玄海原子力発電所3号炉、4号炉審査資料	
資料番号	TTG－015
提出年月日	2022年12月1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おける地下構造モデルの設定について（コメント回答）

2022年12月1日

九州電力株式会社

目　次

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

2. 地下構造モデルの設定
   2.1 新たな地下構造モデルの設定方針
   2.2 地盤減衰（Q値）の設定
      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
            ① 地盤減衰（Q値）の検討方針
            ② 伝達関数（周波数依存型）による検討
            ③ 伝達関数（バイリニア型）による検討
            ④ 地震波干渉法による検討
         (2) 地盤減衰（Q値）の設定
         (3) 地盤減衰（Q値）の妥当性確認
            ① 応答スペクトルによる確認
            ② 伝達関数による確認
      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
            ①PS検層結果を踏まえた速度層断面による検討
            ②経験的地盤増幅率による検討
         (2) 地盤減衰（Q値）の設定
         (3) 地盤減衰（Q値）の妥当性確認
            ① ボーリング孔内における減衰測定による確認
            ② 岩石コアを用いた減衰測定による認確
   2.3 地下構造モデルの設定
   2.4 地下構造モデルの妥当性確認
      (1) 経験的地盤増幅率による確認
      (2) 追加ボーリング調査結果との比較による確認

3. 既許可の地震動評価への影響評価
   3.1 地下構造モデルの位置づけ
   3.2 既許可の地震動評価への影響評価

【補足①】地震観測記録の伝達関数との整合性に関する検討（周波数依存型）
【補足②】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
【参考①】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】ボーリング孔内Q値に関する知見
【参考③】岩石コアQ値に関する知見
【参考④】既許可における地震動評価
【参考⑤】既許可の地下構造モデル
【参考⑥】友澤ほか（2021）の概要

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

No.	コメント	指摘場所	対応状況
1	既許可の地下構造モデルと新たに設定した地下構造モデルの位置づけの記載を充実すること。	第1026回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年1月21日）	第1080回会合にて説明
2	新たに設定した地下構造モデルについて、以下を踏まえ、地盤減衰の設定の考え方、根拠を明確にし、説明すること。 ①15Hz程度までの範囲で評価した地盤減衰の高周波数帯への適用性 ②地震観測記録が得られていない深さにおける地盤減衰の設定 ③地盤減衰の不確かさの考え方		コメント回答①： 第1049回会合にて説明 今回改めて説明 コメント回答②③： 今回説明
3	地震基盤相当面は、設置許可基準規則解釈別記２の定義に従いVs=2,200m/s以上の層に設定すること。		第1057回会合にて説明
4	乱数位相を用いた模擬地震波の作成について、継続時間の設定を含め検討し、説明すること。		説明方針： 第1097回会合にて説明 コメント回答： 次回以降説明予定
5	地震動評価にあたって、どのような地下構造モデルを使うのか方針を示すこと。	第1049回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年5月20日）	第1057回会合にて説明
6	全体スケジュールを考慮した上で、地下構造モデル設定、地震動評価及び全体方針を示すこと。		第1057回会合にて説明
7	審査全体を見通した上で、スケジュールを示すこと。	第1057回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年7月1日）	第1080回会合にて説明
8	今回地下構造モデルの方針を変更していることから、説明済みとなっているコメントに関しても、改めて説明すること。		コメントNo.2について 今回改めて説明
9	新たなボーリング調査から得られる結果を踏まえ、設定した地下構造モデルの妥当性を示すこと。		今回説明

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

No.	コメント	指摘場所	対応状況
10	今後説明予定の新たに設定した地下構造モデルの妥当性について、適切な論理で十分な根拠に基づき説明すること。	第1080回、第1088回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年10月7日、 令和4年10月28日）	説明方針： 第1088回会合にて説明 コメント回答： 今回説明
11	審査事項に係る方針・考え方を準備ができたものから前倒しで説明する等、効果的かつ効率的な審査スケジュールを示すこと。		適宜説明

■川内原子力発電所に関するコメントの反映

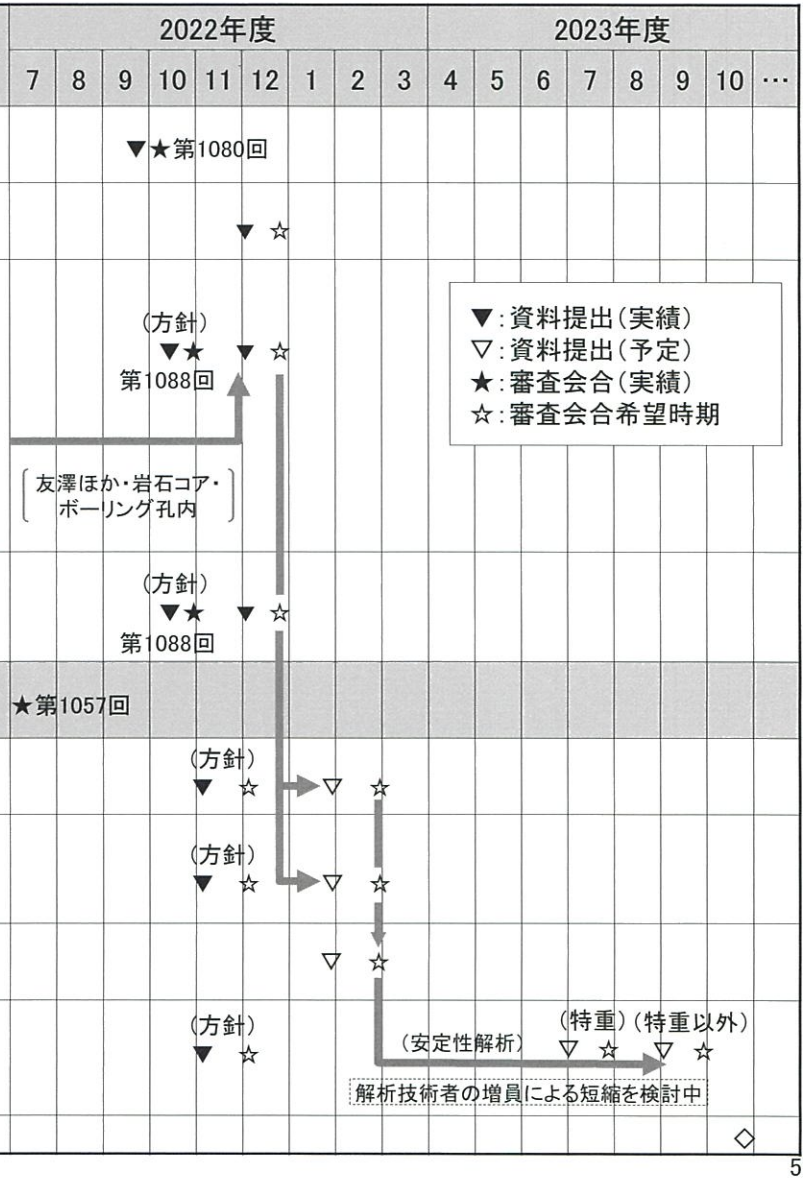
- 第983回審査会合において、川内原子力発電所に関するコメントを受領。
- 玄海原子力発電所についても共通する以下のコメントへの対応を実施。

No.	コメント	指摘場所	対応状況
S-1	地下構造モデルの地盤減衰の設定について、既許可からの変更点の妥当性を説明すること。その際、地盤減衰の設定根拠としている地震観測記録が得られていない範囲（EL.-90m～EL.-200m）の地盤減衰の設定の妥当性についても併せて説明すること。	第983回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和3年6月11日）	第1026回会合にて説明 今回改めて説明
S-2	地下構造モデルの変更に伴う既許可の基準地震動への影響について説明すること。		第1026回会合にて説明 今回改めて説明
S-3	地震基盤相当面について、設置許可基準規則解釈別記２のVs=2,200m/s以上に対し、Vs＝2,100m/sの層上面（EL.-200m）に設定したことの妥当性を説明すること。		第1026回会合にて説明
S-4	模擬地震波の作成について、複数の方法から一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせを採用した妥当性を説明すること。		説明方針： 第1097回会合にて説明 コメント回答： 次回以降説明予定
S-5	既許可以降の観測・調査・分析などについて説明すること。		今回説明

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

o 第1088回審査会合（2022年10月28日）においてご説明した審査スケジュールから変更なし。

項目	内容	関連コメント	対応方針	…
地下構造ﾓﾃﾞﾙ位置付け	・既許可ﾓﾃﾞﾙと新たに設定したﾓﾃﾞﾙの位置付け	No.1	・既許可ﾓﾃﾞﾙと新たに設定したﾓﾃﾞﾙは検討の目的に応じて設定することを明記	
	・既許可の地震動評価への影響	No.S-2	・新たな地下構造ﾓﾃﾞﾙによる既許可の基準地震動への影響確認を実施	
地盤減衰	・地盤減衰の設定および妥当性確認	No.2 No.S-1	・地震観測記録に基づく伝達関数の分析、地震波干渉法、友澤ほか(2021) 等、複数の手法により設定 ・地震計設置以浅について、観測記録による応答ｽﾍﾟｸﾄﾙの比較等により妥当性を確認 ・地震計設置以深は、追加調査等を基に地震計設置以浅で設定した地盤減衰と同等であることを多面的な検討により確認	
	・設定した地下構造モデルの妥当性	No.9 No.10	・追加調査を踏まえたPS検層ﾓﾃﾞﾙとの比較、地震観測記録に基づき設定した友澤ほか(2021)の手法等により妥当性を確認	
地震基盤相当面	・設置許可基準規則解釈別記2の定義に基づく設定	No.3 No.S-3	・Vs=3,100m/sの層上面に設定	
模擬地震波	・乱数位相を用いた地震動評価	No.4	・先行他社と同様に、M7.0、Xeq10kmで継続時間を設定	
	・複数の手法による検討	No.S-4	・先行他社と同様に、複数の手法による検討により、乱数位相を用いた地震波を選定した妥当性を説明	
基準地震動策定	・Ss-6の策定	－	・地震基盤相当面、地盤減衰、模擬地震波の設定を踏まえ、Ss-6を策定	
基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価	・Ss-6による評価	－	・基準地震動見直し後の基礎地盤及び周辺斜面の安定性の評価を実施。 ・評価条件は、既許可申請と同じもので評価	
補正申請	－	－	－	

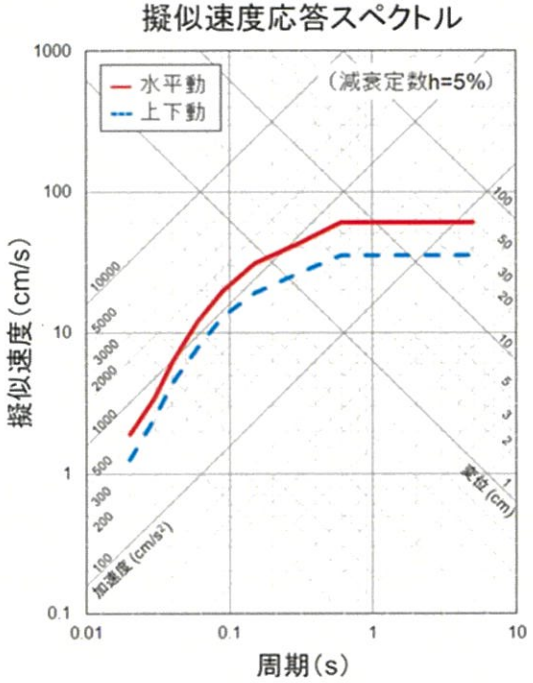


2. 地下構造モデルの設定

2.1 新たな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

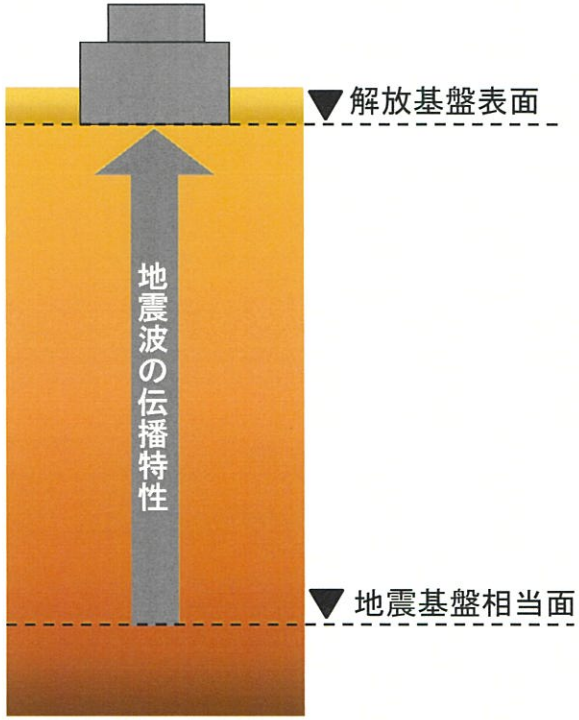
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されることを踏まえ、全ての周期帯に適用できる地下構造モデルを設定することが必要となる。
- また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されるため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを設定する。
- 新たな地下構造モデル（以下、標準応答スペクトル用モデル）の設定にあたっては、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の技術的知見に基づき、多面的な検討を実施。



コントロールポイント

周期 (s)	水平動 擬似速度 (cm/s)	上下動 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

地震基盤相当面における標準応答スペクトル



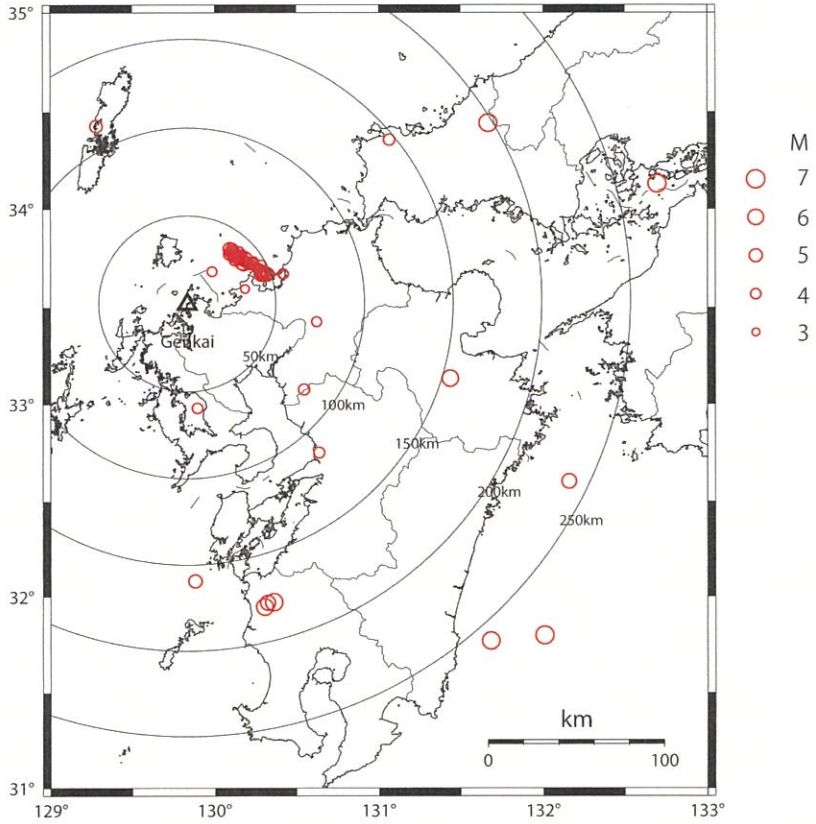
標準応答スペクトルを考慮した
地震動の評価のイメージ

2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■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）

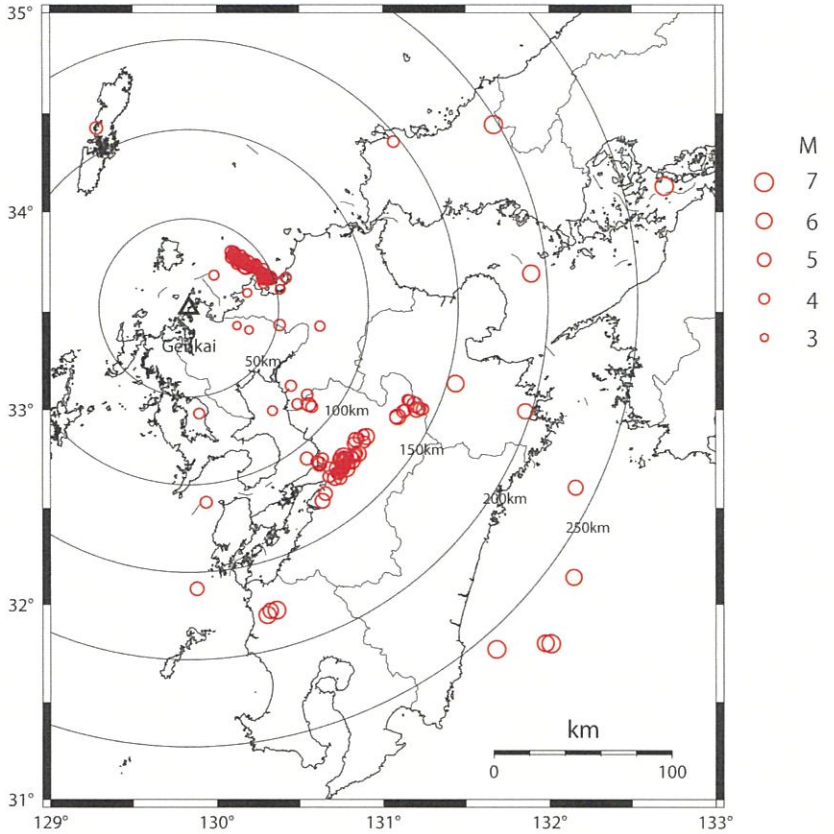
計76地震　※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



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）

＋80地震

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）

2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 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、速度構造及び地盤減衰（Q値）を検討	・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）検討の多面化
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	・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）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	・より広帯域での地盤減衰（Q値）の検討 ・地盤減衰（Q値）検討の多面化
不均質減衰構造を考慮したブロックインバージョン解析に基づく地盤増幅率	設定した地下構造モデルを用いた理論増幅率との比較から地盤減衰（Q値）の適用範囲を検討、及び設定した地下構造モデルの妥当性を確認	・地盤減衰（Q値）検討の多面化 ・設定した地下構造モデルの確認の多面化
敷地内追加ボーリング孔内減衰測定	追加ボーリング調査孔内における減衰測定結果から地盤減衰（Q値）の妥当性を確認 追加ボーリング調査結果から設定した地下構造モデルの妥当性を確認	・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化 ・設定した地下構造モデル（～EL.-200m）の確認の多面化
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）の妥当性を確認	・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化

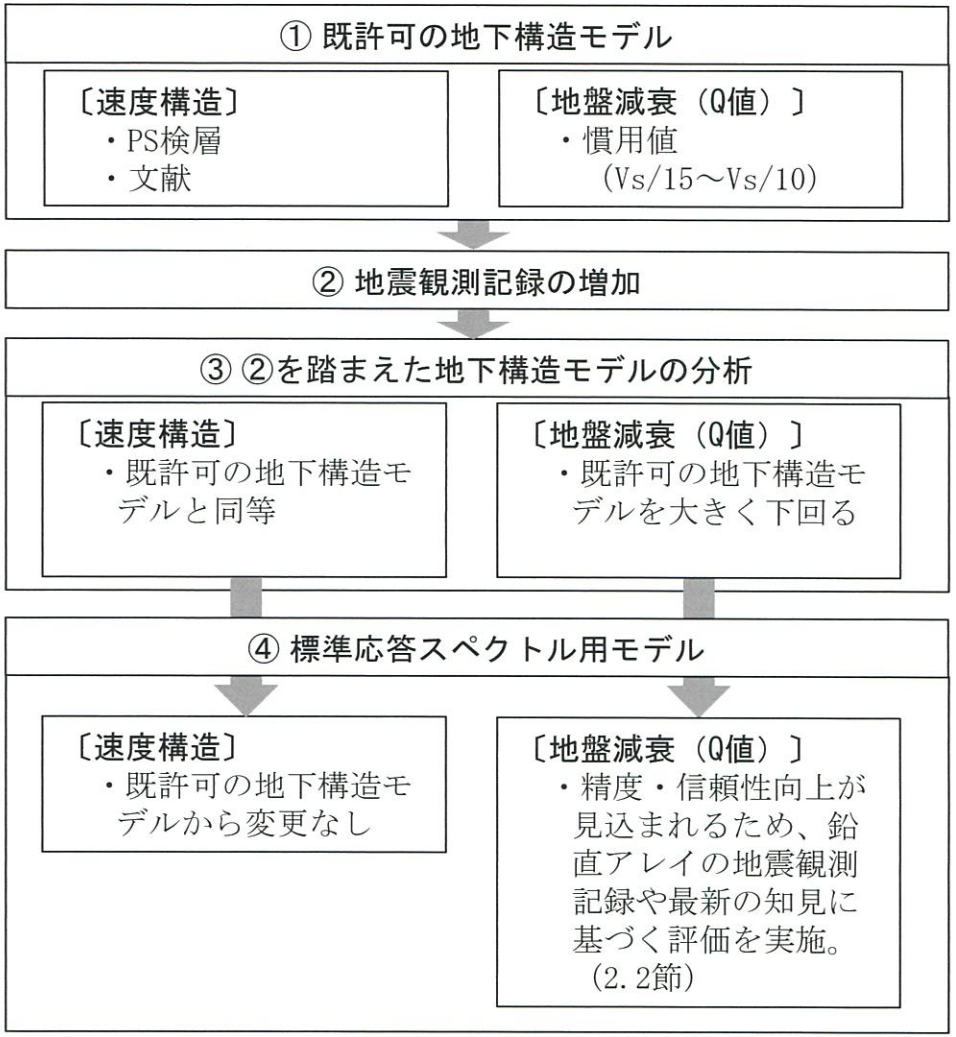
2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

① 既許可の地下構造モデル
- 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。
- 速度構造は、PS検層、鉛直アレイ地震観測や微動アレイ観測などによる多面的な検討を実施した結果、敷地の平均的な地下構造特性を反映していると考えられる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。深部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、慣用値に基づき設定。

② 地震観測記録の増加
- 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
- 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。
- 地盤減衰（Q値）は、既許可の地下構造モデルの地盤減衰（Q値）を大きく下回ることを確認。

④ 標準応答スペクトル用モデル
- 地盤減衰（Q値）は、精度・信頼性の向上が見込まるため、鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見に基づく評価を実施し、短周期帯にも適用する標準応答スペクトル用モデルを設定。



2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

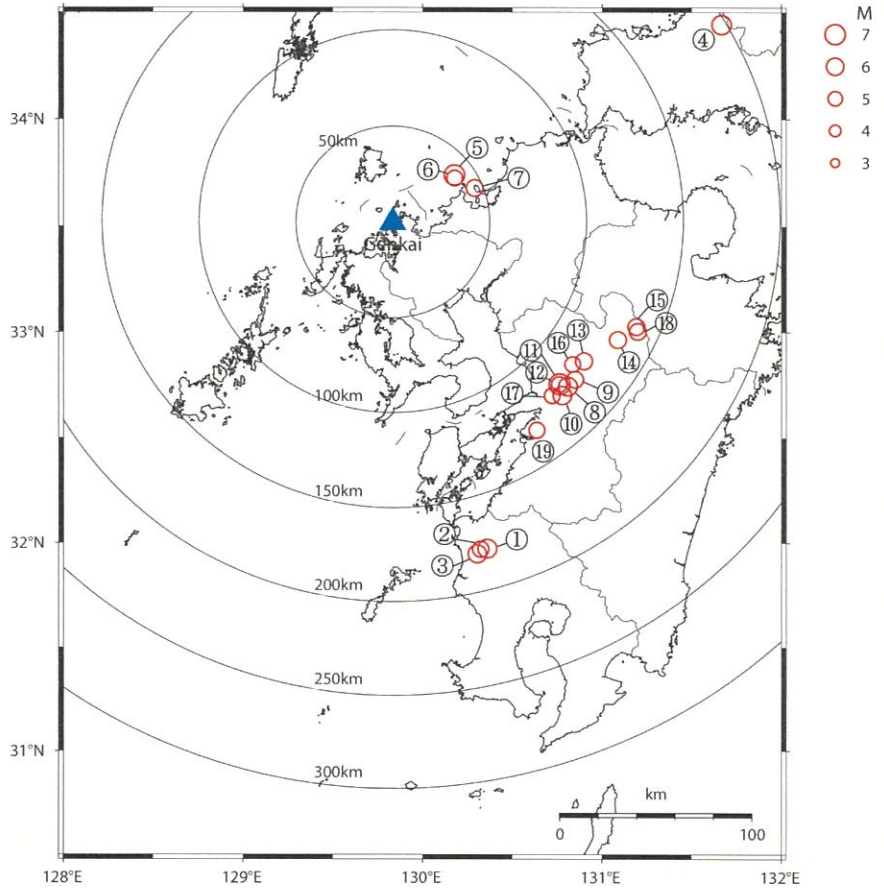
■ 既許可以降に取得した地震観測記録を踏まえた地下構造モデルの分析

- 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)[1)]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）

