

玄海原子力発電所3号炉、4号炉審査資料

資料番号

TTG-051

提出年月日

2023年11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ついて

2023年11月1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. 94
	3.1 模擬地震波の作成方針	P. 95
	3.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成	P. 97
	3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成	P. 100
	3.4 解放基盤表面の地震波の比較	P. 107
4.	基準地震動の策定	P. 113
5.	超過確率の参照	P. 119
6.	まとめ	P. 122

目次 (3/3)

【補足①】 深部地下構造モデルの確認	P. 127
【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. 129
【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. 138
【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. 145
【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. 159
【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. 165
【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. 168
【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. 182
【補足⑨】 既許可の地震動評価への影響確認	P. 187
【参考①】 既許可の地下構造モデル	P. 211
【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. 222
【参考③】 ボーリング孔内Q値に関する知見	P. 230
【参考④】 岩石コアQ値に関する知見	P. 236
【参考⑤】 友澤ほか (2021) の概要	P. 238
【参考⑥】 経験的地盤増幅率による確認	P. 249
【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. 253
【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. 290
【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差	P. 294
【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. 299
【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. 309
【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. 315



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

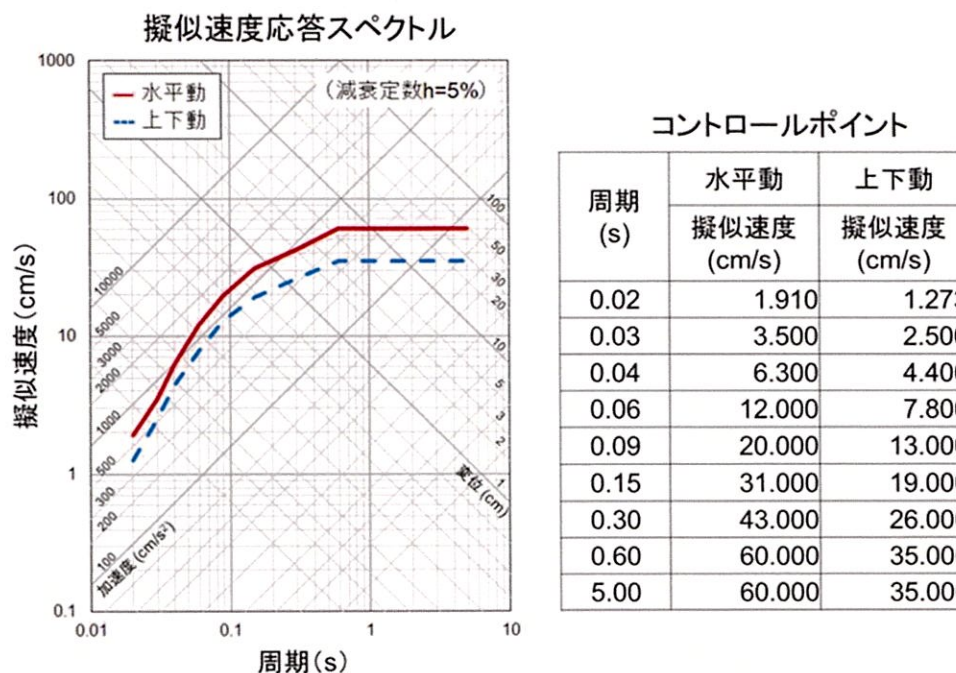
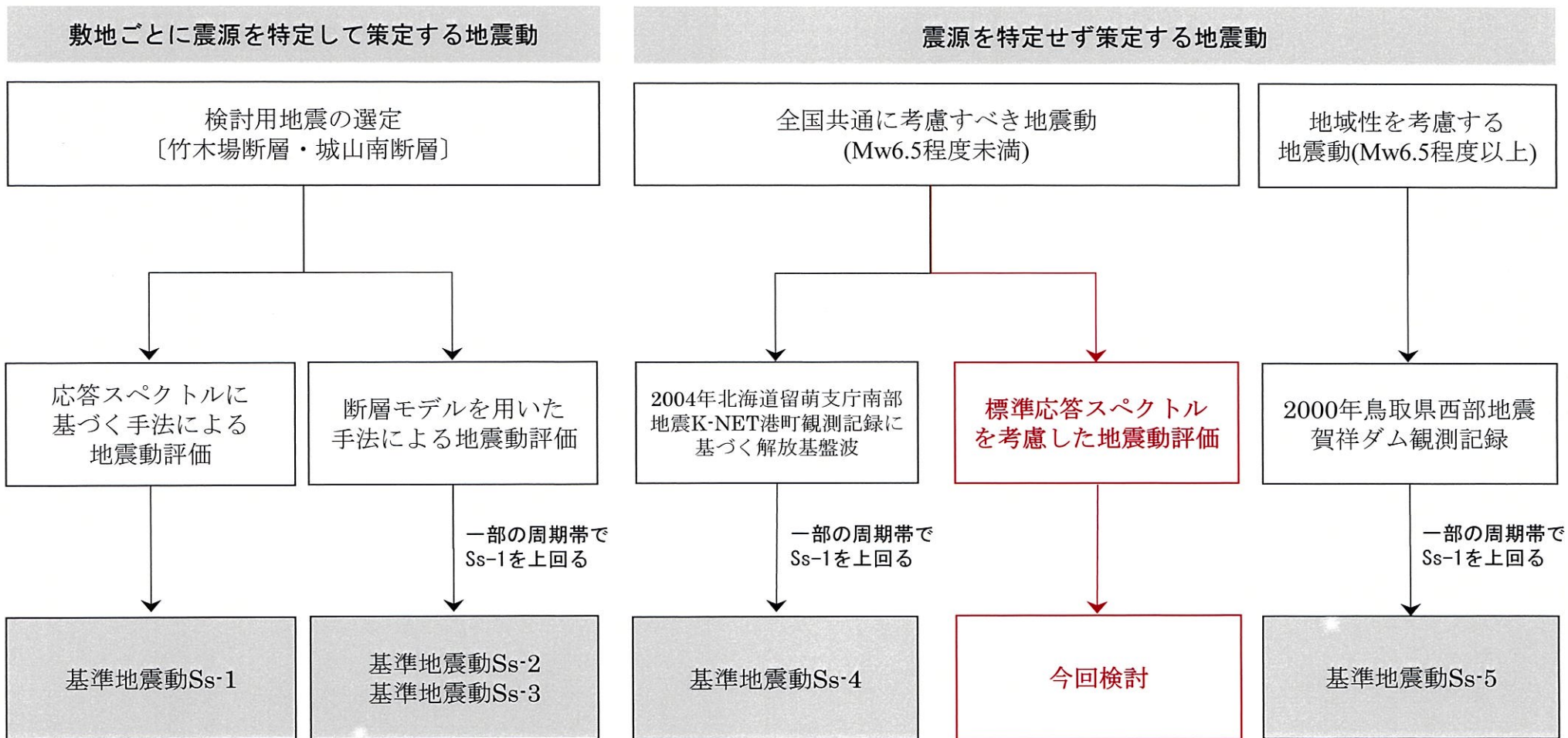


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- 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)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)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

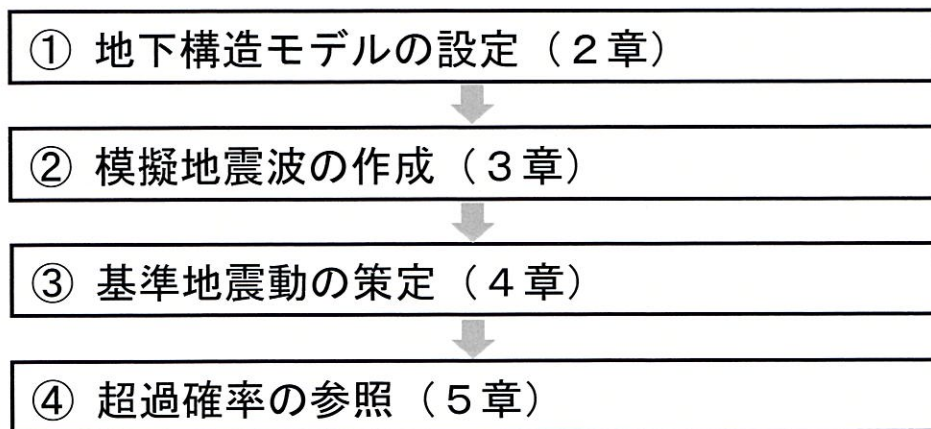
(単位：cm/s²)

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			

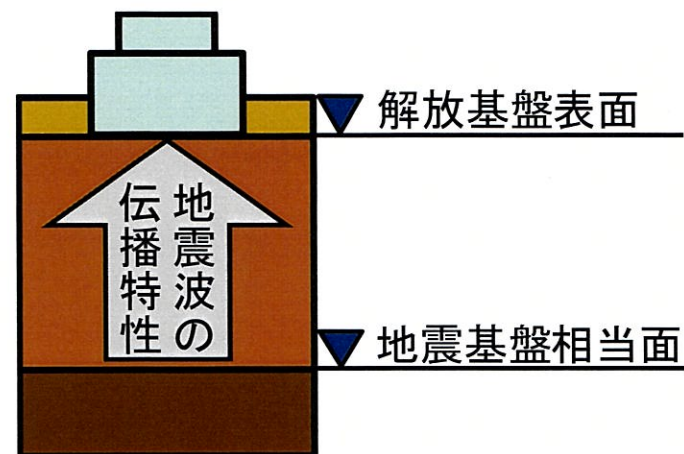
1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 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

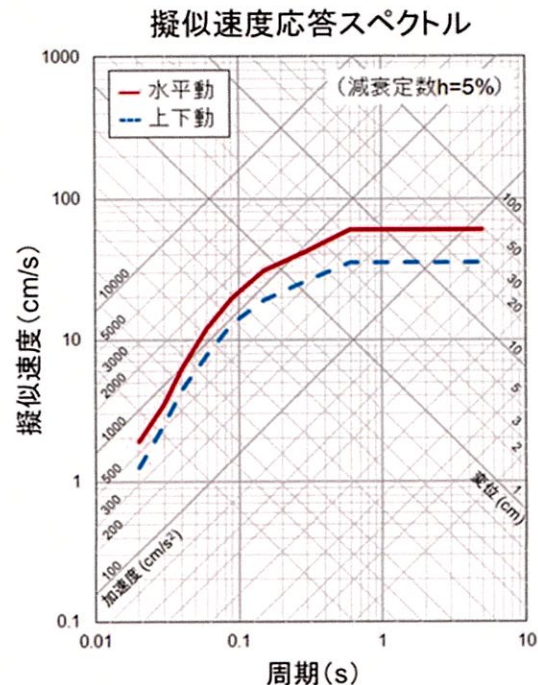


2. 地下構造モデルの設定

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

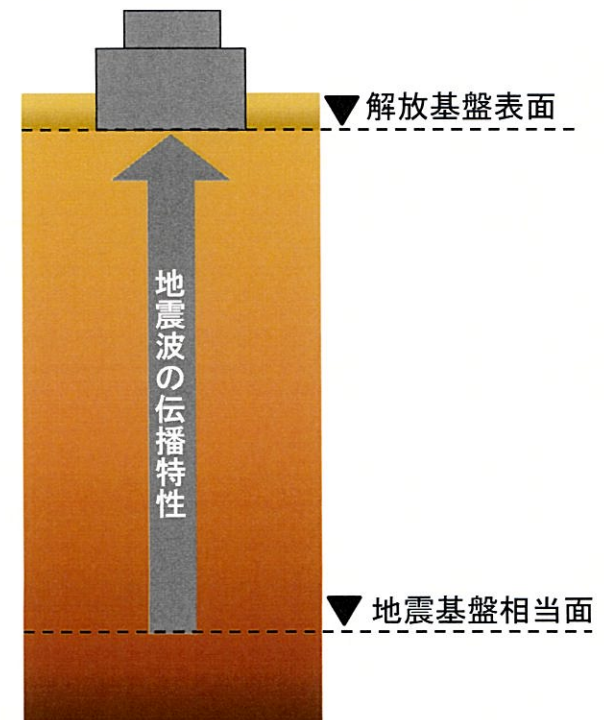
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されることを踏まえ、全ての周期帯に適用できる地下構造モデルを設定することが必要となる。
- また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されるため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを設定する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル（以下、標準応答スペクトル用モデル）の設定にあたっては、既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録やボーリング孔内減衰測定結果等の観測事実等に基づき、最新の技術的知見を取り入れた多面的な検討・確認を実施。
- さらに、玄海原子力発電所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（ $V_s/15 \sim V_s/10$ ）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）

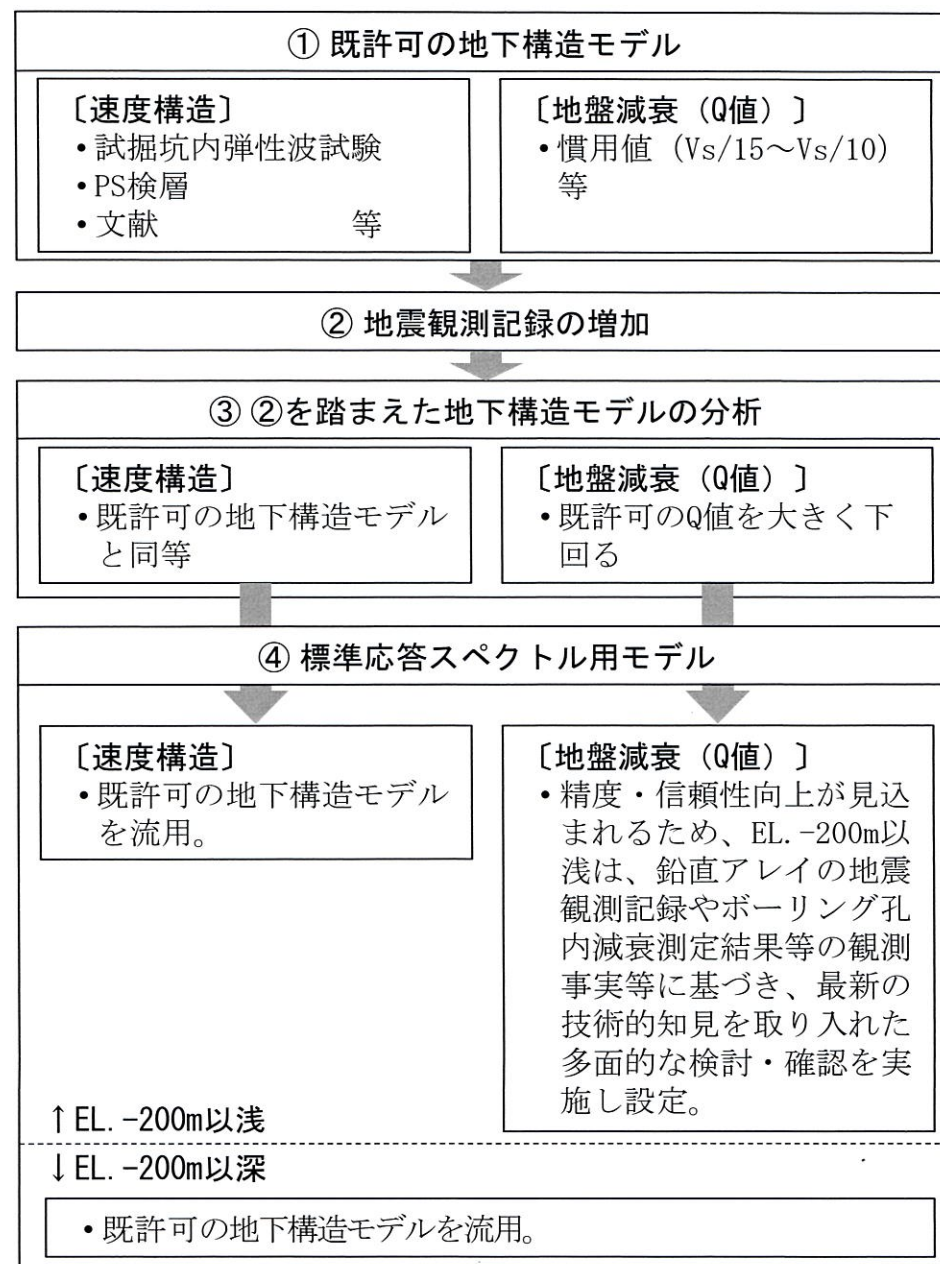
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価に用いていたが、その設定根拠は長周期帯に限定したものではないため、短周期帯の地震動評価にも用いる。

【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。



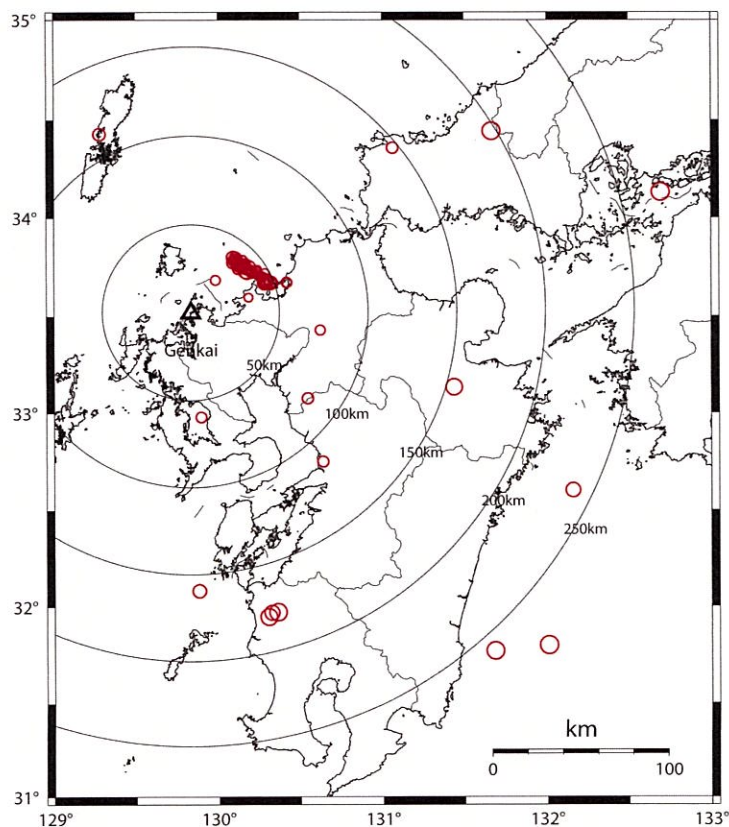
2.1.1 既許可以降に取得した地震観測記録

■ 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

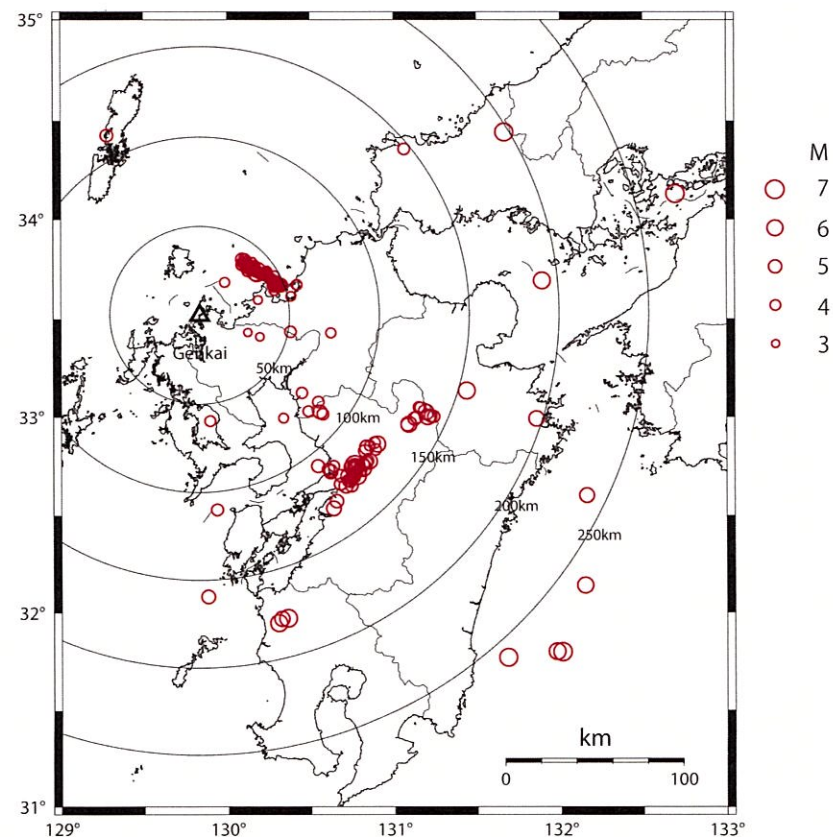
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



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)

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

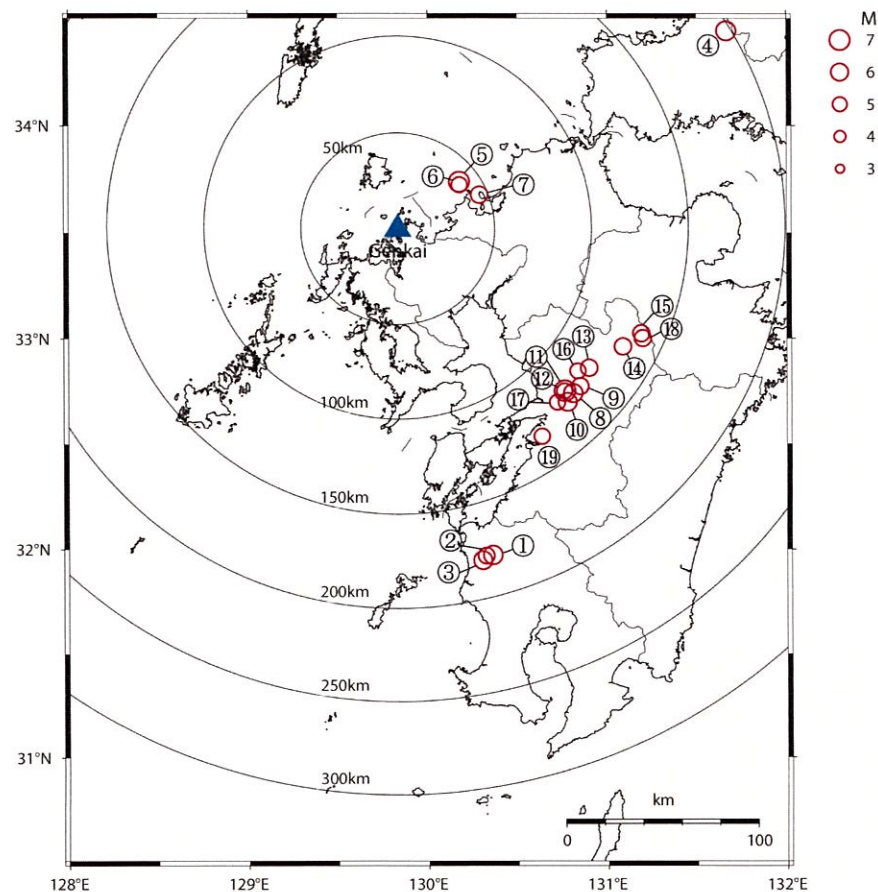
- 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、Vs、Vpと地盤減衰（Q値）の同定を実施。

