

川内原子力発電所 1号炉及び2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10月28日
九州電力株式会社

目次

1. これまでの審査会合におけるコメント
2. 今後の審査スケジュール
3. 地下構造モデルの設定方針
 - 3.1 地下構造モデルの設定方針
 - 3.2 経験的地盤増幅率による地盤減衰（Q値）の検討
 - 3.3 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認
 - 3.4 追加調査結果を踏まえた地下構造モデルの妥当性確認
 - 【参考1】最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）の検討・設定
 - 【参考2】最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）の妥当性確認
 - 【参考3】速度層断面による最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の検討
 - 【参考4】経験的地盤増幅率による地下構造モデルの妥当性確認
 - 【参考5】友澤ほか（2021）の概要



1. これまでの審査会合におけるコメント

1. これまでの審査会合におけるコメント (1/2)

No.	コメント	指摘場所	対応状況
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、EL. -28.5m~EL. -480mの層を分割していること、また、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. -118.5m~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 次回以降改めて説明予定
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 次回以降改めて説明予定
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 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上に対し、 $V_s=2,150\text{m/s}$ の層上面 (EL. -480m) 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
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。		次回以降説明予定
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。		適宜反映
6	変はんれい岩類について、地質層序と地質図の凡例の記載の考え方を説明すること。		第1049回会合にて説明
7	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
8	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 次回以降改めて説明予定 コメント回答②③： 次回以降説明予定
9	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 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の層に設定すること。		第1057回会合にて説明
10	乱數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。		次回以降説明予定

1. これまでの審査会合におけるコメント (2/2)

No.	コメント	指摘場所	対応状況
11	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
12	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
13	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
14	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. 1, 2, 8について 次回以降改めて説明予定
15	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。		次回以降説明予定
16	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 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)	説明方針： 今回説明 (P8~38) コメント回答： 次回以降説明予定
17	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。		今回説明 (P6~7)

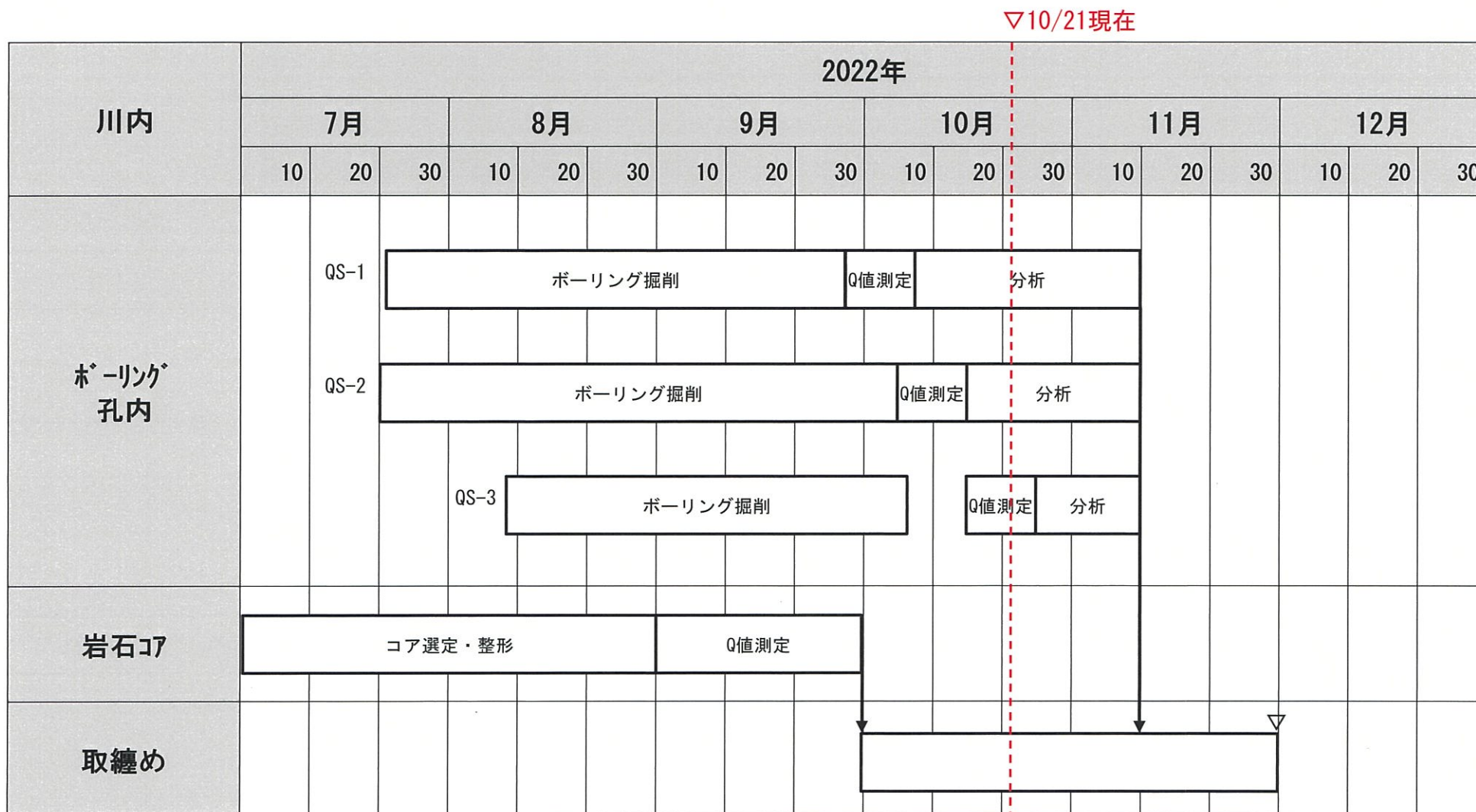


2. 今後の審査スケジュール

2. 今後の審査スケジュール

■ 地盤減衰に係る追加調査の進捗状況

- 第1080回審査会合（2022年10月7日）以降は概ね計画通りに進捗しており、全体取り纏めは11月下旬完了予定。





3. 地下構造モデルの設定方針

3.1 地下構造モデルの設定方針

■ 新たな地下構造モデルの設定

- 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が、既許可の地下構造モデルは、理論的手法による長周期帯の地震動評価を目的として設定していることから、今回、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを新たに設定する。
- 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）の設定に当たっては、下記の当社の基本スタンスに則り、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き、精度・信頼性を向上させた評価を実施。

【当社の基本スタンス（第114回審査会合資料より抜粋）】

- ① 最新の技術的知見やデータ、観測事実に基づき、評価の精度・信頼性を向上させること
- ② ①によっても、なお評価に幅が存在する場合は、敷地への影響の観点から安全側に判断すること
- ③ ①、②の取り組みは、現在のみならず今後とも継続的に進め、常に安全性・信頼性の向上を図ること

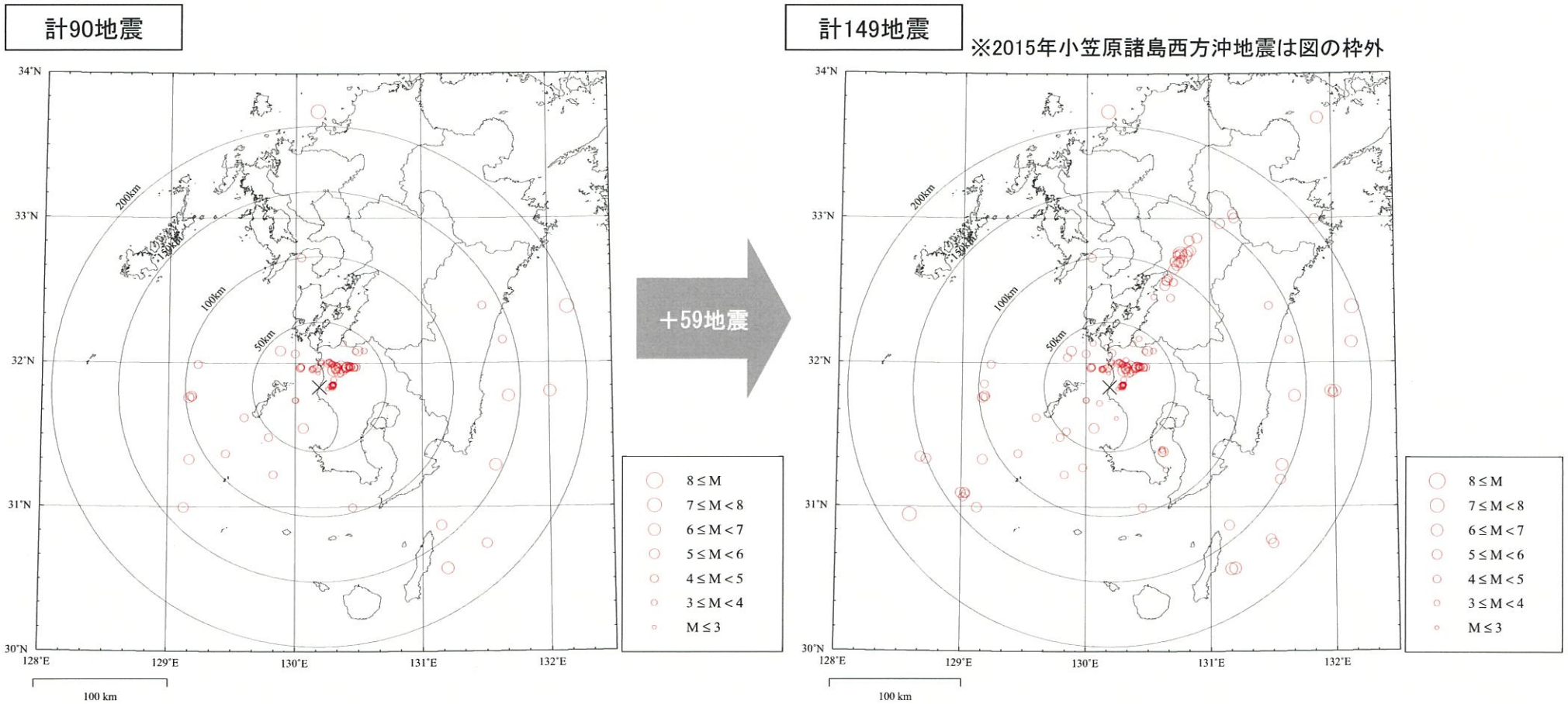
- 既許可の地下構造モデルのうち、速度構造は調査・観測データを用いた多面的な評価に基づき設定し、地盤減衰（Q値）は慣用値に基づき設定している。
- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見（10～11頁）に基づく評価により、地盤減衰（Q値）の精度・信頼性の向上が見込まれるため、地盤減衰（Q値）を対象に評価を実施。

※なお、速度値（ V_s 、 V_p ）は、既許可以降の地震観測記録や最新の知見を取り入れても、精度・信頼性に大きな影響はないことを確認している。

3.1 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、川内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59地震の観測記録を取得。（計149地震の観測記録）



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)

敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

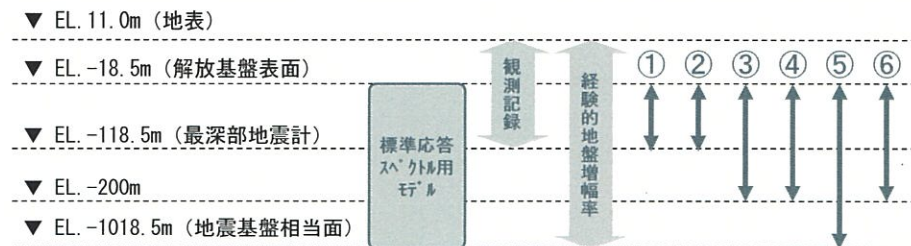
3.1 地下構造モデルの設定方針

■ 今回取り入れる新たな知見や考え方

新たな知見	新たな考え方	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	<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）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	<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）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）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	<ul style="list-style-type: none">・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調査 ・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	<ul style="list-style-type: none">・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	<ul style="list-style-type: none">・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化

3.1 地下構造モデルの設定方針

■ 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) の妥当性確認【参考2】

- 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、同定結果による応答波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) の妥当性確認【3.3節】

- 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

地下構造モデルの妥当性確認

- 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) 【参考4】
 - 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) 【3.4節】

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の検討・設定【参考1】

- 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. -118.5m) 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=8.0程度。
- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 (Q=7.6程度)
 - 伝達関数 (バイリニア型) による検討 (Q=5.8程度)
 - 地震波干渉法による検討 (Q=8.0程度)

地盤減衰 (Q値) は、保守的にQ=12.5と設定。

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の検討・設定

- 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。【参考3】
- 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。【3.2節】

Q=12.5の適用範囲は、保守的にEL. -200mまでに設定。

地下構造モデルの設定

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。

※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。

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

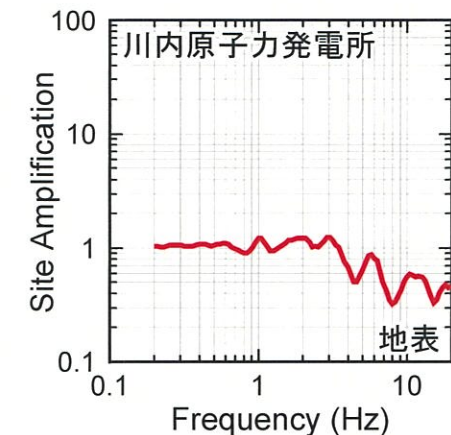
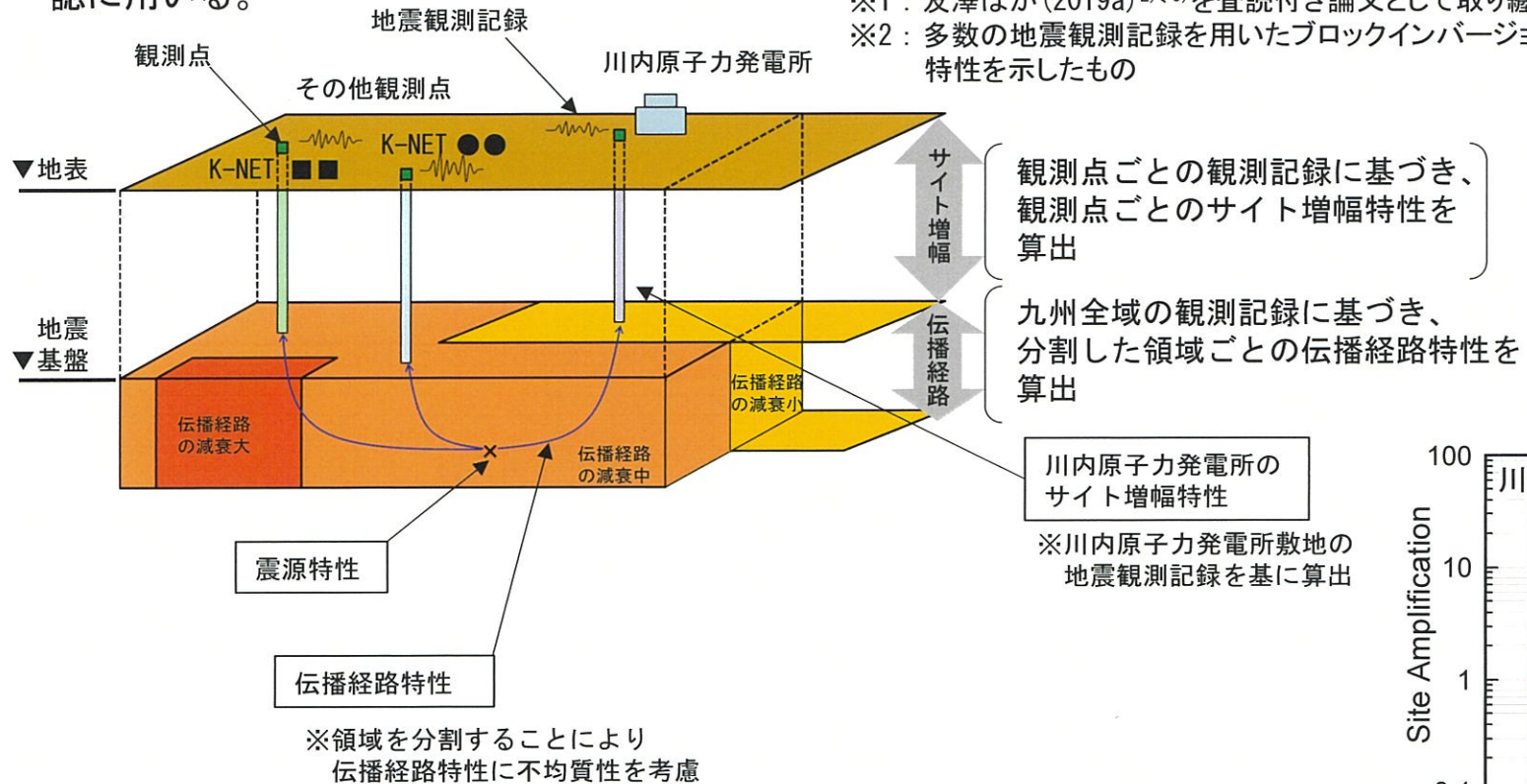
3.2 経験的地盤増幅率による地盤減衰（Q値）の検討

■ 経験的地盤増幅率

- 川内原子力発電所の経験的地盤増幅率は、友澤ほか（2021）^{1)※1}によるサイト増幅率^{※2}を用いる。
 - 友澤ほか（2021）では、川内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川内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）^{2),3)}を査読付き論文として取り纏めたもの

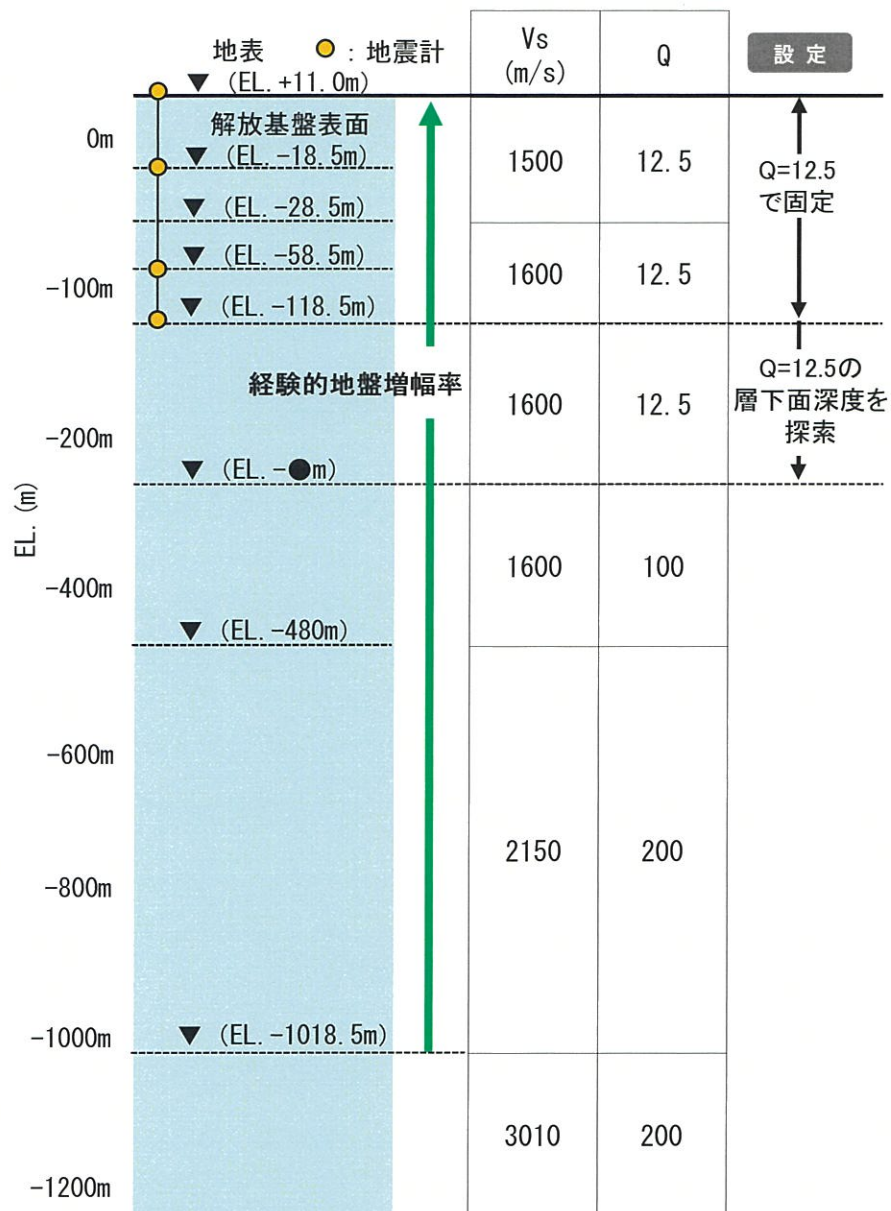
※2：多数の地震観測記録を用いたブロックインバージョン解析により算出した平均的な特性を示したもの



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

3.2 経験的地盤増幅率による地盤減衰（Q値）の検討

■ 経験的地盤増幅率を用いた地盤減衰（Q値）の検討



- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）について、川内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。
- 最深部地震計以浅は、 $Q=12.5$ で固定。
- 経験的地盤増幅率と理論増幅率の残差が最小となる $Q=12.5$ の層下面深度を検討し、 $Q=12.5$ をEL. -200m以深まで適用できることを確認。