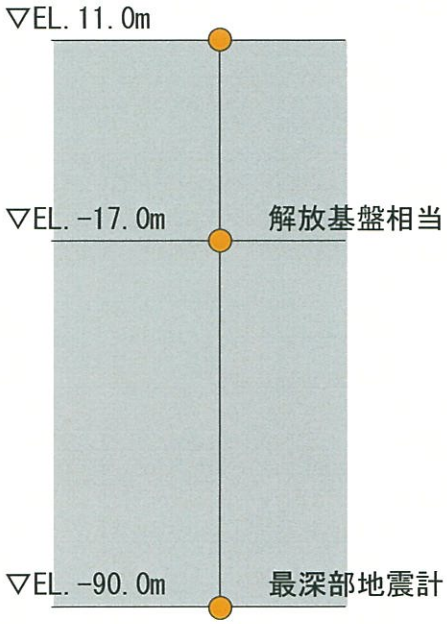
	番号	地震名	発生日	M	震央距離(km)	入射角(°)
既許可時審査	①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
	②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
	③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	180	23
	④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
	⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
	⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
	⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
今回新たに追加	⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
	⑨	熊本県熊本地方	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



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）

2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 同定における解析条件



地震計設置位置

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） ・EL. 11. 0m/EL. -17. 0m ・EL. 11. 0m/EL. -90. 0m 観測記録全区間を使用 Band幅0. 2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚は各地震計観測点の距離、 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	$Q(f)=Q_0 \cdot f^a$

2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■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/cm³)	Vs (m/s)	減衰 Q_0	減衰 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

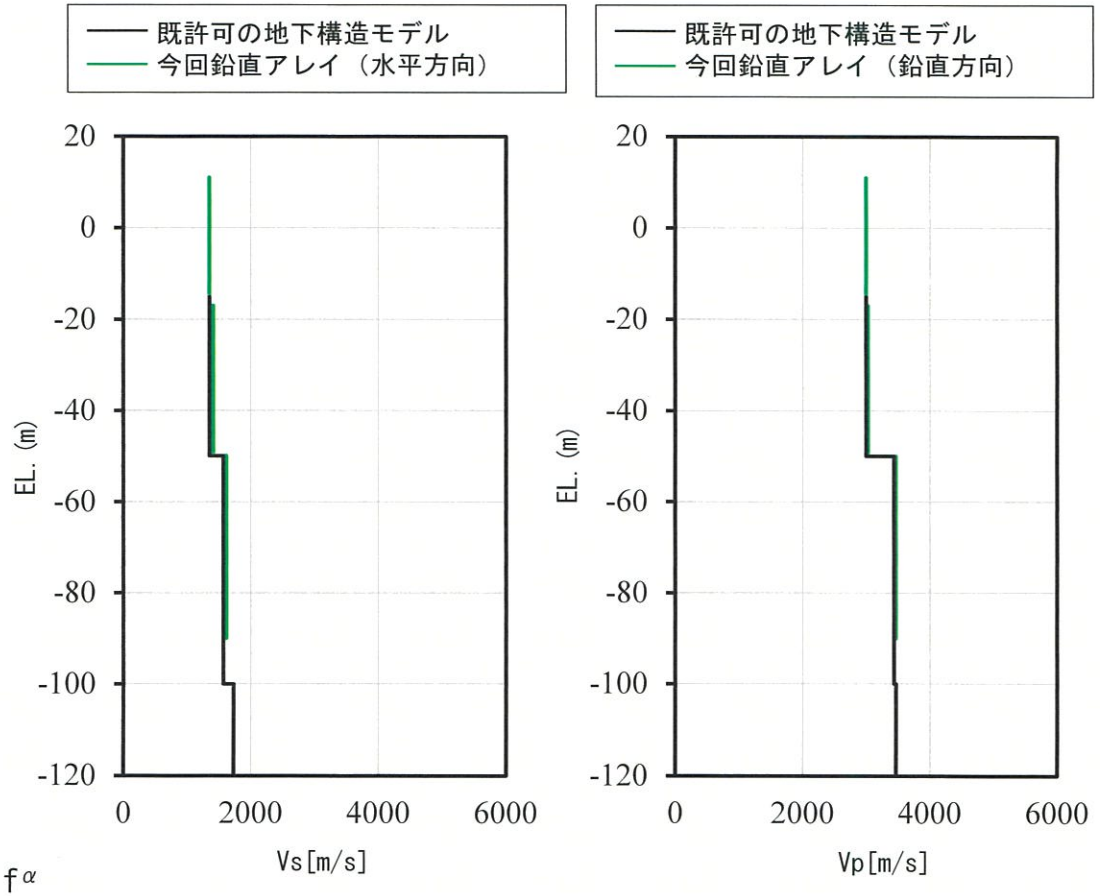
【EW方向】

層上面 EL（m）	密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	減衰 Q_0	減衰 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/cm³)	Vp (m/s)	減衰 Q_0	減衰 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

※$Q(f) = Q_0 \cdot f^{\alpha}$



2.1 新たな地下構造モデルの設定方針

■ 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地盤減衰（Q=100）を大きく下回ることを確認。

【NS方向】

層上面 EL（m）	密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	減衰 Q_0	減衰 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

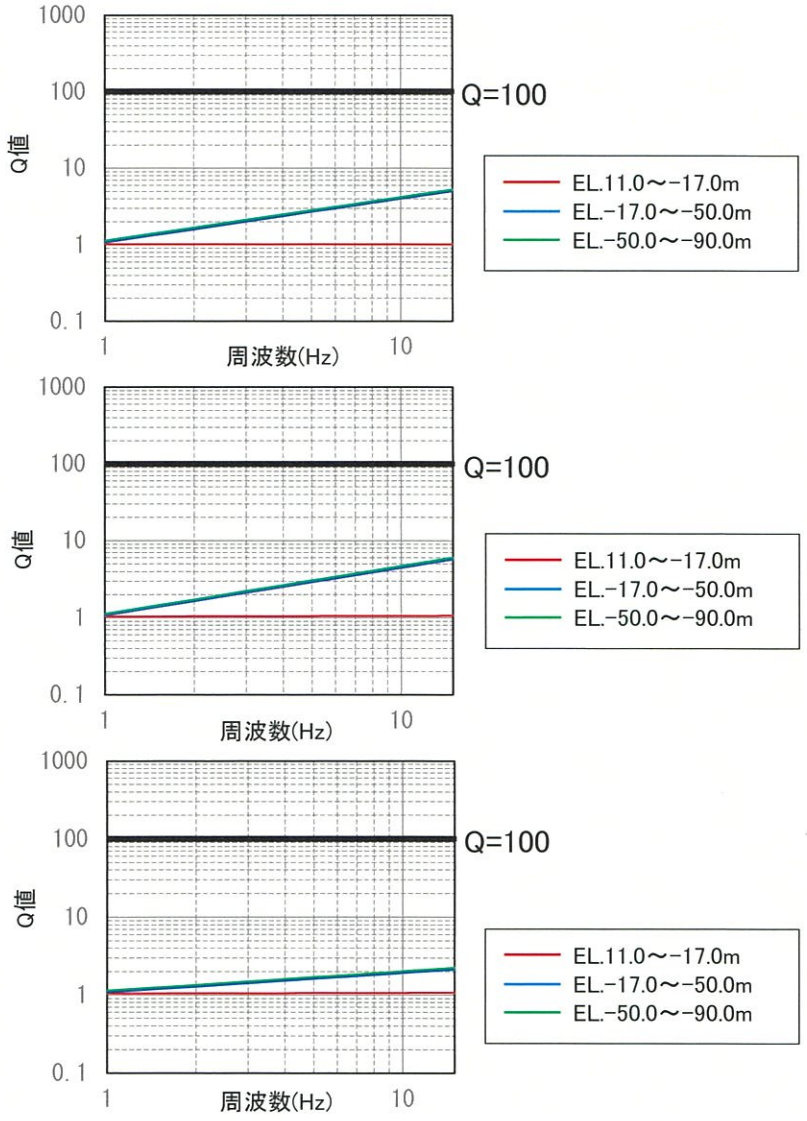
【EW方向】

層上面 EL（m）	密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	減衰 Q_0	減衰 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/cm³)	Vp (m/s)	減衰 Q_0	減衰 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

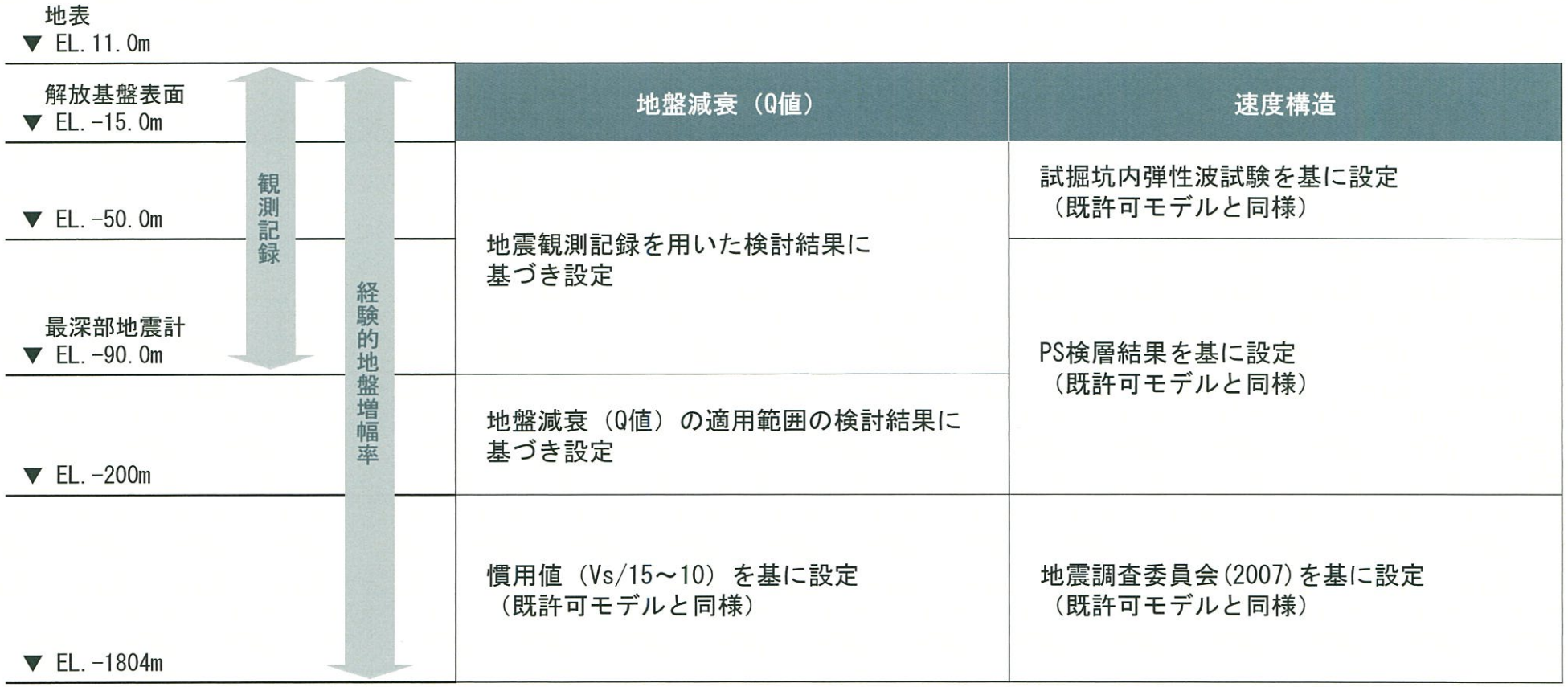
※$Q(f) = Q_0 \cdot f^{\alpha}$



2.2 地盤減衰（Q値）の設定

■ 地盤減衰（Q値）の設定方針

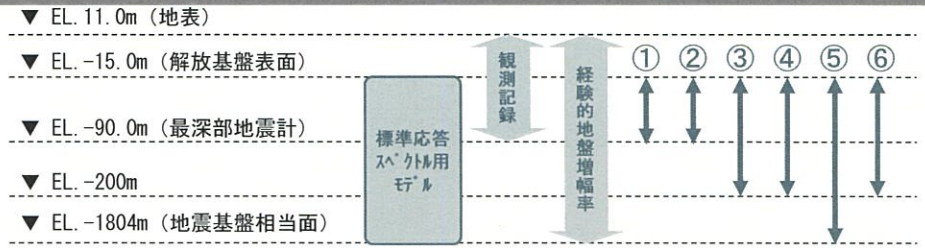
- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見に基づく評価により、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性の向上が見込まれるため、地盤減衰（Q値）を対象に評価を実施。



	地盤減衰（Q値）	速度構造
EL. -15. 0m ～ EL. -50. 0m	地震観測記録を用いた検討結果に基づき設定	試掘坑内弾性波試験を基に設定（既許可モデルと同様）
EL. -50. 0m ～ EL. -90. 0m	地震観測記録を用いた検討結果に基づき設定	PS検層結果を基に設定（既許可モデルと同様）
EL. -90. 0m ～ EL. -200m	地盤減衰（Q値）の適用範囲の検討結果に基づき設定	PS検層結果を基に設定（既許可モデルと同様）
EL. -200m ～ EL. -1804m	慣用値（Vs/15～10）を基に設定（既許可モデルと同様）	地震調査委員会(2007)を基に設定（既許可モデルと同様）

2.2 地盤減衰（Q値）の設定

■ 地下構造モデルの検討・設定及び妥当性確認の流れ



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）の検討・設定【2.2.1項 (1)(2)】

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、以下の手法で検討した結果、上限値はQ=8.7程度。

- 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)

地盤減衰（Q値）は、保守的にQ=12.5と設定。

最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）の妥当性確認【2.2.1項 (3)】

Q=12.5の妥当性を以下の観点で確認。

- 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（①）
- 卓越周波数において、Q=12.5による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する（②）

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）の検討・設定【2.2.2項 (1)(2)】

- 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。
- 発電所敷地で取得した地震観測記録に基づく地盤増幅率（以下、「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の層下面深度を検討し、Q=12.5をEL.-200m以深まで適用できることを確認。

Q=12.5の適用範囲は、保守的にEL.-200mまでに設定。

最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認【2.2.2項(3)】

解放基盤表面からEL.-200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を以下の観点で確認。

- ボーリング孔内測定による減衰※1(③)が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である
- 岩石コアを用いた測定による減衰※2（④）が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

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。

地下構造モデルの妥当性確認【2.4節】

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の地盤増幅率が、経験的地盤増幅率に対して同等もしくは上回る(⑤)〔地震基盤相当面～解放基盤表面〕
- 設定した地下構造モデルの伝達特性（伝達関数、応答スペクトル比）が、追加ボーリング調査結果※1を踏まえたPS検層モデルの伝達特性に対して同等もしくは上回る（⑥）〔EL.-200m～解放基盤表面〕

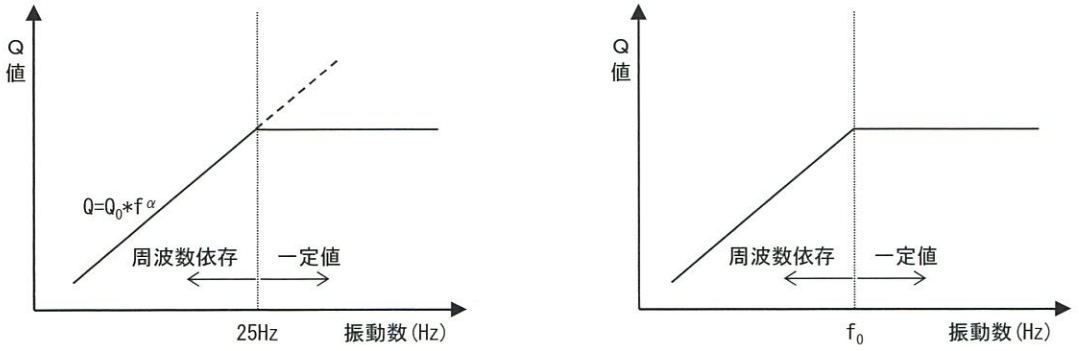
※1：震源車による人工震源を用いた減衰測定。振幅レベルや周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。
※2：岩石コア供試体を用いた超音波試験による減衰測定。岩盤の不均質性による減衰が含まれていない点や周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

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

① 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。
- 伝達関数（周波数依存型）による検討（②）：
  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[2)~7)]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。
- 伝達関数（バイリニア型）による検討（③）：
  低周波数側では地盤減衰（Q値）が周波数のべき乗に比例（$Q=Q_0*(f/f_0)^{\alpha}$）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。
- 地震波干渉法による検討（④）：
  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。



(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）

②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

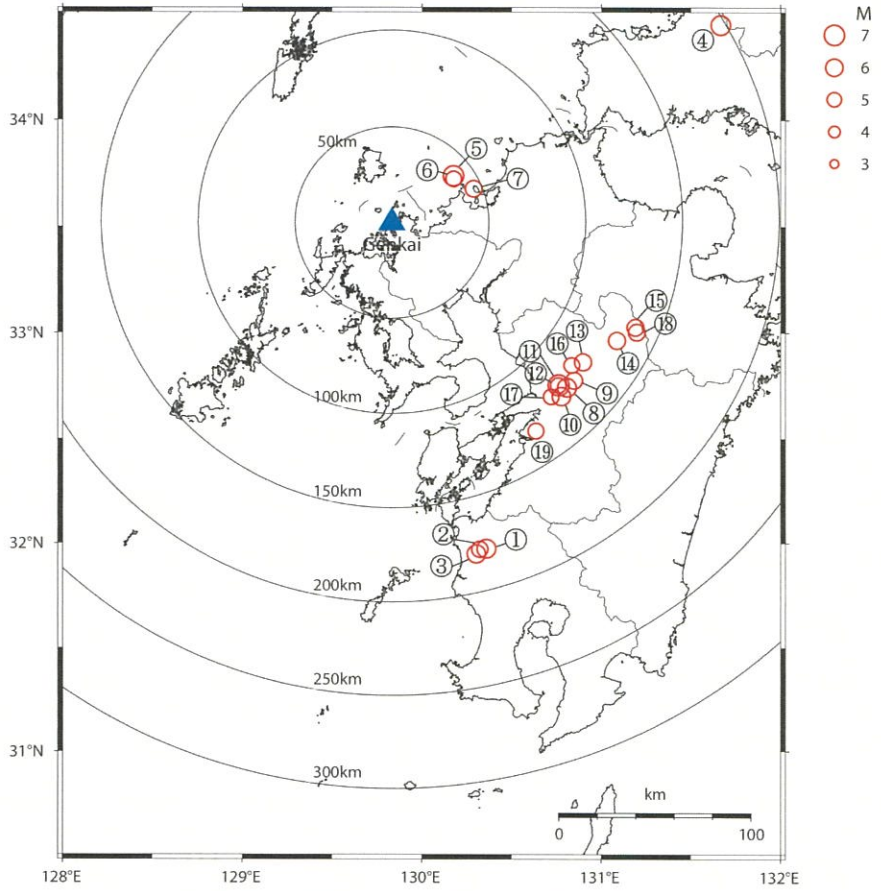
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤減衰の同定を実施。

※ Noda et al.(2002)[1)]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）

既許可時審査 ⇕ 今回新たに追加

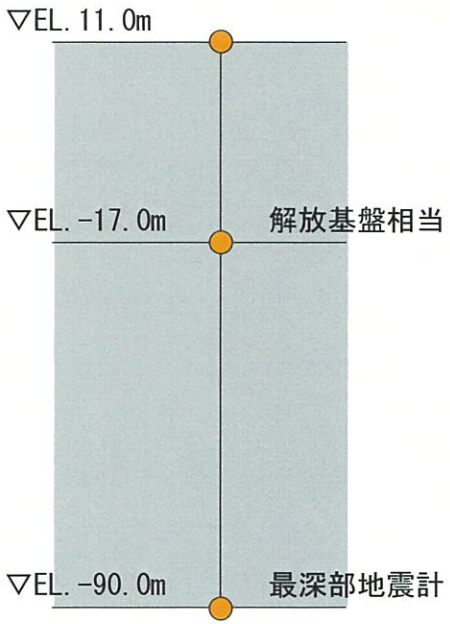
番号	地震名	発生日	M	震央距離(km)	入射角(°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	180	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
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



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



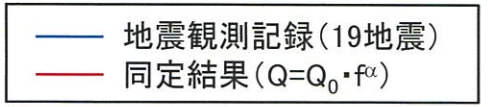
地震計設置位置

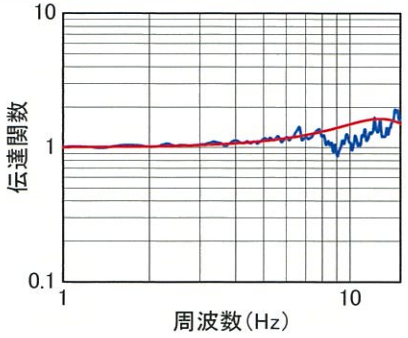
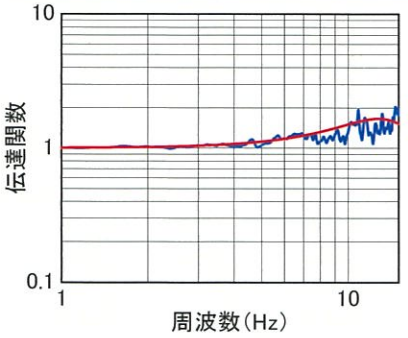
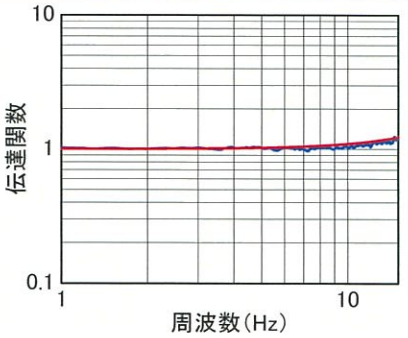
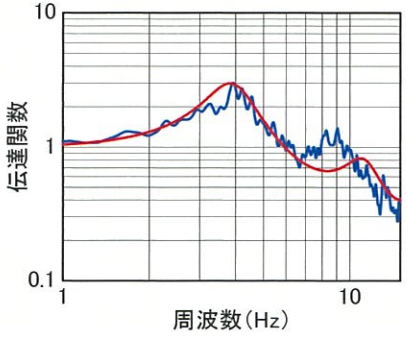
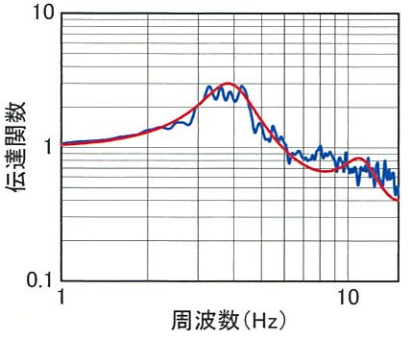
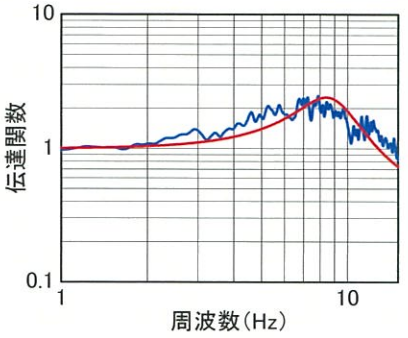
伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定における解析条件

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） ・EL. 11. 0m/EL. -17. 0m ・EL. 11. 0m/EL. -90. 0m 観測記録全区間を使用 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	$Q(f)=Q_0 \cdot f^a$

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



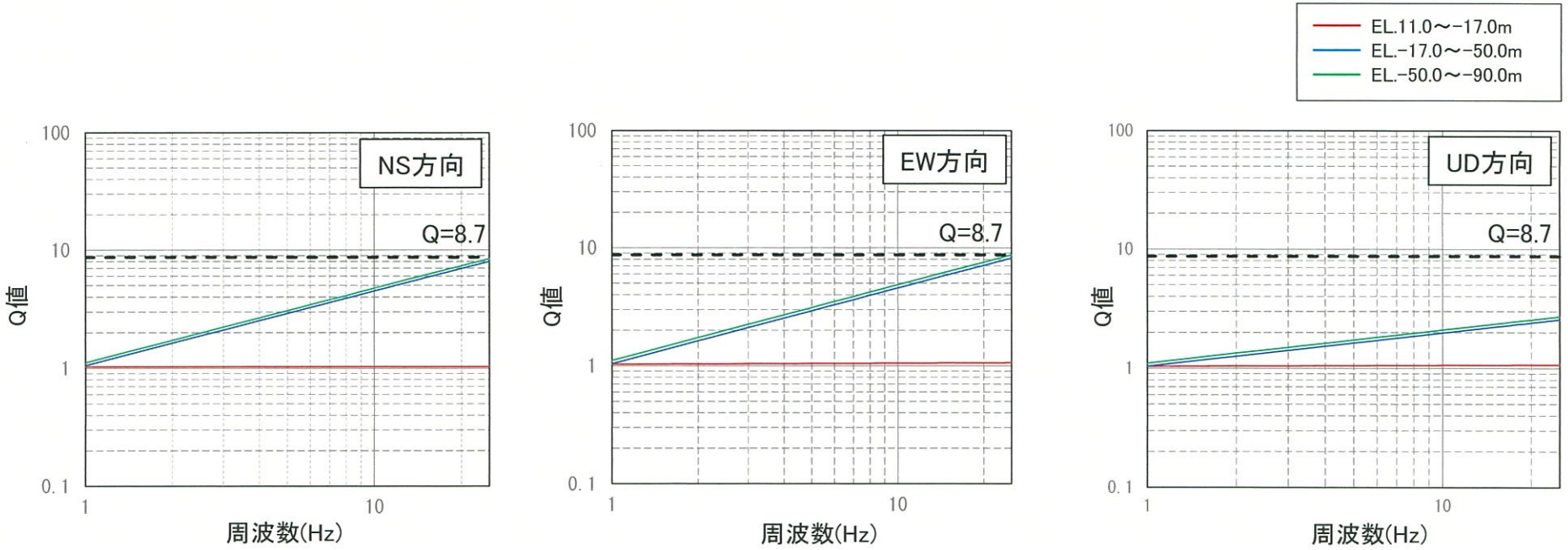
	NS方向	EW方向	UD方向
EL.11.0m /EL.-17.0m			
EL.-17.0m /EL.-90.0m			