※ Noda et al. (2002)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

既許可時審査
↑
今回新たに追加



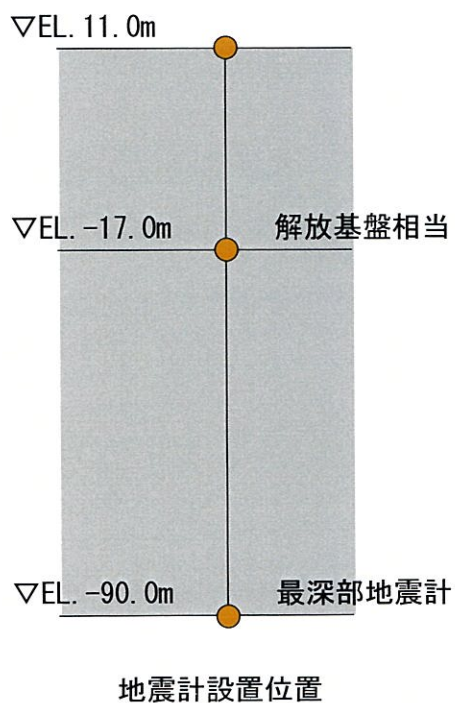
伝達関数（周波数依存型）による
地盤同定に用いた地震の震央位置（計19地震）

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

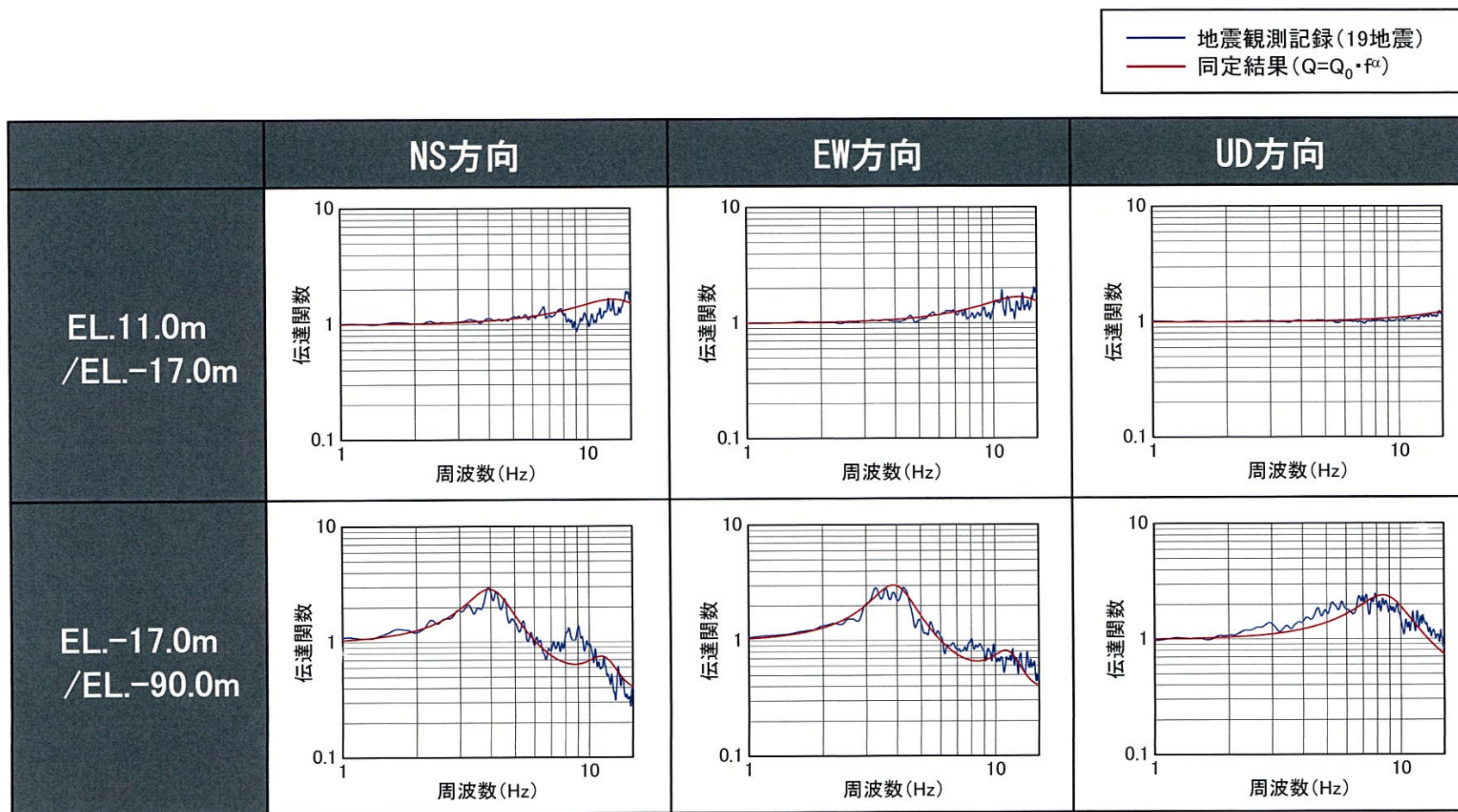


項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数（NS, EW, UD成分） <ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 11.0m/EL. -17.0m ・ EL. -17.0m/EL. -90.0m P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度は既許可の地下構造モデルの値を参照し、 S波速度Vs、P波速度Vp、地盤減衰（Q値）を同定
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

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

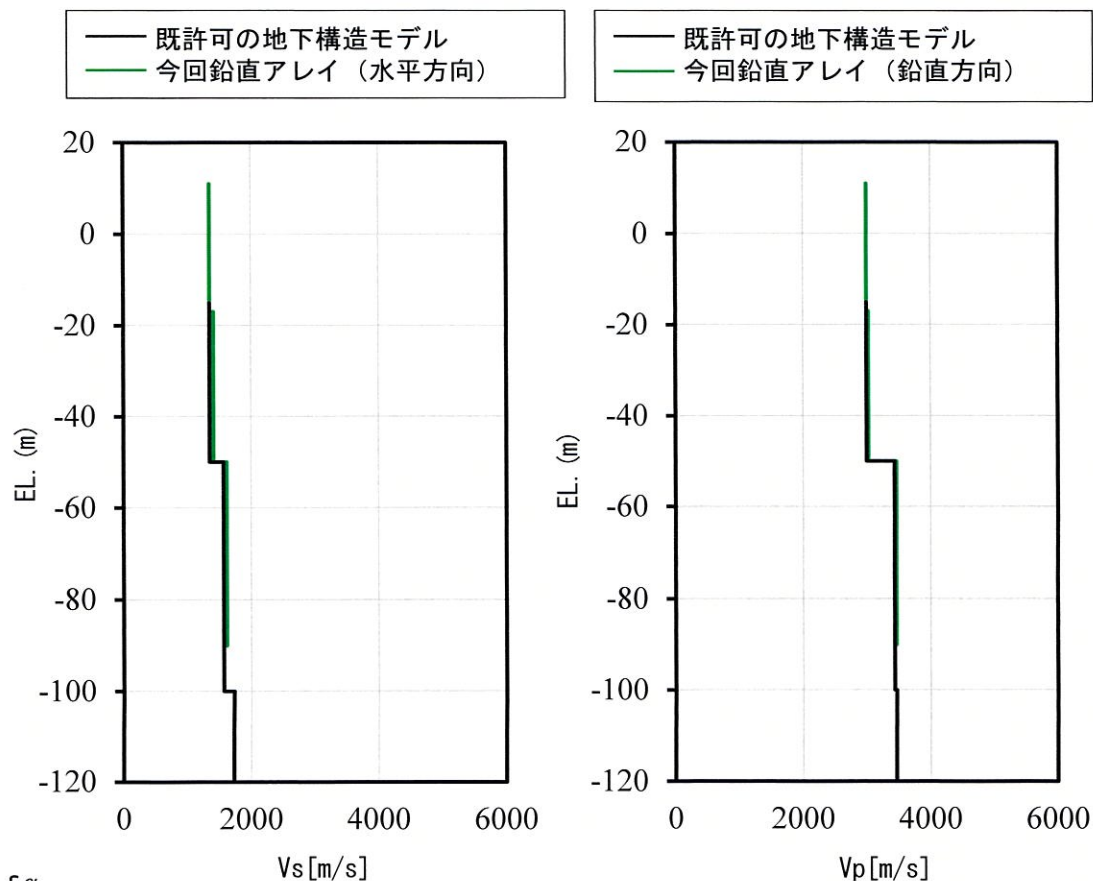
【EW方向】

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

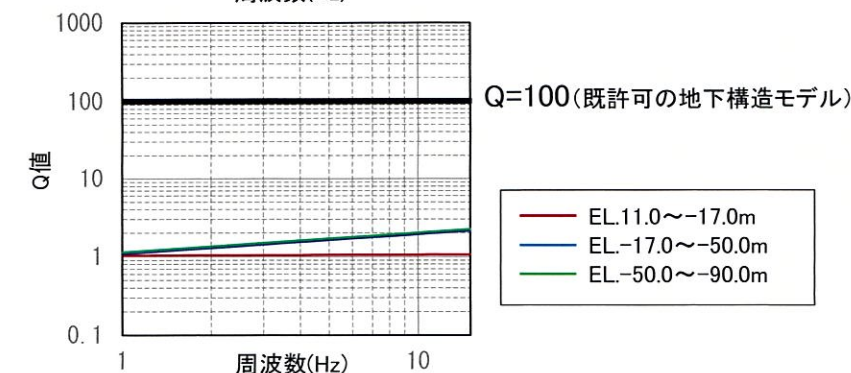
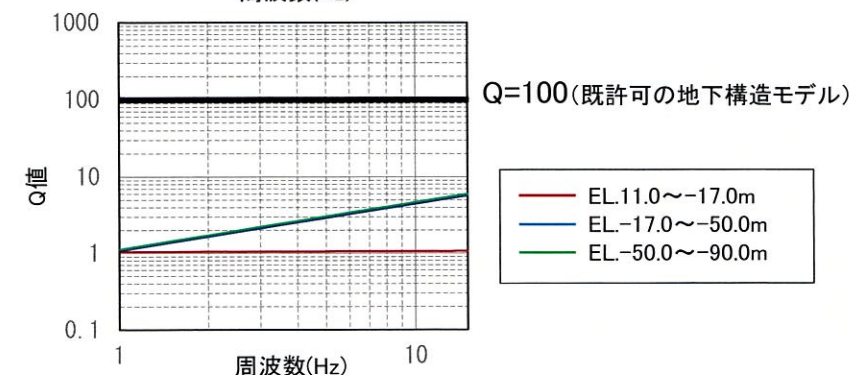
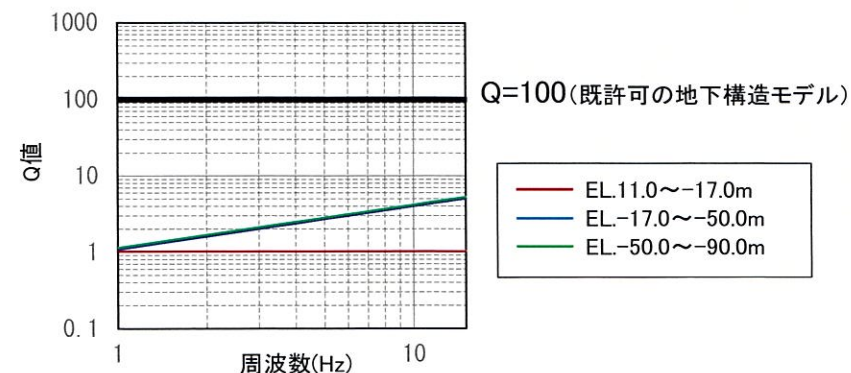
【EW方向】

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）²⁾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)³⁾の深部地盤と、地震調査委員会（2007）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

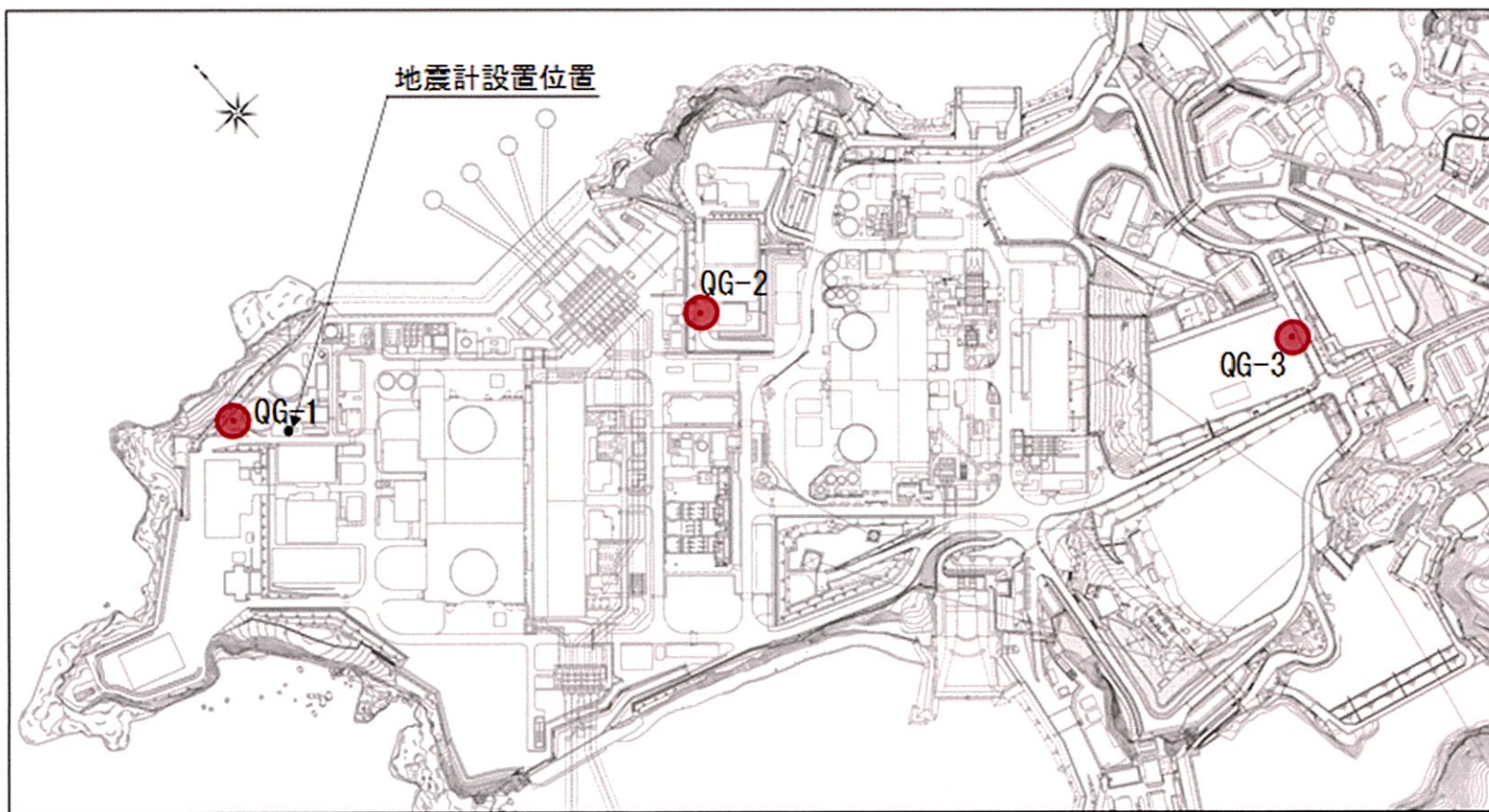
■ 地下構造モデルの設定方針 (2/2)

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 観測記録 最深部地震計 ▼ EL. -90.0m ボーリング孔内 減衰測定等	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]
▼ EL. -200m	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、岩石試験結果を基に設定]
地震基盤相当面 ▼ EL. -1804m	既許可の地下構造モデルを流用 [慣用値 (Vs/15~Vs/10) 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) 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（Vs、Vp）を測定。



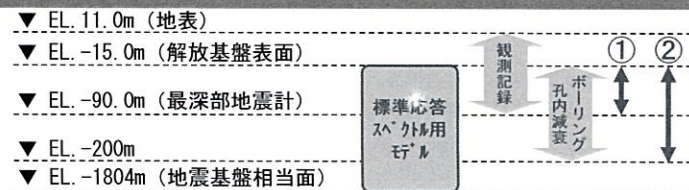
2.1.3 標準応答スペクトル用モデルの設定方針

■ 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）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）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〕

最深部地震計以浅の
地盤減衰（Q値）

最深部地震計以深の
地盤減衰（Q値）

地下構造モデル

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。

地盤減衰（Q値）
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 <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
以下の検討・確認結果に基づき、EL. -90m以浅と同様に設定 <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
既許可の地下構造モデルを流用 [慣用値 ($V_s/15 \sim V_s/10$) を基に設定]

地表
▼ EL. 11.0m

解放基盤表面
▼ EL. -15.0m

▼ EL. -50.0m

最深部地震計
▼ EL. -90.0m

▼ EL. -200m

地震基盤相当面
▼ EL. -1804m

観測記録

ボーリング孔内減衰測定等

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

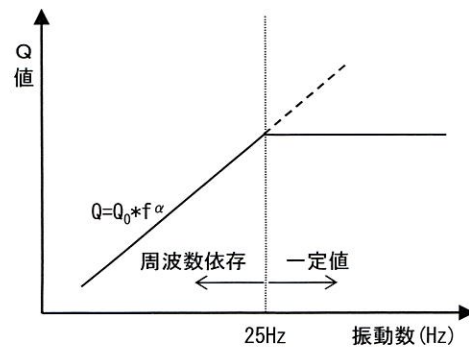
地盤減衰 (Q値) の検討方針

- 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：

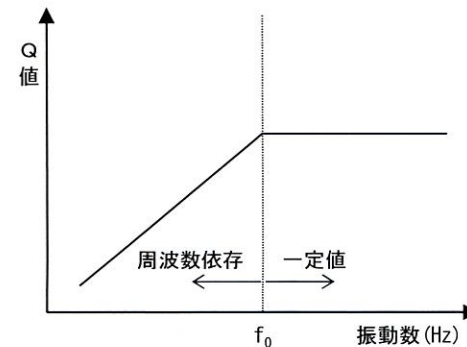
地盤減衰 (Q値) が周波数のべき乗に比例する関数モデル ($Q=Q_0*f^\alpha$) を仮定し、地盤減衰 (Q値) を同定。既往の知見^{4) ~9)}によると、地盤減衰 (Q値) は20Hz程度までのある周波数で上限が存在することから、安全側に考慮し、25Hz以上の値を上限値として採用。
 - b. 伝達関数 (バイリニア型) による検討：

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)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

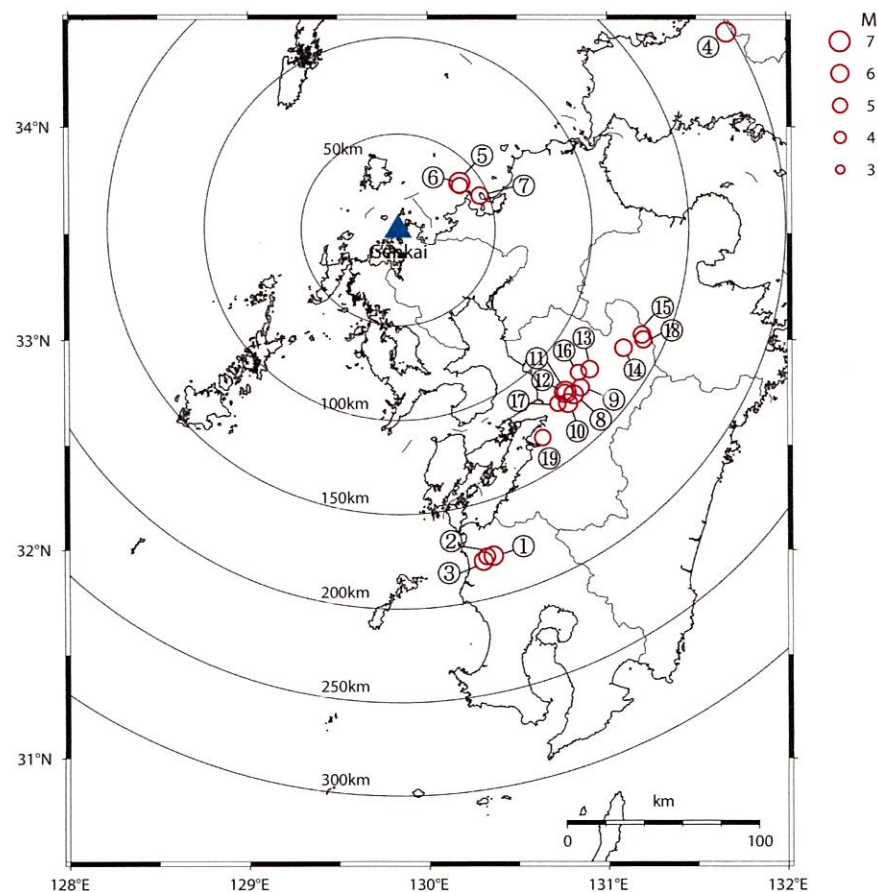
伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震諸元 (計19地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
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