3.3 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認

■ ボーリング孔内減衰測定による妥当性確認

- 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

■ 岩石コア減衰測定による妥当性確認

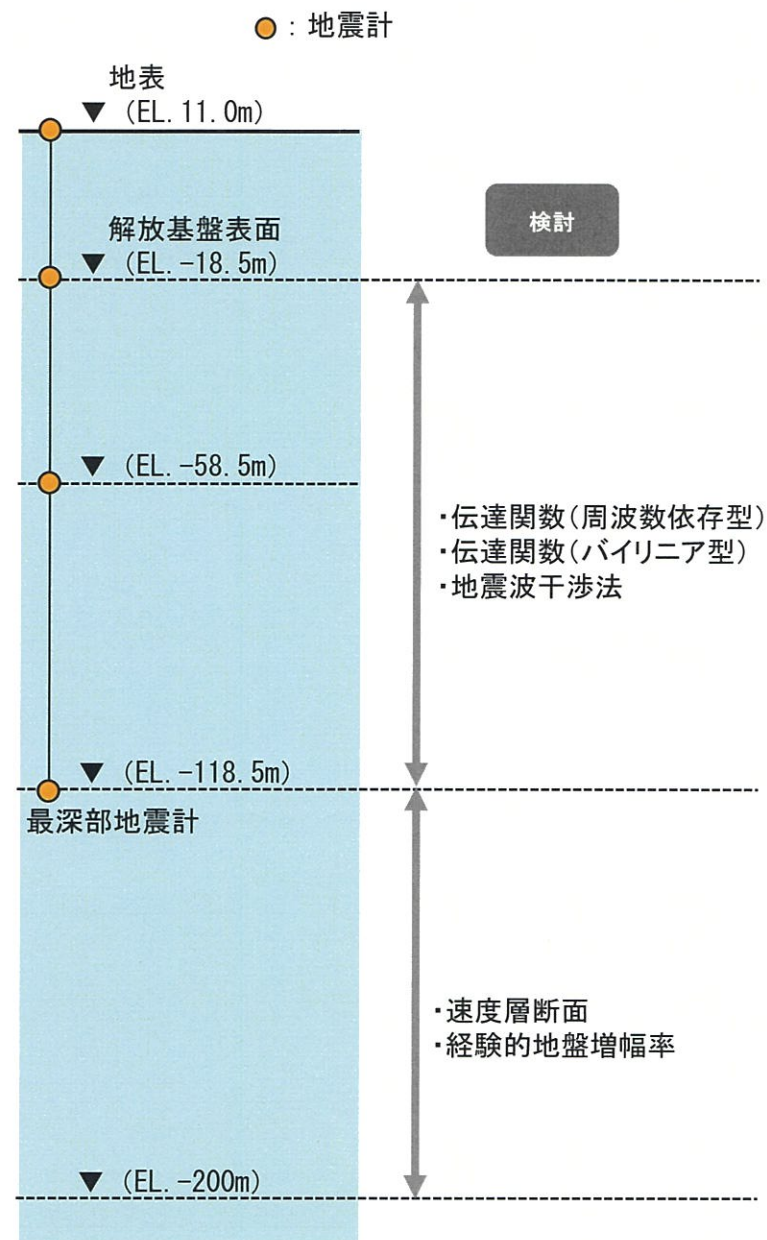
- 岩石コアを用いた減衰測定により、EL. -200mまでの範囲における岩石の減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰（Q値）とする妥当性を以下の観点で確認。
 - 岩石コアを用いた測定による減衰※2が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

※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。

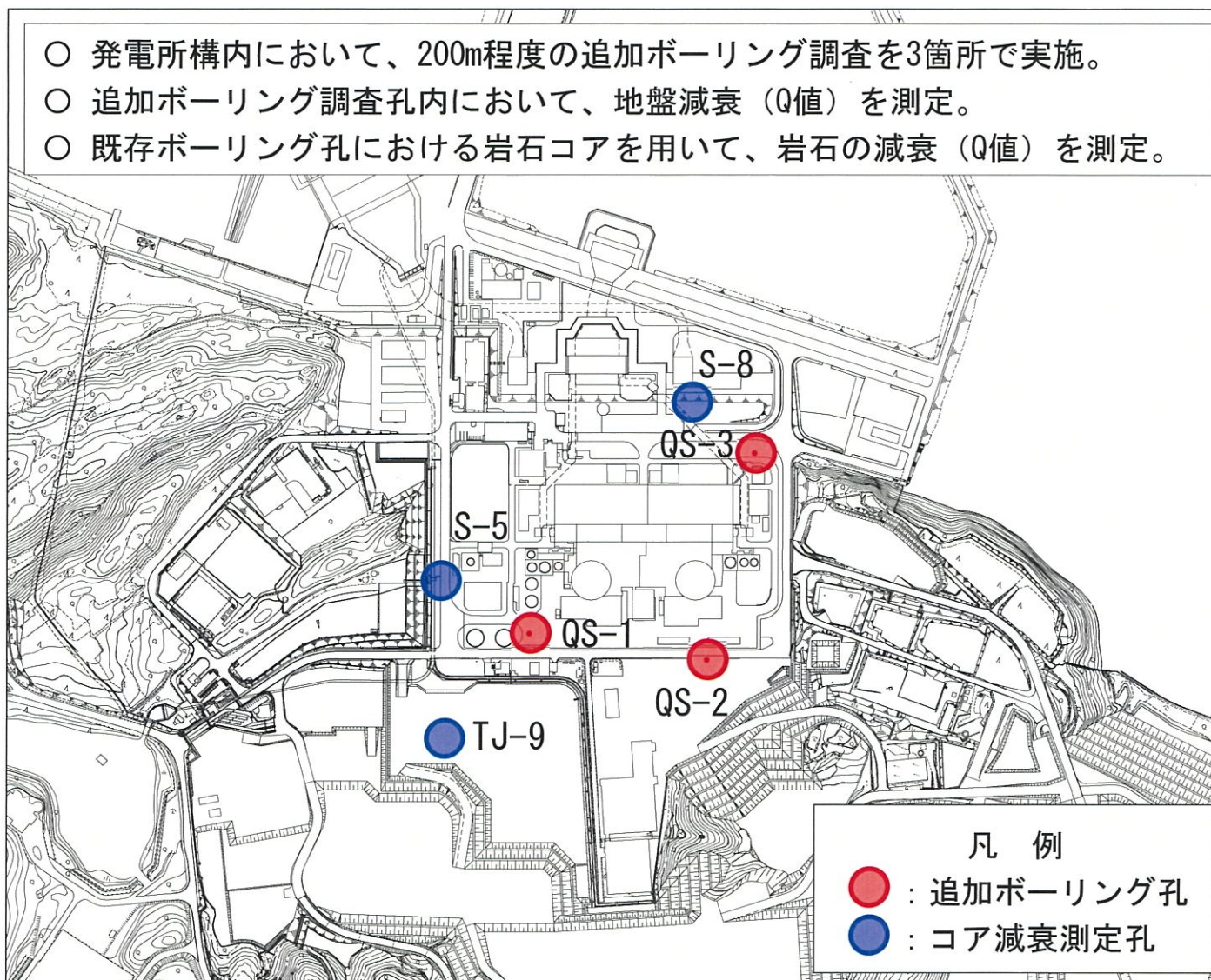
※3：佐藤・岡田（2012）⁴⁾での指摘

- 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。



3.3 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認

■ 追加ボーリング調査及び岩石コア採取位置



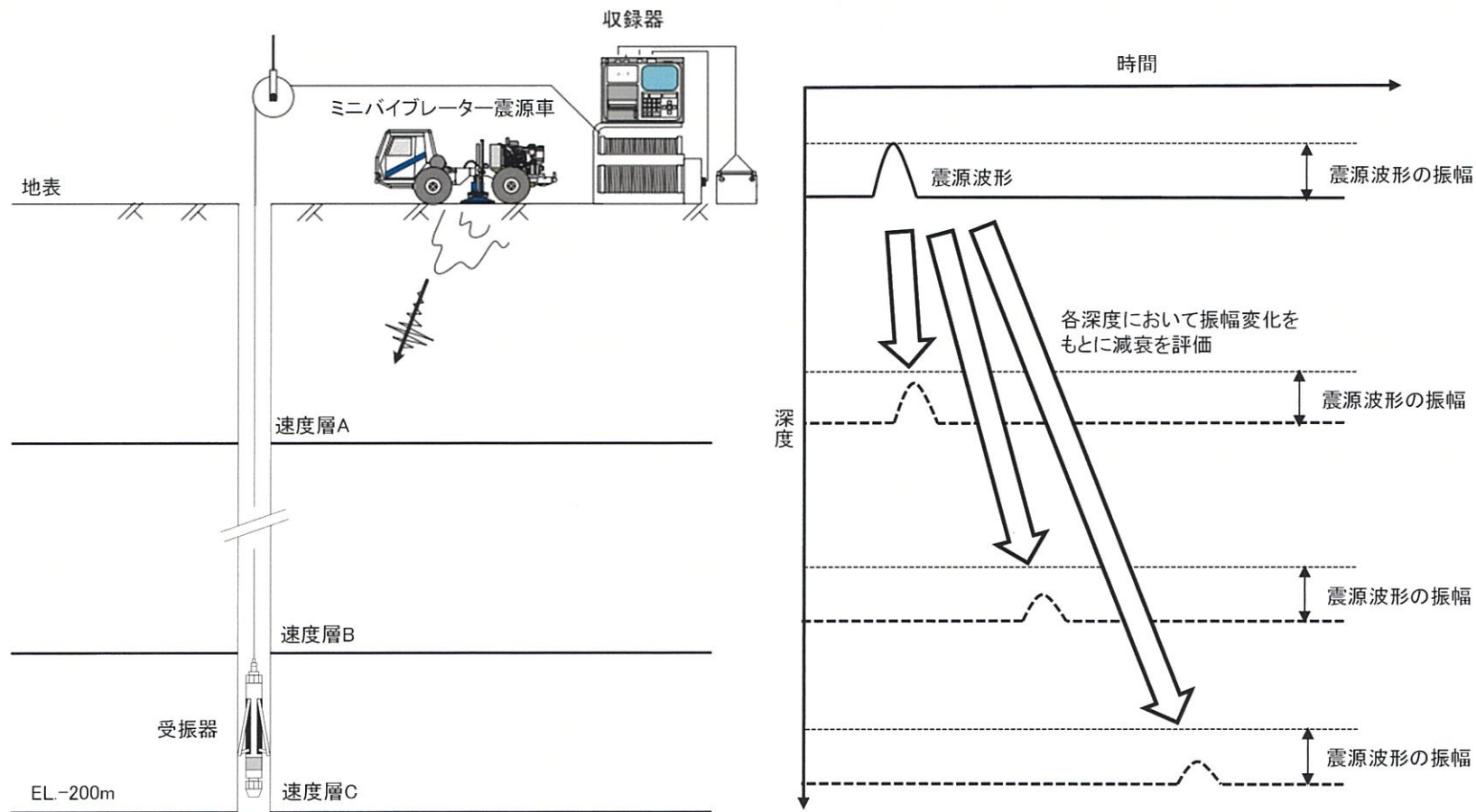
3.3 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認