※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

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/cm³)	Vs (m/s)	Vp (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	1350	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）

③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。

文献	概要
武村ほか(1993)[2]	・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)[3]	・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)[2]等）を踏まえ、減衰定数を一定として設定
木下・大池(2002)[4]	・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)[5]	・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)[6]	・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)[7]	・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)[8]）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)[7]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。

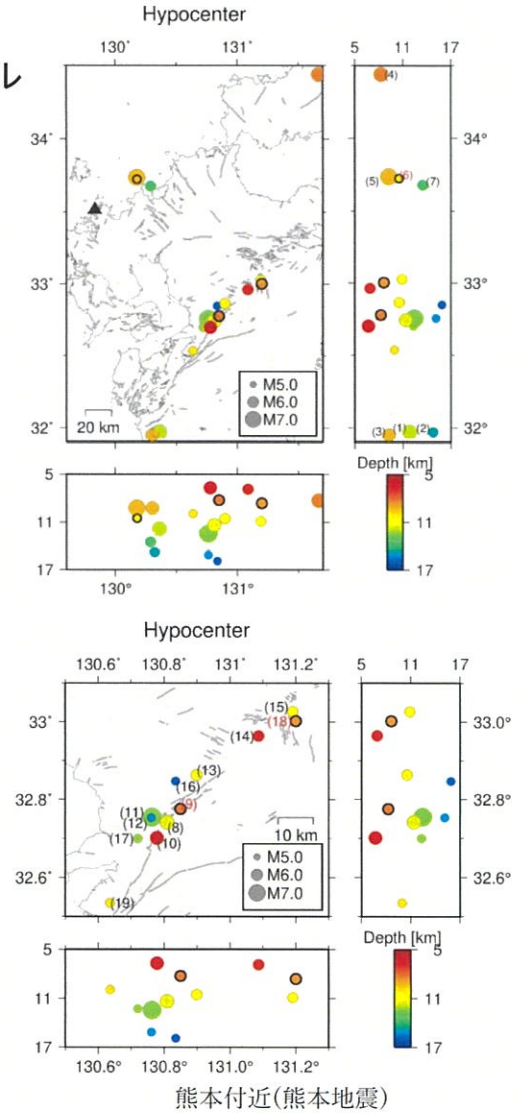
伝達関数（バイリニア型）による地盤減衰の同定における解析条件

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、平均的な特徴を有する地震等
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） ・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	$Q(f)=Q_0 \cdot f^{\alpha}$　（$f<f_0$） $Q(f)=Q_0$　（$f \geqq f_0$）

※下線部は今回の地盤減衰の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

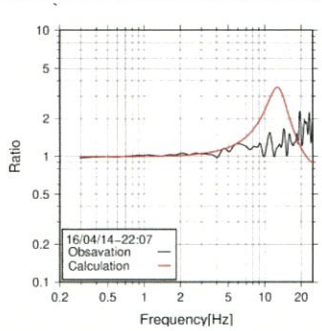
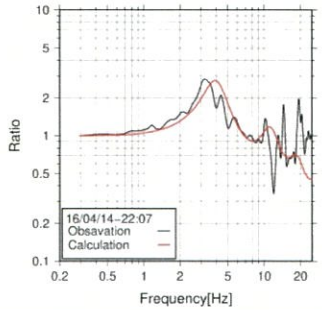
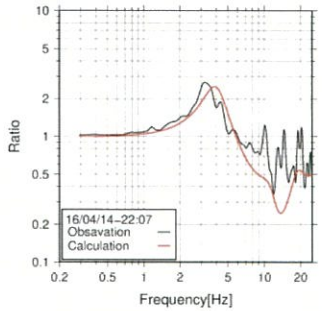
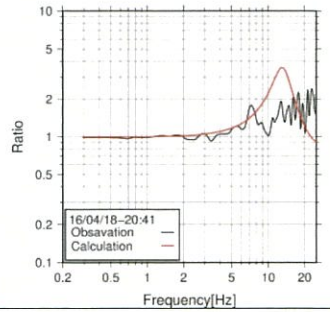
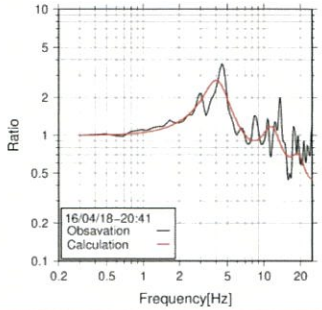
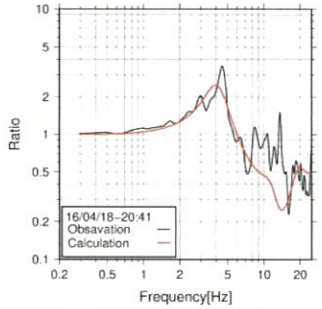
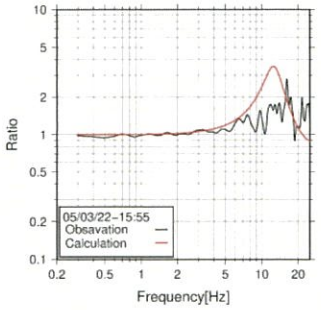
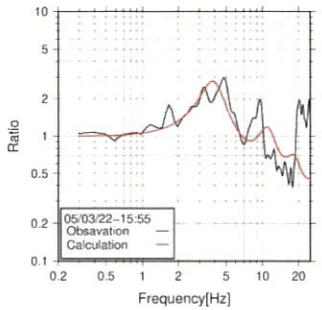
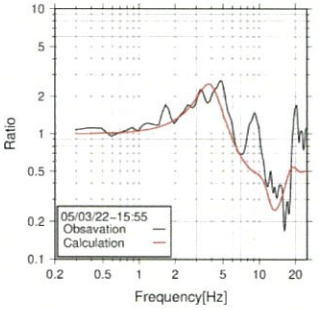


熊本付近(熊本地震)

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）

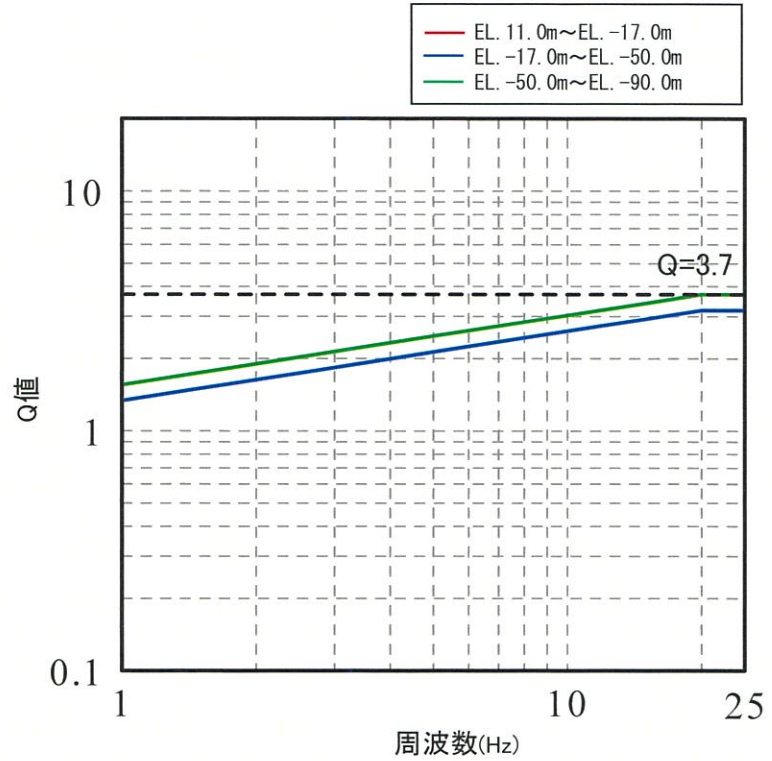
■ 地盤減衰（Q値）の同定結果（Transverse成分）

	EL.11.0m /EL.-17.0m	EL.11.0m /EL.-90.0m	EL.-17.0m /EL.-90.0m
2016年 4月14日 の地震			
2016年 4月18日 の地震			
2005年 3月22日 の地震			

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

- 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/cm³)	Vs (m/s)	Vp (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）

④地震波干渉法による検討

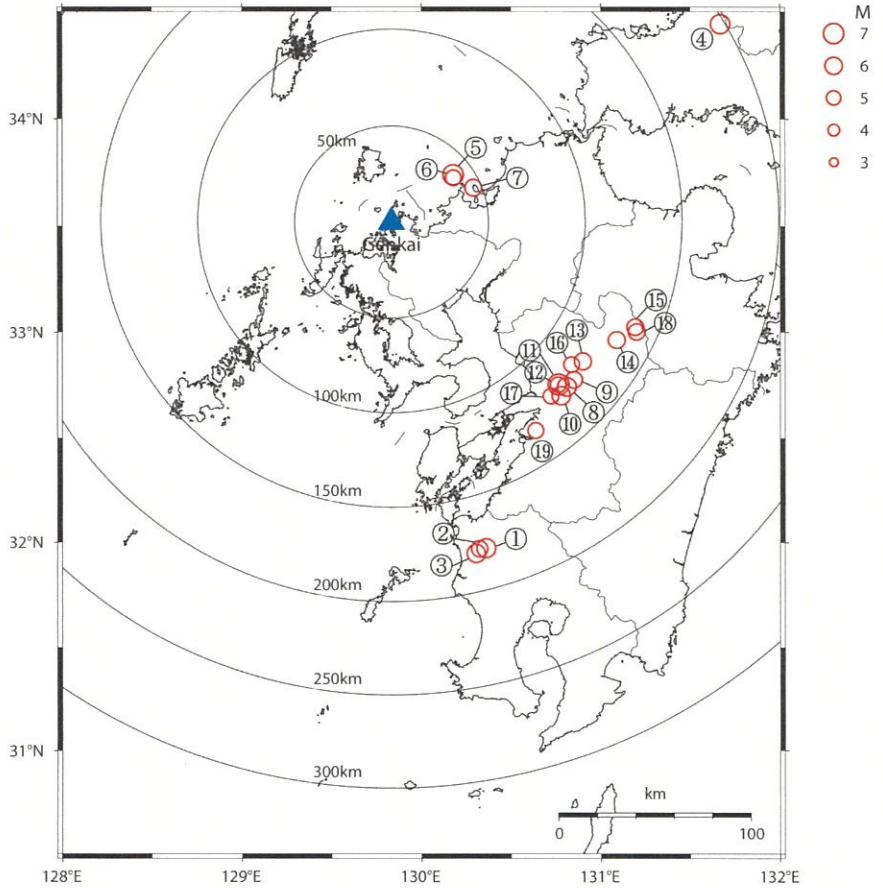
■ 同定に用いる地震諸元

- 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)[1)]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	180	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

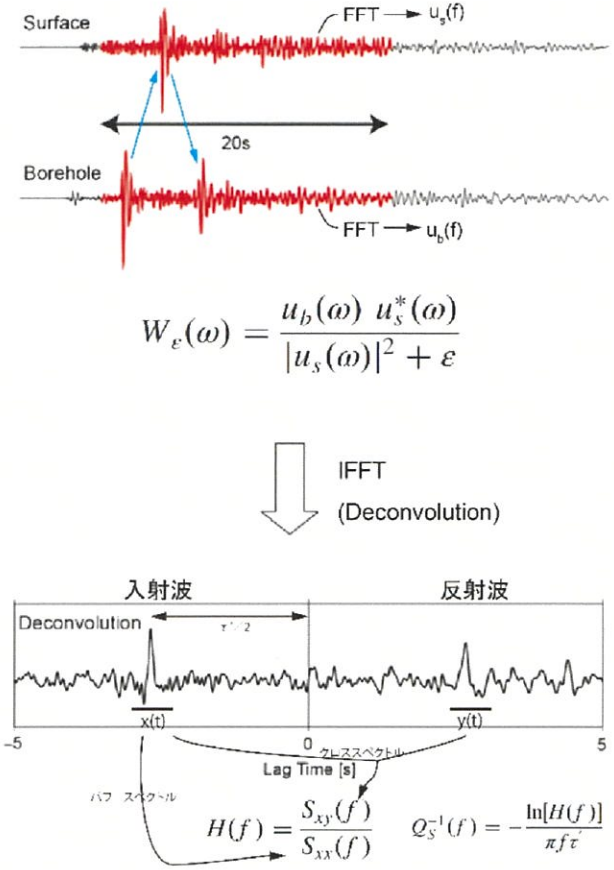
項目		条件
デコンボリューション	対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
	対象地震数	19地震
	解析成分	Transverse成分
	解析区間	S波を含む20秒
	テーパー	コサインテーパー（両端に1秒）
Q値推定	対象地震の選定条件	スタックしたデコンボリューション波形と一致度が高い（C*＞8）地震
	対象地震数	16地震
	解析区間	ピーク時間×２
	スムージング	対数型Parzenウィンドウ Band幅は中心周波数fに対してf/1.3～1.3f

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

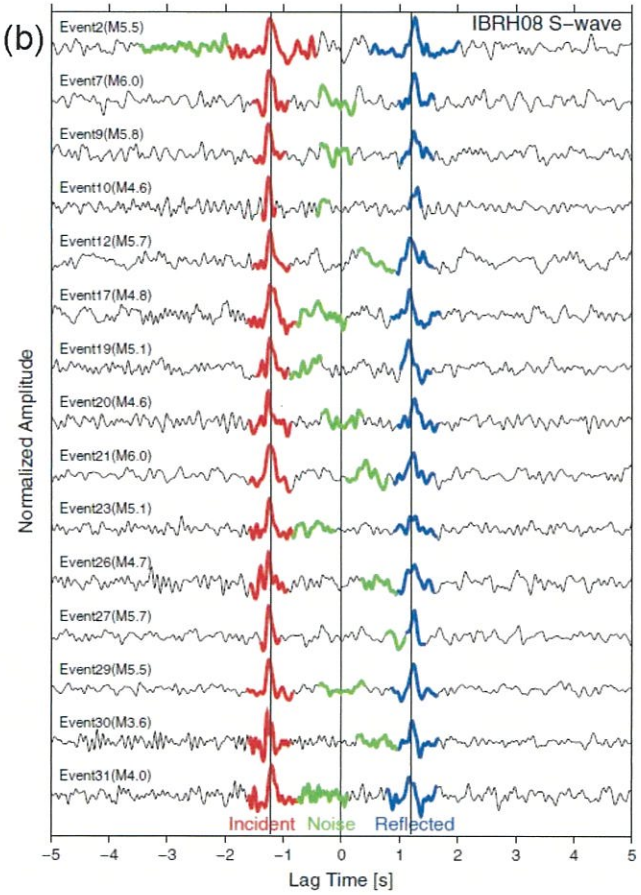
■ 地盤減衰（Q値）の推定方法

- 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[5),9)]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。

(a)



(b)

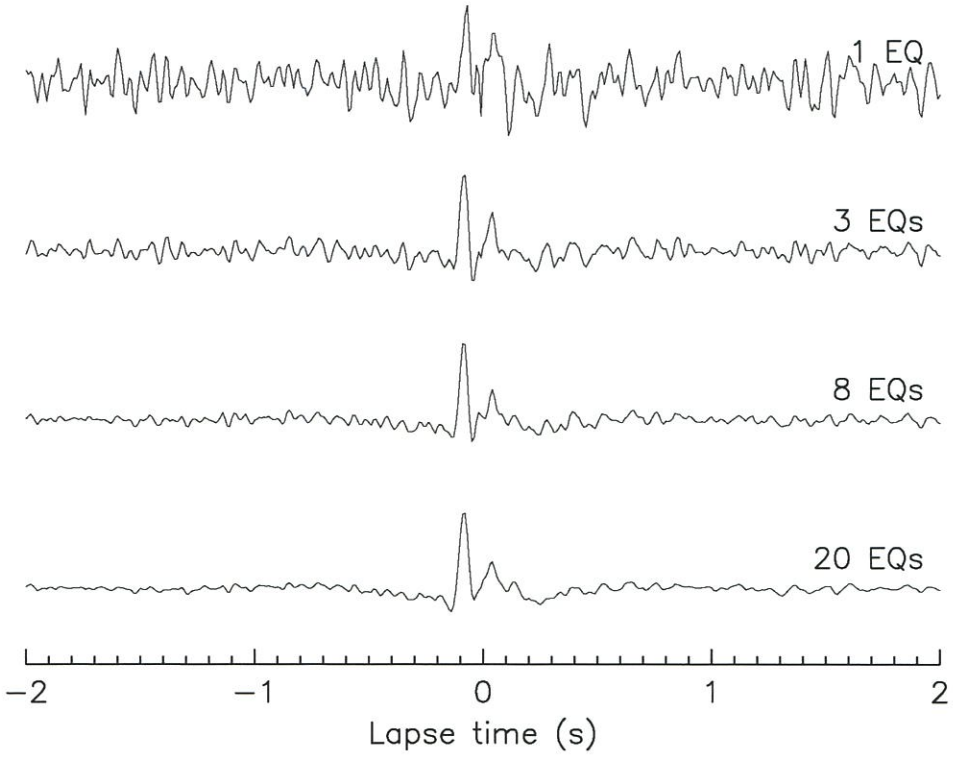


Fukushima et al.(2016)より抜粋

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)[10]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)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。

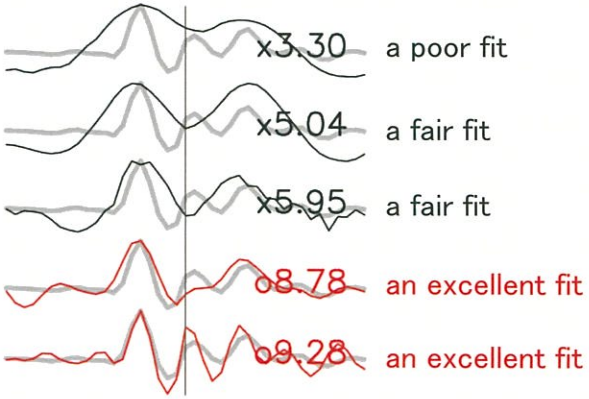
    a poor fit ： ～4　　a good fit ： 6～8

    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 $C(a_1, a_2) = \dfrac{\int a_1(t)a_2(t)dt}{\left[\int a_1^2(t)dt\right]^{1/2}\left[\int a_2^2(t)dt\right]^{1/2}}$

Anderson(2004)より抜粋

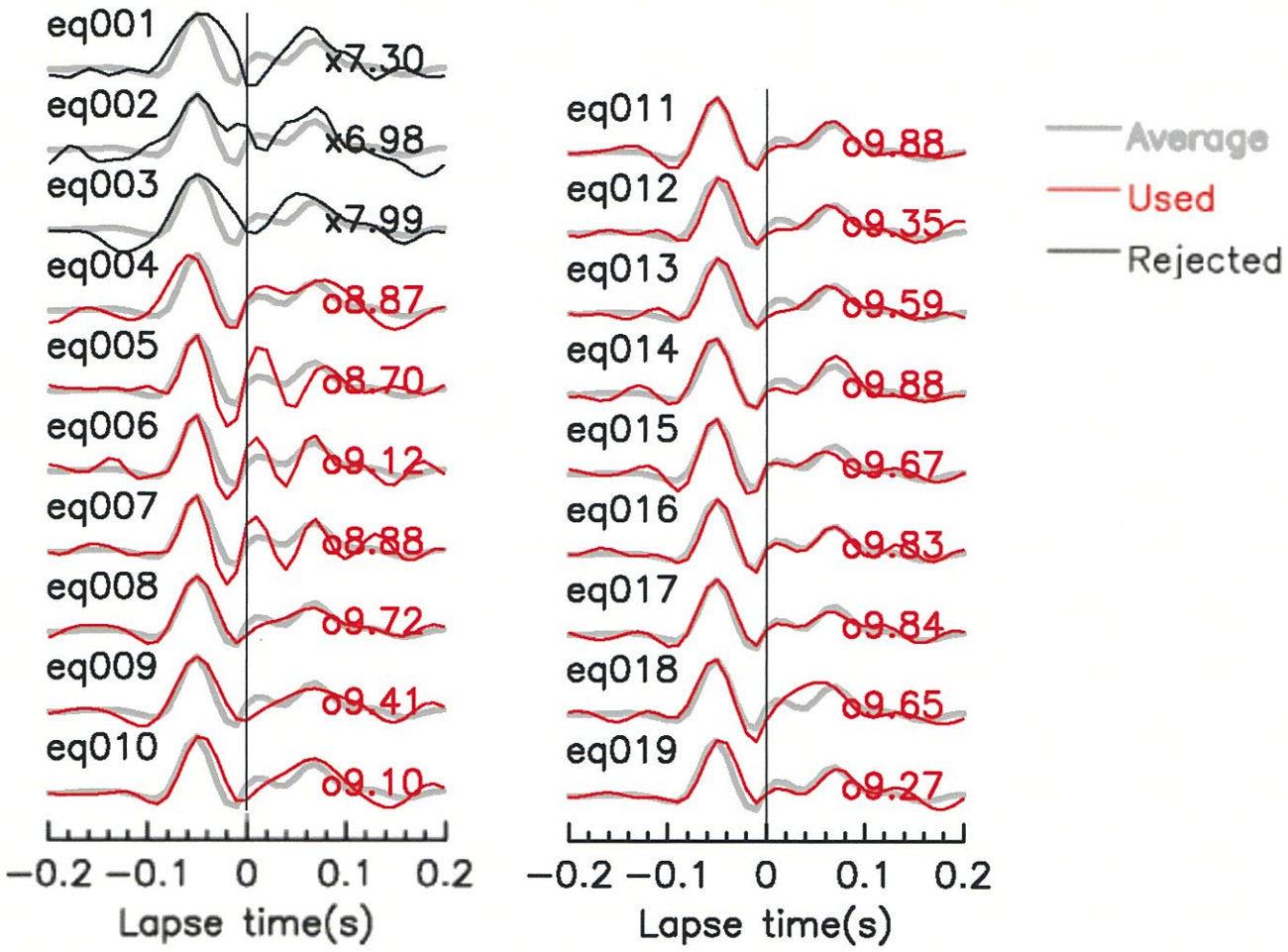


GOFの例
（赤線を抽出、黒線を除外）

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)[10]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。

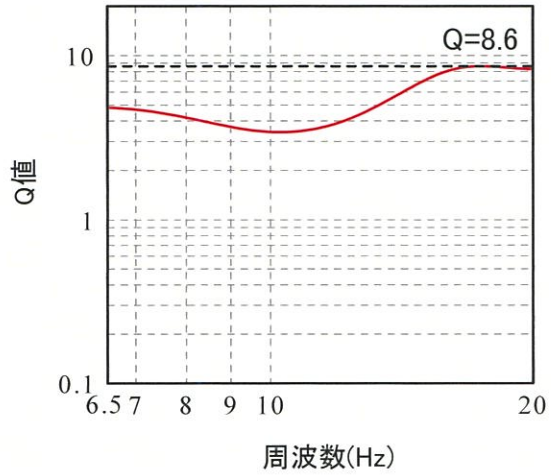


スタックした波形と各地震の波形の相関

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。



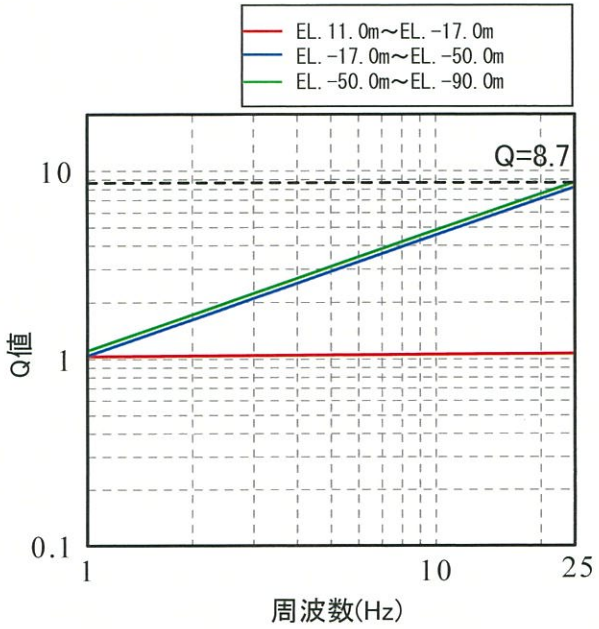
地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m～EL.-90.0m)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