既許可時審査



今回新たに追加

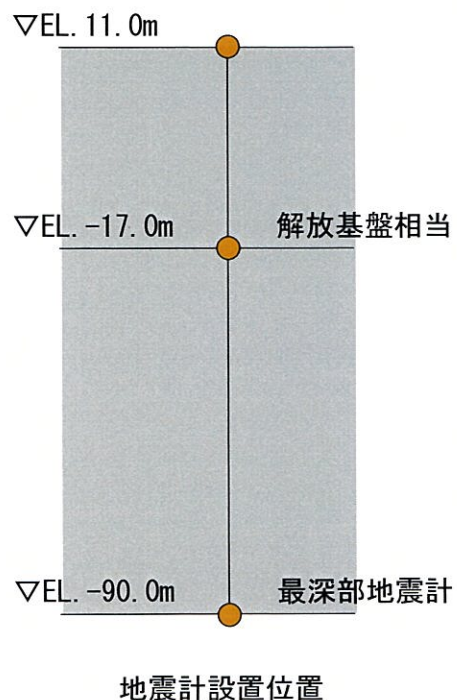


伝達関数 (周波数依存型) による地盤減衰の
同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

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。



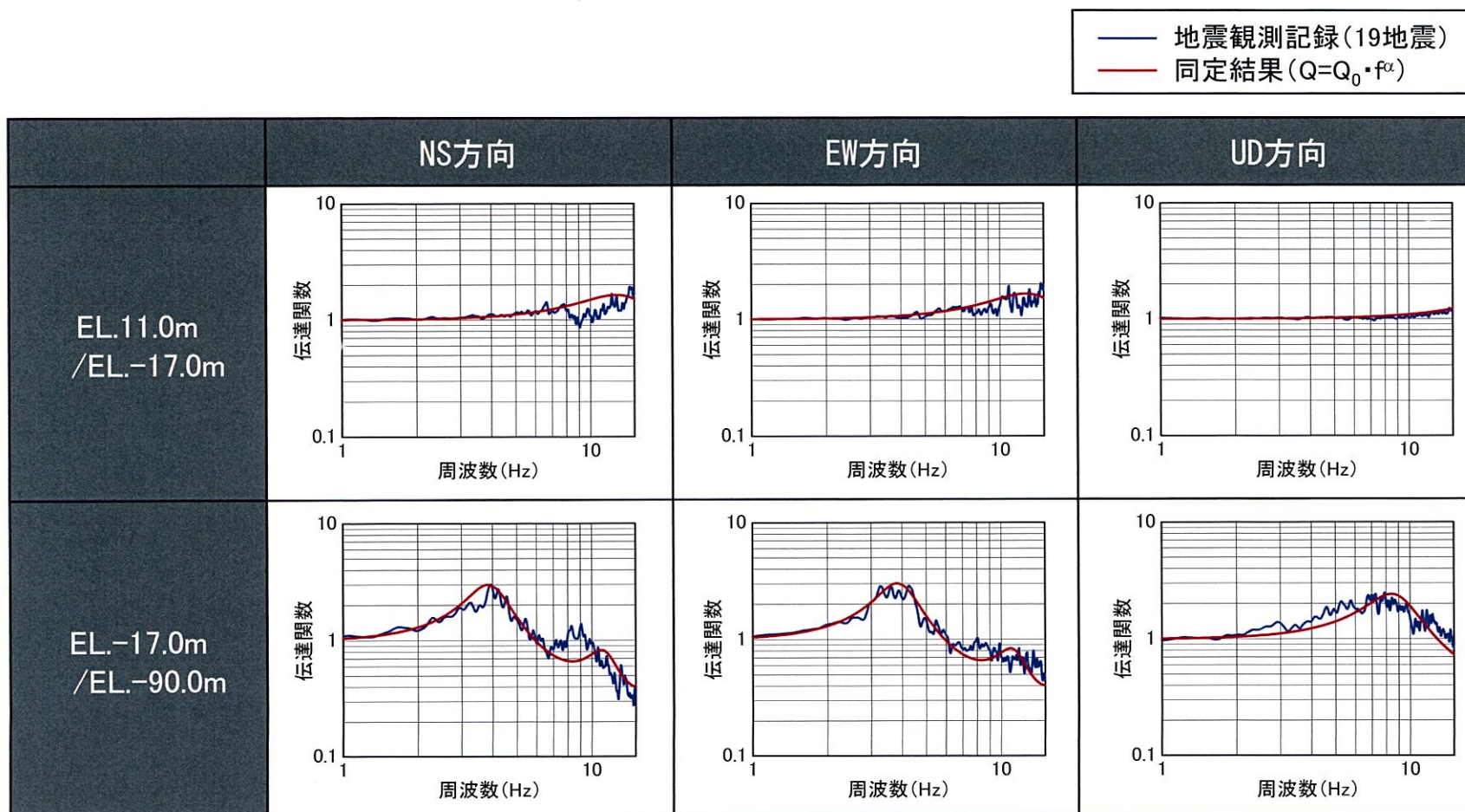
伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰の同定における解析条件

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。



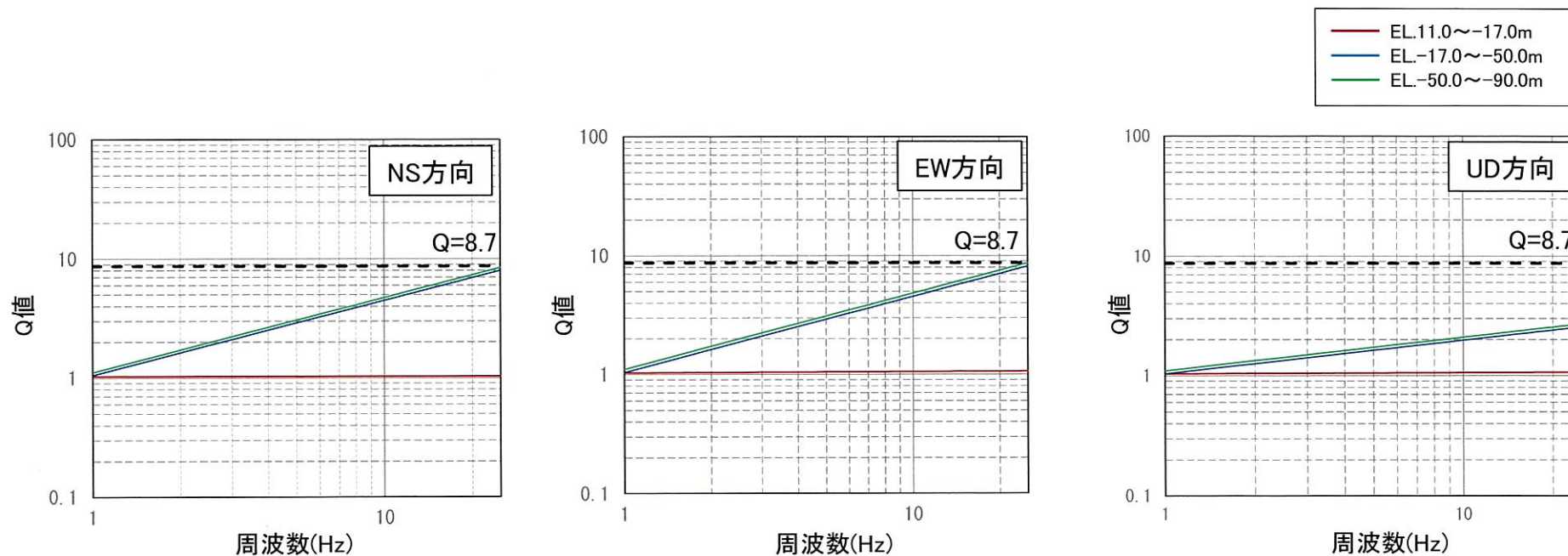
※観測記録及び理論の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

※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) ⁴⁾	<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) ⁵⁾	<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)⁴⁾ 等) を踏まえ、減衰定数を一定として設定
木下・大池(2002) ⁶⁾	<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) ⁷⁾	<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) ⁸⁾	<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) ⁹⁾	<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)¹⁰⁾) 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)⁹⁾ 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

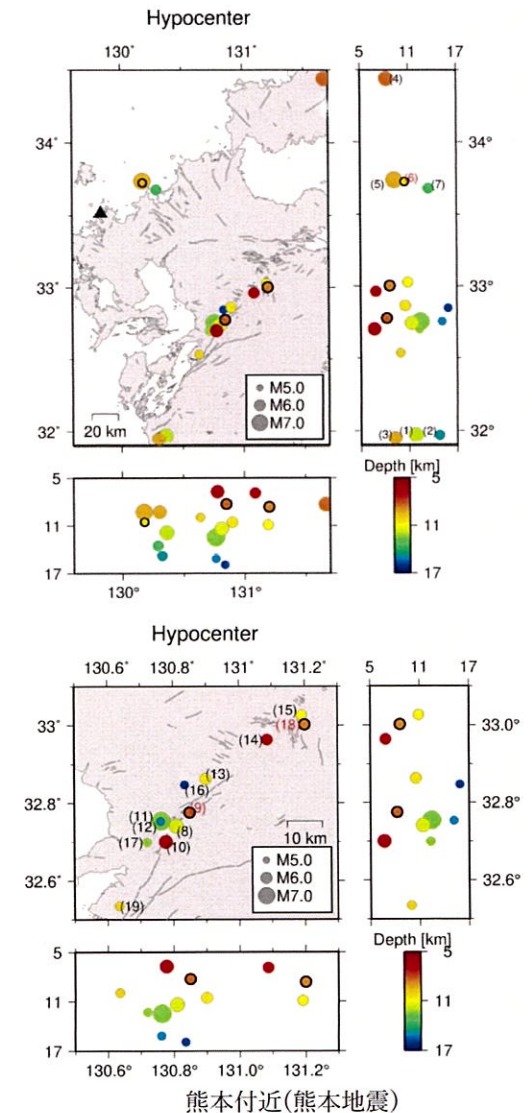
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震のうち、 <u>平均的な特徴を有する地震</u> ※1
対象地震数	3地震
ターゲットとする観測伝達関数	3地震の伝達関数 (Transverse成分) <ul style="list-style-type: none"> EL. 11.0m/EL. -17.0m EL. 11.0m/EL. -90.0m EL. -17.0m/EL. -90.0m S波を含む10秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、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

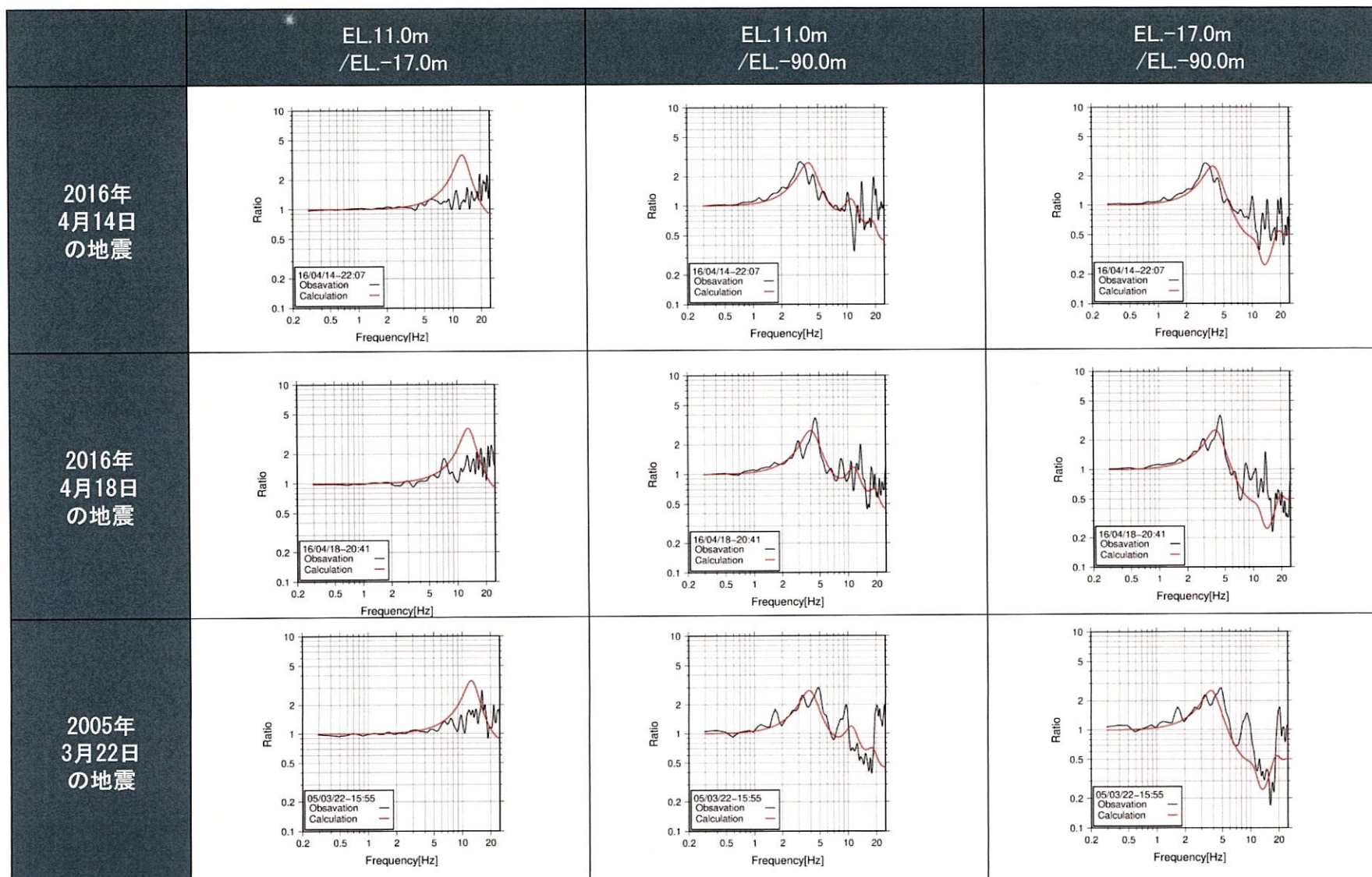


伝達関数 (バイリニア型) による地盤減衰の同定に用いた地震の震央位置 (太枠、計3地震)

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)

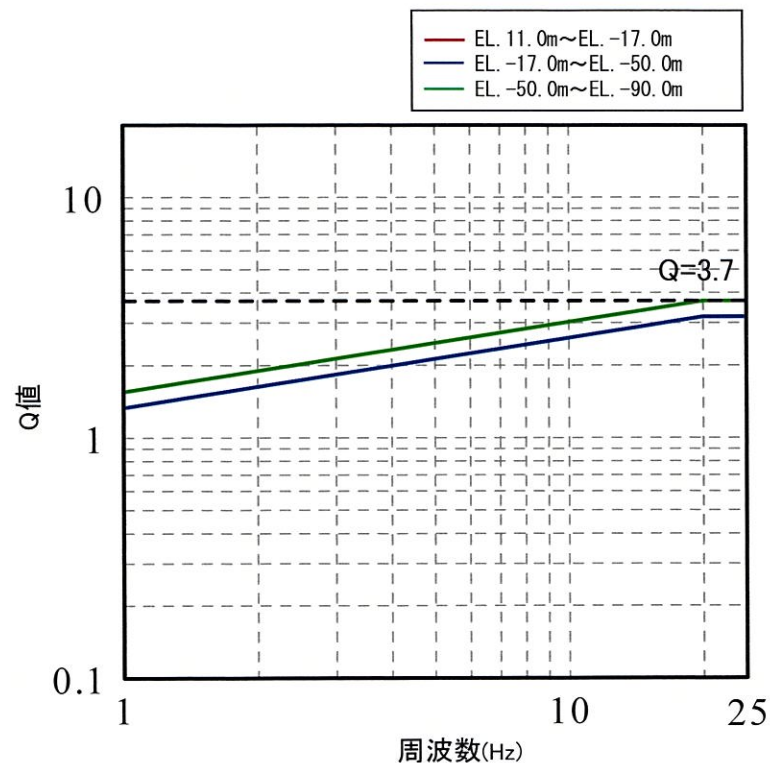
- 同定結果の伝達関数と観測記録の伝達関数を以下に示す。



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

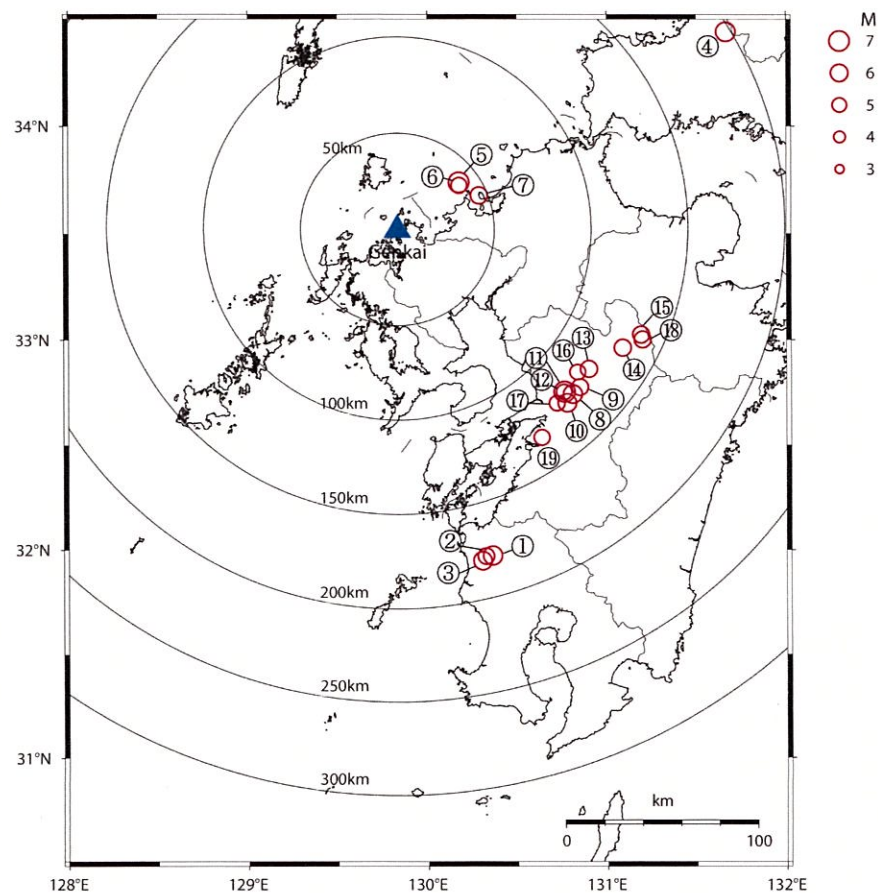
■ 同定に用いる地震諸元

- 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)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。

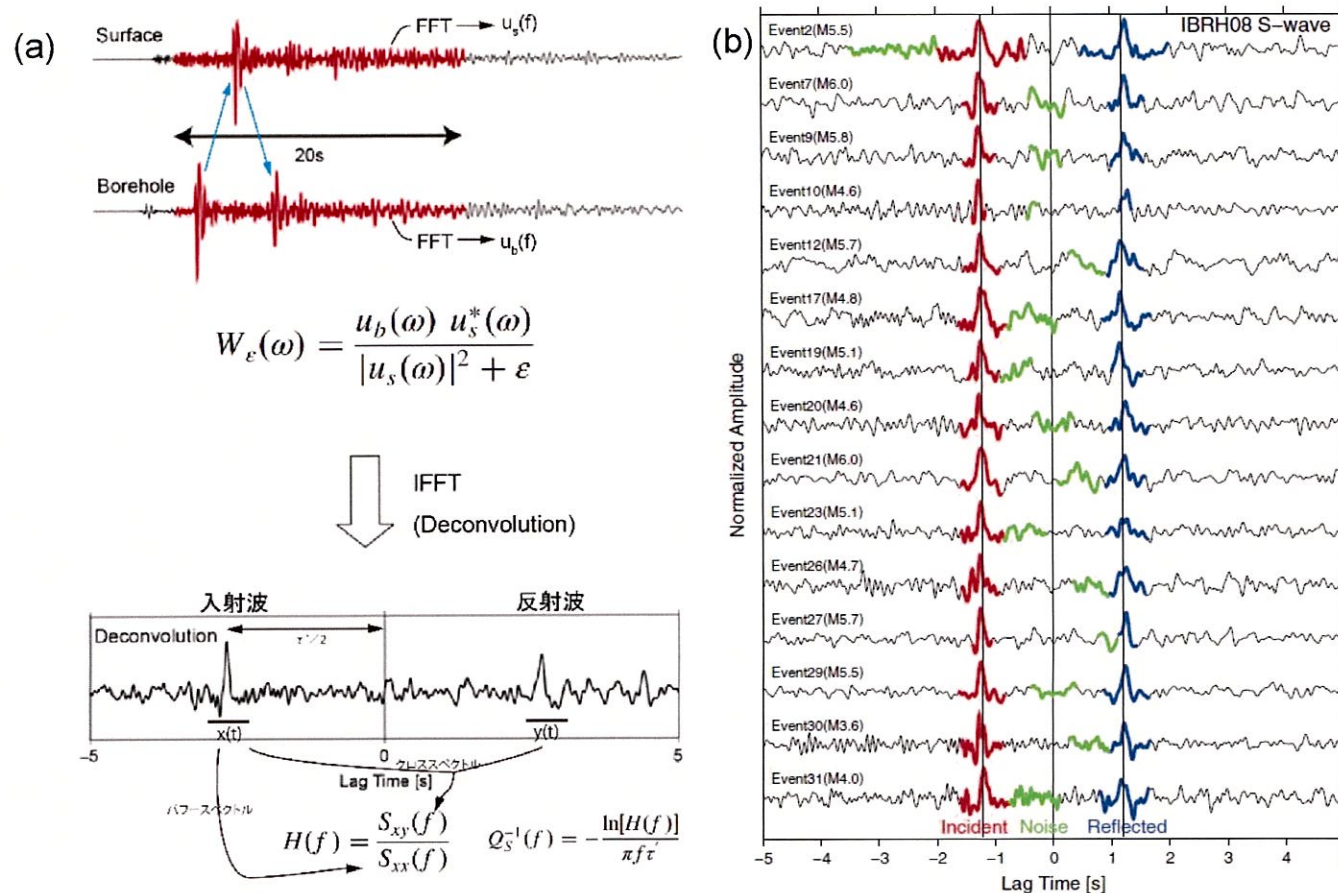
地震波干渉法による地盤減衰の同定における解析条件

	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	コサインテーパ (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^{7), 11)}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。

