—
23	653	2.06	18.0	0.03	—
41	938	2.13	—	0.03	—

 読み取りにより地盤の非線形特性を設定

 減衰定数1%⇒3%に設定

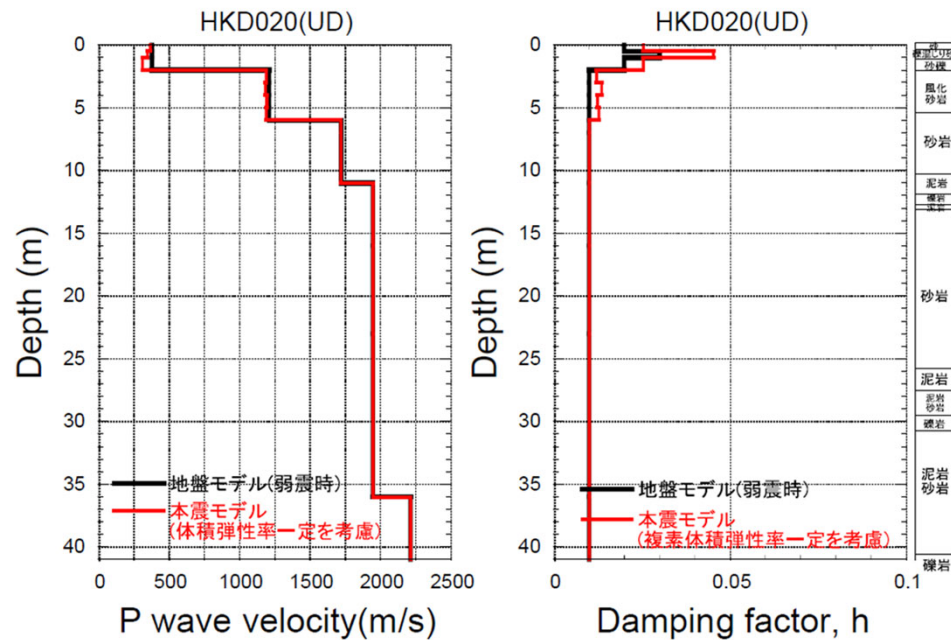


【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考】 当社の留萌地震動に用いた地盤モデル（上下動）

- ・ 佐藤ほか（2013）⁴¹⁾の「（付録）上下成分の基盤地震動の推定」の付図1から、P波速度 V_p 及び減衰定数 h を読み取り、地盤モデルを設定
- ・ EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定

佐藤ほか（2013）⁴¹⁾によるP波速度と減衰定数



当社独自に設定した地盤モデル（上下動）

上面深度 (m)	P波速度 V_p (m/s)	密度 ρ (10^3kg/m^3)	層厚 H(m)	減衰定数 h
0	360	1.90	0.5	0.0253
0.5	345	2.00	0.5	0.0452
1	312	2.00	0.5	0.0253
1.5	312	2.00	0.5	0.0253
2	1185	2.00	1.0	0.0120
3	1180	2.00	1.0	0.0134
4	1190	2.00	1.0	0.0123
5	1185	2.00	1.0	0.0127
6	1722	2.00	1.0	0.03
7	1722	2.00	4.0	0.03
11	1947	2.00	5.0	0.03
16	1947	2.06	7.0	0.03
23	1947	2.06	13.0	0.03
36	2215	2.06	2.0	0.03
38	2215	2.06	3.0	0.03
41	2215	2.13	—	0.03

付図 1 2004 年留萌地震時の P 波速度と減衰定数

- ・ 佐藤ほか（2013）⁴¹⁾は、水平方向の初期地盤モデルを用いて求めた複素体積弾性率と2004年留萌地震時のEW成分の収束物性値から V_p と h_p を算出
- ・ 水平方向の地盤モデルにより密度 ρ は既知のため、P波速度 V_p 、減衰定数 h を佐藤ほか（2013）⁴¹⁾付図1から読み取り（図中：赤線）