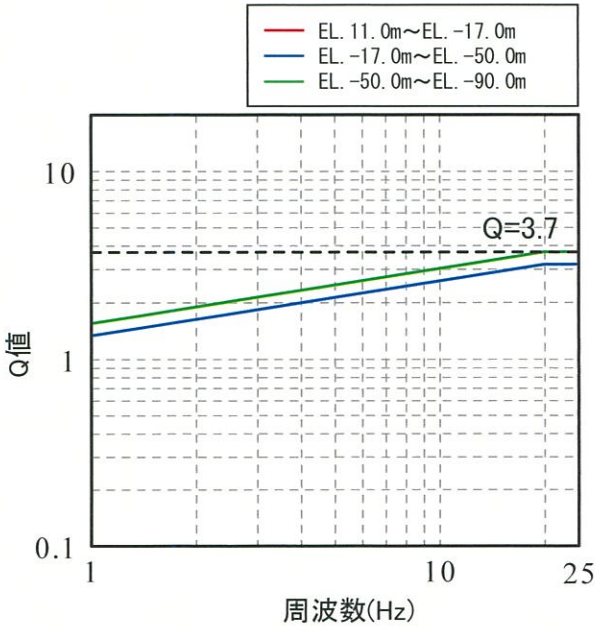
（２）地盤減衰（Q値）の設定

- 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、周波数に依存せず一律で、保守的にQ=12.5と設定。

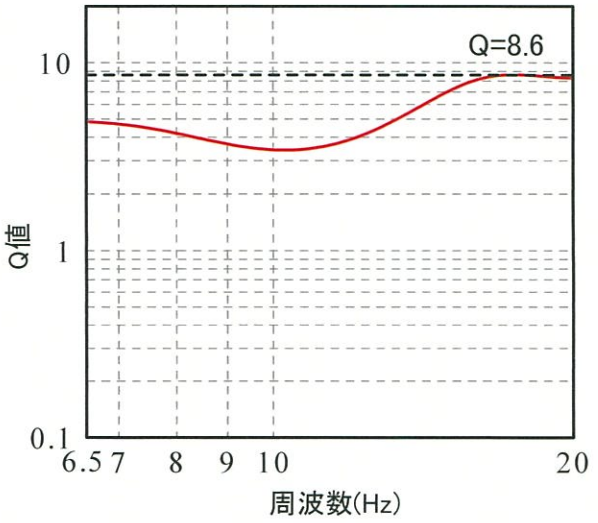
検討手法	伝達関数による検討 （周波数依存型）	伝達関数による検討 （バイリニア型）	地震波干渉法による検討
検討結果 （上限値）	Q=8.7程度	Q=3.7程度	Q=8.6程度



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）

（３）地盤減衰（Q値）の妥当性確認

■最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）の妥当性確認方針

- 前節の通り、最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）は、複数の手法による検討結果に不確かさを考慮して設定。
- 本節では、下表の方法により、地盤減衰（Q値）の設定の妥当性を確認。

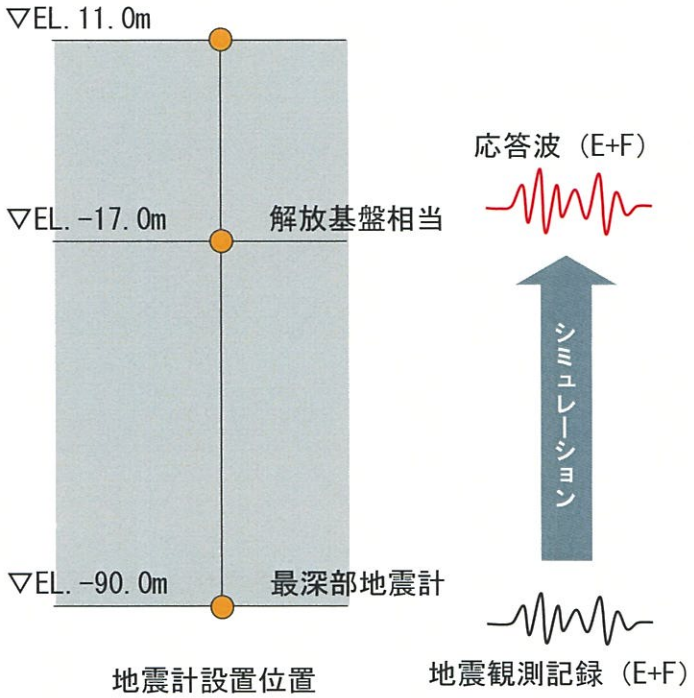
確認方法	対象深度EL.（m）	比較方法	比較対象		確認する観点
応答スペクトルによる確認	EL.-15.0m～EL.-90.0m	応答スペクトル	伝達関数（周波数依存型）による同定結果	地震観測記録（解放基盤表面）	同定結果による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等。
	EL.-15.0m～EL.-90.0m	応答スペクトル	Q=12.5	伝達関数（周波数依存型）による同定結果	Q=12.5の応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
伝達関数による確認	EL.-15.0m～EL.-90.0m	理論伝達関数	Q=12.5	伝達関数（周波数依存型）による同定結果	卓越周波数において、Q=12.5による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する。

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

①応答スペクトルによる確認

- 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.-15.0m）※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。
- 前節で設定したQ=12.5の妥当性を以下の観点で確認。
  - 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を同等もしくは上回る。
- 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を下回るものについて、特異な地震観測記録であることを確認。（補足②参照）

※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表面（EL.-15.0m）での応答波は地中記録のため、E+Fで評価