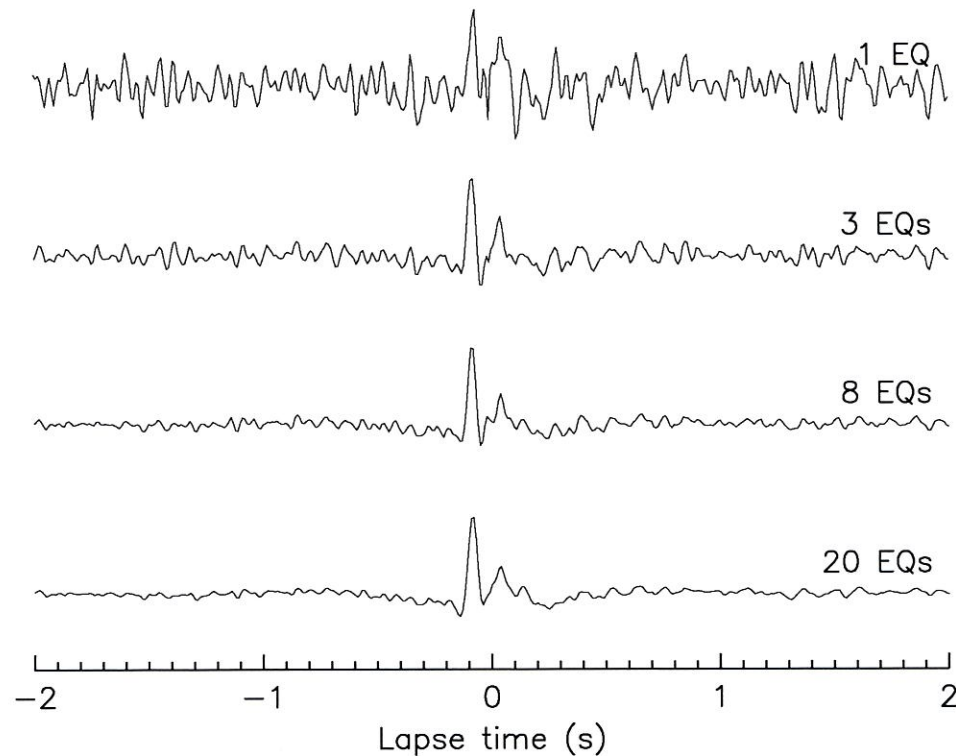


Fukushima et al.(2016)より抜粋

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)

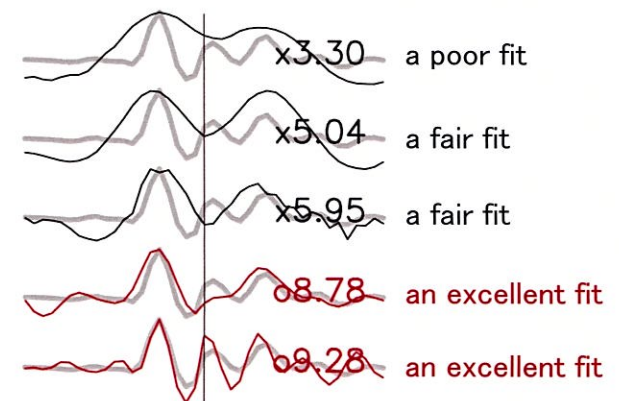
■ GOFによる波形の抽出方法

- 対象とした19地震の観測記録から、Anderson (2004)¹²⁾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	$C^* = 10 \max[C(a_1(t), a_2(t)), 0] \text{ where}$ $C(a_1, a_2) = \frac{\int a_1(t)a_2(t)dt}{\left[\int a_1^2(t)dt\right]^{1/2} \left[\int a_2^2(t)dt\right]^{1/2}}$

Anderson(2004)より抜粋



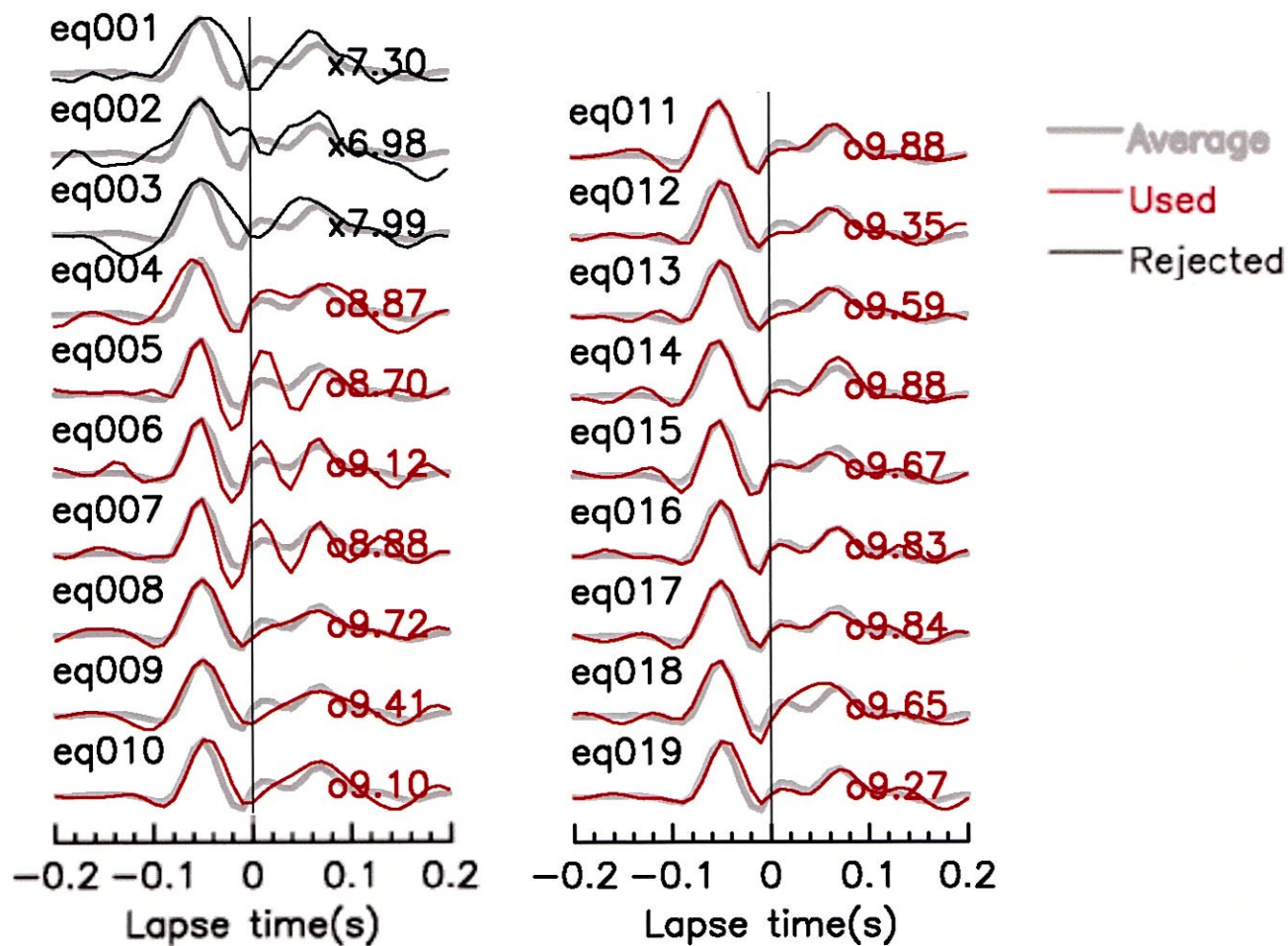
GOFの例

(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)¹²⁾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。

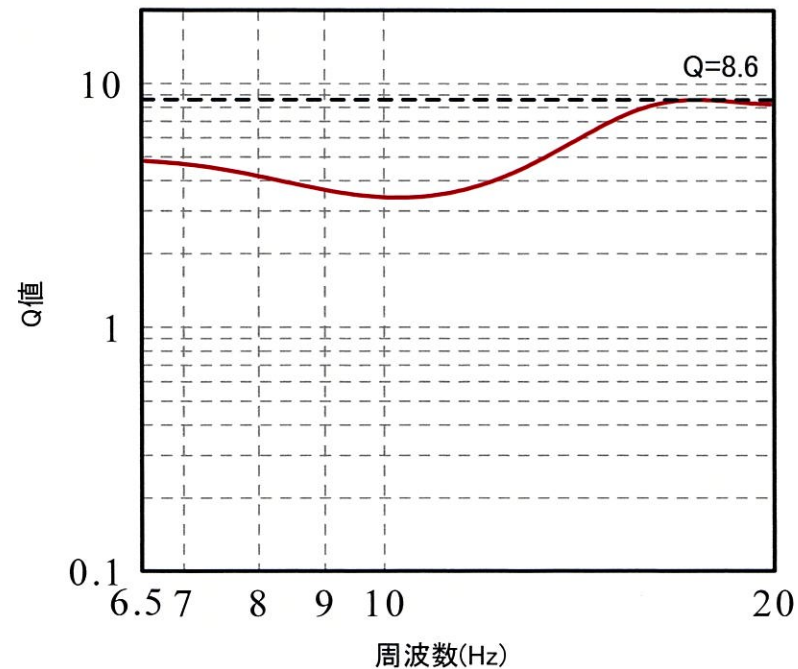


スタックした波形と各地震の波形の相関

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。



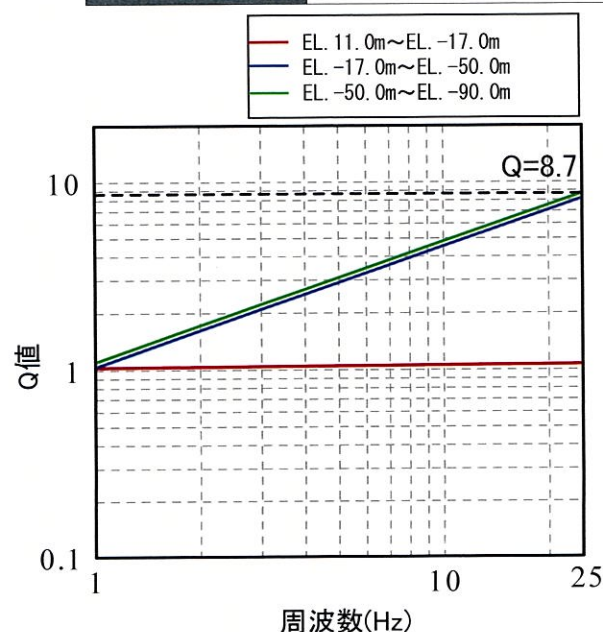
地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-90.0m)

2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

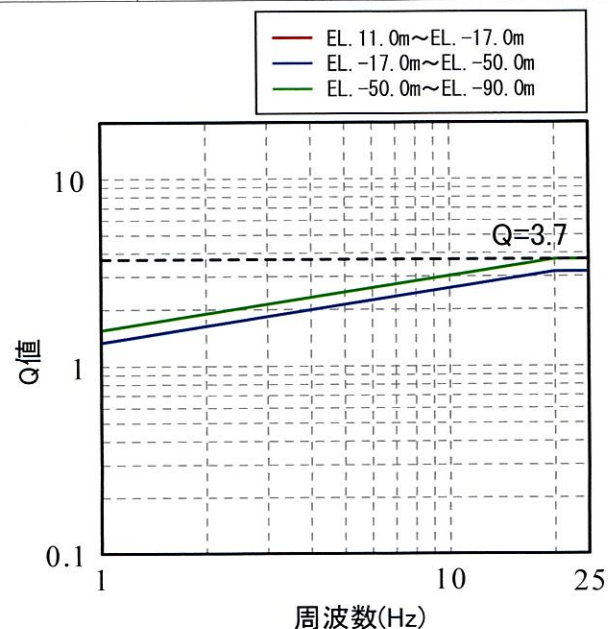
■ 複数の手法による検討結果を踏まえた地盤減衰 (Q値)

- 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。

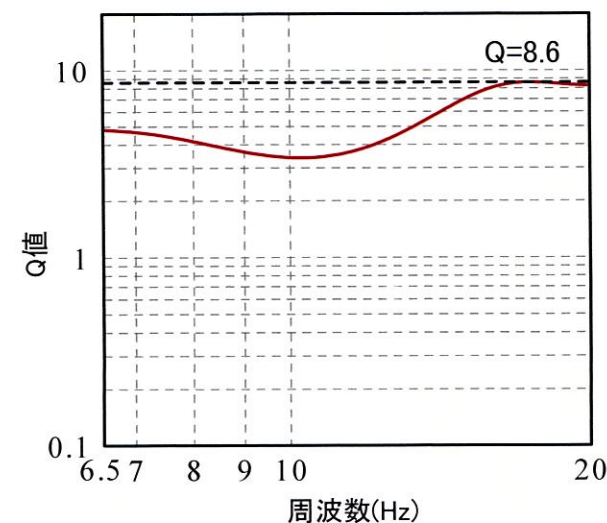
検討手法	伝達関数による検討 (周波数依存型)	伝達関数による検討 (バイリニア型)	地震波干渉法による検討
検討結果 (上限値)	Q=8.7程度	Q=3.7程度	Q=8.6程度



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)

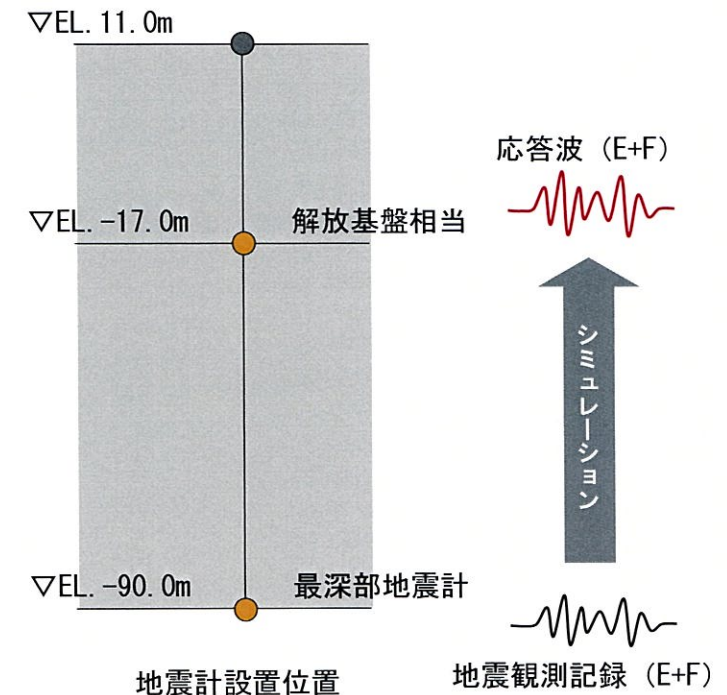
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

(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。

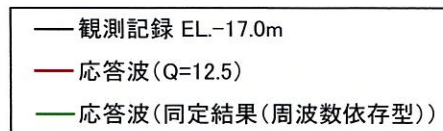
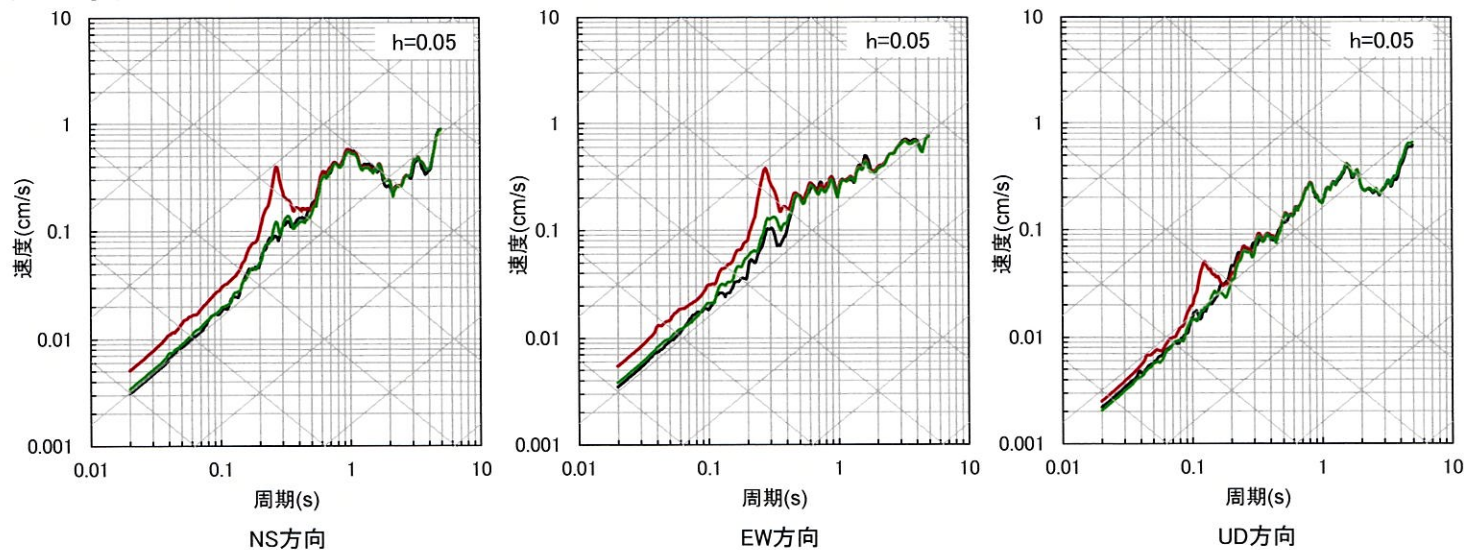
※入力 of 最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当 (EL. -17.0m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価



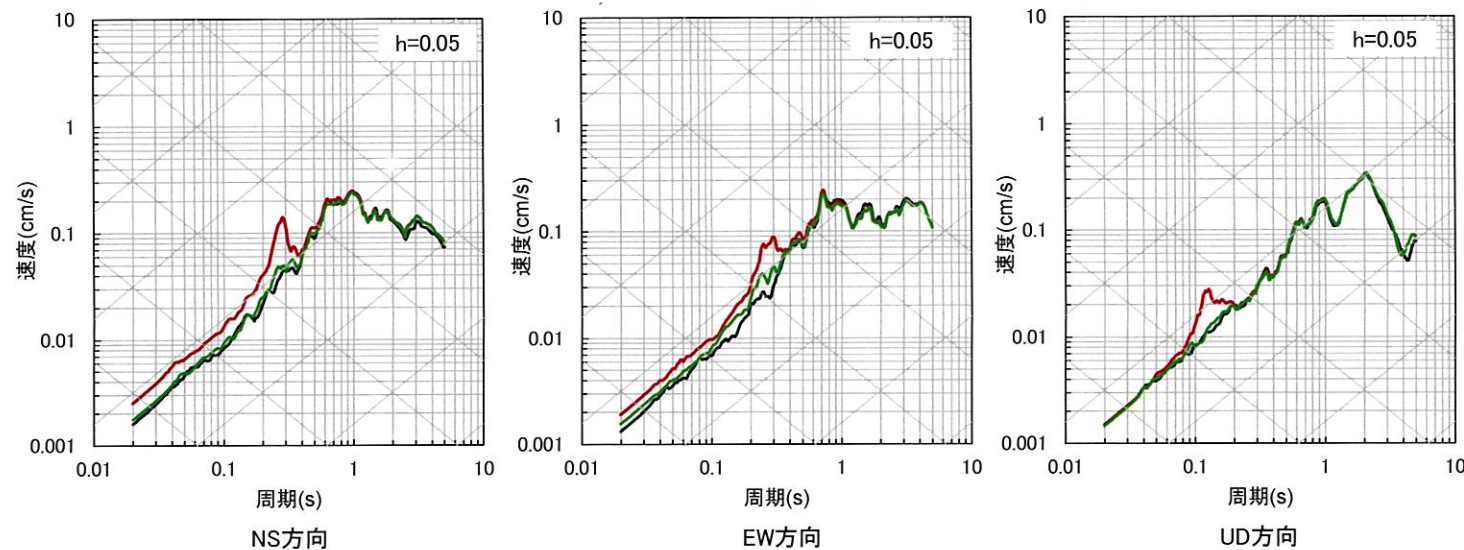
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