■ ボーリング孔内における減衰測定^{5)、6)}

第1080回審査会合資料より抜粋

■ ボーリング孔内における減衰測定

- 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値を測定する。



減衰評価イメージ図

3.3 最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の妥当性確認

■ 岩石コアを用いた減衰測定^{4)、7)}

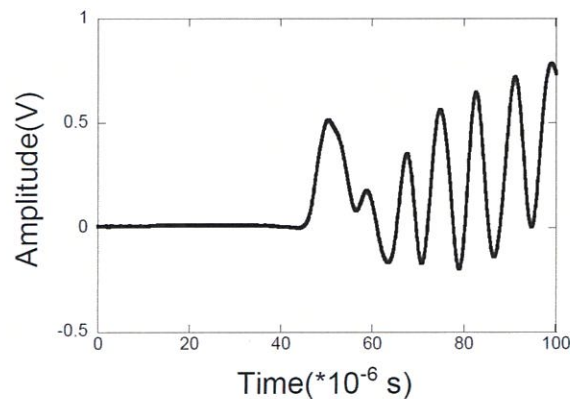
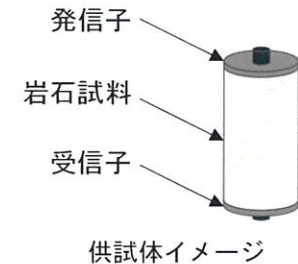
第1080回審査会合資料より抜粋（一部修正）

■ 岩石コアを用いた減衰測定

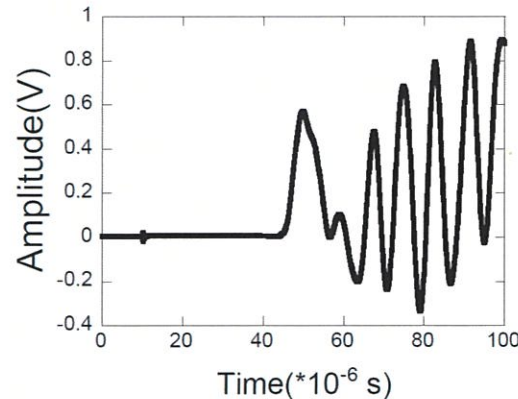
- 敷地内で過去に実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて、岩石の減衰（Q値）を測定。
- 佐藤・岡田（2012）²⁾において適用性が確認された、異なる試験体の透過パルス波のスペクトル比を用いる「スペクトル比法」（Toksöz et al. (1979)³⁾）による評価を実施。
- 供試体1として敷地内のボーリング調査により得られた岩石コアを、供試体2としてQ値が既知なアルミニウムを使用し、透過波のスペクトル比 $A_1(f)/A_2(f)$ から次式に基づき、地盤減衰（Q値）を推定。

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

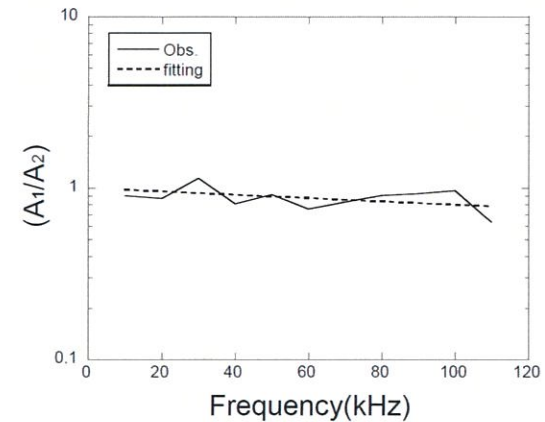
c 弾性波速度
 Q Q値
 x 伝播距離（供試体長さ）
 f 周波数
 K 供試体での幾何減衰に関する項



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

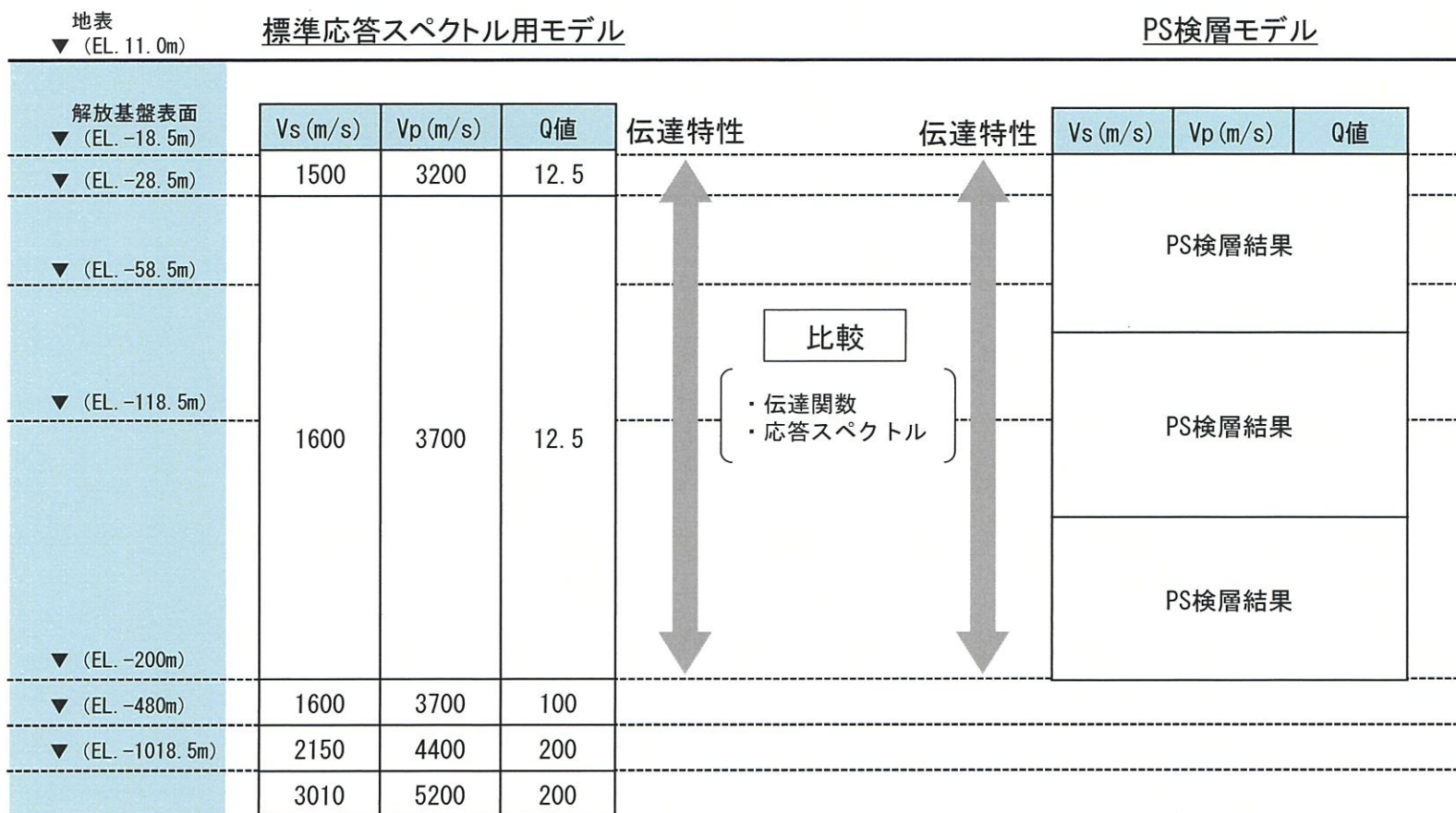
スペクトル比法による減衰測定イメージ ※佐藤・岡田（2012）より抜粋

3.4 追加調査結果を踏まえた地下構造モデルの妥当性確認

第1080回審査会合資料より抜粋

(2) 地下構造モデルの妥当性確認

- 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。

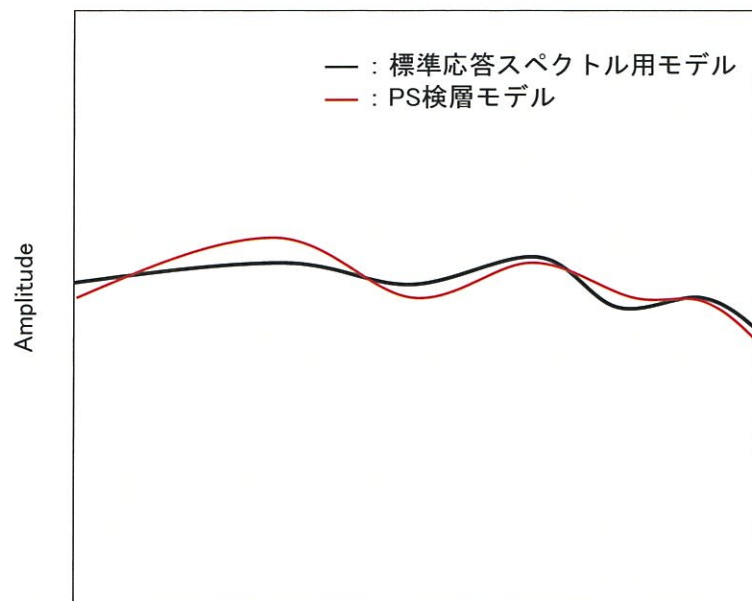


検討イメージ

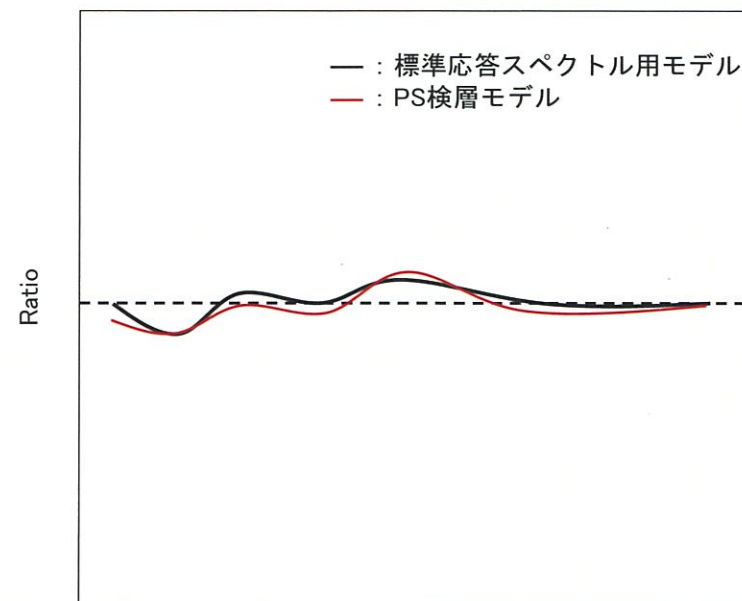
3.4 追加調査結果を踏まえた地下構造モデルの妥当性確認

■ 伝達特性の比較による妥当性確認方針

- 標準応答スペクトル用モデルの妥当性を以下の観点で確認。
 - 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。
 - 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。