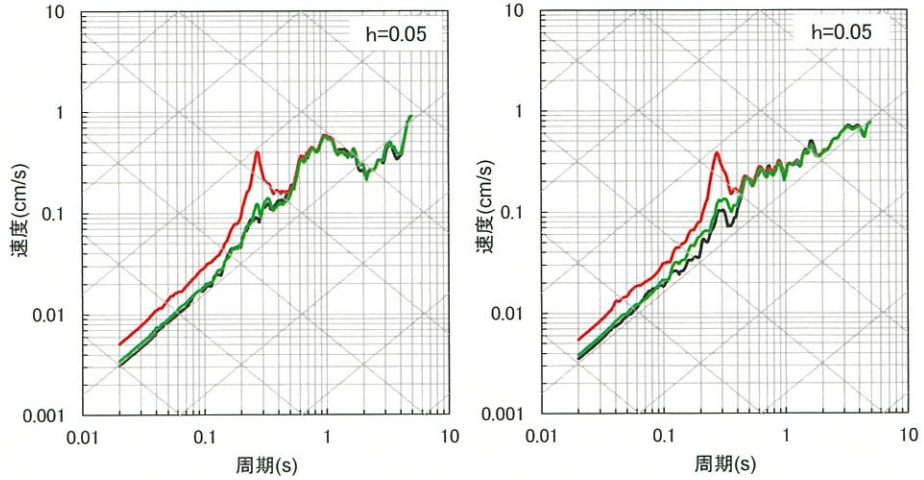


2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

■応答スペクトルの比較結果（1/5）

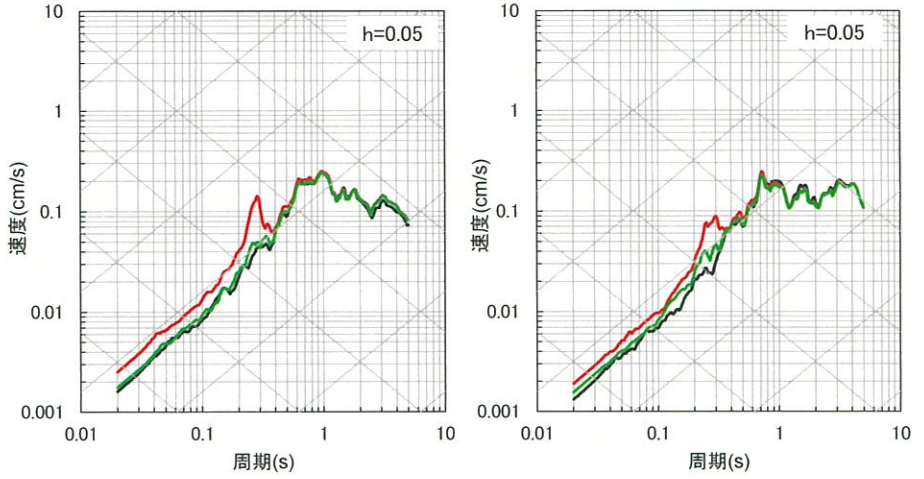
観測記録 EL.-17.0m
応答波（Q=12.5）
応答値（今回同定結果）

①鹿児島県北西部



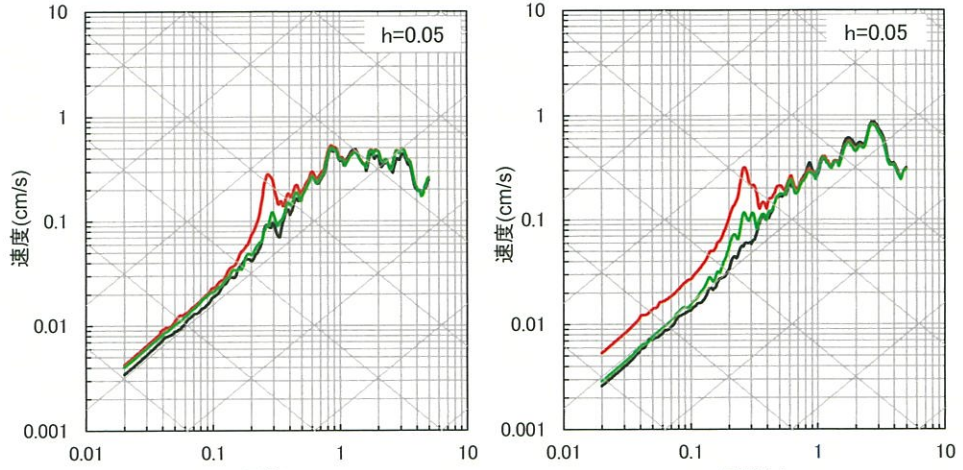
NS方向　　EW方向

②鹿児島県北西部



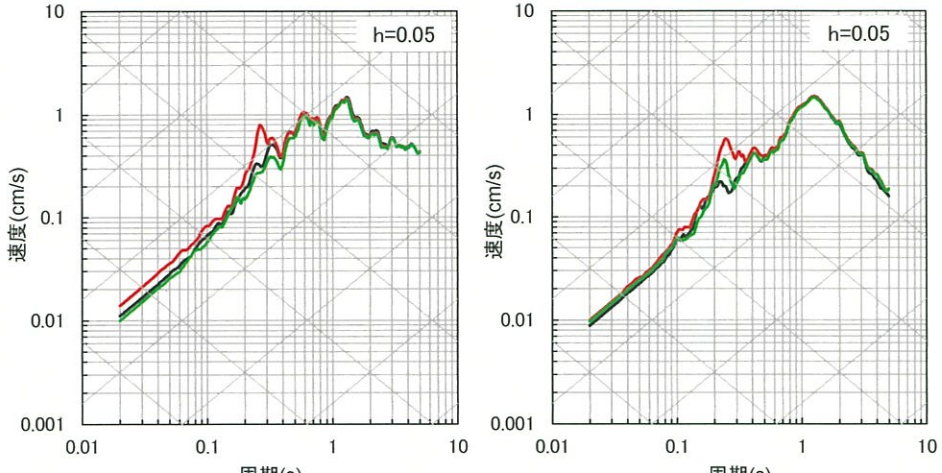
NS方向　　EW方向

③鹿児島県北西部



NS方向　　EW方向

④山口県



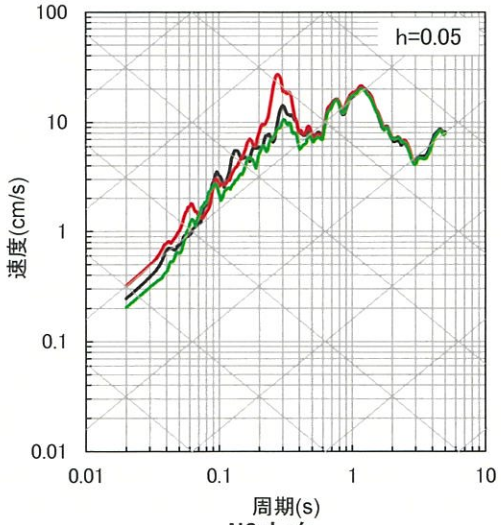
NS方向　　EW方向

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

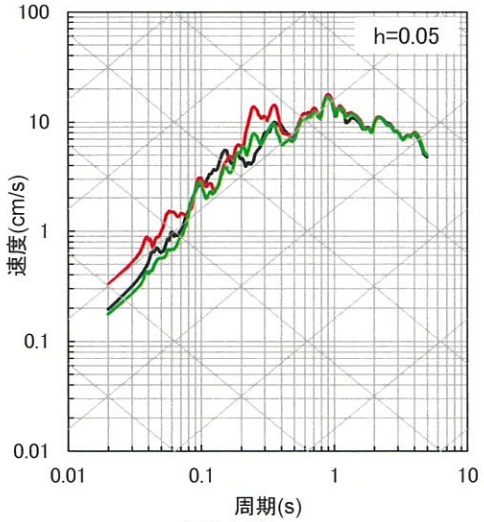
■応答スペクトルの比較結果（2/5）

観測記録 EL.-17.0m
応答波（Q=12.5）
応答値（今回同定結果）

⑤九州北西沖（2005年福岡県西方沖地震本震）

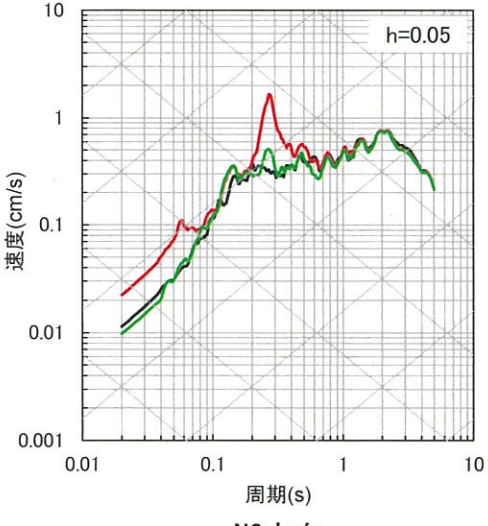


NS方向

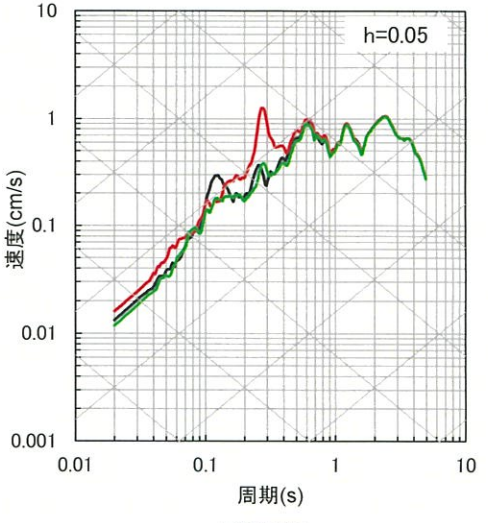


EW方向

⑥九州北西沖

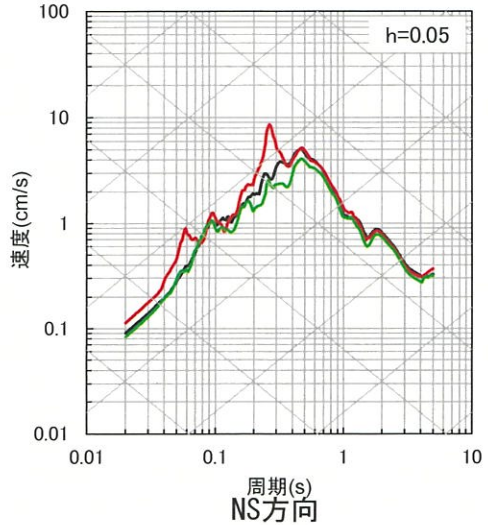


NS方向

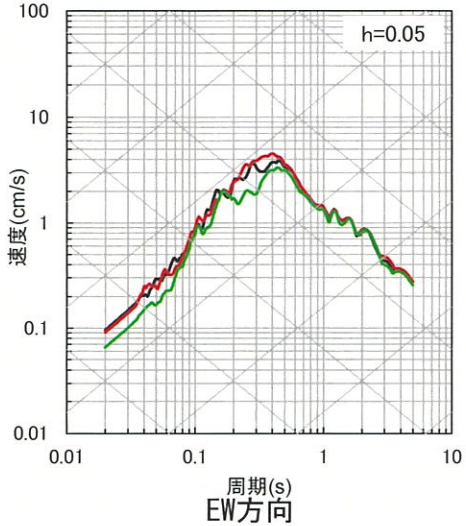


EW方向

⑦福岡県中部（2005年福岡県西方沖地震最大余震）

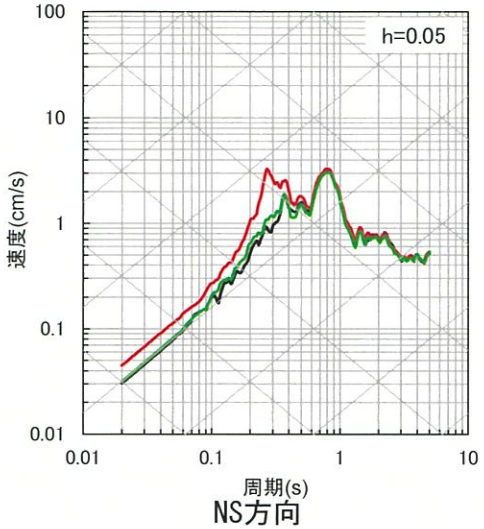


NS方向

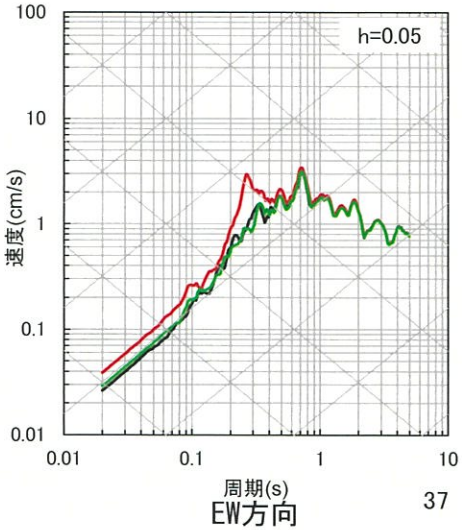


EW方向

⑧熊本県熊本地方（2016年熊本地震前震）



NS方向



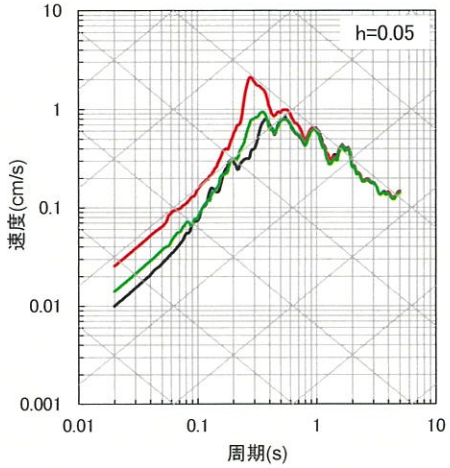
EW方向

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

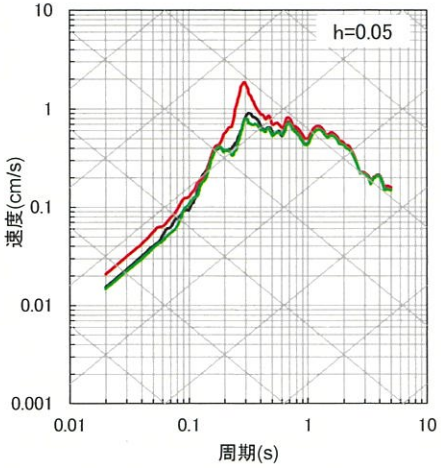
■応答スペクトルの比較結果（3/5）

観測記録 EL.-17.0m
応答波（Q=12.5）
応答値（今回同定結果）

⑨熊本県熊本地方

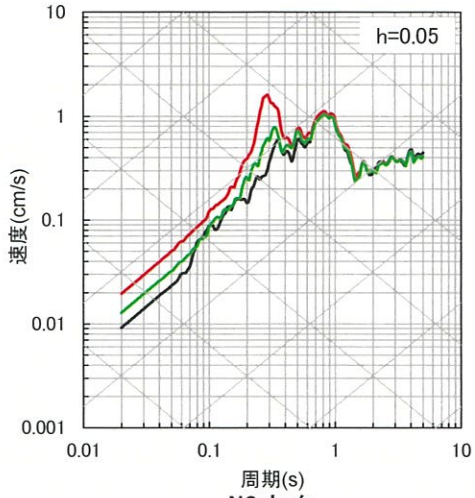


NS方向

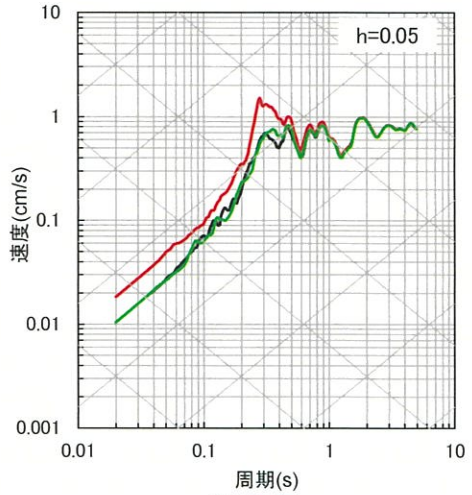


EW方向

⑩熊本県熊本地方

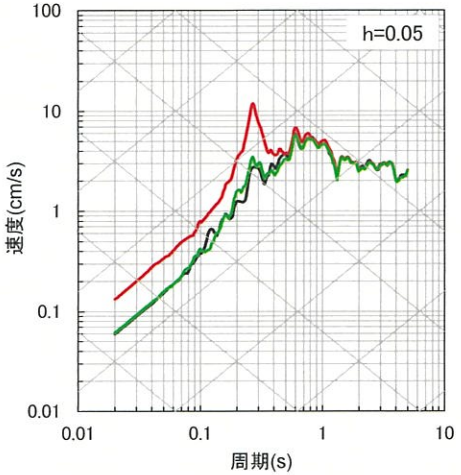


NS方向

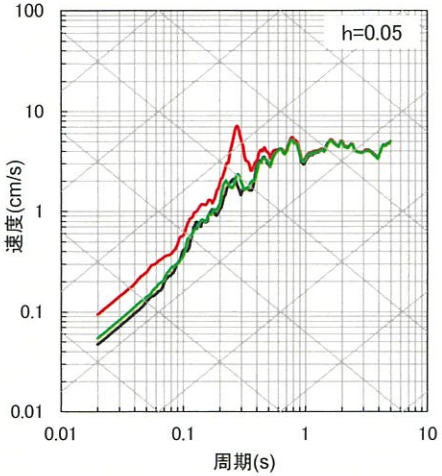


EW方向

⑪熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）

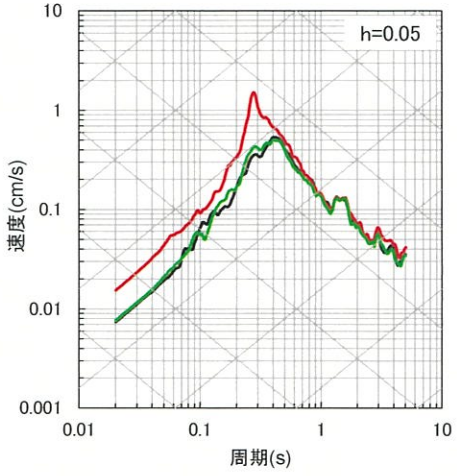


NS方向

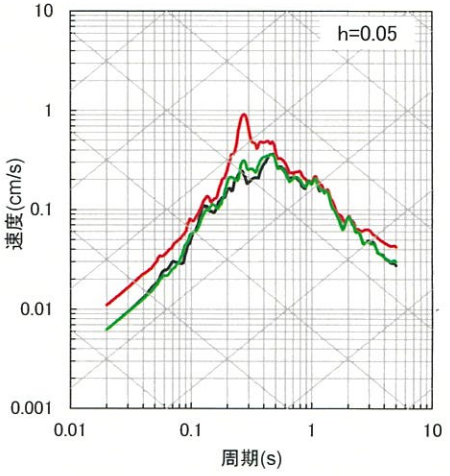


EW方向

⑫熊本県熊本地方



NS方向



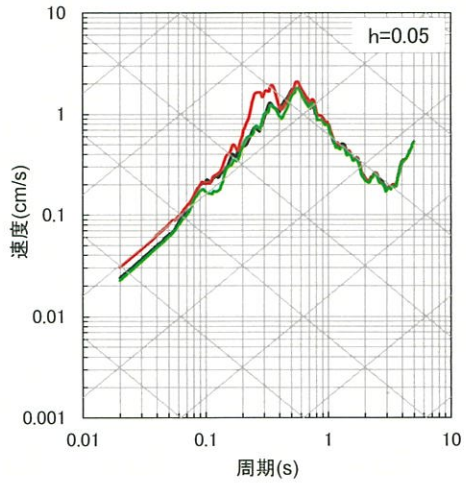
EW方向

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

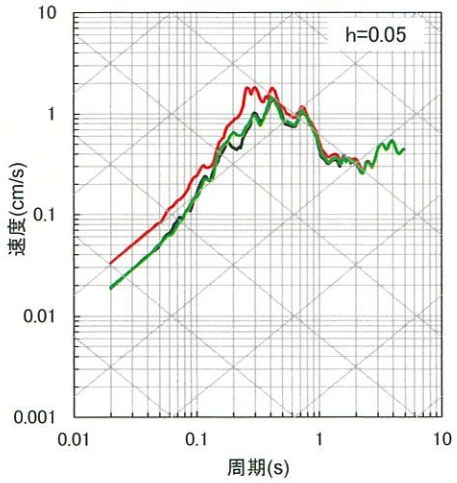
■応答スペクトルの比較結果（4/5）

観測記録 EL.-17.0m
応答波（Q=12.5）
応答値（今回同定結果）

⑬熊本県熊本地方

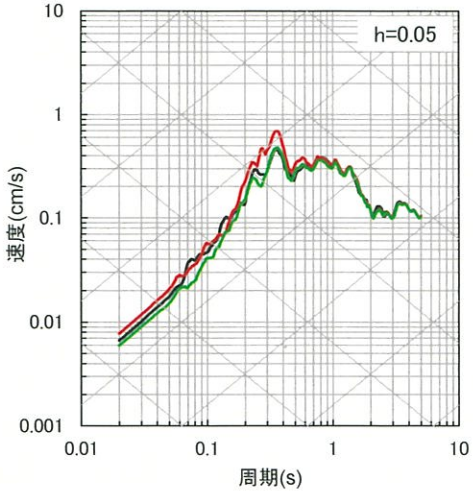


NS方向

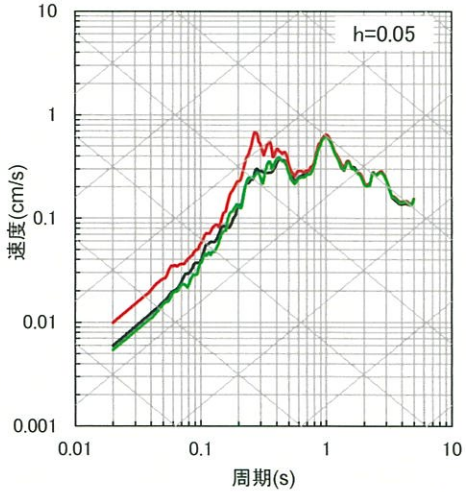


EW方向

⑭熊本県阿蘇地方

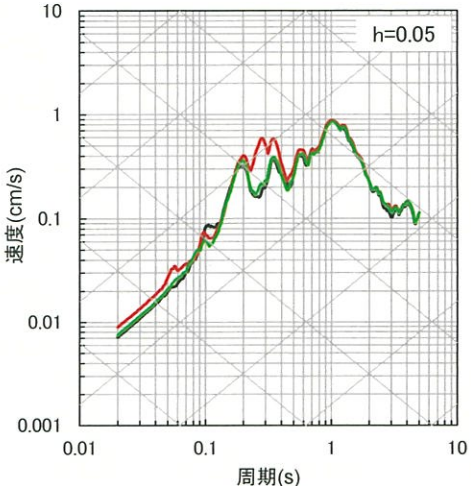


NS方向

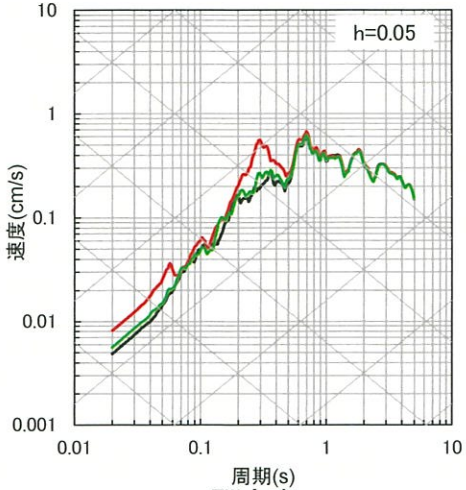


EW方向

⑮熊本県阿蘇地方

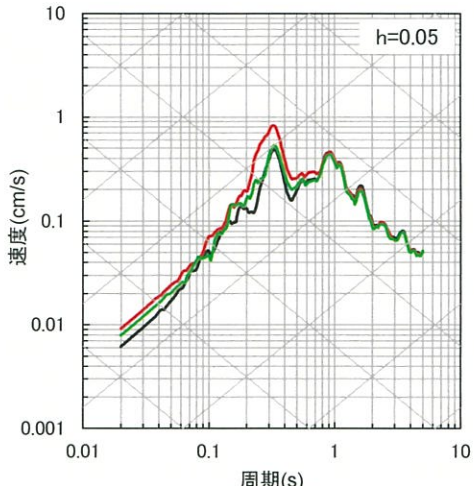


NS方向

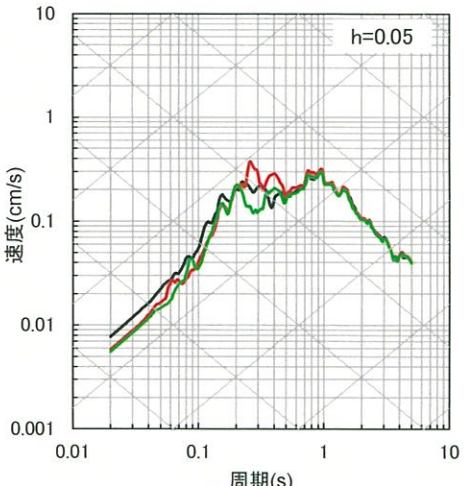


EW方向

⑯熊本県熊本地方



NS方向



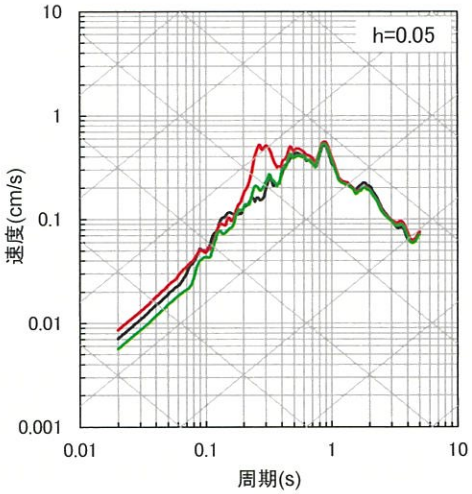
EW方向

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

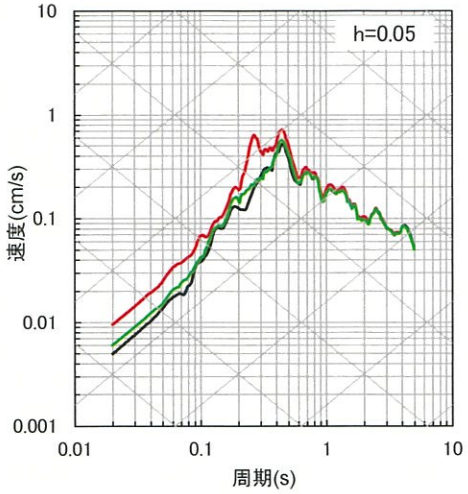
■応答スペクトルの比較結果（5/5）

観測記録 EL.-17.0m
応答波（Q=12.5）
応答値（今回同定結果）

⑰熊本県熊本地方

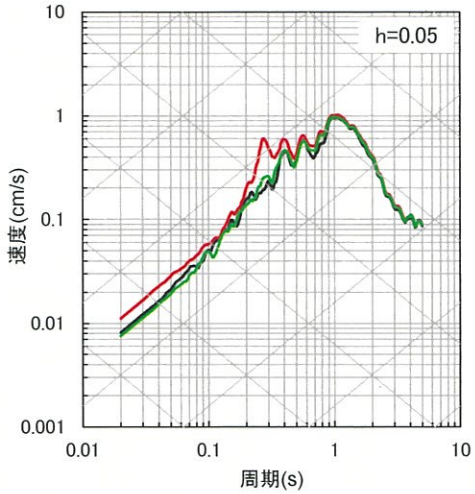


NS方向

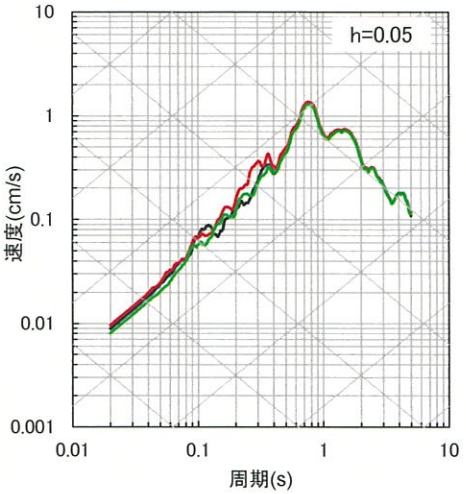


EW方向

⑱熊本県阿蘇地方

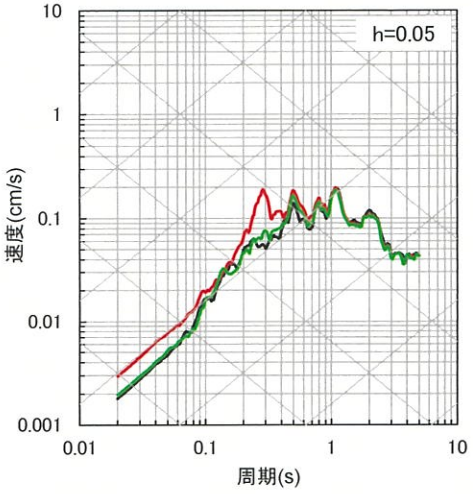


NS方向

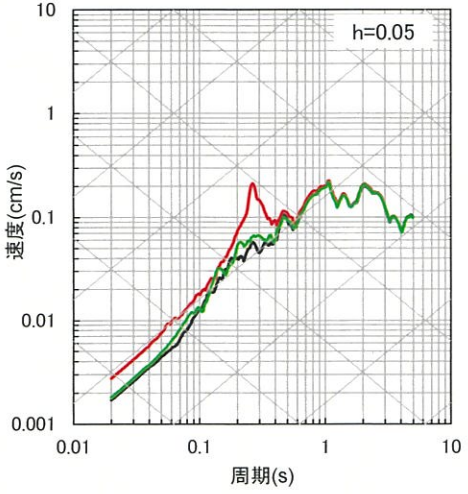


EW方向

⑲熊本県熊本地方



NS方向

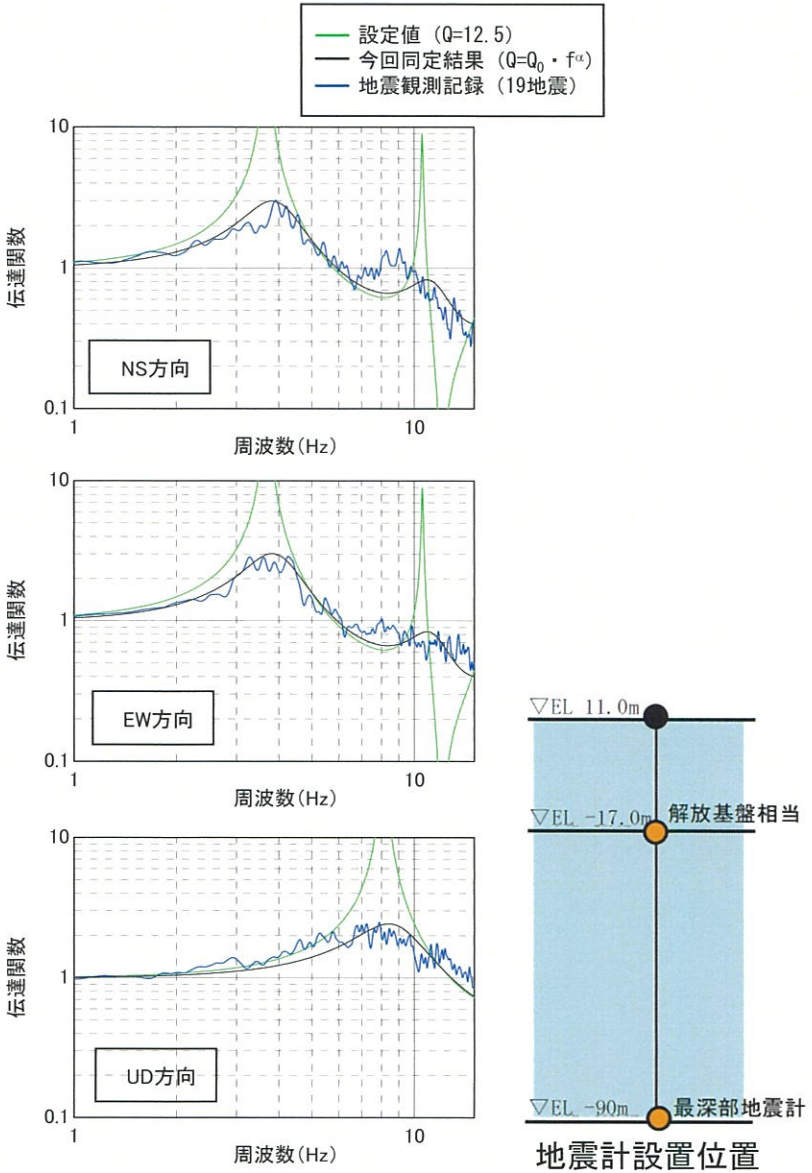


EW方向

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

②伝達関数による確認

- 今回設定した地盤減衰（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、今回設定した地盤減衰（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。



伝達関数の比較
(EL.-17.0m/EL.-90.0m)

地震計設置位置

※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

地下構造モデル（Q=12.5）

EL.（m）	密度ρ (g/cm³)	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

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）

「2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）」のまとめ

- 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最新の知見に基づく評価により、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。
- 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地盤減衰（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地盤減衰（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。
- 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。
- 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、周波数に依存せず一律で、保守的にQ=12.5と設定。
- 設定した地盤減衰（Q値）の妥当性確認のため、最深部地震計の観測記録と解放基盤表面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、妥当性を確認。

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

- 「2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）」において、設定した最深部地震計以浅の地盤減衰（Q=12.5）の適用範囲について、以下の検討を実施。

① PS検層結果を踏まえた速度層断面による検討

・ 原子炉設置位置付近のPS検層結果を踏まえた速度層断面により、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。

② 経験的地盤増幅率による検討

・ 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の層下面深度を検討し、Q=12.5をEL.-200m以深まで適用できることを確認する。

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

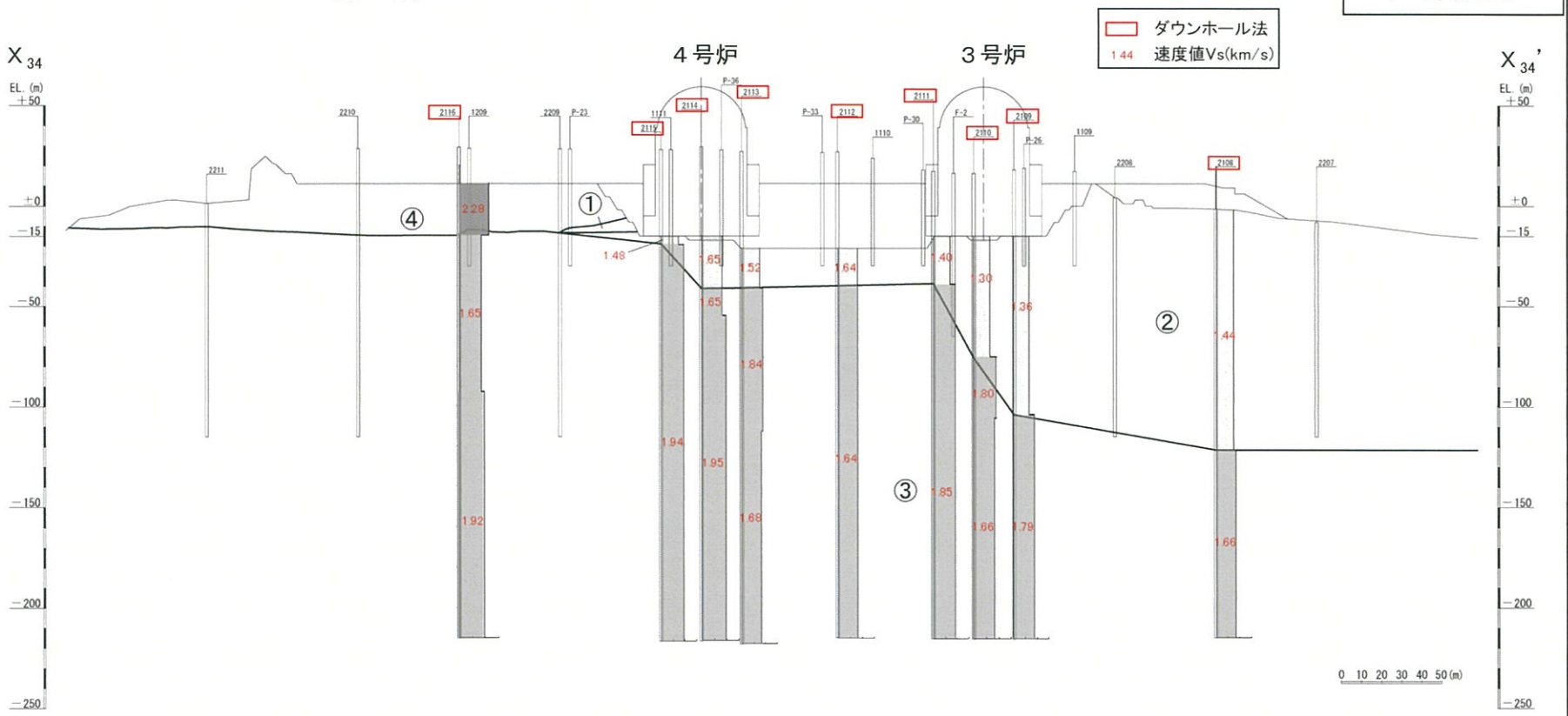
①PS検層結果を踏まえた速度層断面による検討

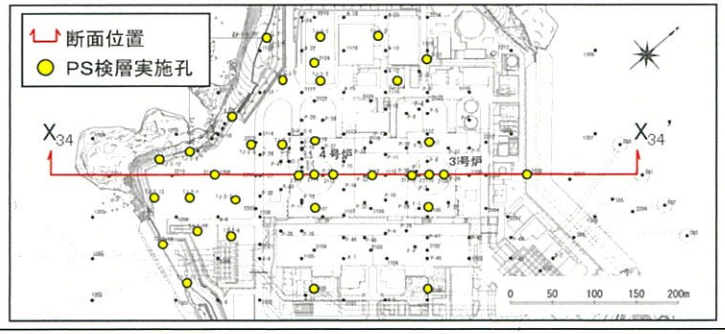
- 解放基盤表面からEL.-200mまでの範囲において、PS検層結果を踏まえた速度層断面が得られている。
- 原子炉設置位置付近のPS検層結果を踏まえた速度層断面では、解放基盤表面からEL.-200mまでは概ね③速度層に分類されており、最深部地震計（EL.-90.0m）以浅と最深部地震計以深において大きな差異が見られないことを確認。

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（X_{34}-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

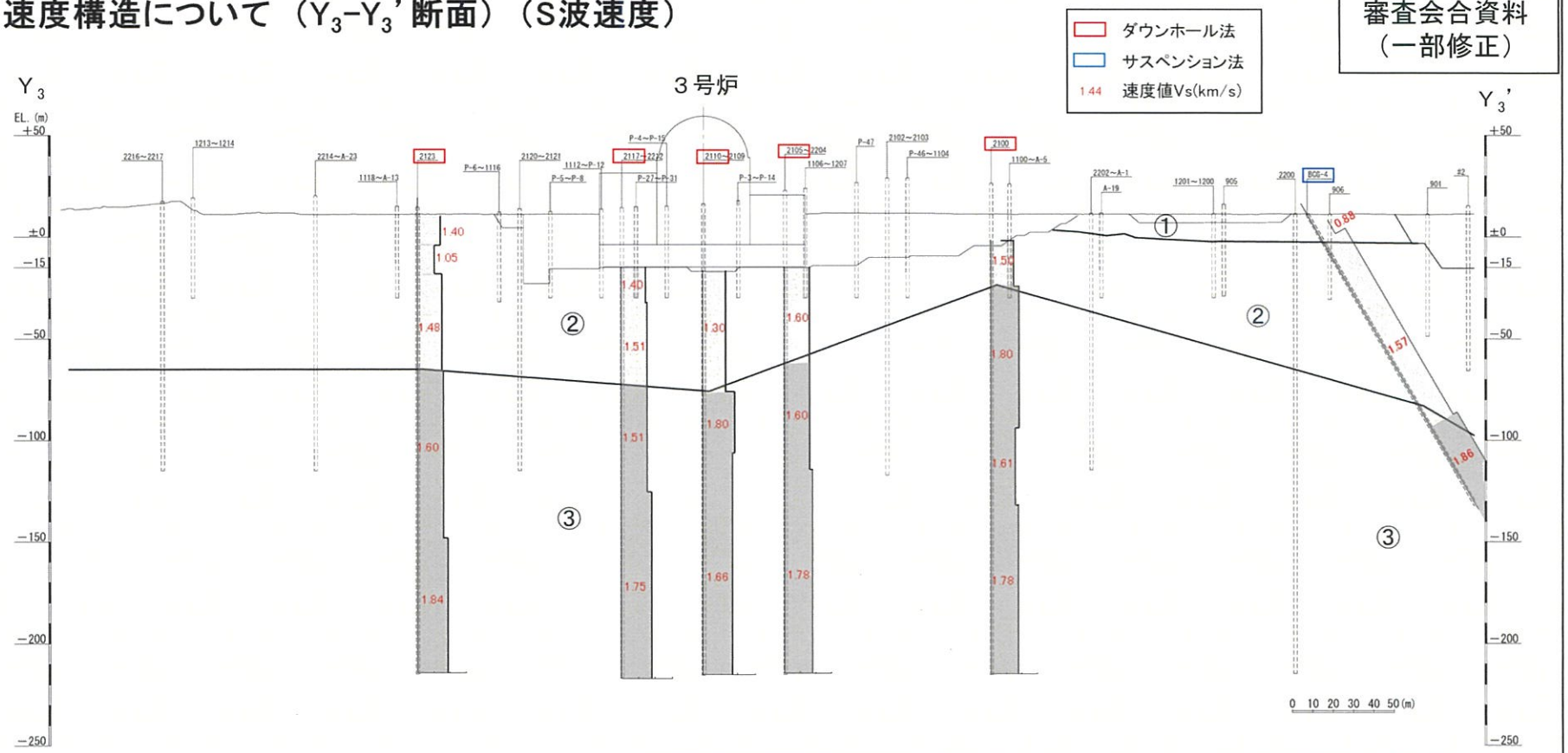
- 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度（Vs=約1.4～1.8km/s）を示す。
- 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

第402回会合資料の地質断面図について、敷地形状の見直し及びＰＳ検層結果の速度層区分を加筆。

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（Y_3-Y_3'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

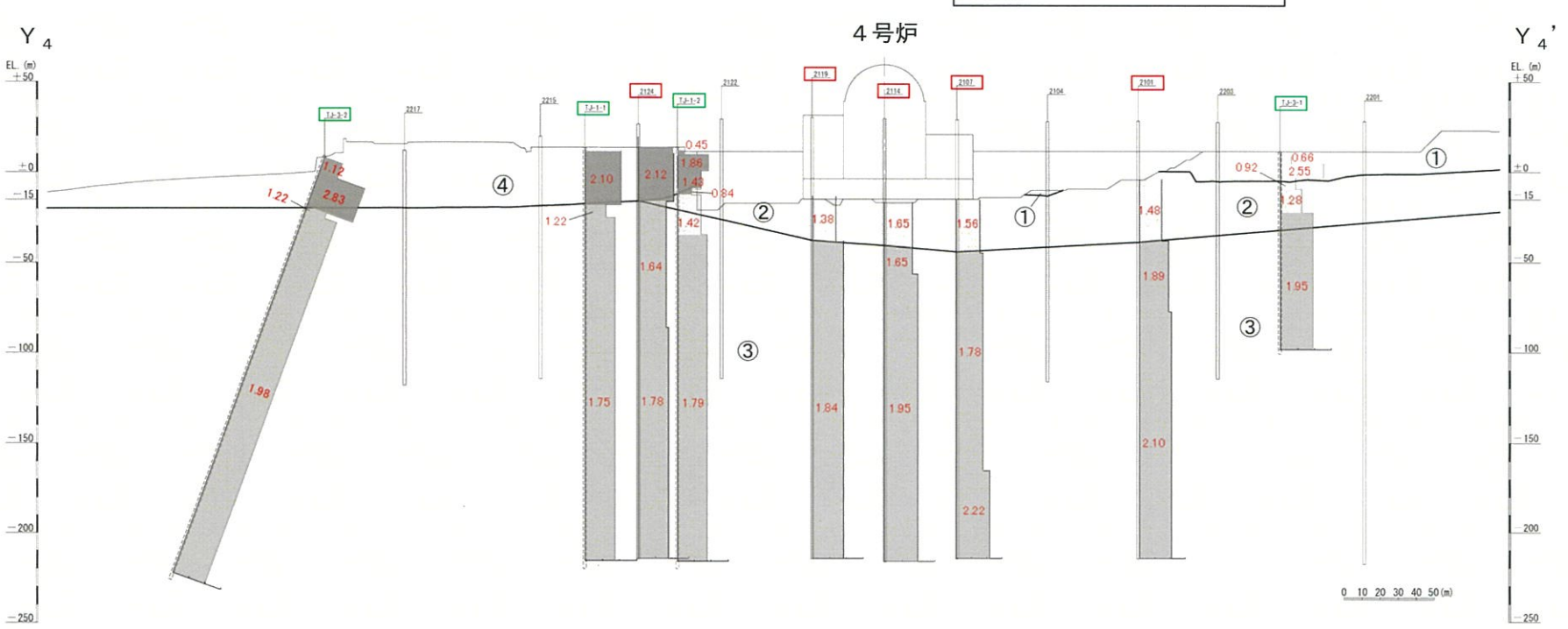
・原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度（Vs=約1.4～1.8km/s）を示す。
・速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