読み取りによりP波速度 V_p 、減衰定数 h を設定

減衰定数1%⇒3%に設定

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

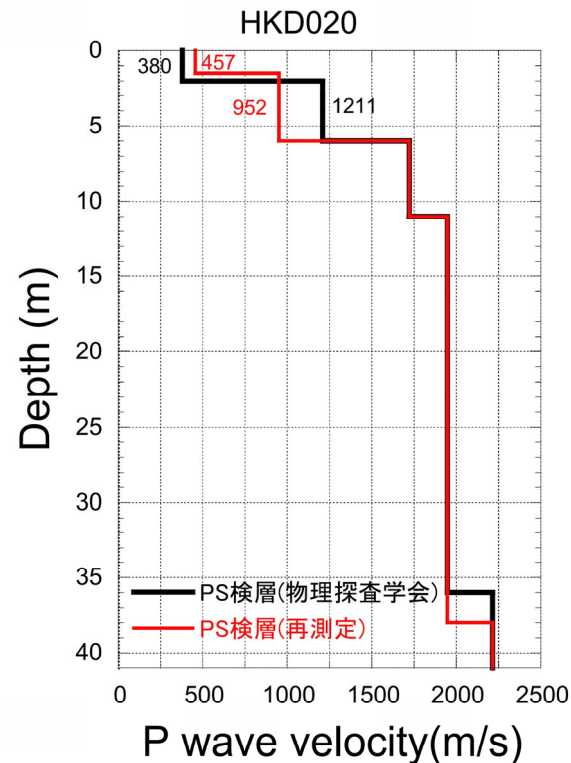
【参考】 他社原子力発電所（硬岩サイト）の留萌地震動に用いた地盤モデル

- ・ 水平動の地盤モデルの礫混じり砂の非線形特性については、佐藤ほか（2013）⁴¹⁾による数値データに基づき、EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定
- ・ 上下動の地盤モデルは、佐藤ほか（2013）⁴¹⁾以降に再測定を実施したPS検層に基づき、再設定

表層の地盤モデル見直しに伴う上下動の再評価

23

■表層部に重点をおいたPS検層の再測定の結果、港町観測点のP波速度モデルが以下のとおり変更されている。



第101回審査会合
資料1-1 高浜発電所・大飯発電所 震源を特定せず策定する地震動について
コメント回答（2004年留萌支庁南部の地震） 抜粋

参考文献 (1/3)

- 1) 加藤研一・宮腰勝義・武村雅之・井上大栄・上田圭一・壇一男(2004) : 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—、日本地震工学会論文集、第4巻、第4号、pp. 46-86、2004年.
- 2) S. Noda, 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, pp. 399-408, Oct. 16-18, 2002.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2007) : 2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動予測手法の検証について (中間報告) .
- 4) 防災科学技術研究所 : 地震ハザードステーション J-SHIS、<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 5) 武村雅之, 池浦友則, 高橋克也, 石田寛, 大島豊 (1993) : 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年4月.
- 6) 福島美光, 翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp. 37-46, 1994年6月.
- 7) 木下繁夫, 大池美保(2002) : 関東地域の堆積層—基盤系におけるS波の減衰特性 —0.5~16Hz—, 地震 第2輯, 第55巻, pp. 19-31, 2002年.
- 8) R. Fukushima, H. Nakahara, and T. Nishimura(2016) : Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 552-559, 2016.
- 9) 佐藤浩章, 金谷守, 大島靖樹 (2006) : 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年6月.
- 10) 佐藤浩章 (2012) : 地震動評価のための地表に近い岩盤における減衰の測定とそのモデル化, 物理探査, 第65巻第1&2号(2012), pp. 37-51.
- 11) R. E. Abercrombie(1998) : A Summary of Attenuation Measurements from Borehole Recordings of Earthquakes: The 10 Hz Transition Problem, Pure appl. geophys., 153 (1998), pp. 475-487.
- 12) Riga, Evi, F. Hollender, A. Roumelioti, P.-Y. Bard, and K. Pitilakis (2019) : Assessing the Applicability of Deconvolution of Borehole Records for Determining Near-Surface Shear-Wave Attenuation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 109, No.2, pp. 621-635, 2019.
- 13) John G. ANDERSON(2004) : QUANTITATIVE MEASURE OF THE GOODNESS-OF-FIT OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS、13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada、Paper No. 243, August 1-6, 2004.