① 鹿児島県北西部



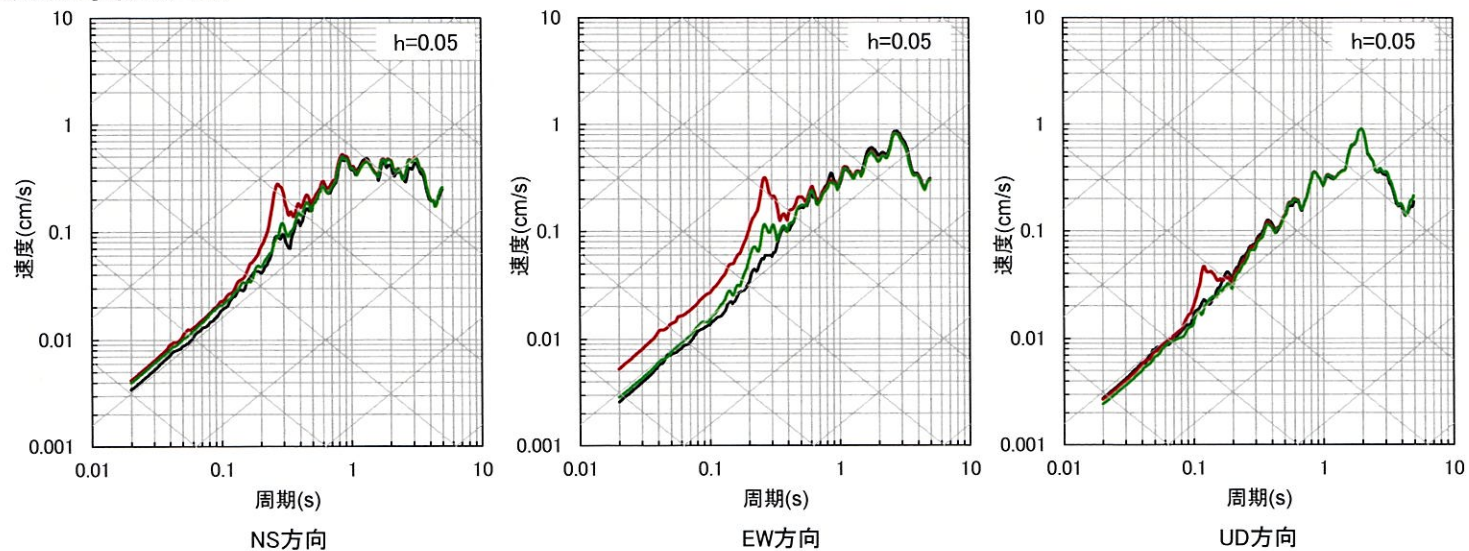
② 鹿児島県北西部



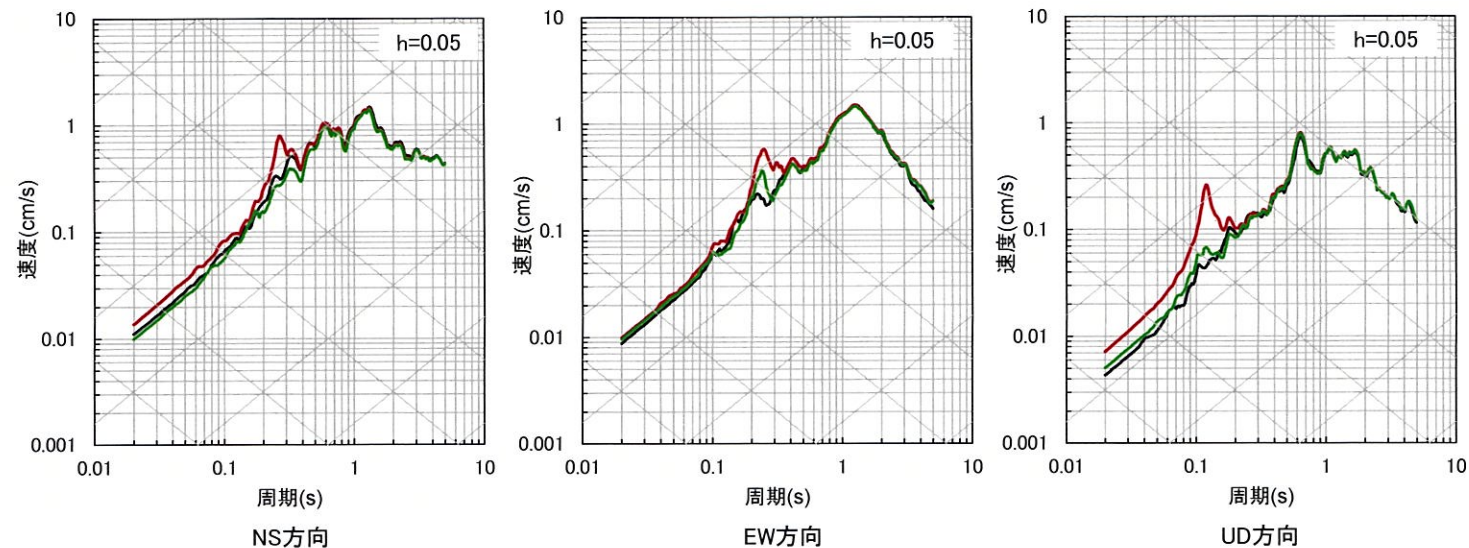
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部



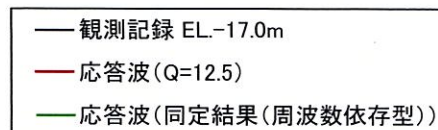
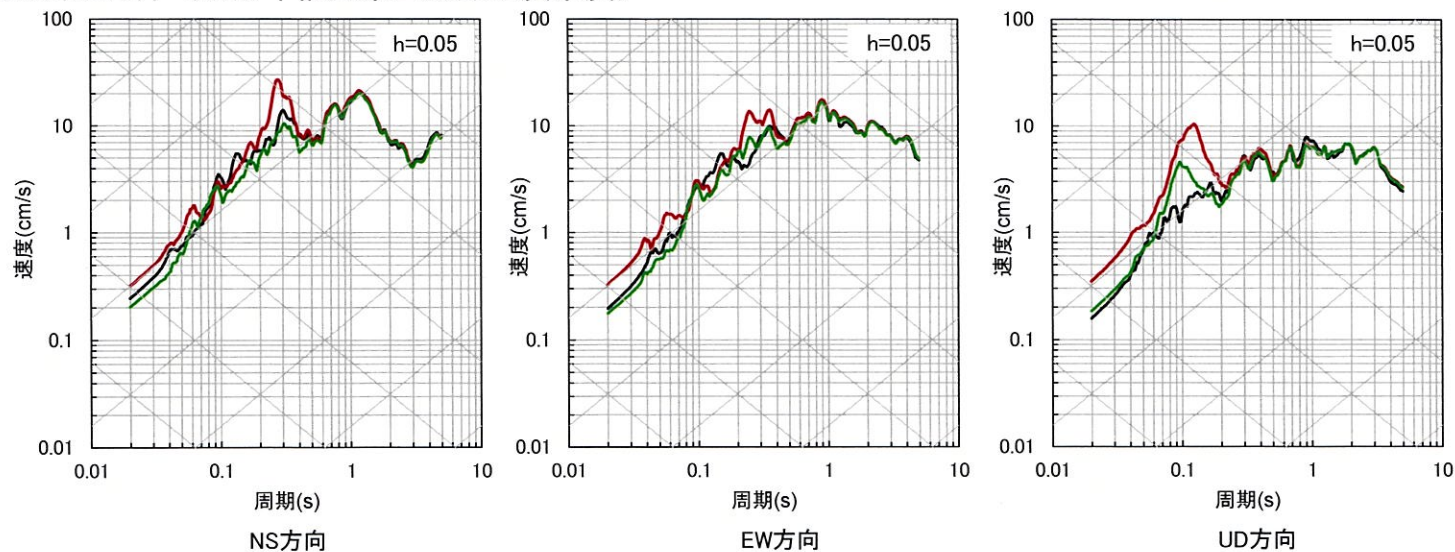
④ 山口県



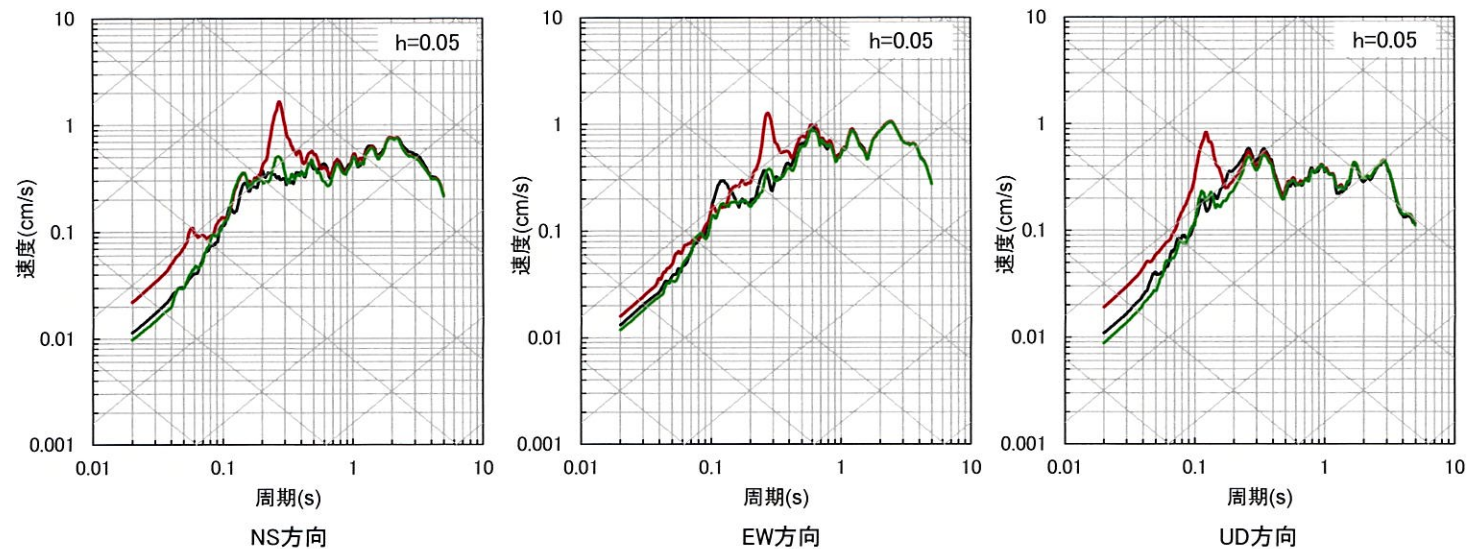
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 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)



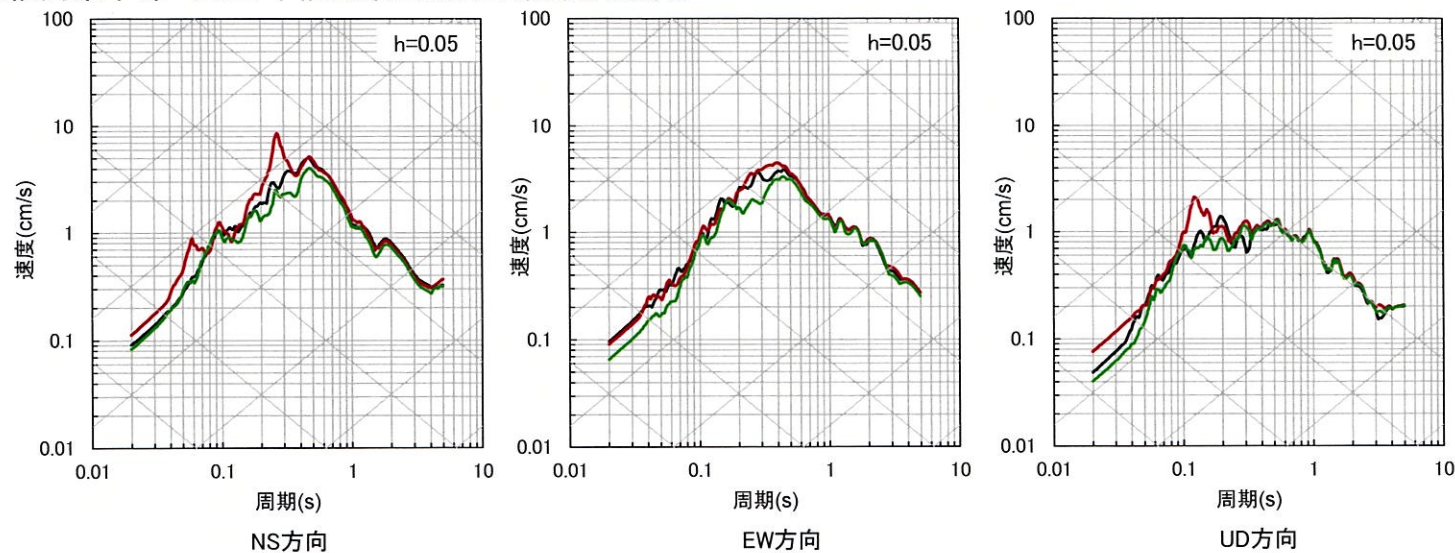
⑥九州北西沖



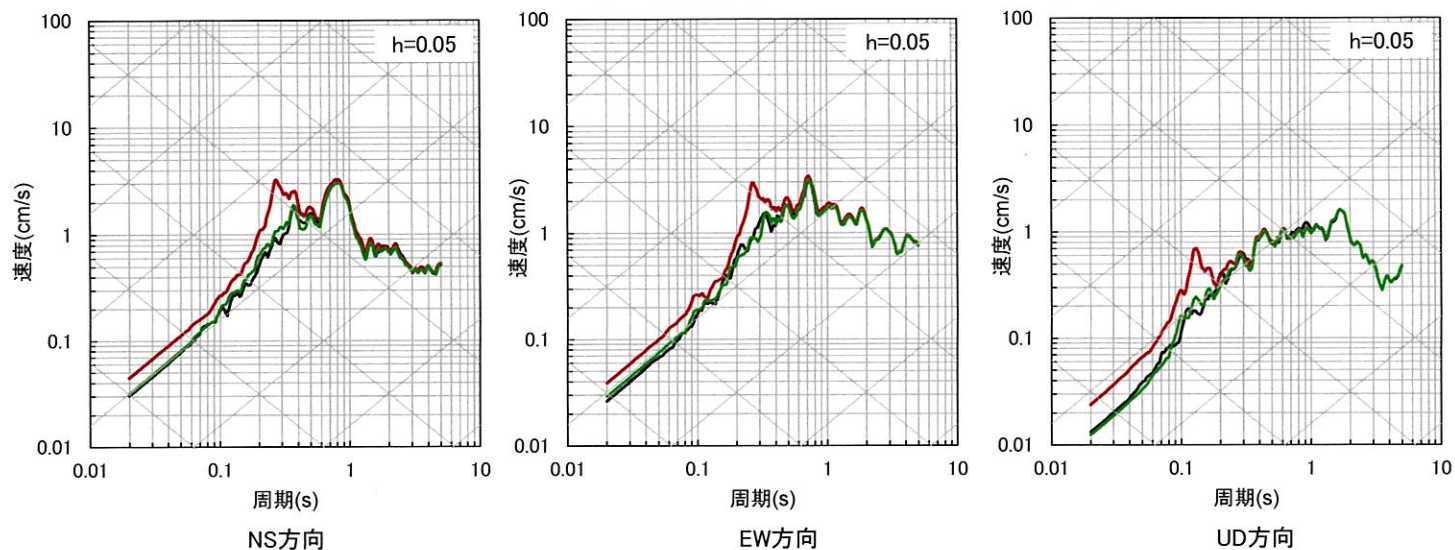
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 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)



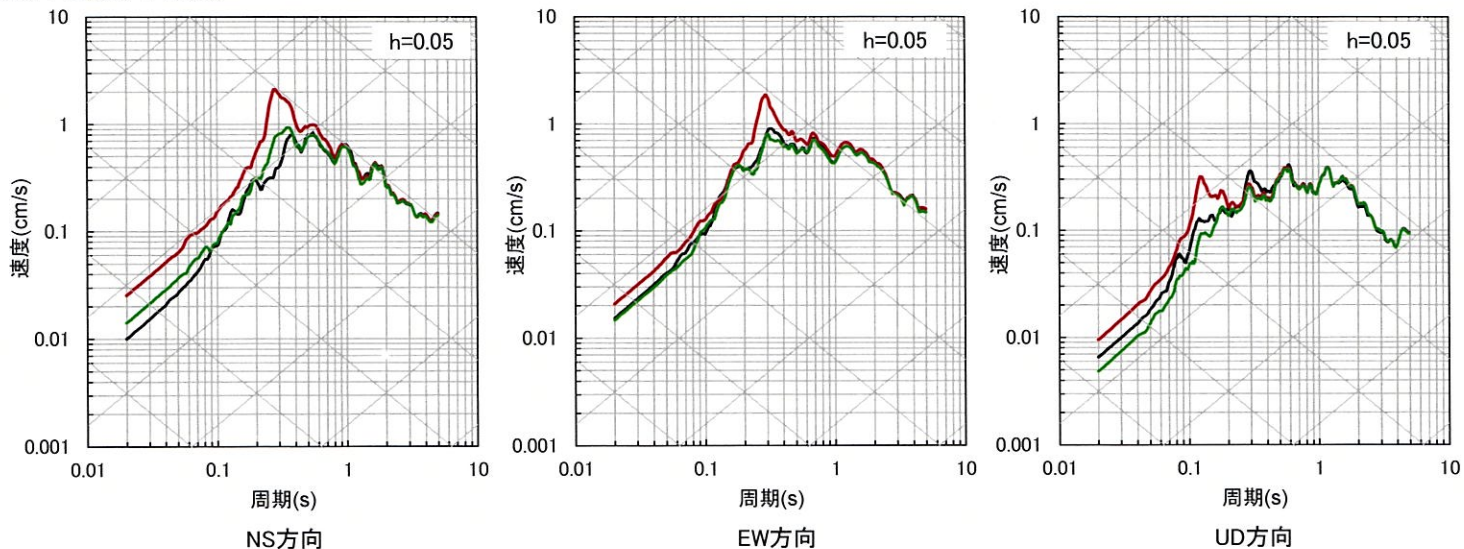
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



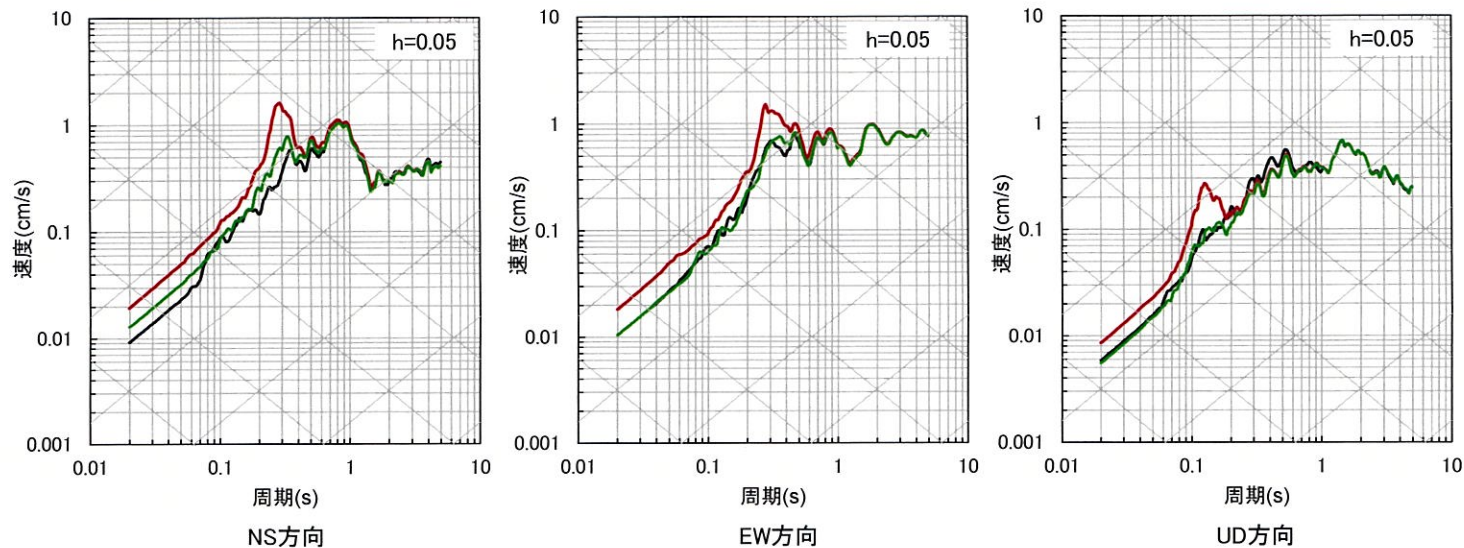
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