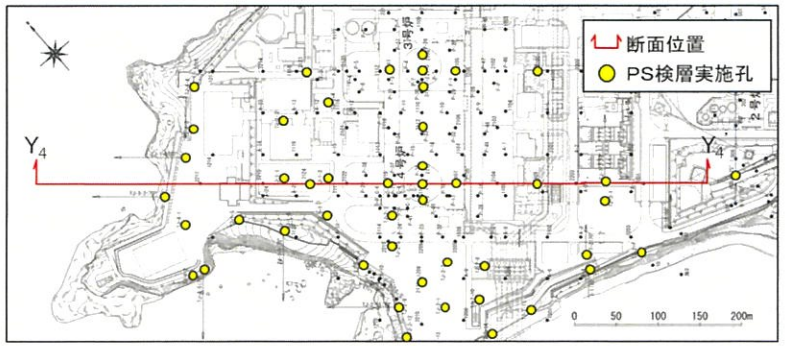
第402回会合資料の地質断面図について、敷地形状の見直し及びＰＳ検層結果の速度層区分を加筆。

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（Y_4-Y_4'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（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。

第402回会合資料の地質断面図について、敷地形状の見直し及びＰＳ検層結果の速度層区分を加筆。

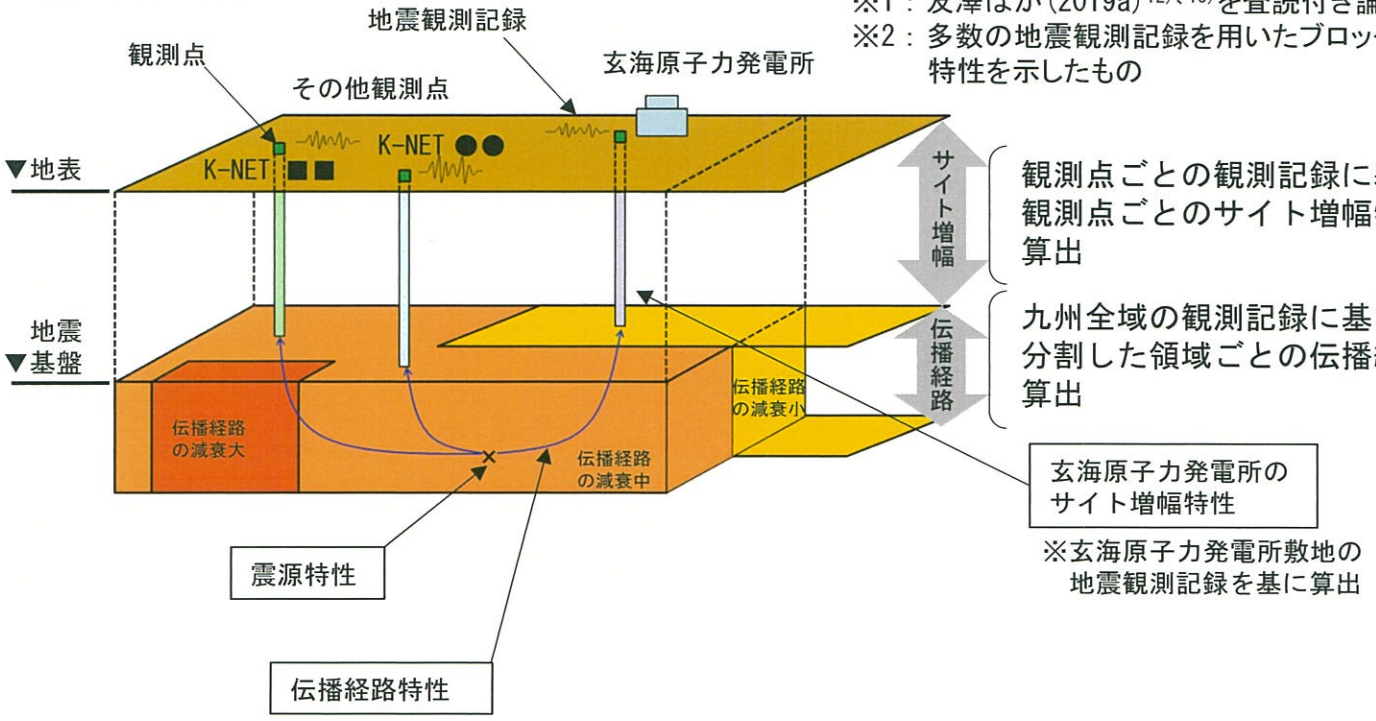
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

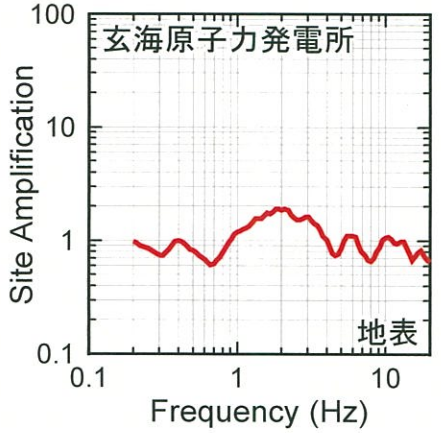
②経験的地盤増幅率による検討

■ 友澤ほか(2021)[11]に基づく経験的地盤増幅率

- 玄海原子力発電所の経験的地盤増幅率は、友澤ほか(2021)[11]※1によるサイト増幅率※2を用いる。
  - 友澤ほか（2021）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）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り、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性向上に資する知見として以降の検討・確認に用いる。

※1：友澤ほか(2019a)[12]、[13]を査読付き論文として取り纏めたもの
※2：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



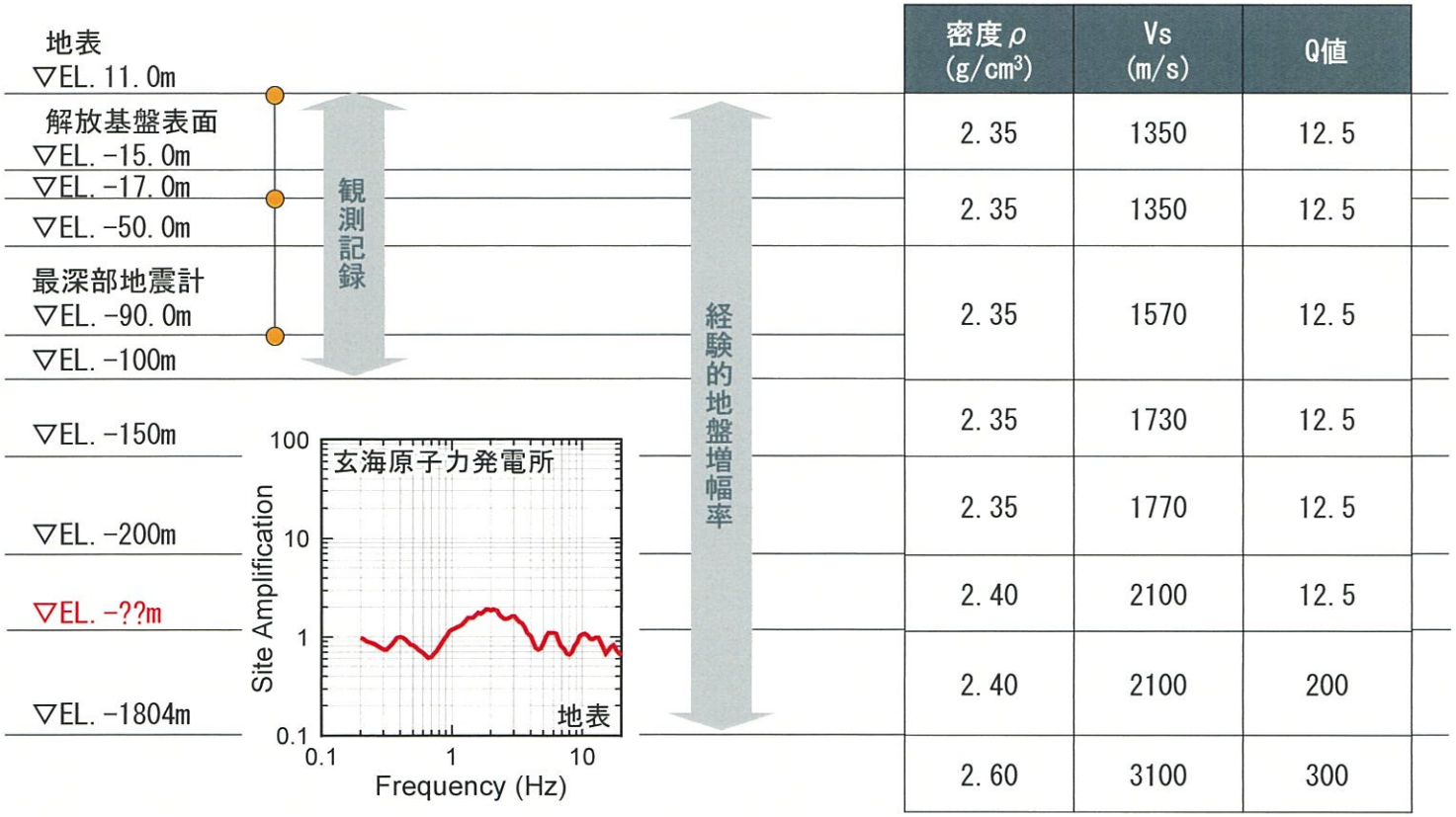


友澤ほか（2021）による震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性のイメージ

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 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、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。
- 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。
- 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。

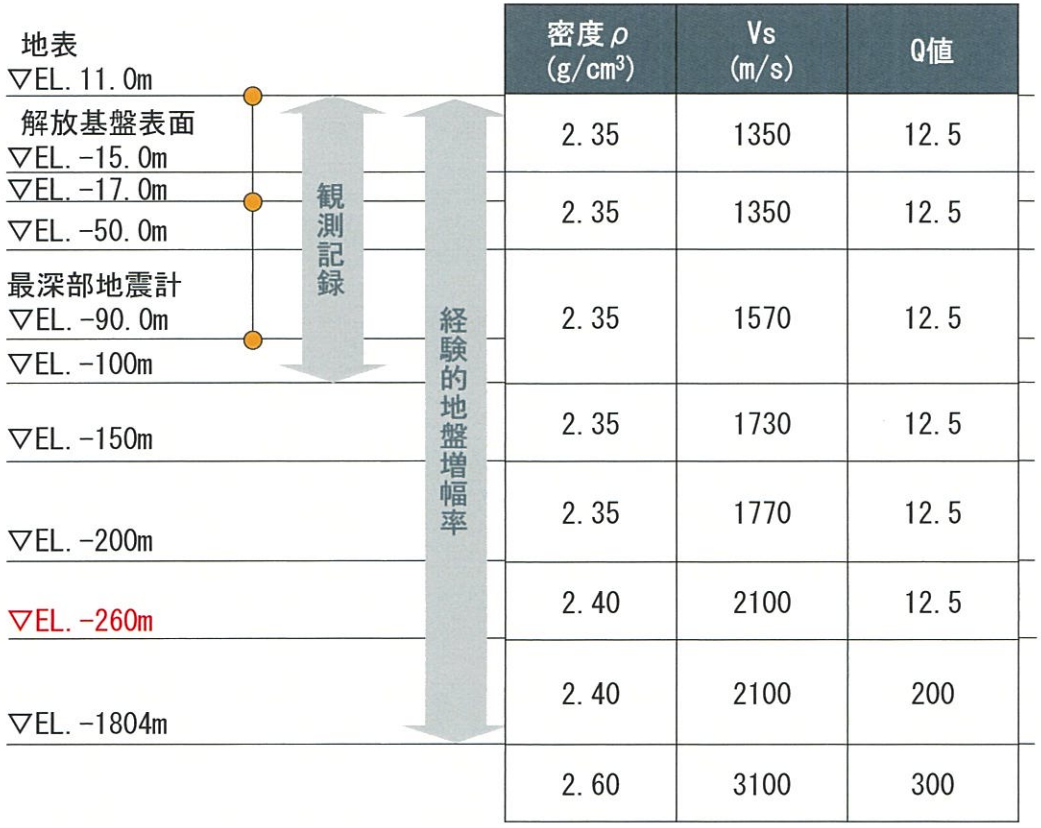


密度 ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	Q値
2.35	1350	12.5
2.35	1350	12.5
2.35	1570	12.5
2.35	1730	12.5
2.35	1770	12.5
2.40	2100	12.5
2.40	2100	200
2.60	3100	300

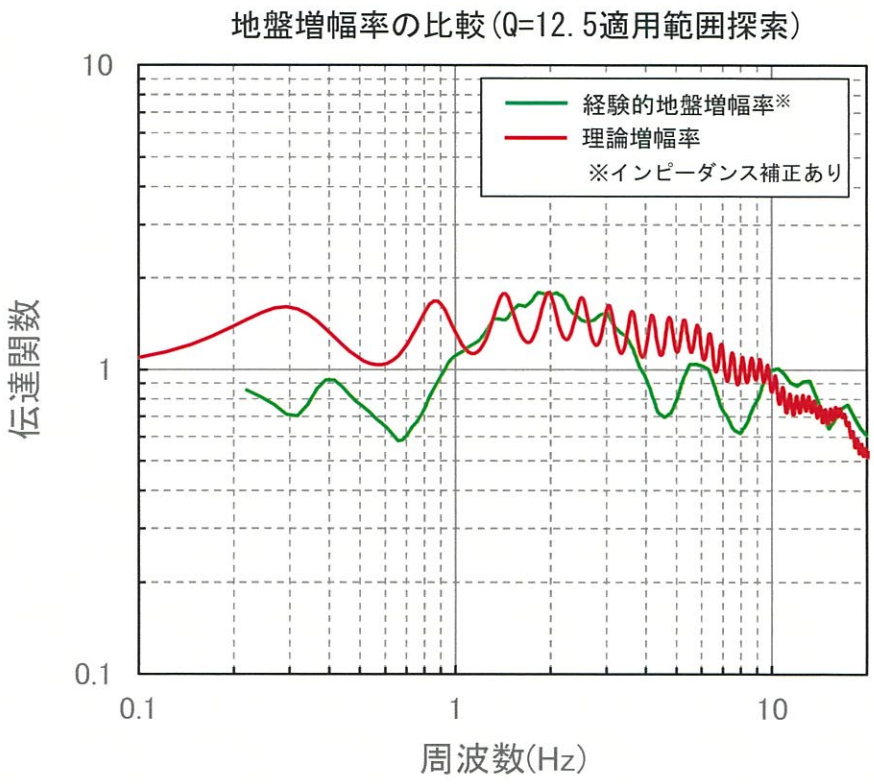
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 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。



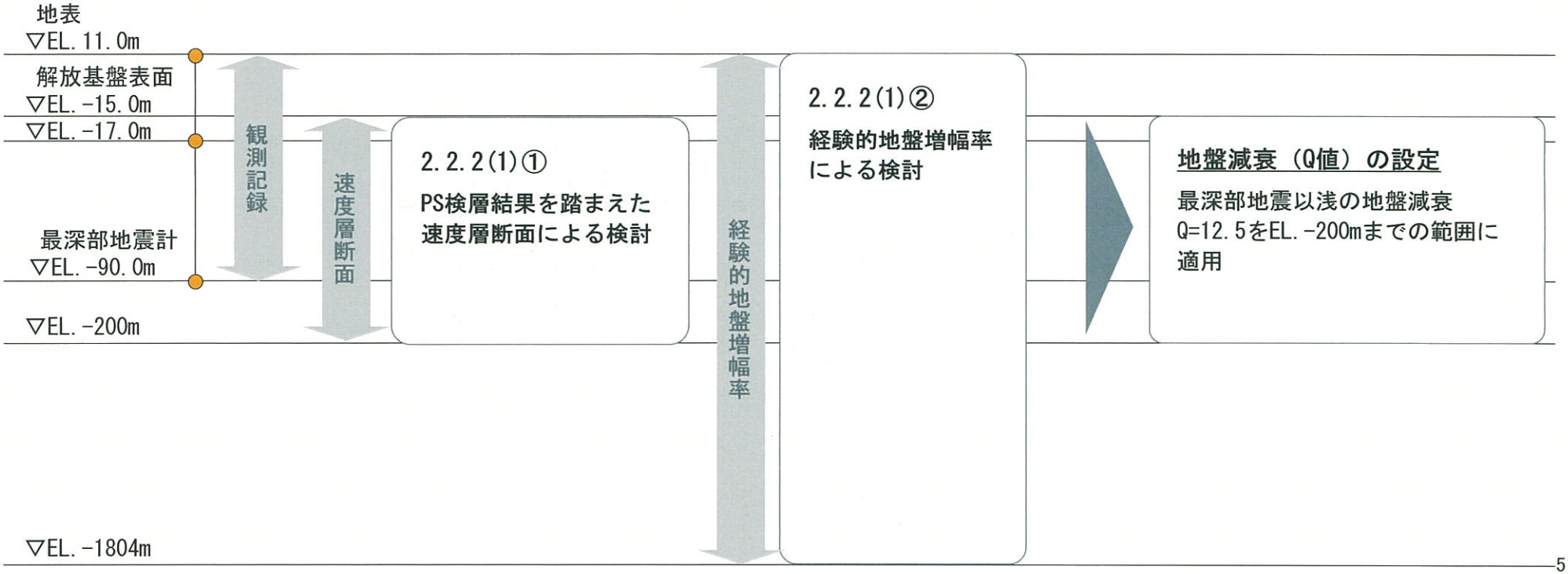
密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	Q値
2.35	1350	12.5
2.35	1350	12.5
2.35	1570	12.5
2.35	1730	12.5
2.35	1770	12.5
2.40	2100	12.5
2.40	2100	200
2.60	3100	300



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）の設定

- PS検層結果を踏まえた速度層断面による検討の結果、EL.-200mまでの範囲は速度構造が概ね同じであることを確認。
- 経験的地盤増幅率による検討から、残差が最小となるQ=12.5の層下面深度はEL.-260m。
- 経験的地盤増幅率は地震観測記録に基づくブロックインバージョン解析により算出しており、解析に含まれる不確かさや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て、Q=12.5を適用する範囲を、速度層断面により確認できているEL.-200mまでの範囲に適用。



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）の妥当性確認

■最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認方針

- 前節の通り、最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）は、複数の手法により最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）がEL.-200mまで適用可能であることを確認し、設定。
- 本節では、下表の方法により地盤減衰（Q値）の設定の妥当性を確認。

確認方法	対象深度EL.(m) -15.0 -90.0 -200 -1804	比較方法	比較対象		確認する観点
ボーリング孔内減衰による確認	EL.-15.0m～EL.-200m	地盤減衰（Q値）	ボーリング孔内測定結果（最深部地震計以浅）	ボーリング孔内測定結果（最深部地震計以深）	最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等。
岩石コア減衰による確認	EL.-15.0m～EL.-200m	地盤減衰（Q値）	岩石コア（最深部地震計以浅）	岩石コア（最深部地震計以深）	最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等。

2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

①ボーリング孔内における減衰測定による確認

- ボーリング孔内における減衰測定により、EL.-200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面からEL.-200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を以下の観点で確認。
  - ボーリング孔内測定による減衰※1が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

②岩石コア減衰測定による確認

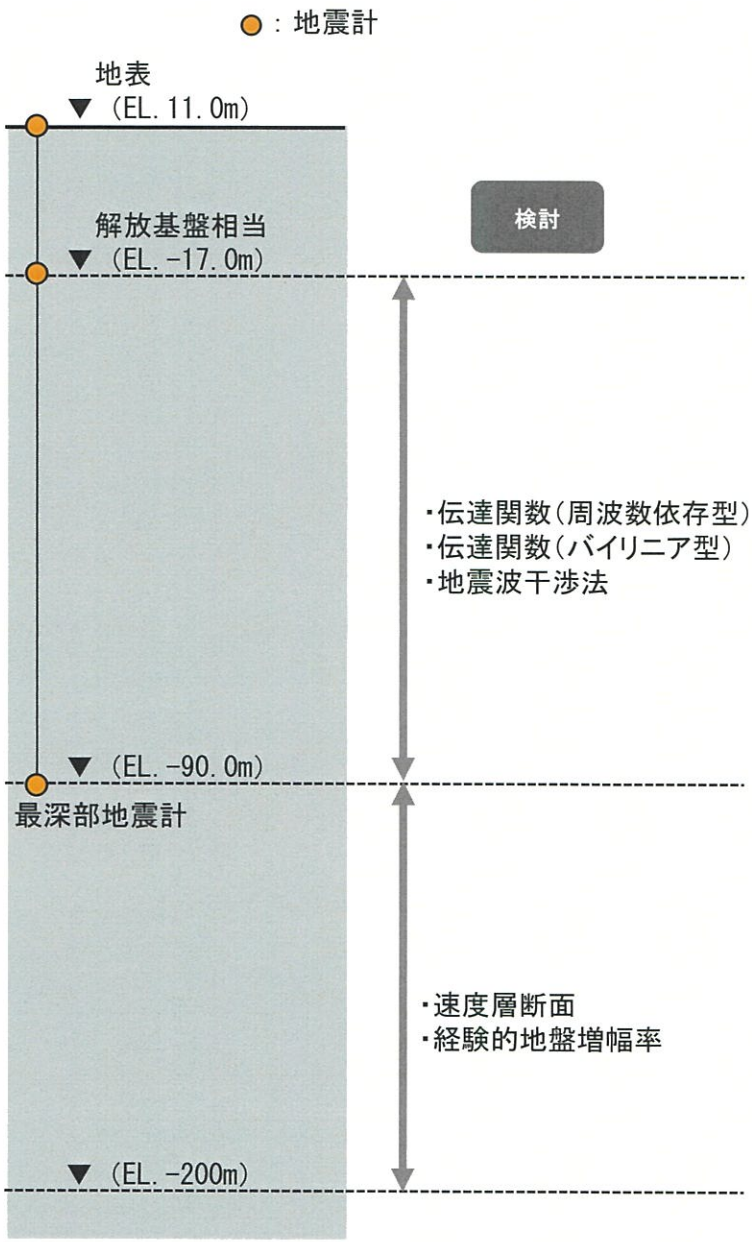
- 岩石コアを用いた減衰測定により、EL.-200mまでの範囲における岩石の減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面からEL.-200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を以下の観点で確認。
  - 岩石コアを用いた測定による減衰※2が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

※1：震源車による人工震源を用いた減衰測定。振幅レベルや周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

※2：岩石コア供試体を用いた超音波試験による減衰測定。岩盤の不均質性による減衰が含まれていない点※3や周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