Frequency(Hz)
伝達関数の比較イメージ



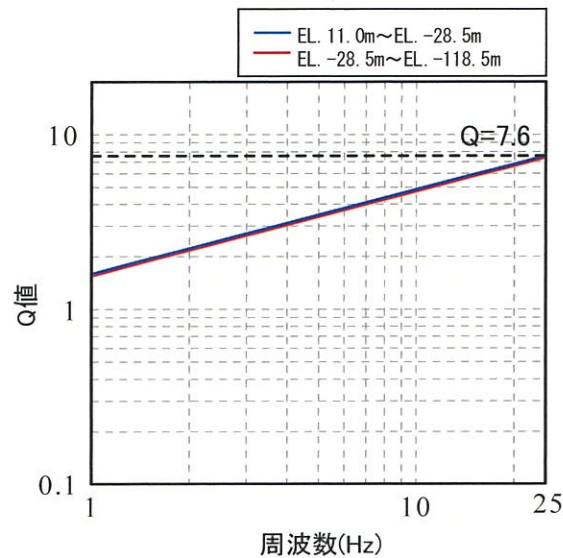
Period(s)
応答スペクトル比の比較イメージ

【参考1】最深部地震計以浅の地盤減衰（Q値）の検討・設定

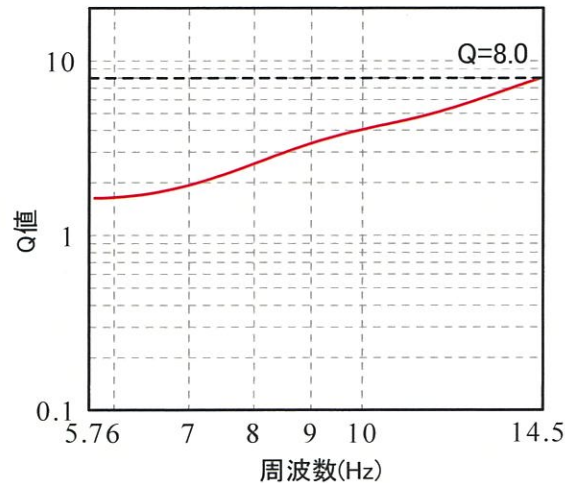
第1049回審査会合資料より抜粋

- 既往の知見より、地盤減衰（Q値）の高周波数帯で上限の存在が示唆される。
- 地盤減衰（Q値）の上限値を高周波数帯へ適用可能。
- 3つの手法により検討をした地盤減衰（Q値）の上限値は下表の通り。

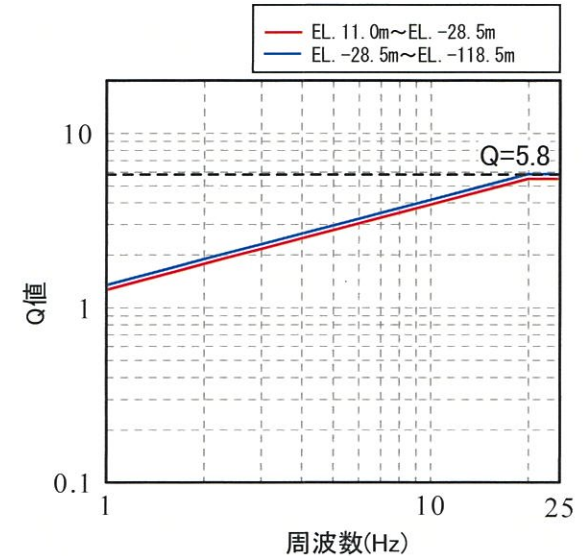
検討手法	伝達関数による検討 (周波数依存型)	地震波干渉法による検討	伝達関数による検討 (バイリニア型)
検討結果 (上限値)	Q=7.6程度	Q=8.0程度	Q=5.8程度



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.-118.5m)



地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-118.5m)



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.-118.5m)

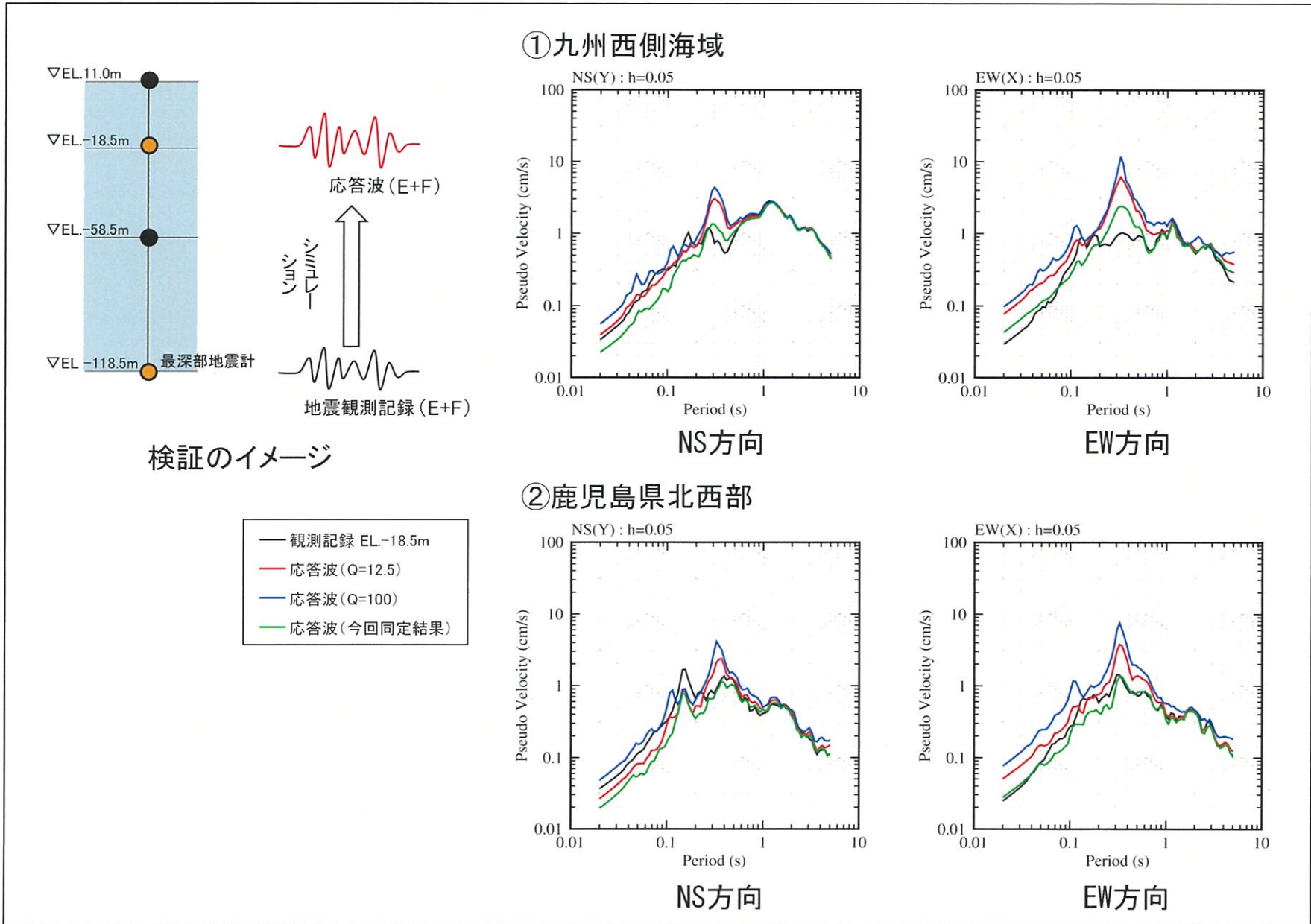
30

B. 応答スペクトルによる確認

- 鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数による地盤減衰の同定結果及び設定した地盤減衰（ $Q=12.5$ ）を用いて、応答スペクトルによる確認を実施。
- 最深部地震計（EL. -118.5m）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. -18.5m）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。
 - 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）による応答波の応答スペクトルは、地盤同定結果を用いた応答波の応答スペクトルを上回ることを確認。
 - 地盤減衰（ $Q=12.5$ ）による応答波の応答スペクトルは、大半の地震において、地震観測記録の応答スペクトルと比べて、同等もしくは上回ることを確認。
 - なお、既許可の地盤減衰（ $Q=100$ ）による応答波の応答スペクトルは、短周期帯において、観測記録の応答スペクトルと整合せず、過度な保守性を有していることを確認。

【参考2】 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認

第1026回審査会合資料より抜粋



【参考2】 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認

第1026回審査会合資料より抜粋

(2) 地盤減衰 (Q値) の確認

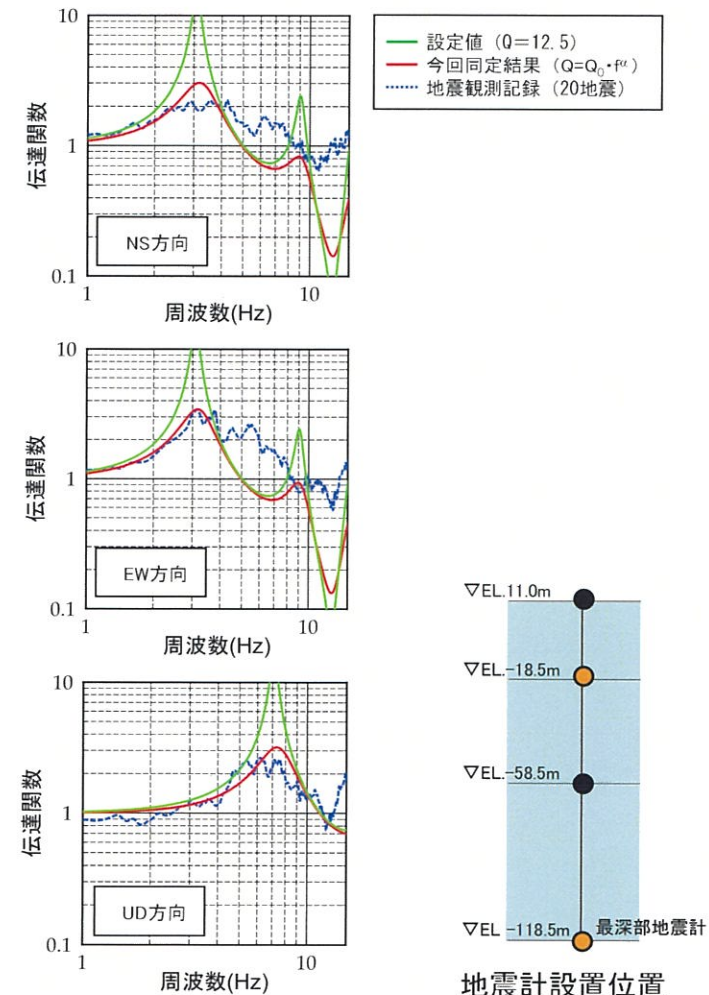
A. 伝達関数による確認

- 今回設定した地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数と今回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。

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
11.0m	2.7	1500	3200	12.5
-18.5m	2.7	1500	3200	12.5
-28.5m	2.7	1600	3700	12.5
-118.5m				

※解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に層を追加



伝達関数の比較 (EL.-18.5m/EL.-118.5m)