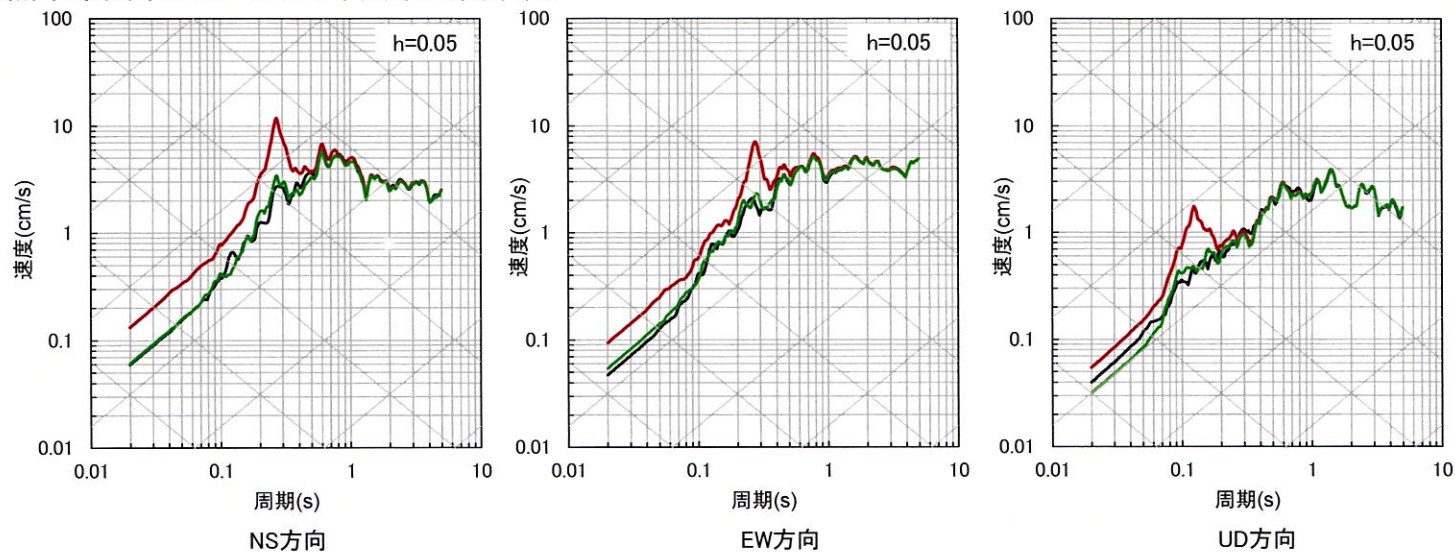
⑩ 熊本県熊本地方



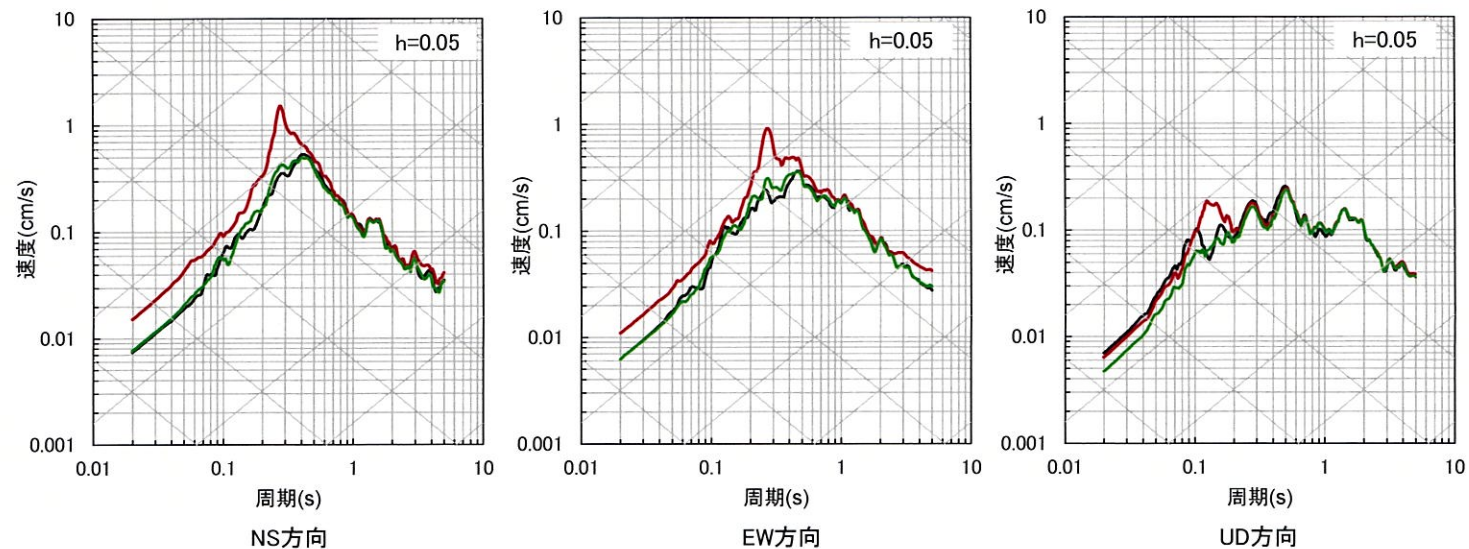
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 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)



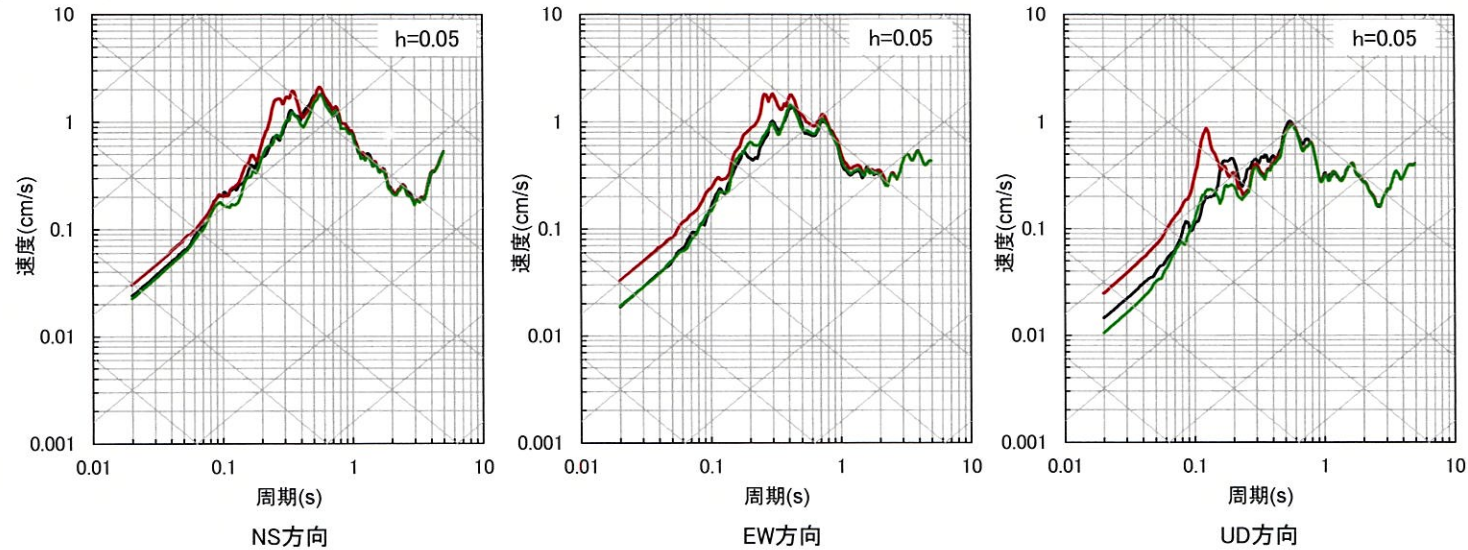
⑫ 熊本県熊本地方



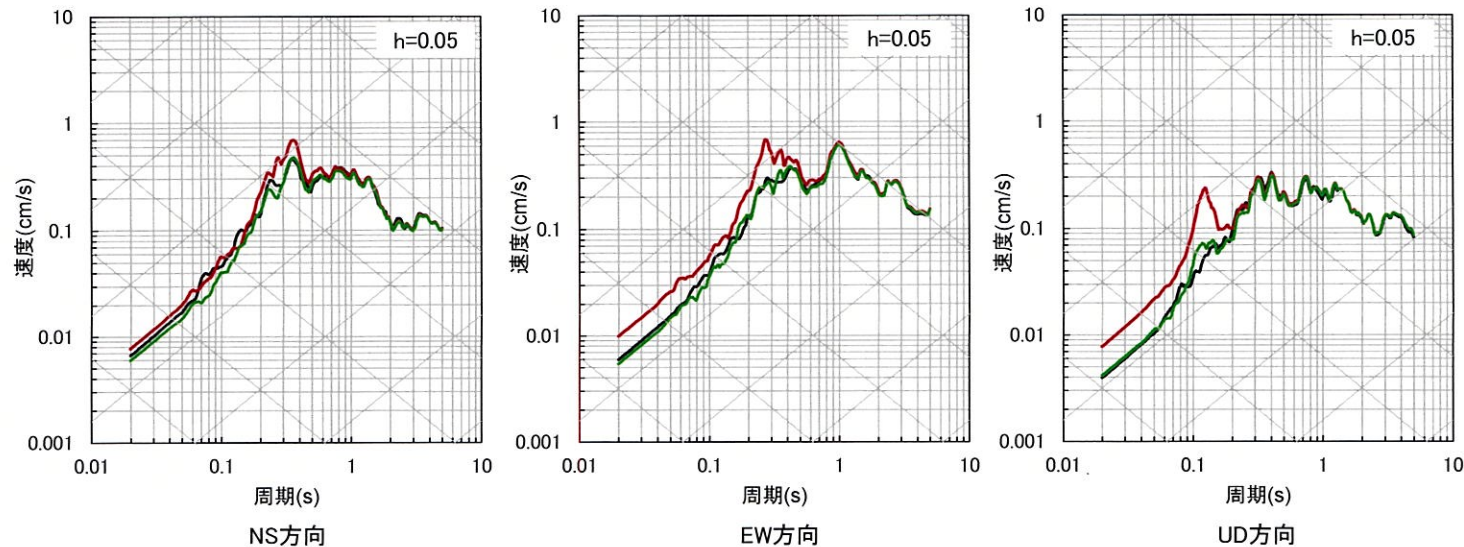
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



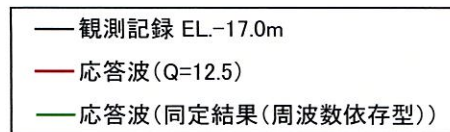
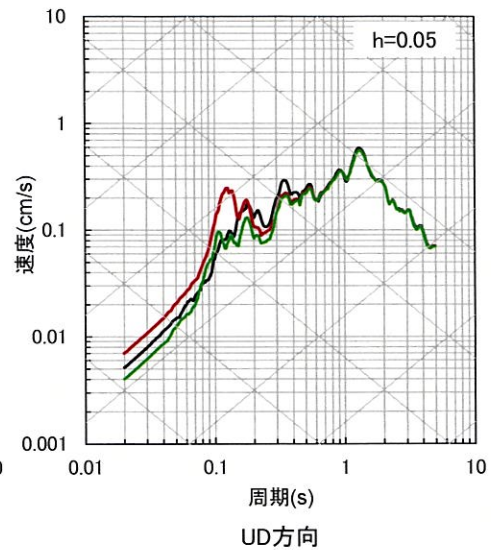
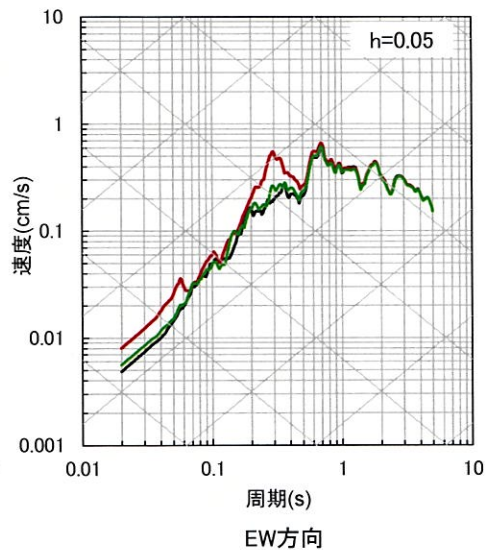
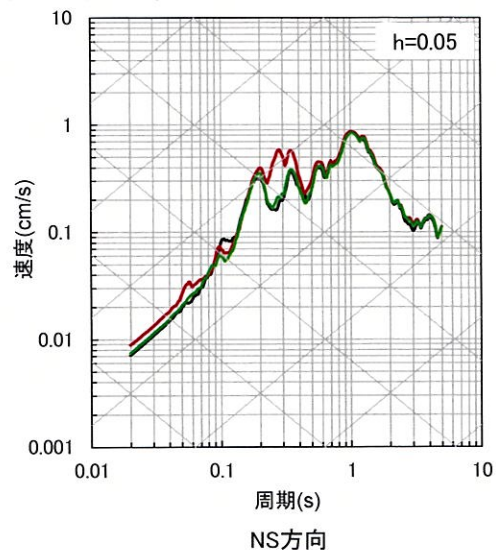
⑭ 熊本県阿蘇地方



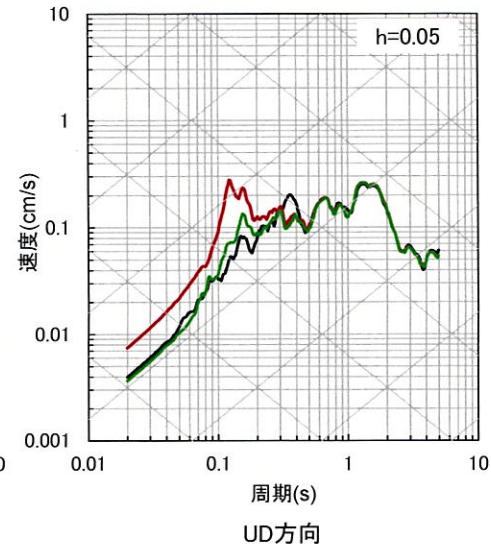
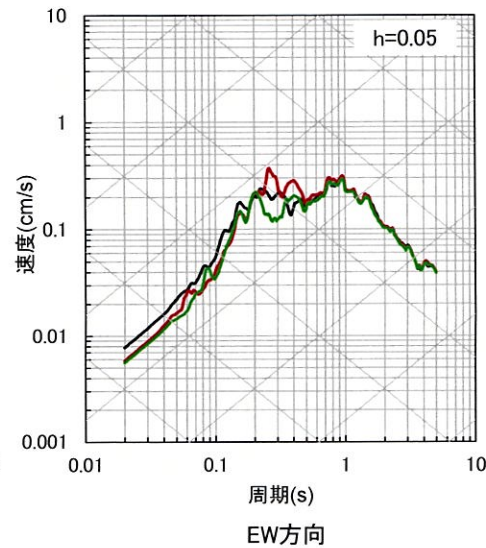
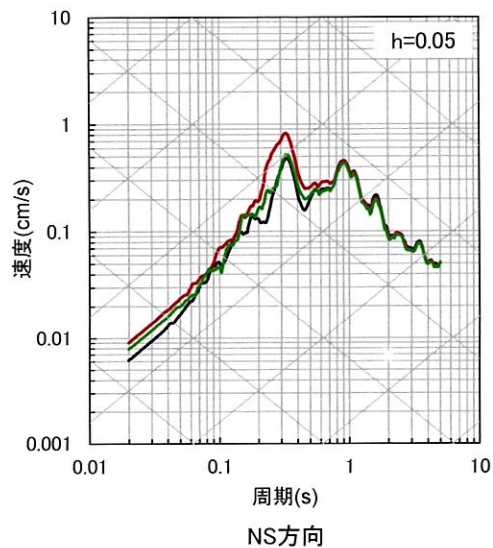
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



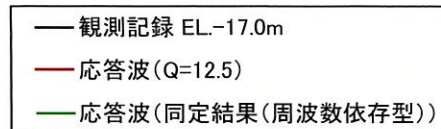
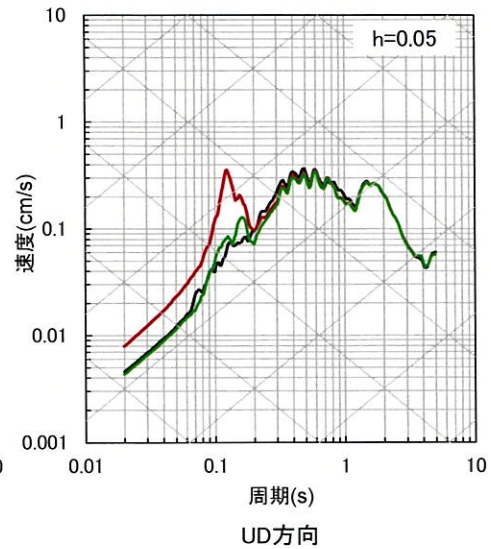
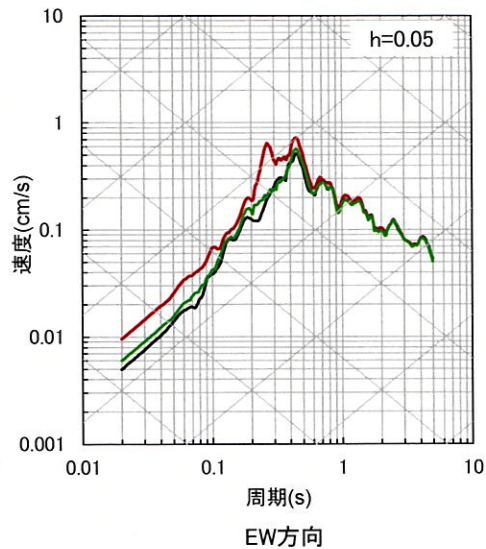
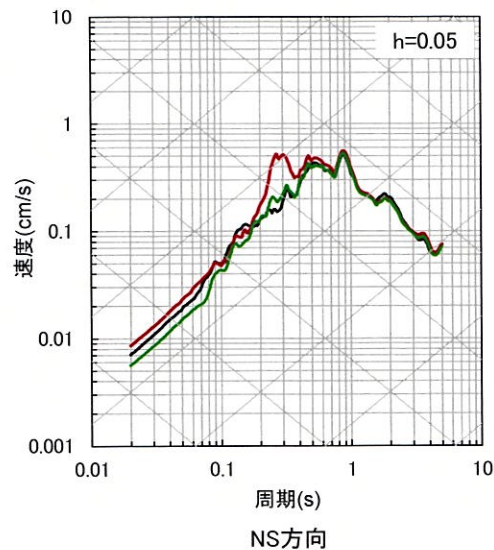
⑯ 熊本県熊本地方



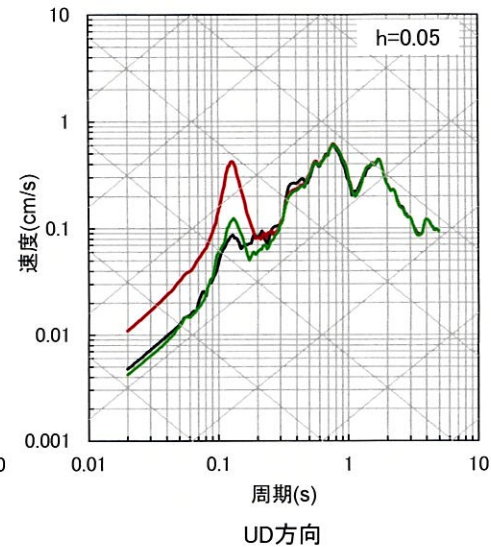
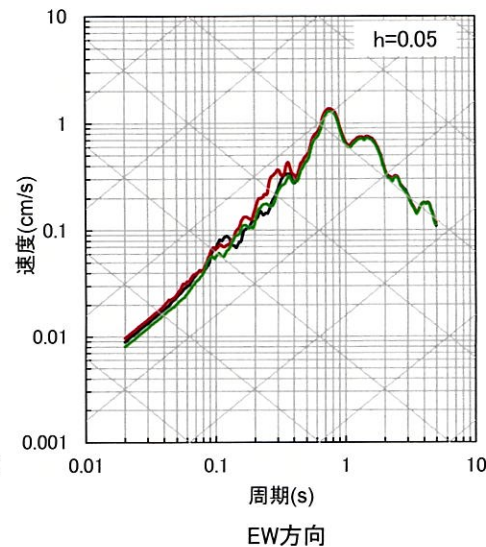
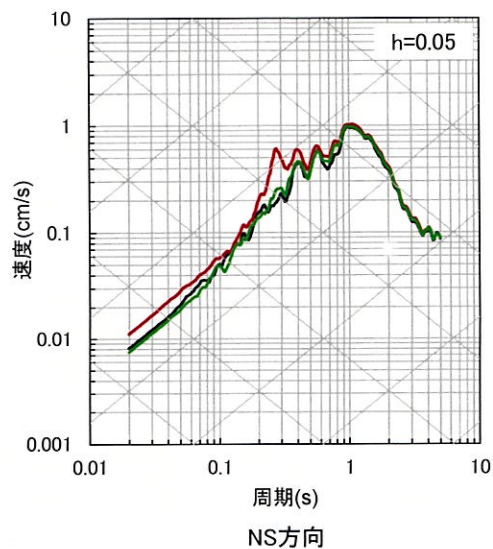
2.2.1 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



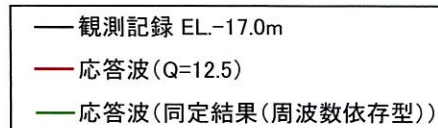
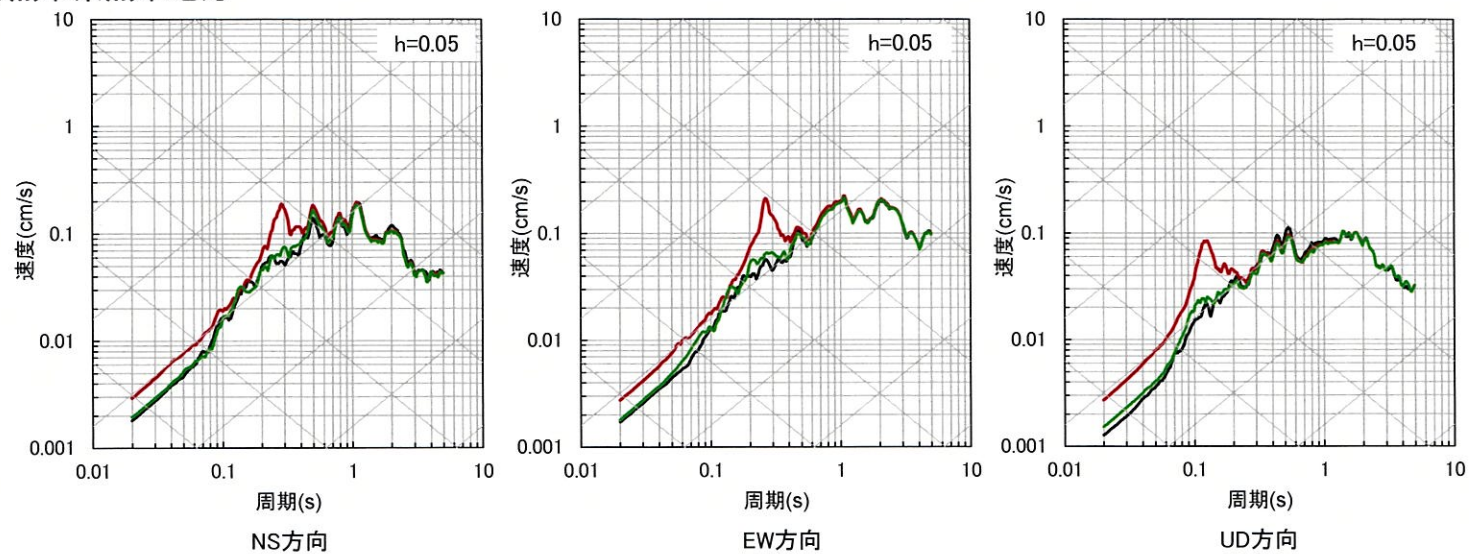
⑱ 熊本県阿蘇地方



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)