参考文献 (2/3)

- 14) 地盤工学会(2013) : 地盤の弾性波速度検層方法, JGS1122-2013, 2013年3月.
- 15) 信岡大, 東宏幸, 大場政章(2012) : PS検層の手法を用いた地盤減衰特性(Q値)の評価, 物理探査, 第6巻, 第1&2号, 79-90, 2012年.
- 16) 佐藤浩章, 岡田哲実(2012) : 地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その5) -実岩盤における減衰付加効果の解明のための岩石コアの減衰測定-, 電力中央研究所報告, N11063, 2012年5月.
- 17) M. N. Toksöz, D. H. Johnston, and A. Timur(1979), Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements, Geophysics, 44, 4, pp. 681-690, 1979.
- 18) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2003) : 布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価について.
- 19) 日本電気協会(2015):原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015,一般社団法人日本電気協会.
- 20) 武村雅之(1990) : 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 第2輯, 第43巻, 1990年.
- 21) H. Kanamori(1977) : The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 20, 2981-2987, July 10, 1977.
- 22) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2013) : 九州地域の活断層の長期評価(第一版) .
- 23) 活断層研究会編(1991) : 「〔新編〕日本の活断層」分布図と資料、東京大学出版会.
- 24) 萩原尊禮編(1991) : 日本列島の地震 地震工学と地震地体構造、鹿島出版会.
- 25) 垣見俊弘、松田時彦、相田勇、衣笠善博(2003) : 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分、地震、第2輯、第55巻、第4号、pp. 389-406、2003年.
- 26) 気象庁 : 地震年報 2012年、地震月報(カタログ編) <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>
- 27) 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013) : 日本被害地震総覧 599-2012、東京大学出版会.
- 28) 宇津徳治・嶋悦三・吉井敏尅・山科健一郎編(2001) : 地震の事典 [第2版]、朝倉書店.
- 29) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2009) : 「全国地震動予測地図」報告書.
- 30) Zhao, D., S. Horiuchi and A. Hasegawa (1992) : Seismic velocity of the crust beneath the Japan Islands, Tectonophysics, 212, 289-301, 1992.
- 31) 八木原寛、清水洋、後藤和彦、角田寿喜(2001) : 近地地震データによる九州の地殻および最上部マンタルの3次元地震速度構造, 月刊地球, Vol. 23, No. 8, 583-588, 2001.
- 32) 石田寛, 太田外気晴, 原昭夫, 高橋克也(1987) : 室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰評価, 第15回地盤震動シンポジウム, 1987年8月.

参考文献 (3/3)

- 33) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明(2010): PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される地盤の減衰定数の関係性, 物理探査学会第122回学術講演会論文集(2010), 37-40, 2010年.
- 34) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明, 安藤誠, 鈴木晴彦, 松山尚典(2013): PS検層による地盤のS波の減衰定数の評価に関する検討ー鉛直アレー観測による減衰定数との比較ー, 物理探査, 第66巻, 第3号, 153-165, 2013年.
- 35) 佐藤浩章(2010): 地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その4)ー地表に近い岩盤における減衰定数の評価と速度の揺らぎとの関係ー, 電力中央研究所報告, N10004, 2010年8月.
- 36) 友澤裕介, 加藤研一, 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎(2021): 九州地域の震源特性・不均質伝播経路特性・サイト増幅特性の推定 強震観測記録のブロックインバージョン解析に基づく検討, 日本建築学会構造系論文集, 第86巻, 第790号, 1597-1606, 2021年12月.
- 37) 友澤裕介, 加藤研一, 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎(2019a): 九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定(その1) ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21238, 2019年9月.
- 38) 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎, 友澤裕介, 加藤研一(2019a): 九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定(その2) 距離減衰特性の方位性, サイト増幅特性, 震源特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21239, 2019年9月.
- 39) 友澤裕介, 加藤研一, 野尻揮一郎(2019b): 地震動の伝播経路特性の領域分割に着目した不均質減衰構造・震源特性・サイト増幅特性の推定 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域を対象とした検討, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻, 第756号, 171-181, 2019年2月.
- 40) 笠松健太郎, 池浦友則, 岡崎敦(2014): KiK-net地点における応答スペクトルのはぎとり倍率, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21207, 2014年9月.
- 41) 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, 電力中央研究所報告, 2013年12月.