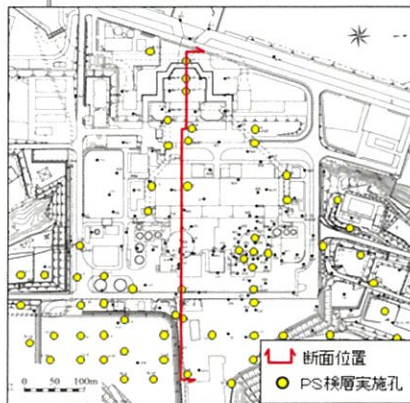
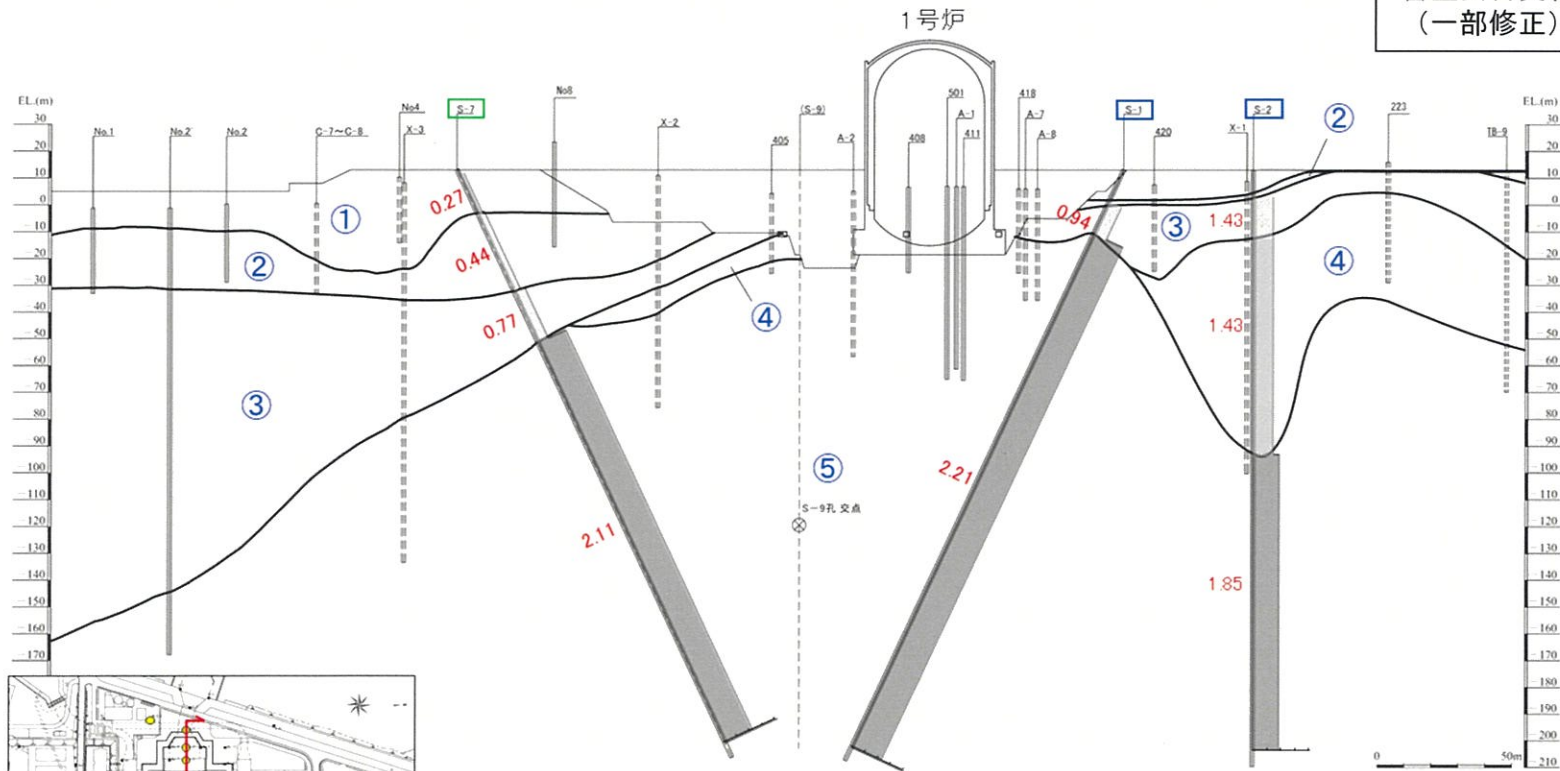
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

【参考3】速度層断面による最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の検討

第1026回審査会合資料より抜粋

原子炉設置位置付近の速度層断面図（X₁-X₁'断面）

第5回
審査会合資料
(一部修正)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)
①	0.28
②	0.52
③	0.90
④	1.37
⑤	2.05

 サスペンション法
 ダウンホール法+サスペンション法
1.44 速度値Vs(km/s)

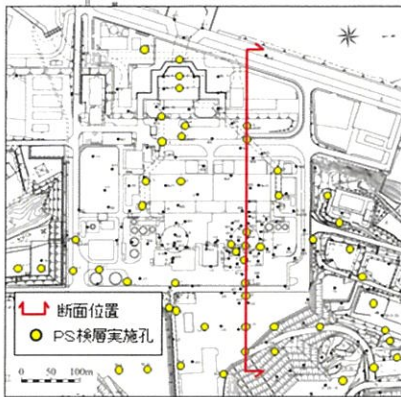
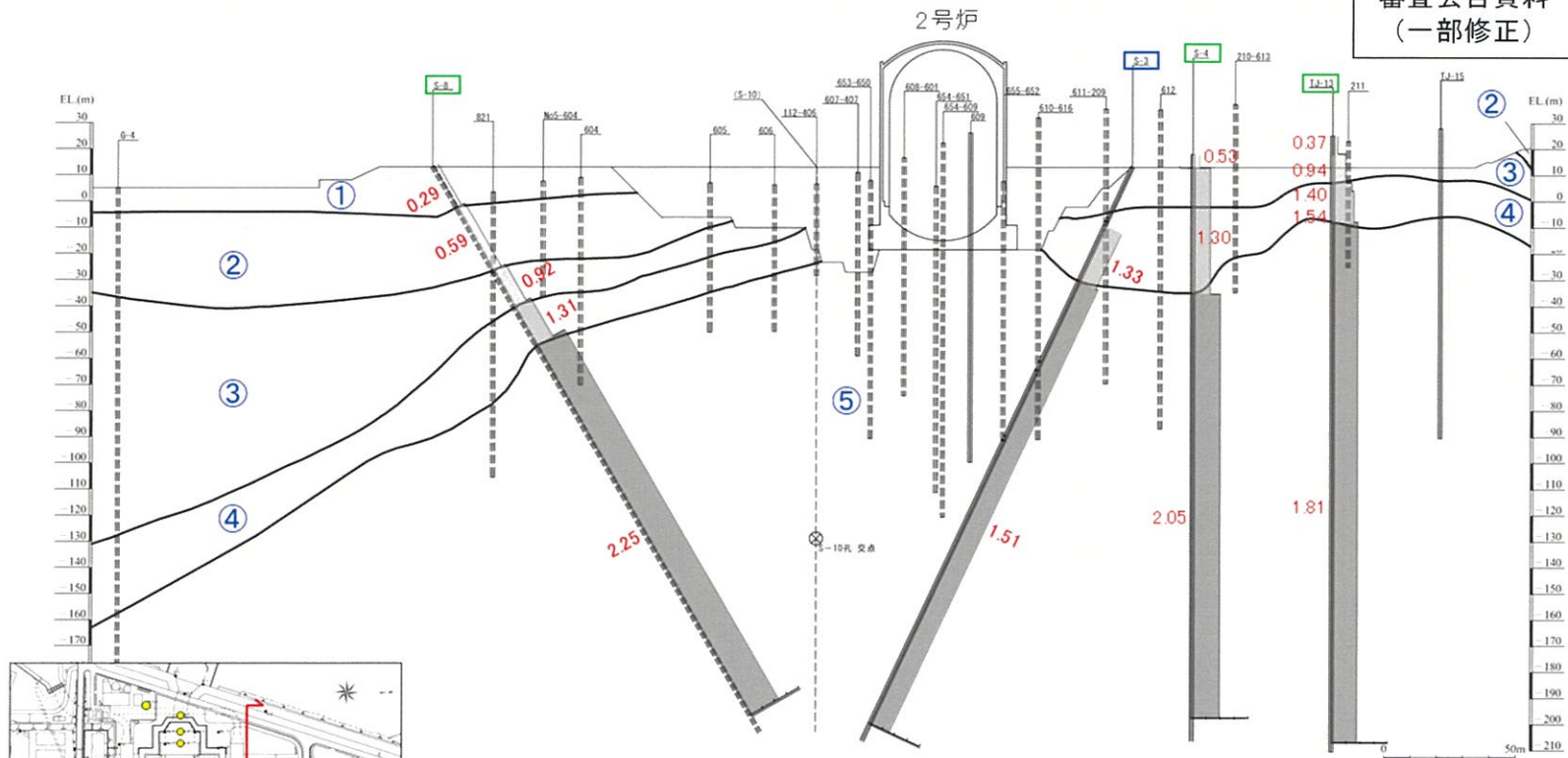
※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

【参考3】速度層断面による最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の検討

第1026回審査会合資料より抜粋

原子炉設置位置付近の速度層断面図（X₂-X₂'断面）

第5回
審査会合資料
(一部修正)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)
①	0.28
②	0.52
③	0.90
④	1.37
⑤	2.05

 サスペンション法
 ダウンホール法+サスペンション法
1.44 速度値Vs(km/s)