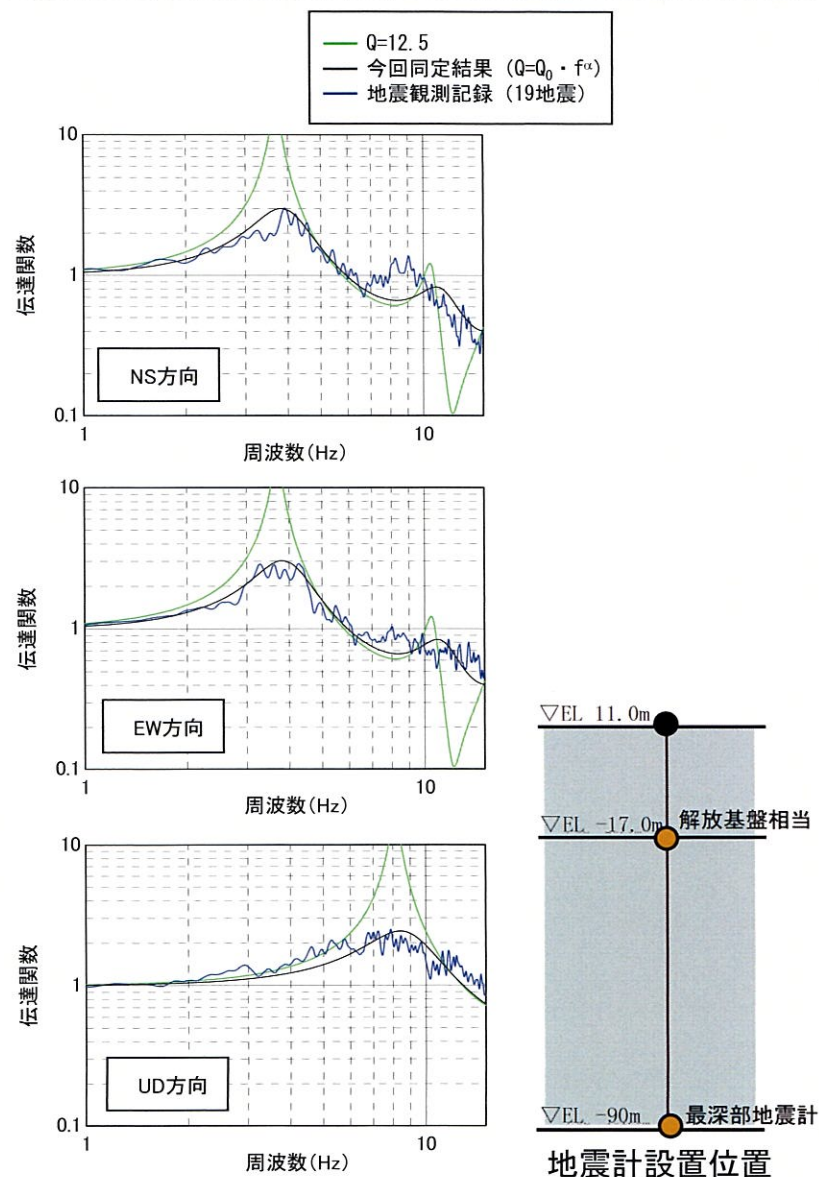
b. 伝達関数による地盤減衰 (Q値) の確認

- 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	2.35	1570	3440	12.5

※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

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。

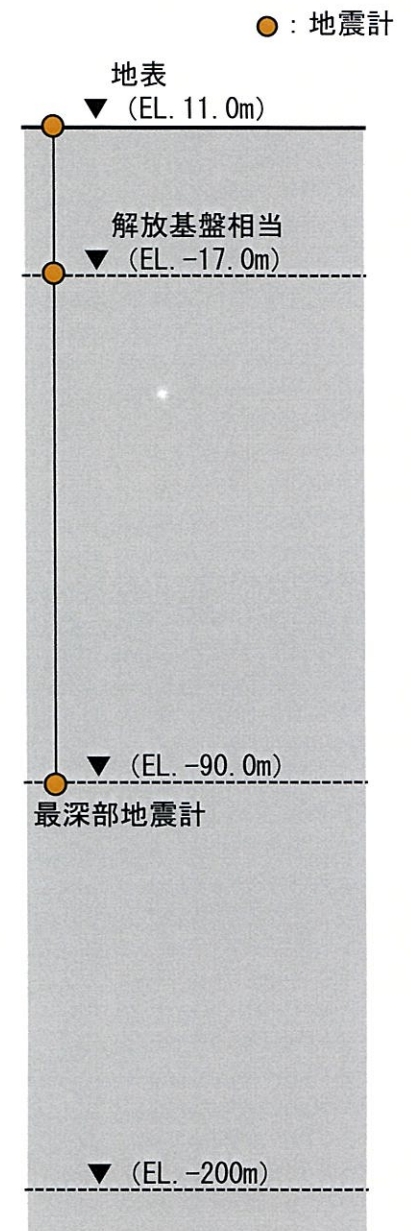


- 上記の検討・確認を踏まえ、地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定する。

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。

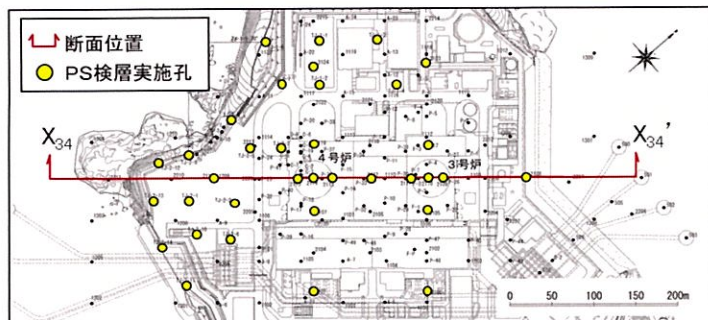
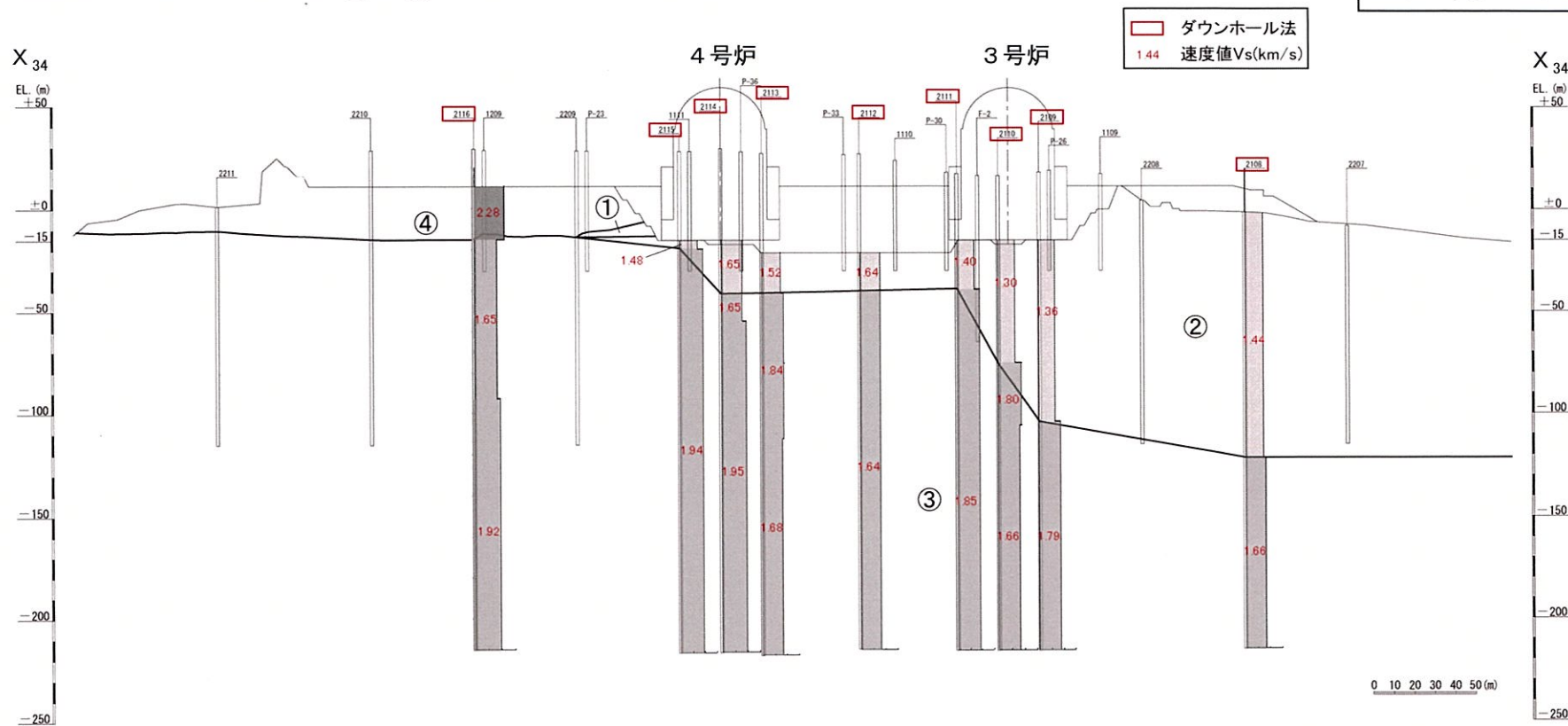


- 原子炉設置位置付近の既存の速度層断面では、解放基盤表面からEL. -200mまでは概ね②、③速度層に分類されており、最深部地震計（EL. -90.0m）以浅と最深部地震計以深の速度に大きな差異が見られないことを確認した。（57～59頁参照）

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)



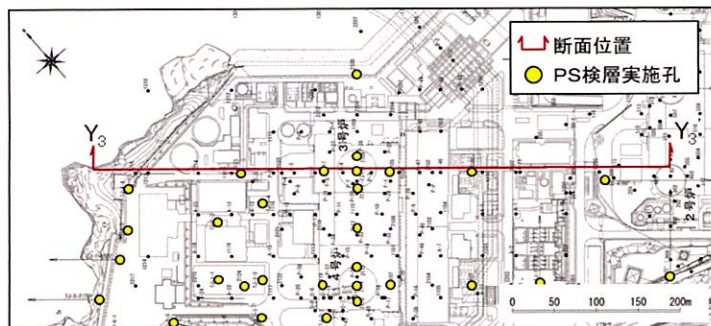
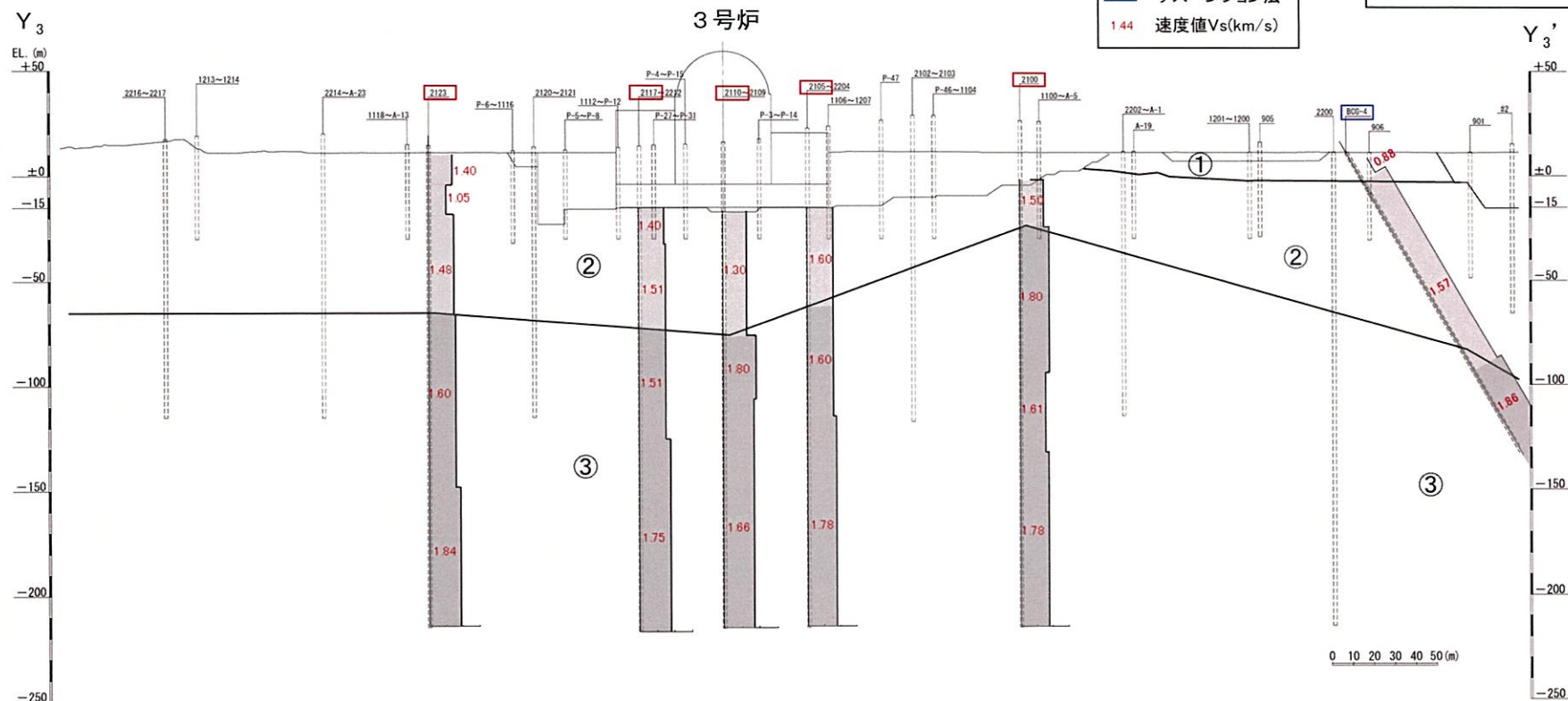
速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・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)

速度構造について (Y₃-Y₃' 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

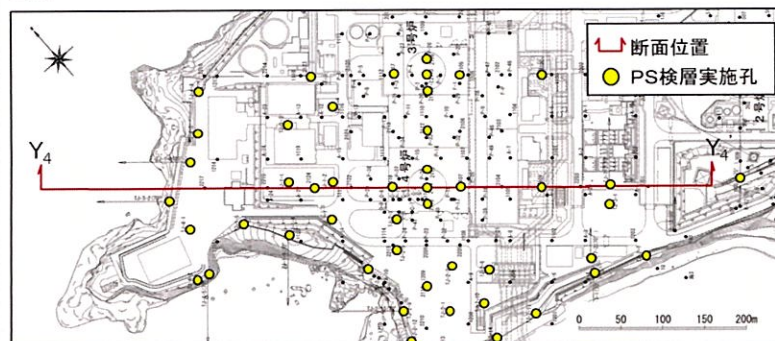
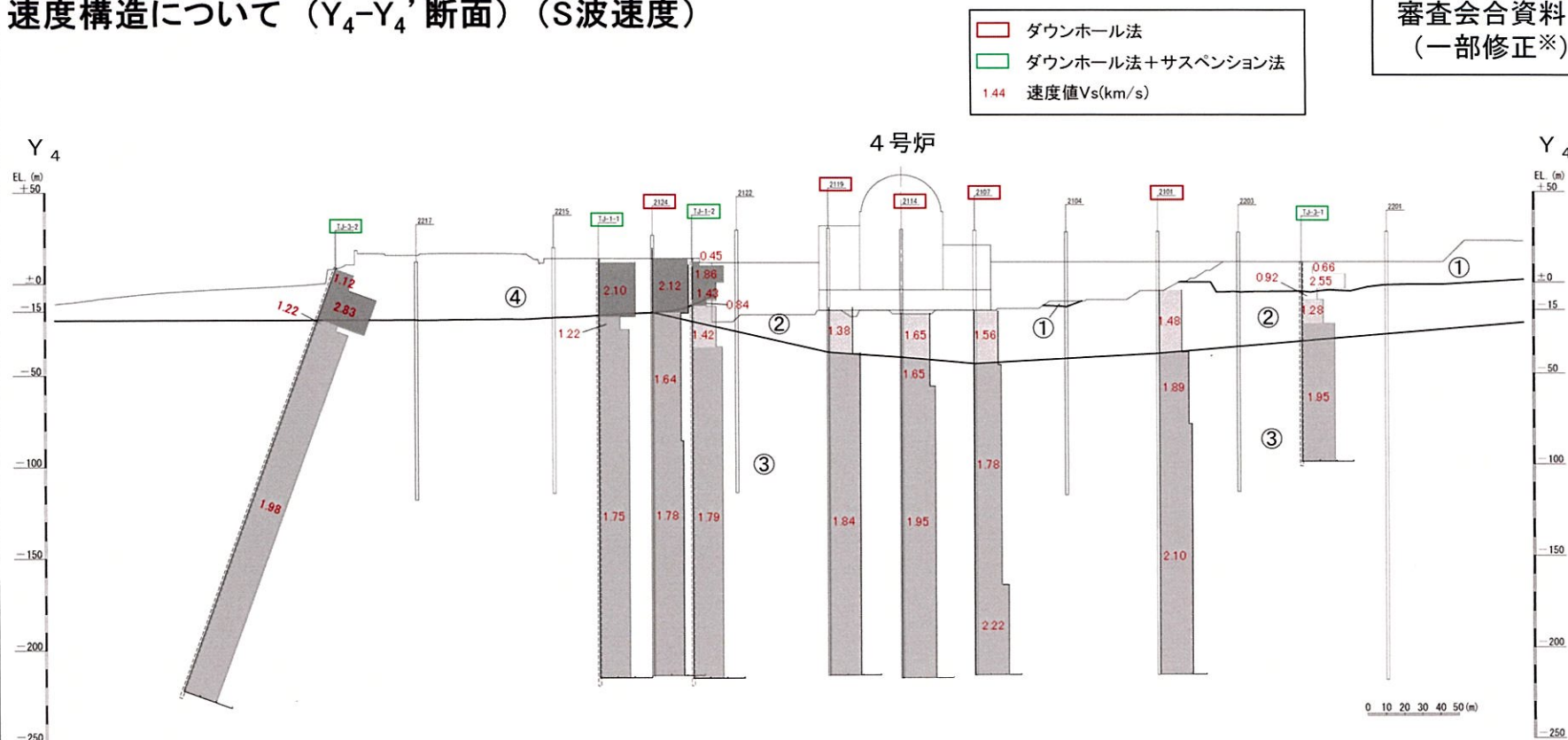
- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (V_s=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (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)

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。

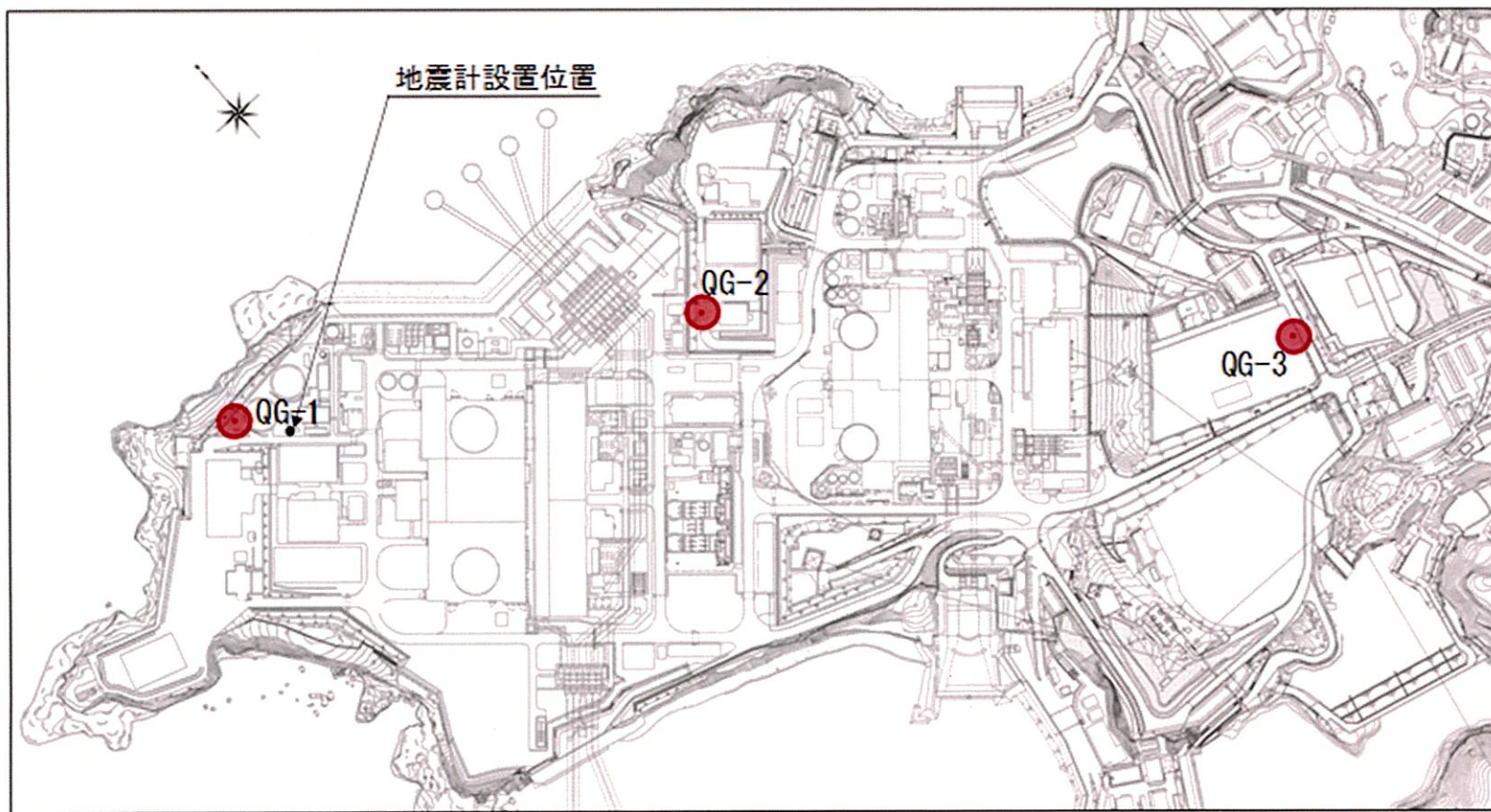
※ H31.4許可の設置変更許可申請書の情報への更新 (①TJ-3-2, TJ-1-1, TJ-1-2, TJ-3-1孔の追加、②速度層境界の変更、③地形の変更)