※3：佐藤・岡田(2012)[14]での指摘

- 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。

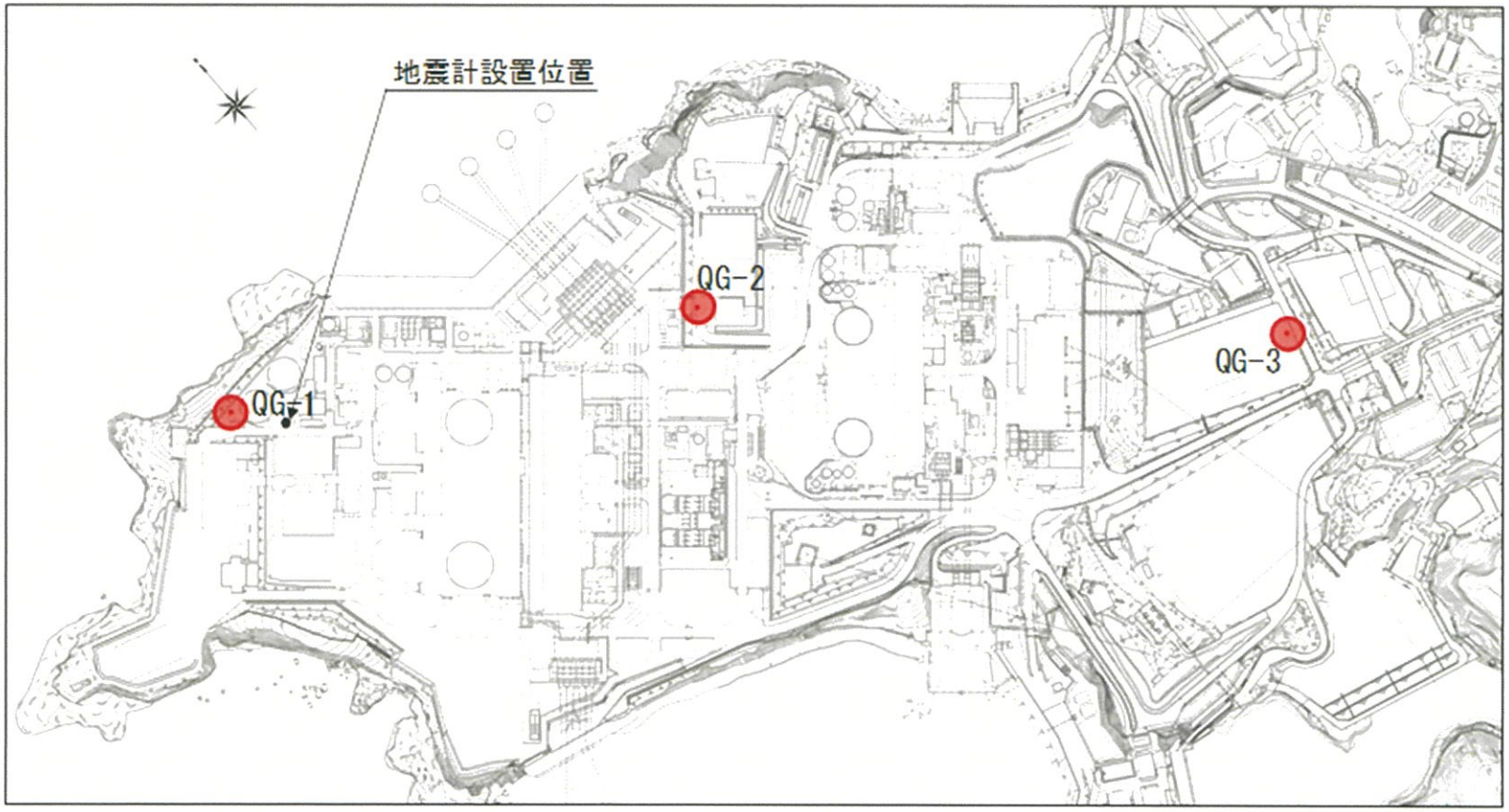


2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

①ボーリング孔内における減衰測定による確認

■追加ボーリング調査位置

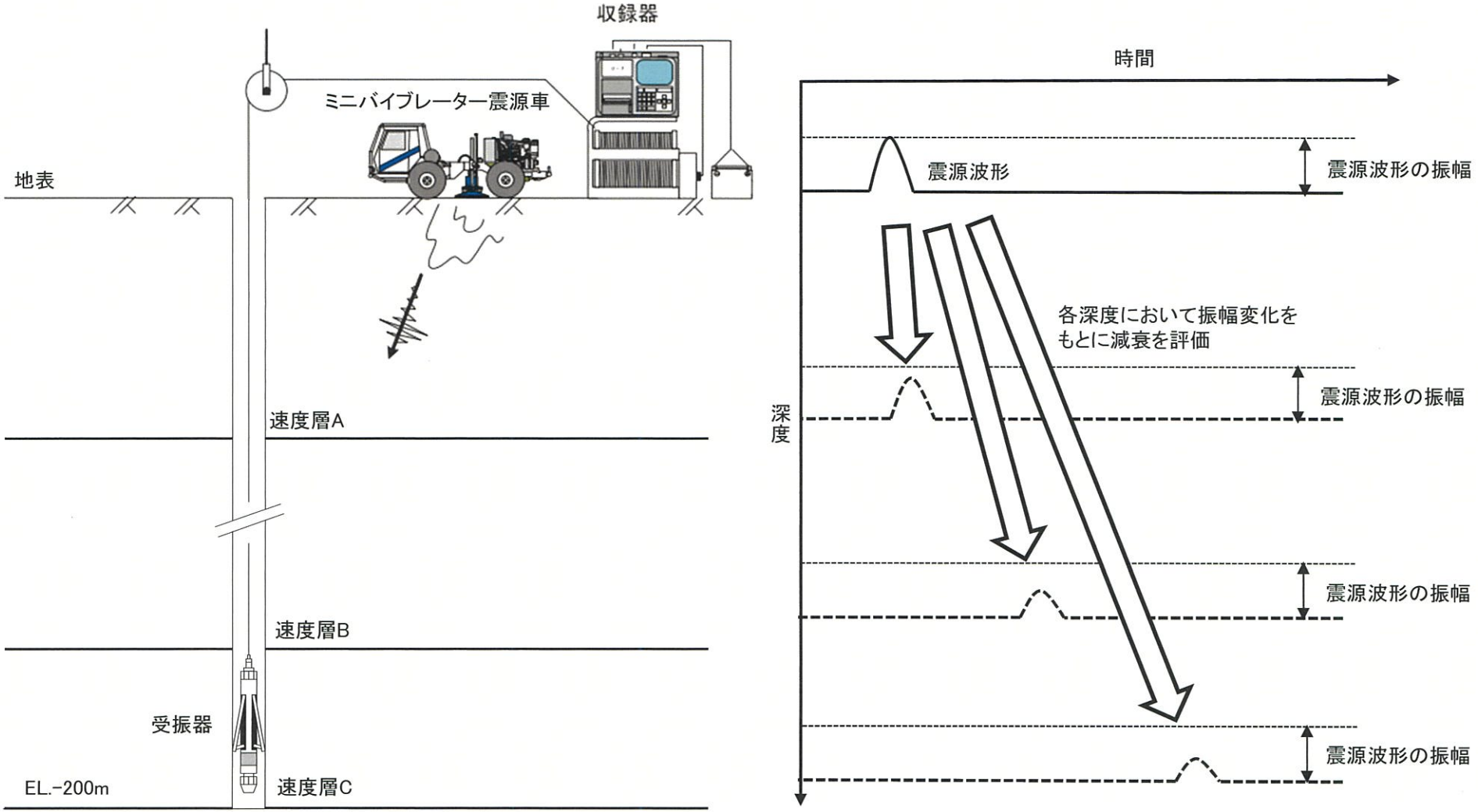
- 発電所構内において、EL.-200mまでの追加ボーリング調査を3箇所で実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



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[15),16)]

- 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[15)]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[16)]する。



減衰評価イメージ図

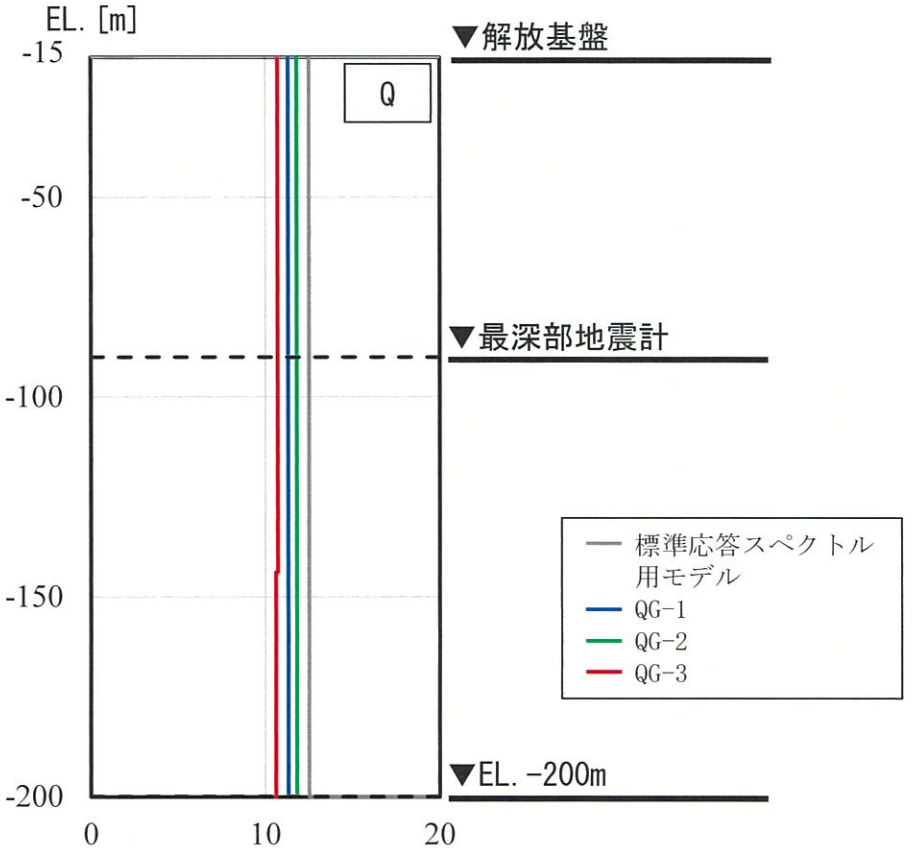
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■減衰測定結果を踏まえた地盤減衰（Q値）の妥当性確認

- 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＝10.6～10.7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）	Q値	減衰定数 h（%）
QG-1	-15.0 ～ -200.0	11.3	4.4
QG-2	-15.0 ～ -200.0	11.8	4.2
QG-3	-15.0 ～ -144.0	10.7	4.7
	-144.0 ～ -200.0	10.6	4.7

※ 調査結果は解放基盤以深からEL.-200mに範囲を統一したものを記載

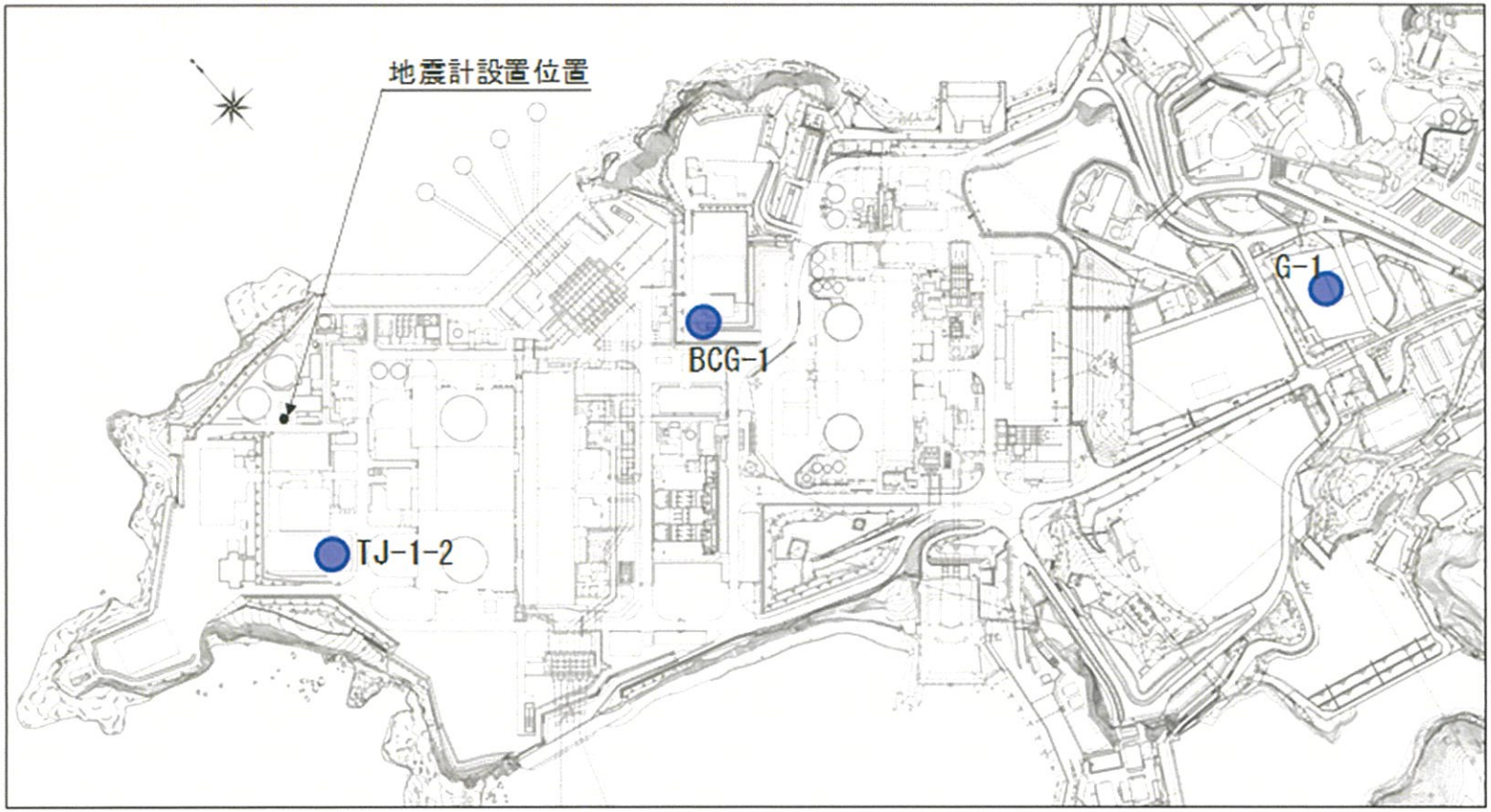


2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

②岩石コアを用いた減衰測定による確認

■ 岩石コア採取位置

- 発電所構内における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。



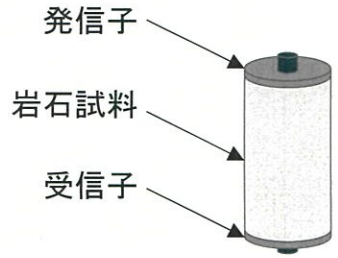
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■岩石コアを用いた減衰測定[14),17)]

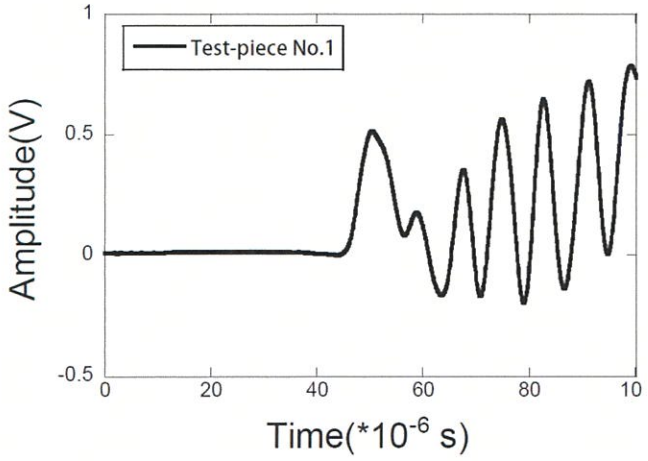
- 佐藤・岡田(2012)[14)]において適用性が確認された、異なる試験体の透過パルス波のスペクトル比を用いる「スペクトル比法」（Toksöz et al.(1979)[17)]）による評価を実施。供試体1として敷地内のボーリング調査により得られた岩石コアを、供試体2としてQ値が既知なアルミニウムを使用し、透過波のスペクトル比$A_1(f)/A_2(f)$から次式に基づき、岩石の減衰（Q値）を推定。
- 岩石コアで得られるQ値は、地盤を構成する材料の減衰であり、亀裂等を含む地盤全体の減衰に対して部分的であることから、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の相対比較による検討を実施。

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

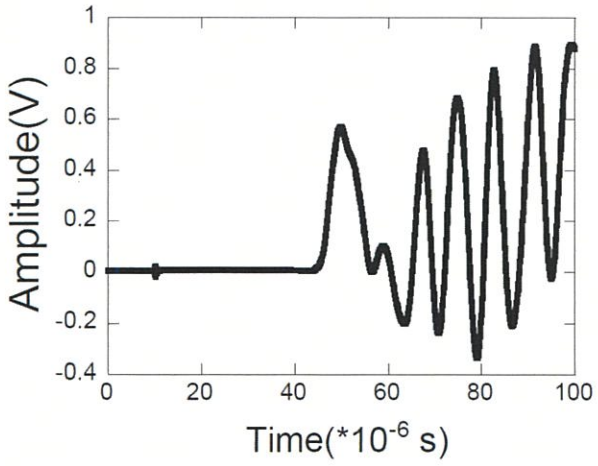
c	弾性波速度
Q	Q値
x	伝播距離(供試体長さ)
f	周波数
K	供試体での幾何減衰に関する項



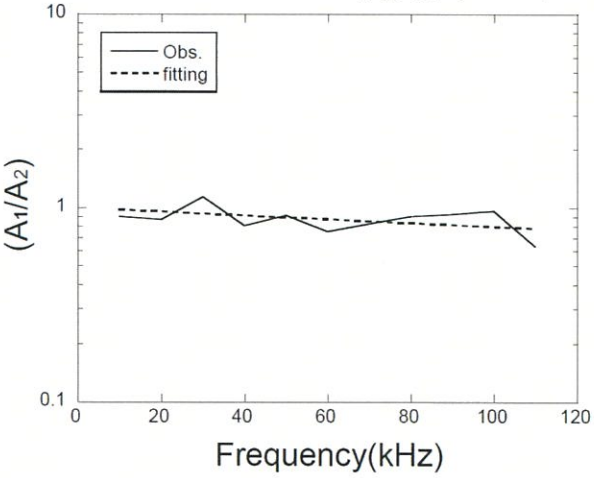
供試体イメージ



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

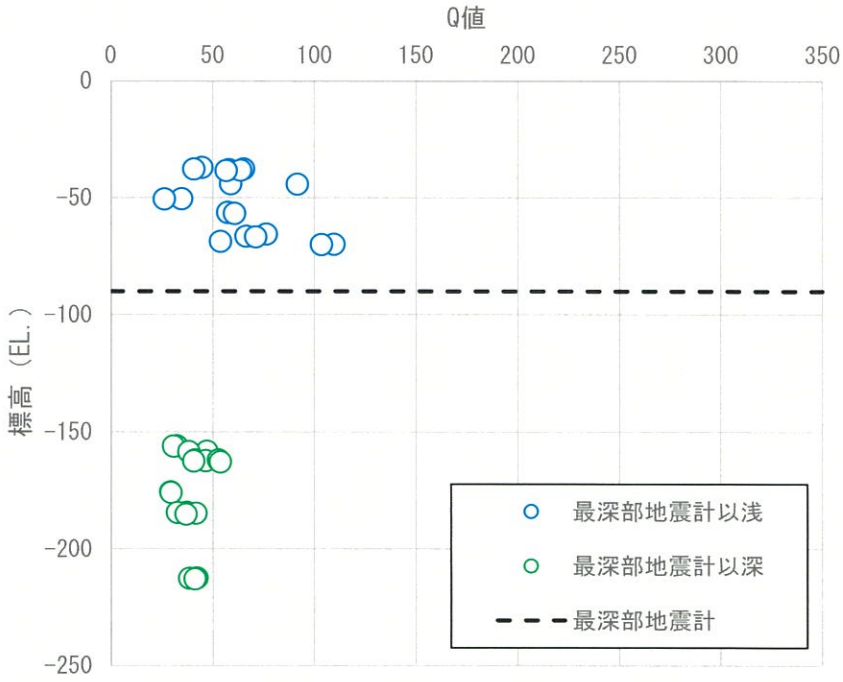
スペクトル比法による減衰測定イメージ　※佐藤・岡田（2012）より抜粋

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）の妥当性確認

- 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＝20～110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＝20～60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）

「2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）」のまとめ

- 「2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）」において設定した地盤減衰（Q=12.5）を適用する範囲を、原子炉設置位置付近のPS検層結果を踏まえた速度層断面による検討や経験的地盤増幅率による検討を踏まえ、解析に含まれる不確かさや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て、速度層断面により確認できているEL.-200mまでの範囲に適用。
- 設定した地盤減衰（Q値）の妥当性確認のため、追加ボーリング孔内における減衰測定による確認及び岩石コア減衰測定による確認を実施。
- 追加ボーリング孔内における減衰測定では、最深部地震計以浅と最深部地震計以深でQ値は同等であることを確認。
- 岩石コア減衰測定では、最深部地震計以浅と最深部地震計以深でQ値は同等もしくは最深部地震計以深が小さい傾向であることを確認。
- 追加ボーリング孔内における減衰測定による確認及び岩石コア減衰測定により、解放基盤表面からEL.-200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を確認。

2.3 地下構造モデルの設定

■標準応答スペクトル用モデルの設定

- 解放基盤表面からEL.-200mまでの範囲において、敷地の地震観測記録や経験的地盤増幅率による検討から地盤減衰（Q値）を設定、妥当性を確認し、以下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
（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
解放基盤表面	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-15m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-50m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5
-100m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5
-150m	-0.185	2.40	2100	4000	200
-200m	-1.789	2.60	3100	5500	300
-1804m					

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、複数の手法による検討結果に不確かさを考慮して設定。
- 設定した地盤減衰（Q値）について、複数の手法により妥当性を確認。
- 本節では、下表の方法により、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） -15.0 -90.0 -200 -1804	比較方法	比較対象		確認する観点
友澤ほか増幅率による確認	EL.-15.0m～EL.-1804m	地盤増幅率	標準応答SP用モデル	経験的地盤増幅率	標準応答スペクトル用モデルによる地盤増幅率が、経験的地盤増幅率と同等もしくは上回る。
	EL.-15.0m～EL.-1804m	応答スペクトル	標準応答SP用モデル	経験的地盤増幅率	標準応答スペクトル用モデルによる応答スペクトルが、経験的地盤増幅率の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
追加調査結果に基づく確認	EL.-15.0m～EL.-200m	理論伝達関数	標準応答SP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。
	EL.-15.0m～EL.-200m	応答スペクトル比	標準応答SP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応答スペクトル比が、PS検層モデルによる応答スペクトル比と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

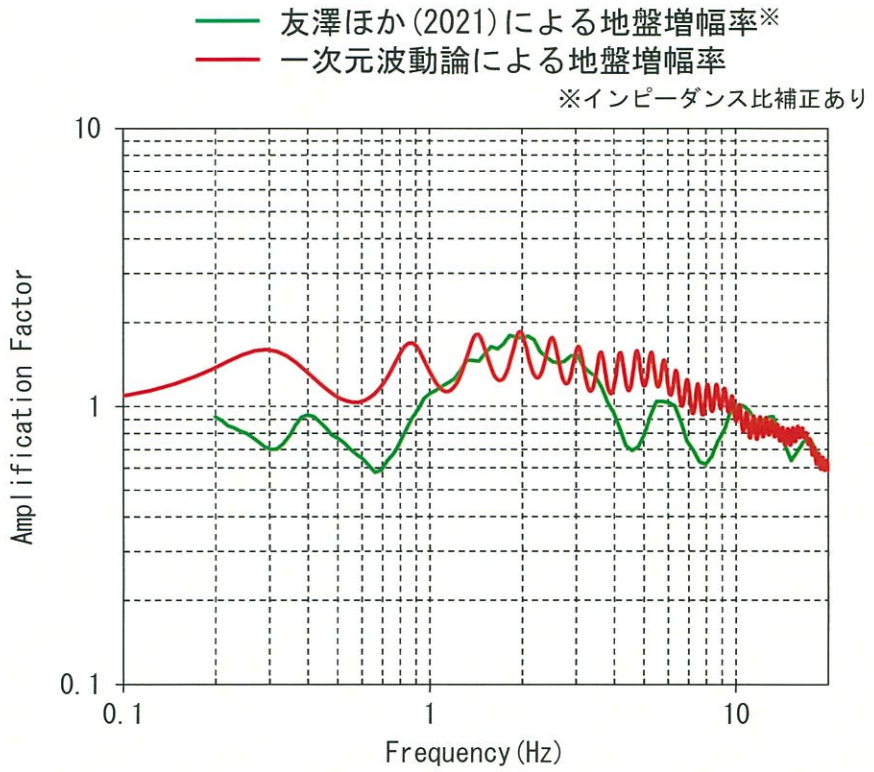
（１）経験的地盤増幅率による確認

- 標準応答スペクトル用モデルにおけるVs=3100m/sの層上面から地表まで一次元波動論に基づき算出した地盤増幅率と、友澤ほか(2021)[11]で推定された玄海原子力発電所の地盤増幅率の比較により、標準応答スペクトル用モデル（地震基盤相当面～地表）の妥当性を確認。
- その結果、友澤ほか(2021)[11]による地盤増幅率に比べ大きい、もしくは一部周波数帯で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評価に用いる
一次元地下構造モデル

EL.	密度 ρ (g/cm^3)	Vs (m/s)	Q値
11m	2.35	1350	12.5
-15m	2.35	1350	12.5
-50m	2.35	1570	12.5
-100m	2.35	1730	12.5
-150m	2.35	1770	12.5
-200m	2.40	2100	200
-1804m	2.60	3100	300

解放基盤表面(EL.-15.0m)上に層を追加



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

- 前頁の地盤増幅率と2005年3月20日福岡県西方沖地震本震における敷地の最深部地震計の地震観測記録（EL.-90.0m）を用い、①及び②で算出した応答スペクトルの比較・検討を実施。

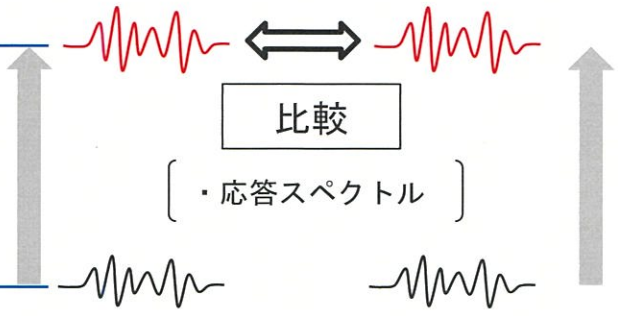
① 地震基盤相当面であるEL.-1804mに、 2005年3月20日福岡県西方沖地震本震における敷地の最深部地震計の地震観測記録（EL.-90.0m）を入力し、標準応答スペクトル用モデルを用いて、1次元波動論に基づき、地表における応答波の応答スペクトルを算出。