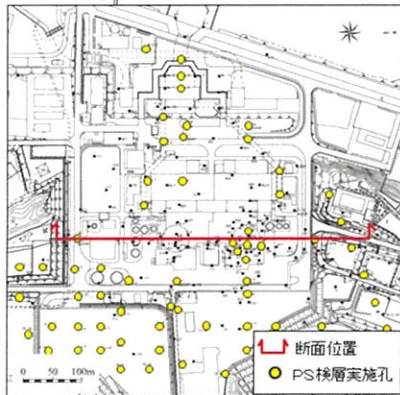
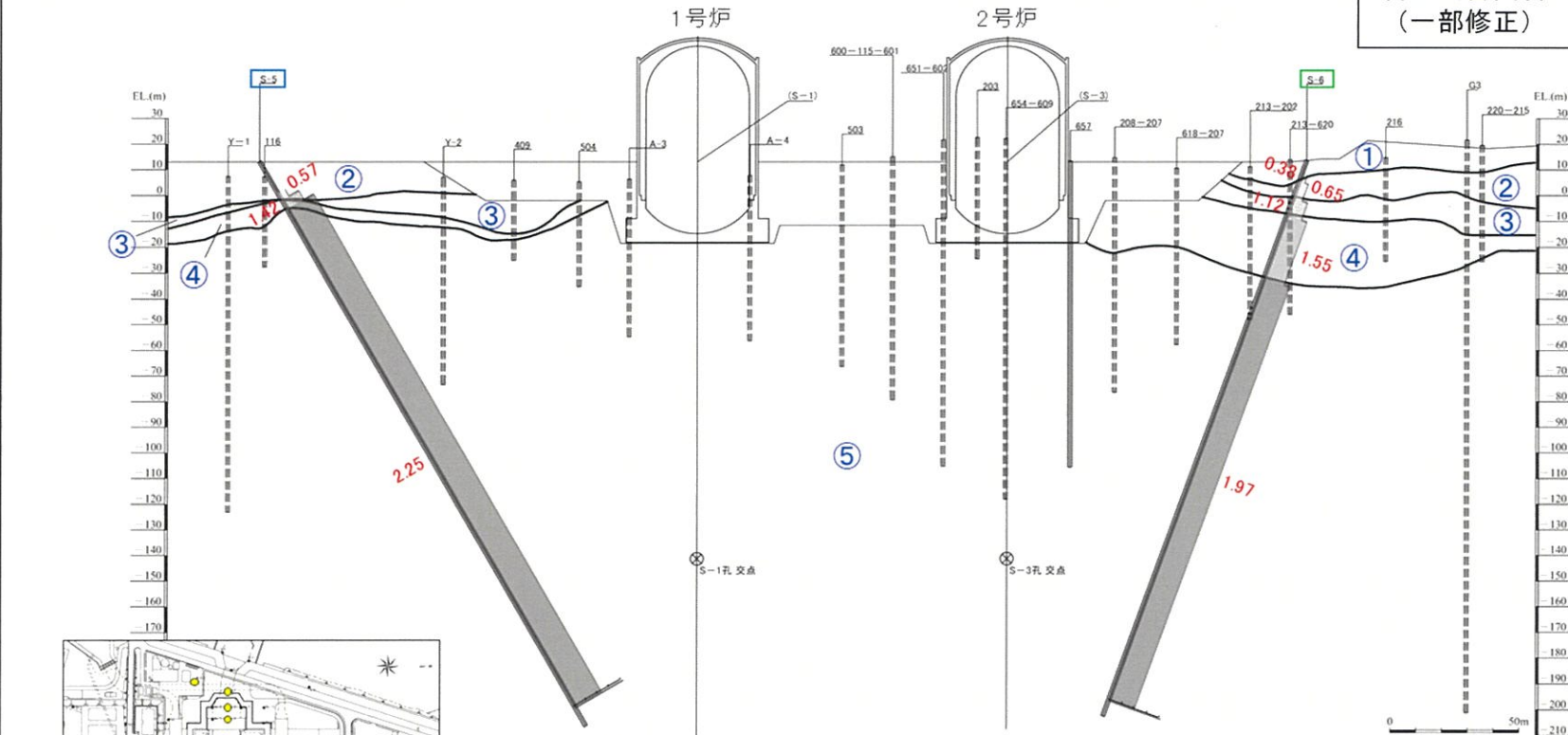
※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

【参考3】速度層断面による最深部地震計以深の地盤減衰（Q値）の検討

第1026回審査会合資料より抜粋

原子炉設置位置付近の速度層断面図（Y-Y'断面）

第5回
審査会合資料
(一部修正)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)
①	0.28
②	0.52
③	0.90
④	1.37
⑤	2.05

 サスペンション法
 ダウンホール法+サスペンション法
1.44 速度値Vs(km/s)

※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

【参考4】 経験的地盤増幅率による地下構造モデルの妥当性確認

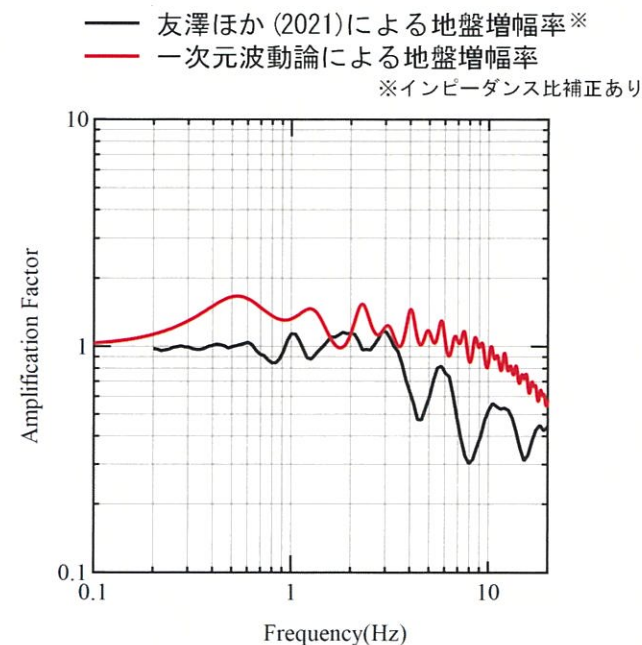
第1026回審査会合資料より抜粋（一部修正）

- 設定した地下構造モデルにおける $V_s=3010\text{m/s}$ 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)で推定された川内原子力発電所の地盤増幅率を比較した結果、友澤ほか(2021)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)	V_s (m/s)	Q値
11.0m	2.70	1500	12.5
-18.5m	2.70	1500	12.5
-28.5m	2.70	1600	12.5
-200m	2.70	1600	100
-480m	2.70	2150	200
-1018.5m	2.70	3010	200
-2018.5m	2.70	3240	300
-3018.5m	2.70	3500	300
-17018.5m	3.00	3800	500
-33018.5m	3.30	4300	500

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に層を追加



【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ 友澤ほか（2021）の概要

- 友澤ほか(2021)¹⁾では、九州地域で発生した地震の強震観測記録（K-NET、KiK-net及び硬質岩盤地点である玄海原子力発電所（GNK）と川内原子力発電所（SND））を収集し、九州地域の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性をブロックインバージョン解析⁸⁾により推定。
- その際に、九州地域では活火山が存在し、減衰構造が均質でない可能性も考えられるため、伝播経路特性の不均質性を考慮。（友澤ほか(2019b)⁸⁾では、火山帯周辺では伝播経路特性が複雑であることから、観測記録を震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性に分離する際には、伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することの重要性を指摘。）
- 検討に用いた観測記録は、以下の方針により選定（36地震・216観測点の3380記録）。
 - 震源深さ20km以内の内陸地殻内地震
 - Mj4.8以上の地震
（ただし、対象地震の地域の偏りを避けるため2016年熊本地震の震源域はMj5.5以上）
 - K-NET地表観測記録、KiK-net地中観測記録、川内原子力発電所地表観測記録、玄海原子力発電所地表観測記録を対象
 - 地表の最大加速度が三成分とも200cm/s²以下（地盤の非線形化の影響を避けるため）
 - 等価震源距離200km以内

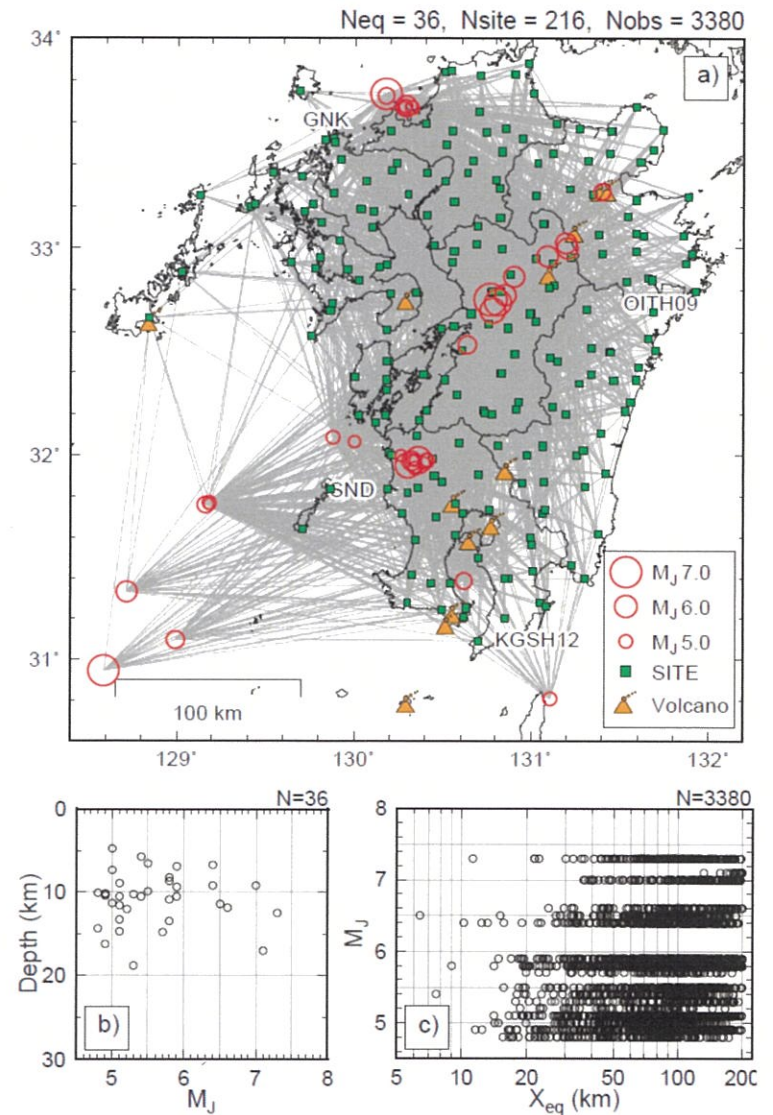


Fig.1 Dataset used in this study. a) Epicenters (○) and sites (■). Location of volcano is also shown. b) M_J vs focal depth, c) Equivalent hypocentral distance vs M_J

※友澤ほか（2021）より抜粋

【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ 検討に用いた地震

検討に用いた地震諸元（計36地震）

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

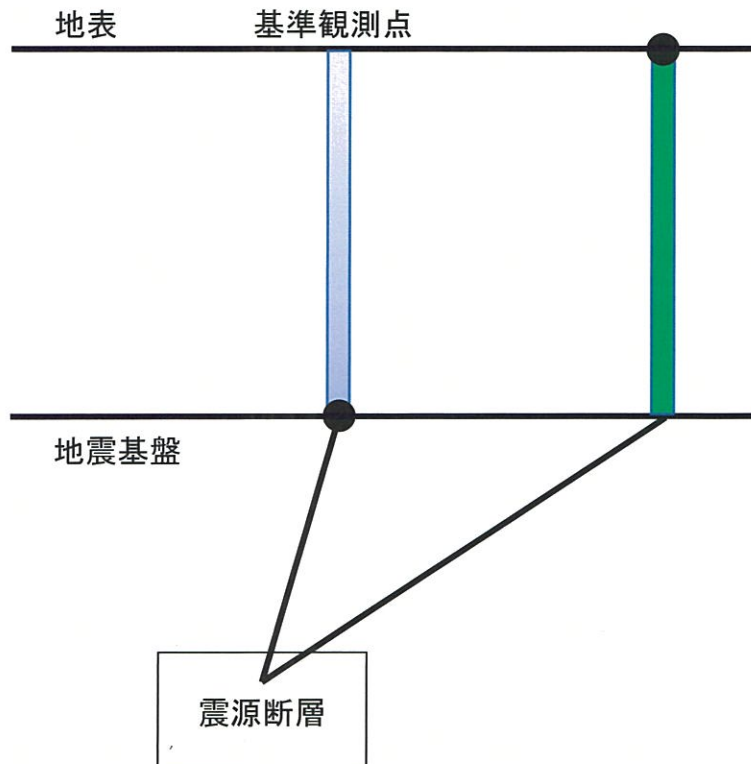
番号	地震名	発生日	Mj	震源深さ (km)
⑲	福岡県福岡地方	2005年5月2日	5.0	11.4
⑳	天草灘	2006年2月4日	5.1	11.6
㉑	天草灘	2012年8月17日	4.9	10.5
㉒	種子島近海	2015年8月17日	5.0	7.4
㉓	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	17.0
㉔	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	9.4
㉕	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	11.4
㉖	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	8.3
㉗	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	6.7
㉘	熊本県熊本地方	2016年4月16日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