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

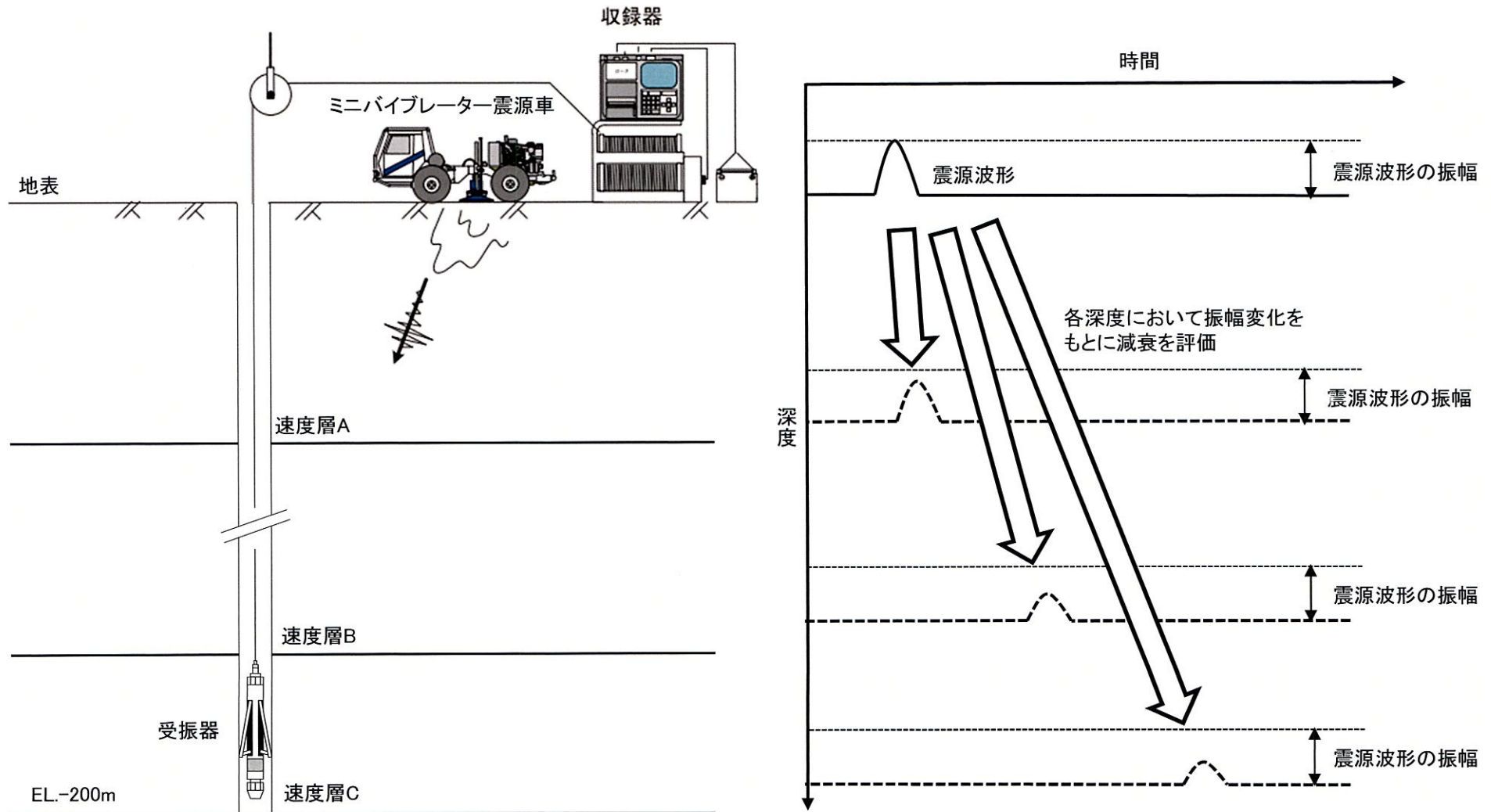
- 発電所構内において、解放基盤表面からEL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



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^{13), 14)}

- 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¹³⁾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¹⁴⁾する。(参考③)



減衰評価イメージ図

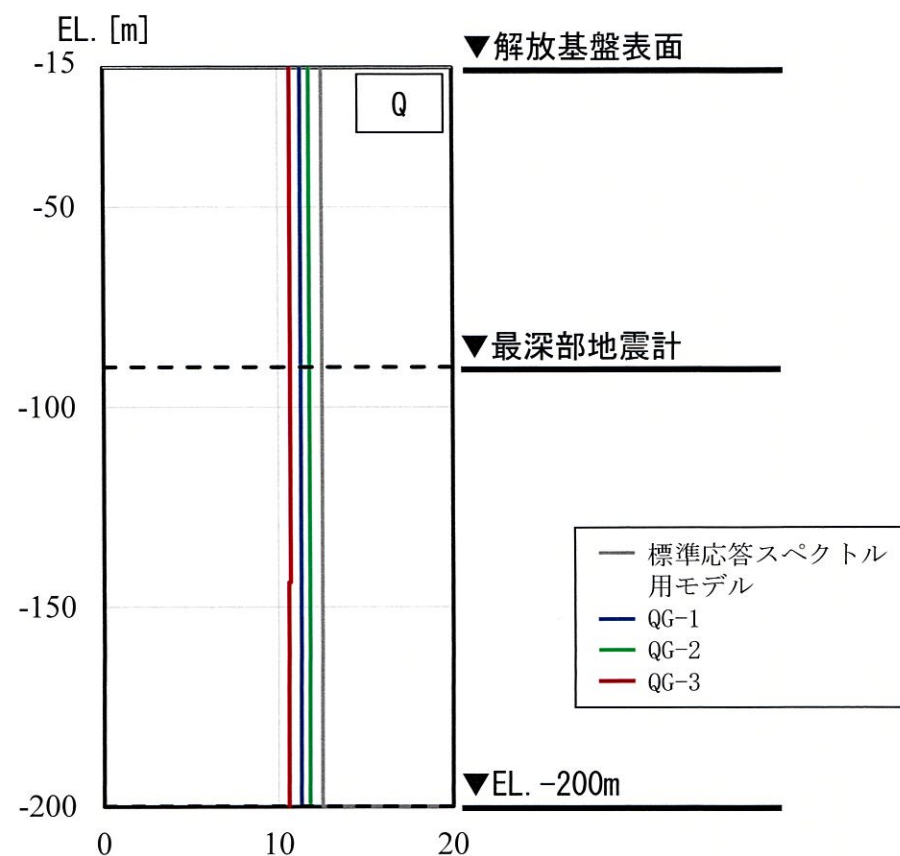
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 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



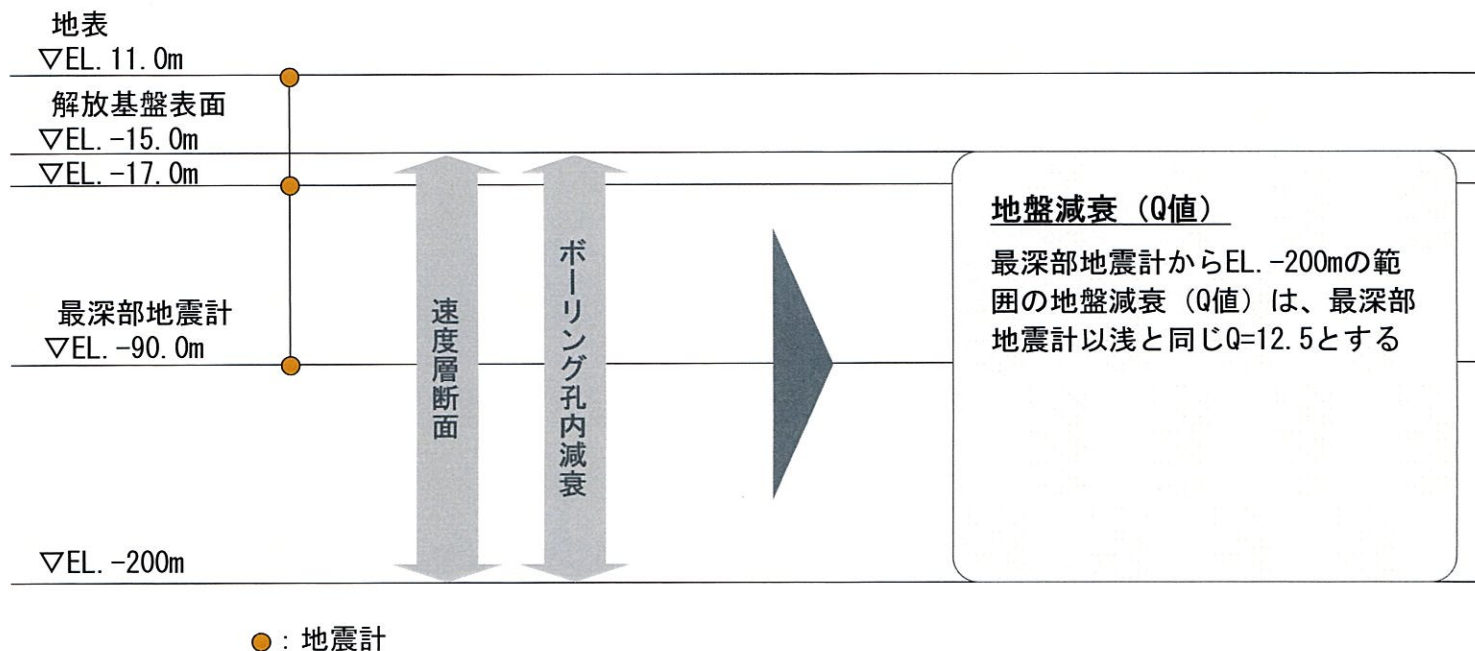
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

■ 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。



2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）

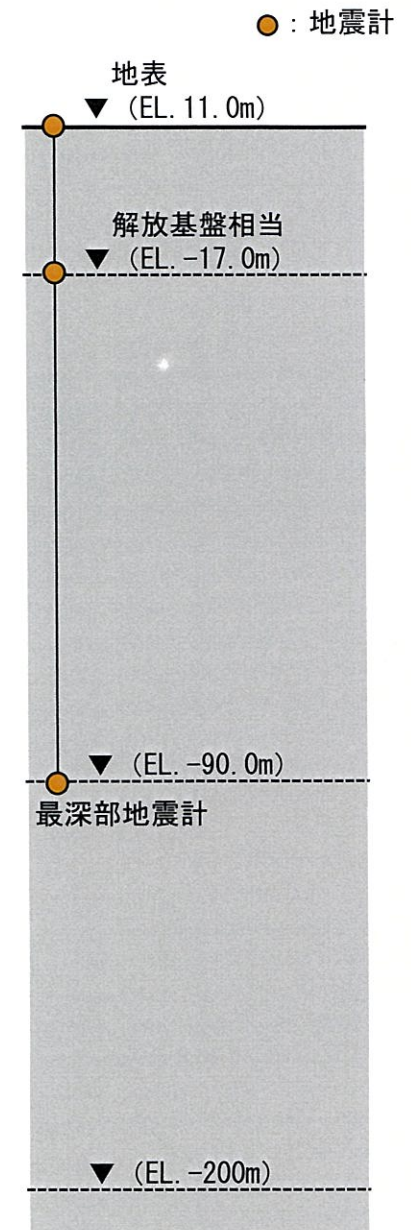
(2) 地盤減衰（Q値）の確認

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)¹⁵⁾での指摘（参考④）

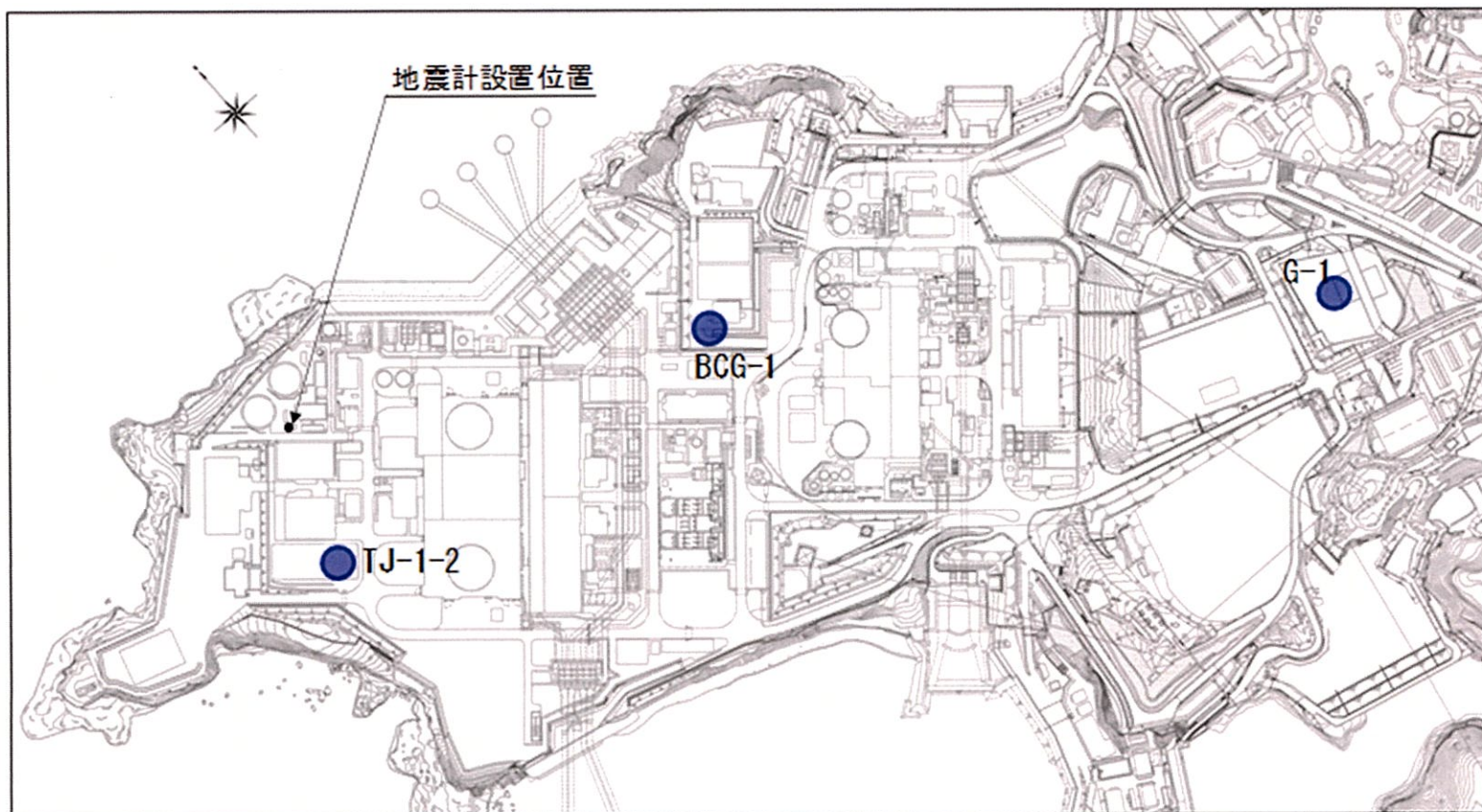
- 岩石コアを用いて測定した減衰は、鉛直アレイ観測記録に基づき評価した減衰に比べて小さくなる。
- 鉛直アレイ観測記録に基づき評価された減衰は、実際の岩盤を対象としているため、顕著な亀裂やランダム性の存在による減衰の付加効果が生じている。



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。



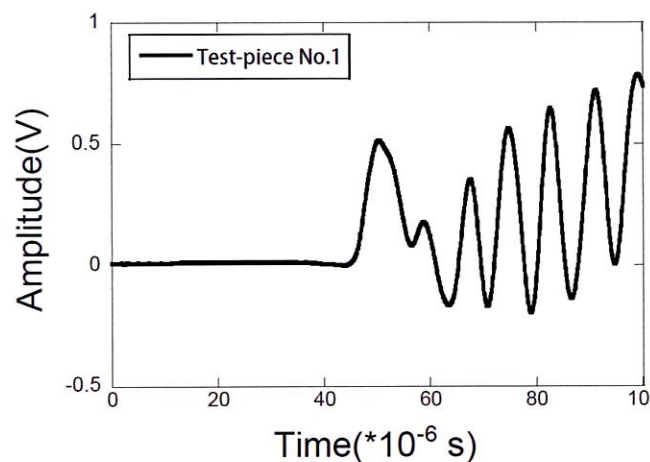
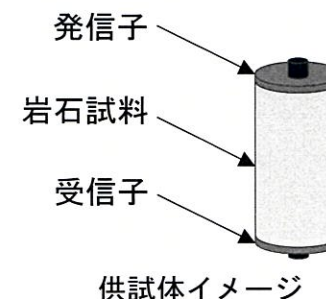
2.2.2 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

■ 岩石コアを用いた減衰測定^{15), 16)}

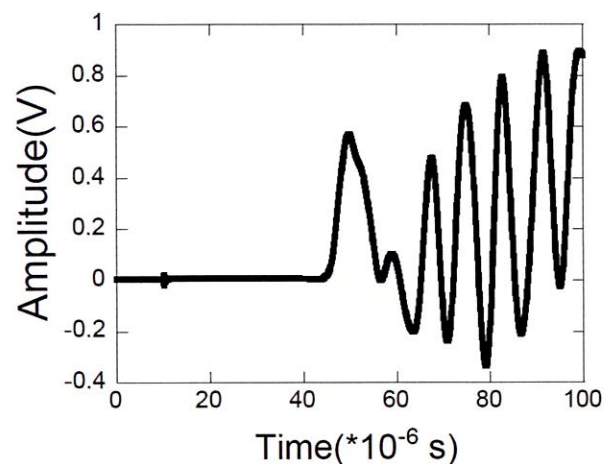
- 佐藤・岡田 (2012)¹⁵⁾において適用性が確認された、異なる試験体の透過パルス波のスペクトル比を用いる「スペクトル比法」(Toksöz et al. (1979)¹⁶⁾)による評価を実施。供試体1として敷地内のボーリング調査により得られた岩石コアを、供試体2としてQ値が既知なアルミニウムを使用し、透過波のスペクトル比 $A_1(f)/A_2(f)$ から次式に基づき、岩石の減衰 (Q値) を推定。
- 岩石コアで得られるQ値は、地盤を構成する材料の減衰であり、亀裂等を含む地盤全体の減衰に対して部分的であることから、最深部地震計以浅と最深部地震計以深の相対比較による検討を実施。

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

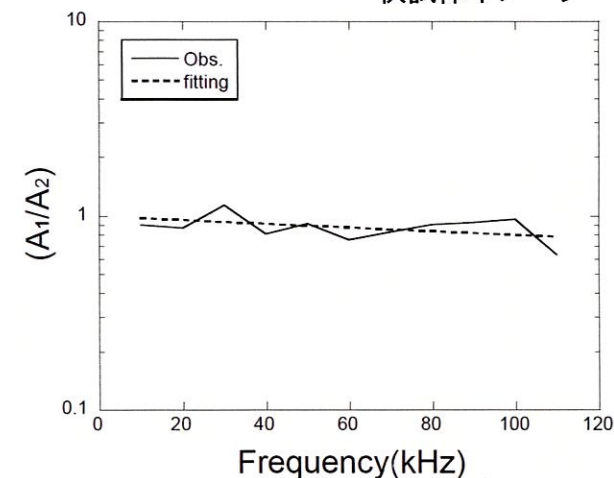
c	弾性波速度
Q	Q値
x	伝播距離(供試体長さ)
f	周波数
K	供試体での幾何減衰に関する項



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

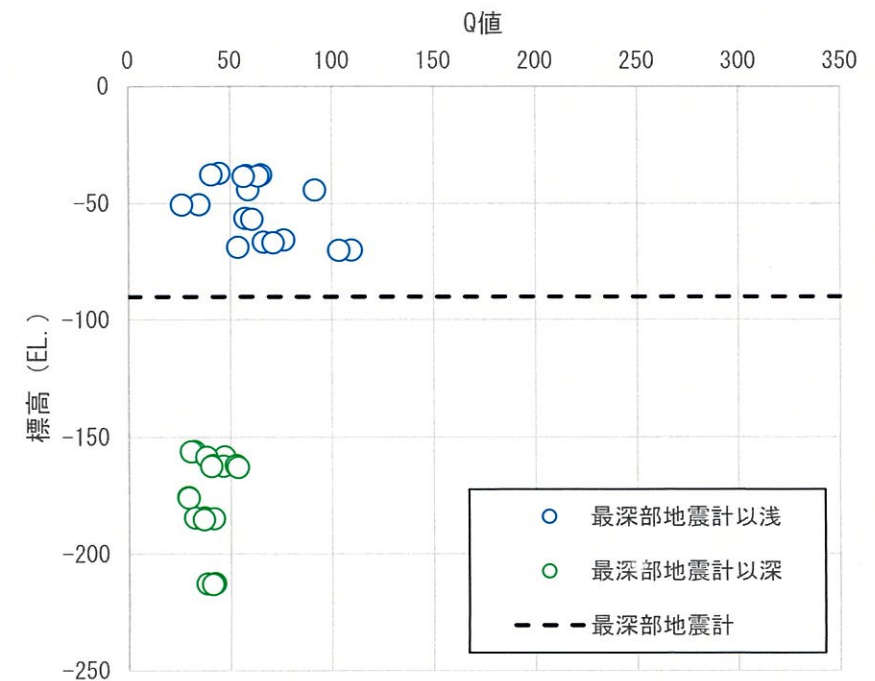
スペクトル比法による減衰測定イメージ ※佐藤・岡田 (2012) より抜粋

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）