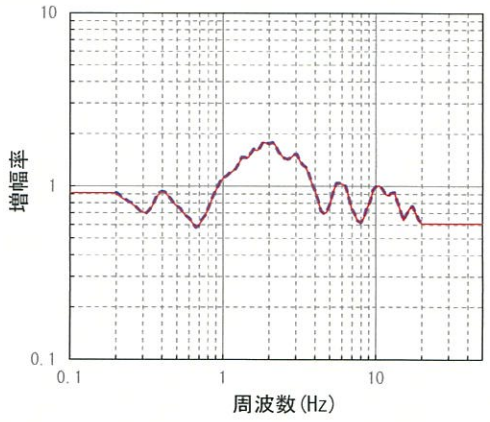
② 2005年3月20日福岡県西方沖地震本震における敷地の最深部地震計の地震観測記録（EL.-90.0m）のフーリエ振幅スペクトルに経験的増幅率を乗じ、フーリエ逆変換することにより推定した地表の応答波の応答スペクトルを算出。なお、経験的地盤増幅率は、0.2～20Hzの範囲の地盤増幅率であるため、上記算出に当たっては、0.2Hz及び20Hzの値で外挿。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる
一次元地下構造モデル

EL.	密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	Q値
11m	2.35	1350	12.5
-15m	2.35	1350	12.5
-50m	2.35	1570	12.5
-100m	2.35	1730	12.5
-150m	2.35	1770	12.5
-200m	2.40	2100	200
-1804m	2.60	3100	300

解放基盤表面(EL.-15.0m)上に層を追加

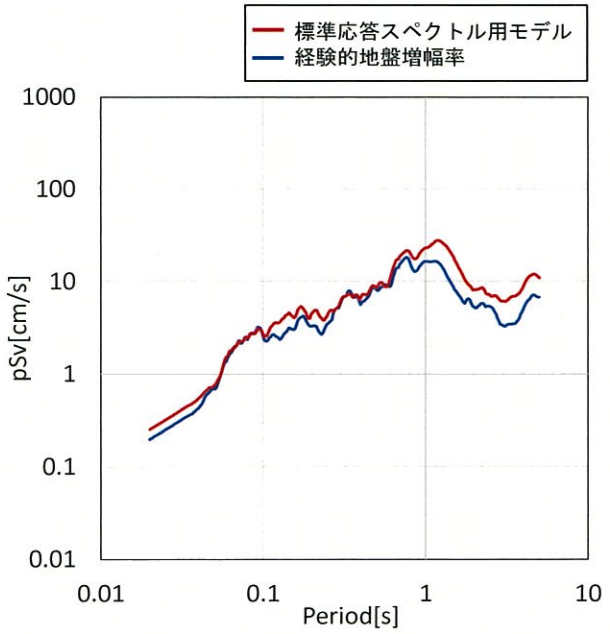




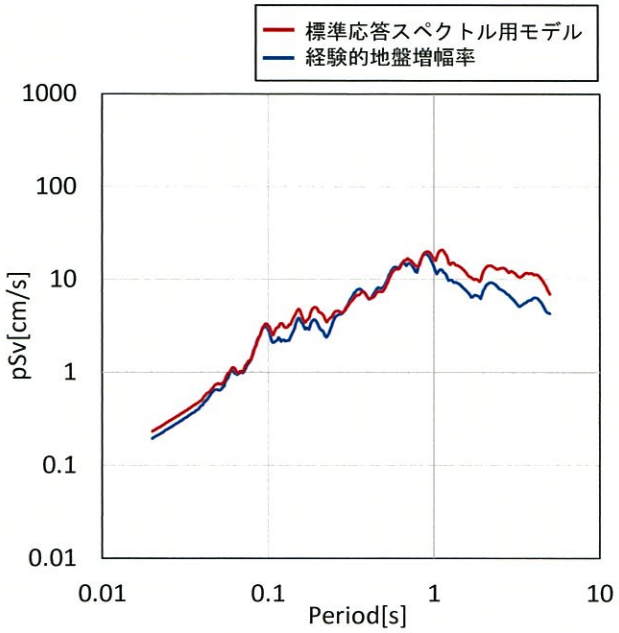
経験的地盤増幅率

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

- ①標準応答スペクトル用モデルに基づく応答スペクトルは、②経験的地盤増幅率に基づく応答スペクトルを上回ることを確認。



NS方向

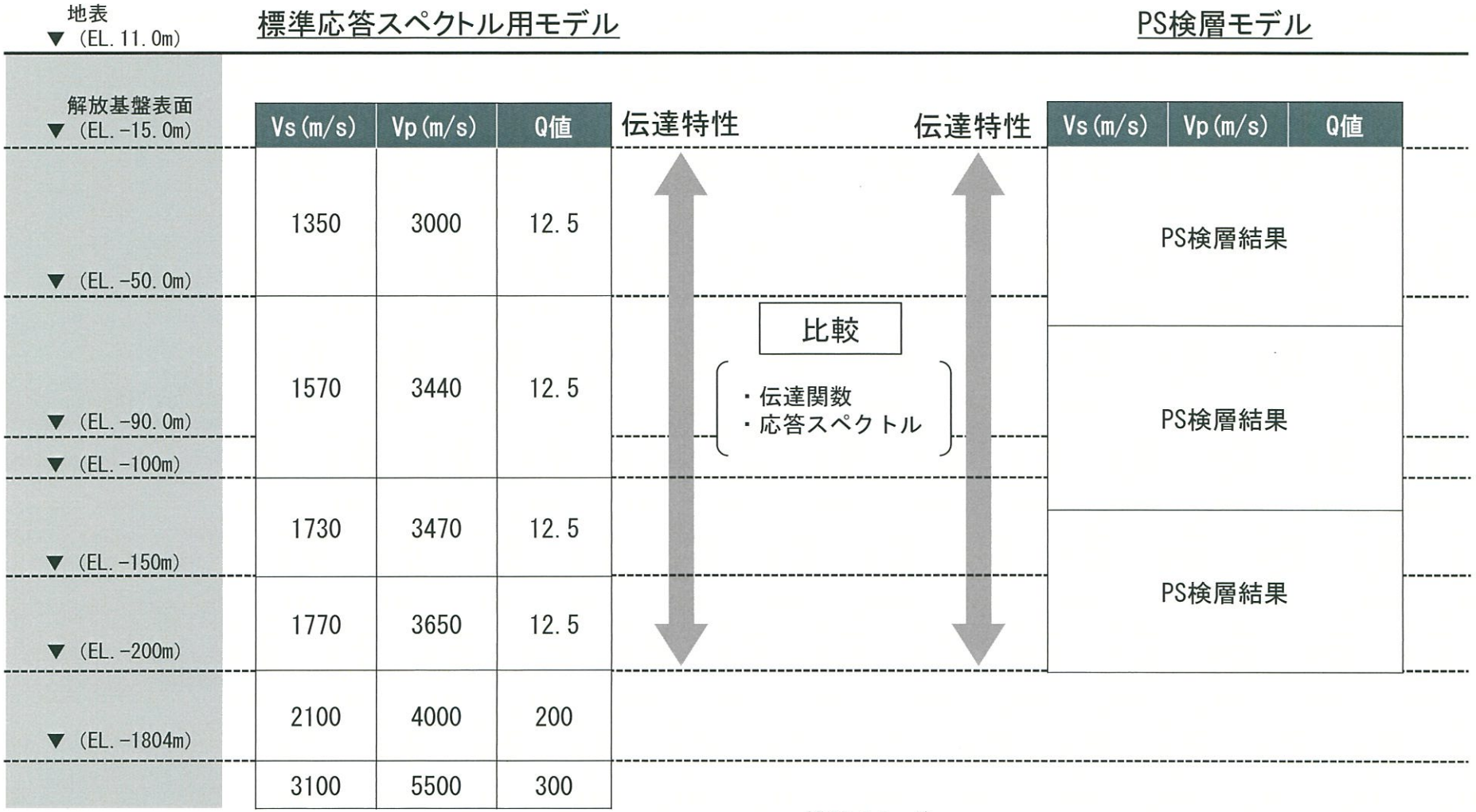


EW方向

2.4 地下構造モデルの妥当性確認

（２）追加ボーリング調査結果との比較による確認

- 追加調査により得られた層厚、Vs、Vp、Q値を基に、PS検層モデルを設定。
- 標準応答スペクトル用の地下構造モデルとPS検層モデルによる伝達特性（伝達関数、応答スペクトル）の比較により、標準応答スペクトル用モデルの妥当性を確認。

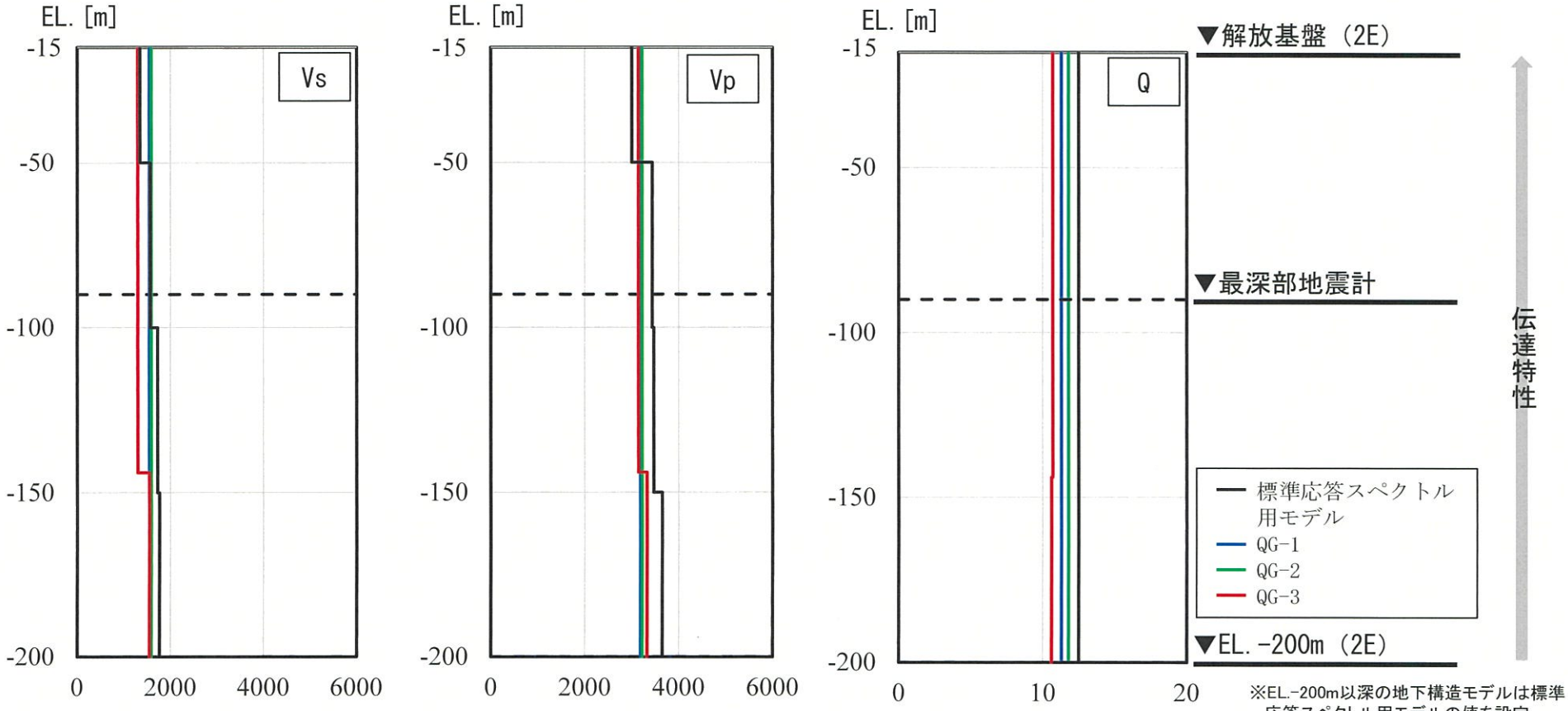


検討イメージ

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PS検層結果を踏まえ、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（Vs、Vp）は、標準応答スペクトル用モデルと概ね整合しているものの、QG-3のVsは、標準応答スペクトル用モデルに比べ、小さい傾向。
- 追加ボーリング孔におけるPS検層によるQ値は、いずれも標準応答スペクトル用モデルの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。

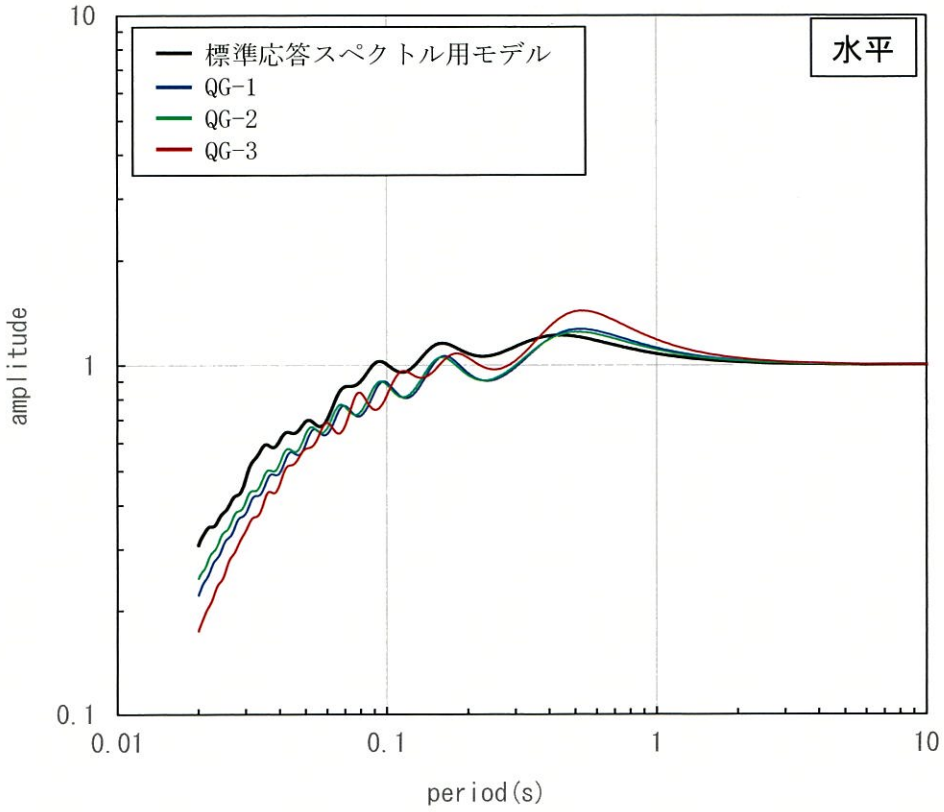


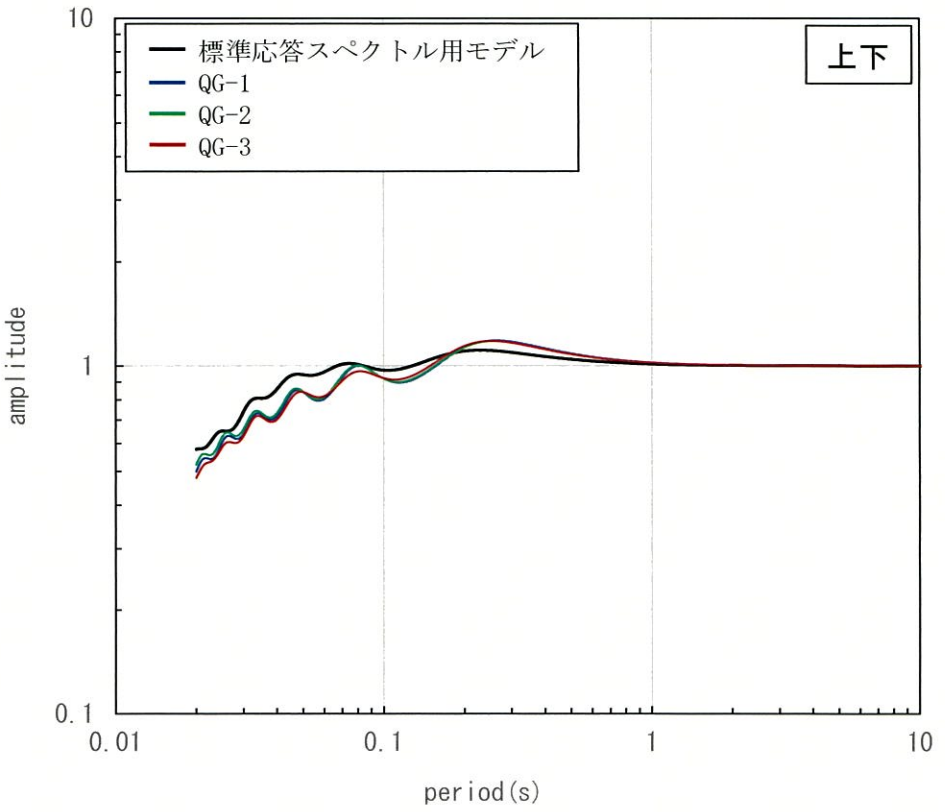
※EL.-200m以深の地下構造モデルは標準応答スペクトル用モデルの値を設定

2.4 地下構造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。ただし、QG-3の伝達関数（水平）については、一部の周期帯（0.5秒付近）では、下回ることを確認。





2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■PS検層モデルによる伝達関数に見られる特徴的なピークの解釈

- PS検層モデル（QG-3）の伝達関数は、一部の周期帯（水平：0.5秒付近）で特徴的なピークを有する。
- 追加調査ボーリングのPS検層結果（QG-3）は、標準応答スペクトル用モデルに比べ、速度構造のコントラストが大きく、その結果として、PS検層モデルの伝達関数に特徴的なピークが現れていると考えられる。

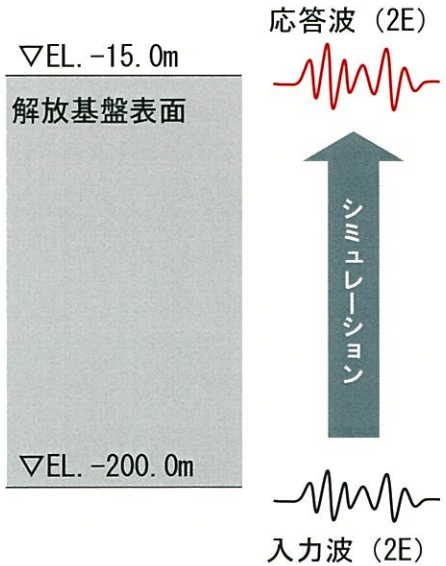
- 一方、既許可の地下構造モデルの速度構造は、PS検層、鉛直アレイ地震観測や微動アレイ観測などに基づく多面的な検討を実施しているが、既往のPS検層は、各孔ごとに幅があることを把握した上で、敷地の平均的な特性を反映していると考えられる3号炉基礎マットPS検層（5孔平均）を基に速度構造を設定している。
- このため、追加調査ボーリングのPS検層を踏まえても、地下構造モデルの速度構造は敷地の平均的な特性を反映した既許可の判断が変わるものではない。

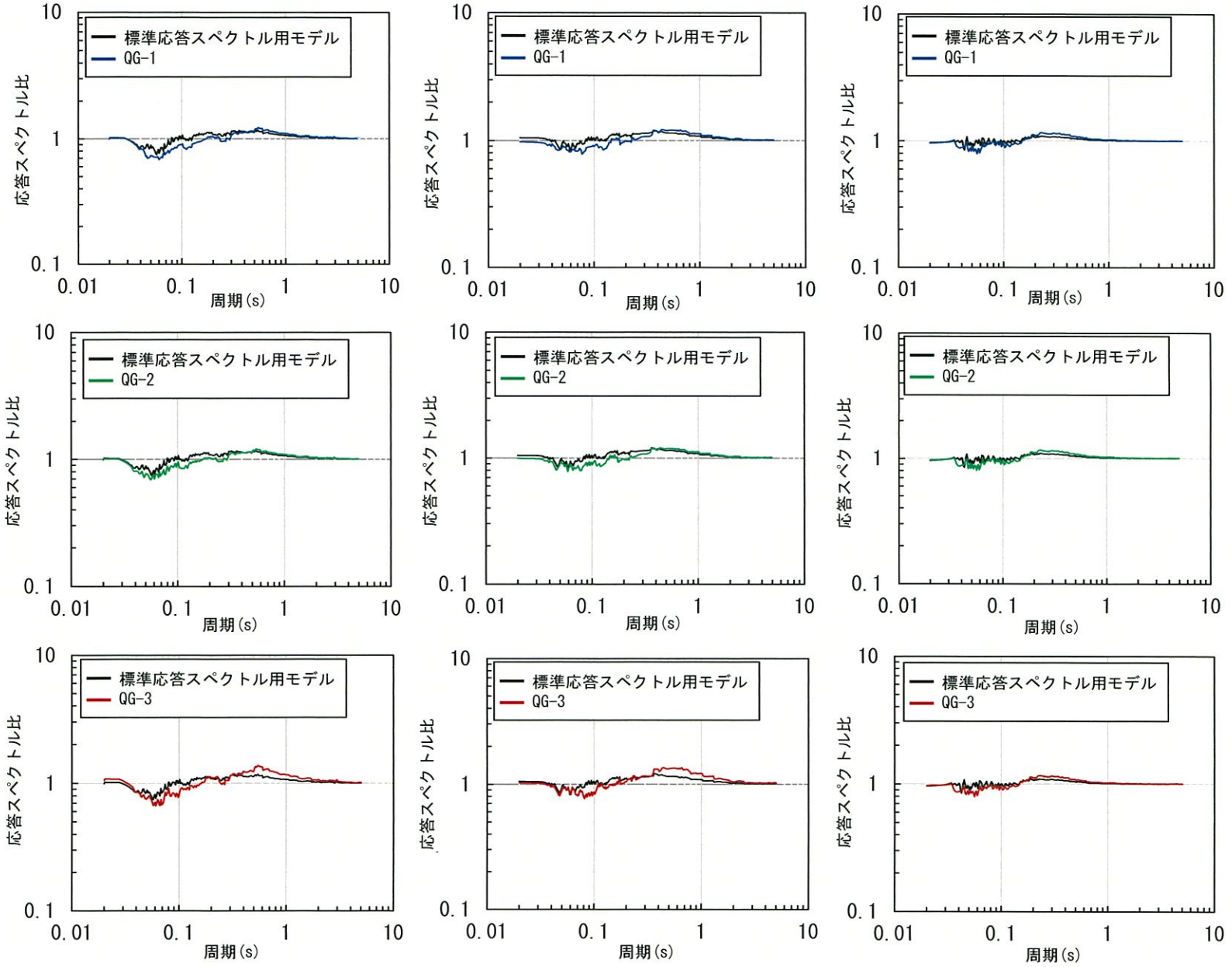
2.4 地下構造モデルの妥当性確認

■応答スペクトルの比較

- 次頁のとおり、PS検層モデルの下端であるEL.-200mに、2005年3月20日福岡県西方沖地震本震における敷地の最深部地震計の地震観測記録（EL.-90.0m）を入力し、1次元波動論に基づき、推定した解放基盤表面における応答波の応答スペクトルを算出し、応答スペクトル比（解放基盤表面／EL.-200m ）を算出。
- 標準応答スペクトル用モデルによる応答スペクトル比（解放基盤表面／ EL.-200m）が、PS検層モデルによる応答スペクトル比（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。ただし、QG-3の応答スペクトル比（水平）については、一部の周期帯（0.5秒付近）では、下回ることを確認。
- これは、前頁の伝達関数に見られた一部の周期帯（0.5秒付近）における特徴的なピークと整合。

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

「2.4 地下構造モデルの妥当性確認」のまとめ

■ 「2.3 地下構造モデルの設定」において設定した標準応答スペクトル用モデルの妥当性確認のため、経験的増幅率による確認（地震基盤相当面～解放基盤表面）及び追加ボーリング調査結果による確認（EL.-200m～解放基盤表面）を実施。

■ 地震基盤相当面～解放基盤表面までの地下構造モデルについて、経験的地盤増幅率と比較した結果、標準応答スペクトル用モデルの地盤増幅率は、経験的地盤増幅率に比べ大きい、もしくは一部周波数帯で同等であり、標準応答スペクトル用モデルの応答スペクトルは経験的地盤増幅率による応答スペクトルを上回ることを確認した。

■ 地盤減衰を見直したEL.-200m～解放基盤表面までの地下構造モデルについて、追加ボーリング調査結果と比較した結果、標準応答スペクトル用モデルの伝達特性は、追加ボーリング調査結果を踏まえたPS検層モデルの伝達特性に比べ、同等もしくは上回ることを確認した。

■ 以上より、地震基盤相当面から解放基盤表面までの標準応答スペクトル用モデルは、基準地震動策定に用いる地下構造モデルとして妥当であることを確認した。