【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ 一般的なスペクトルインバージョン解析

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

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



推定するパラメータ

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

既知パラメータ

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

【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ ブロックインバージョン解析

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

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

推定するパラメータ

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

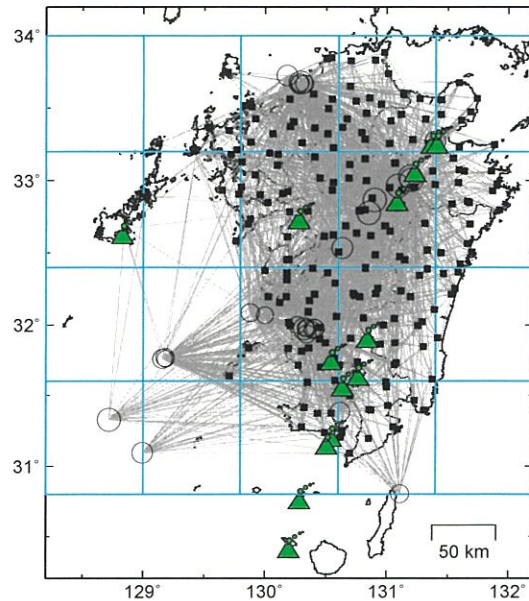
既知パラメータ

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

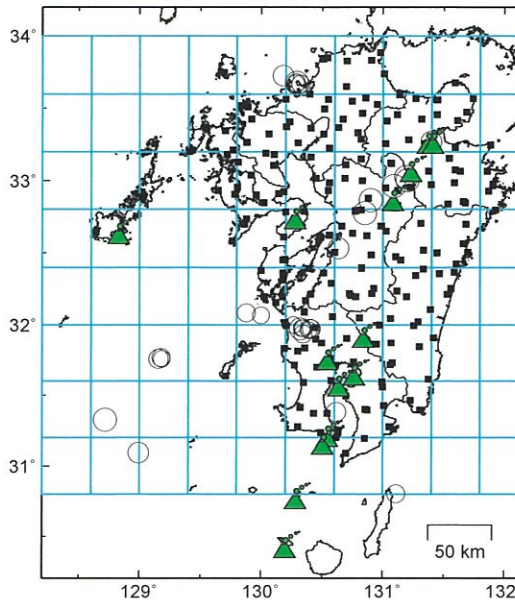
【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ 不均質減衰構造の推定

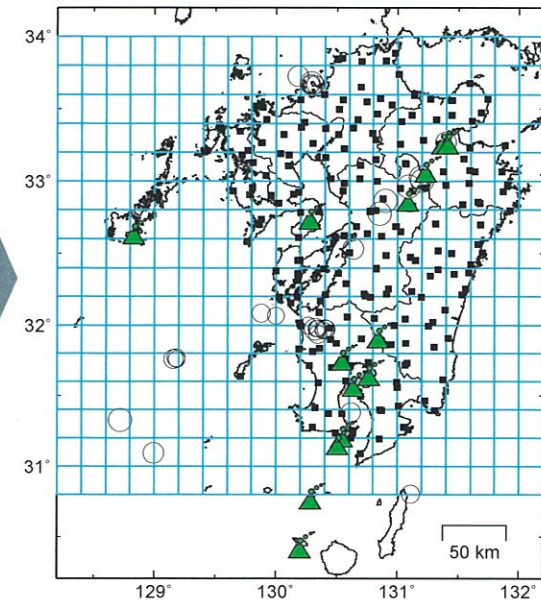
- 領域分割の推定においては、まずは、ブロックサイズを大きく設定し、広域な不均質減衰構造を求め、徐々に最小ブロックサイズを小さくして、より詳細な不均質減衰構造を推定。



①初期領域分割 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ として
最小ブロック $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ と設定



②左記の条件で推定した領域分割を初期値として
最小ブロック $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$ と設定

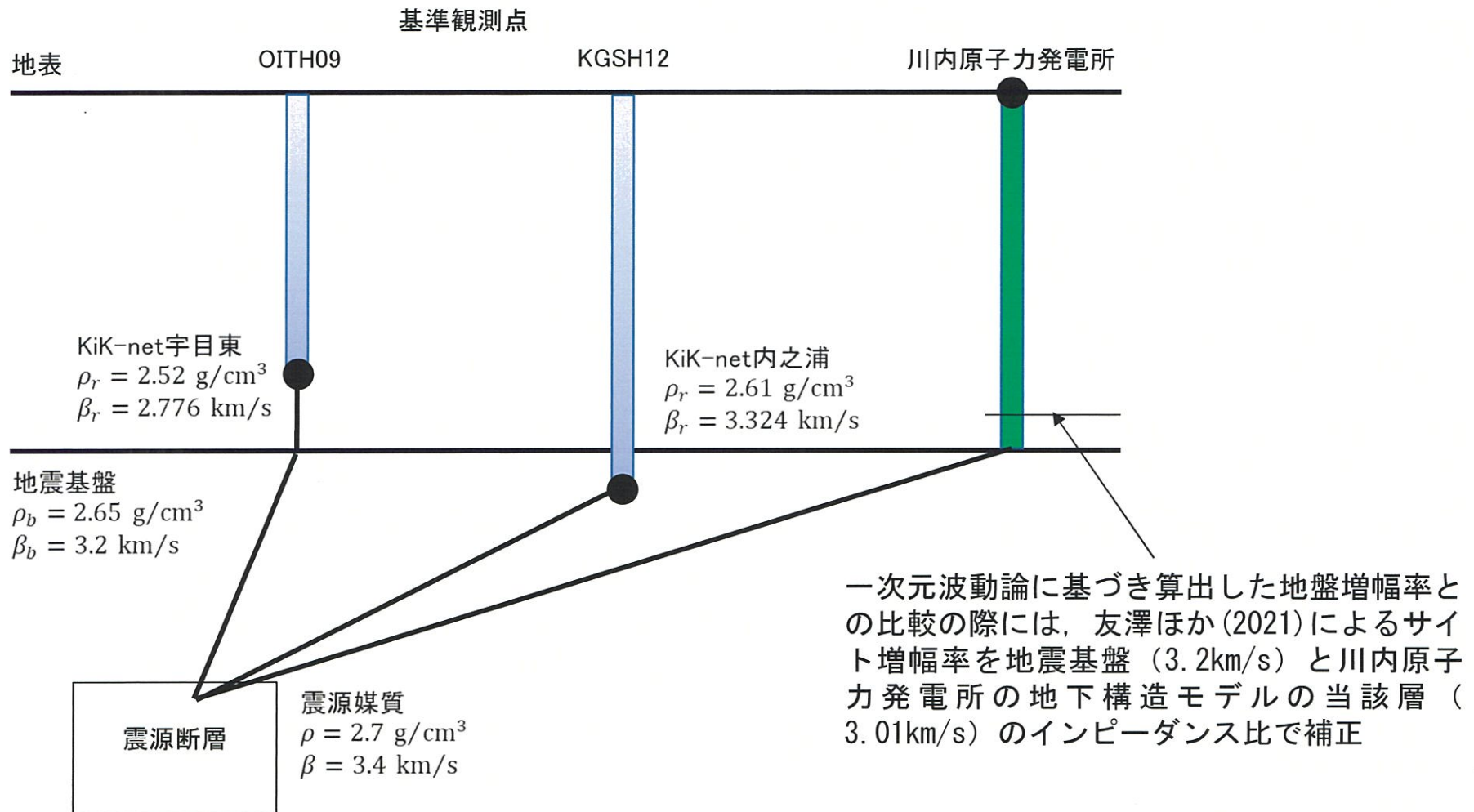


③左記の条件で推定した領域分割を初期値として
最小ブロック $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ と設定

【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ 基準観測点

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



【参考5】友澤ほか（2021）の概要

- 笠松ほか(2014)⁹⁾の最適化地盤モデルによると、基準観測点として選定したKiK-net宇目東(OITH09)とKiK-net内之浦(KGSH12)の地中観測点位置は、地震基盤と見なせるため、基準観測点に適していると判断。
- 笠松ほか(2014)では、観測点の地表／地中の伝達関数を算定し、それに鉛直入射を仮定した一次元波動論を当てはめる逆解析に基づいて最適化を検討。

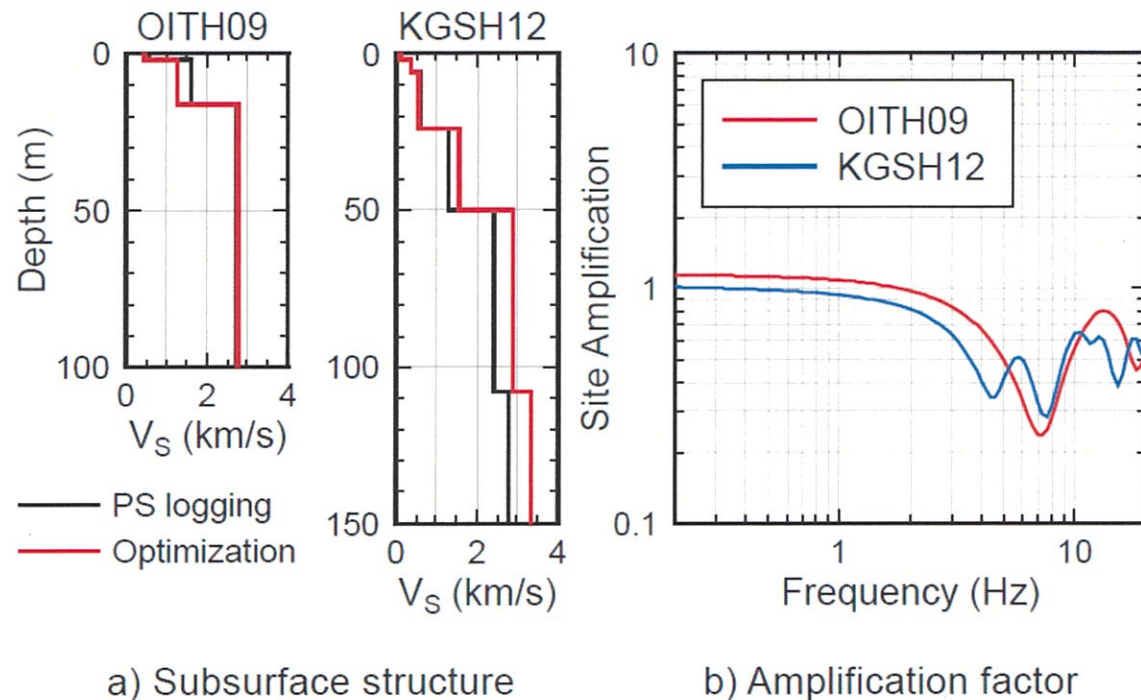


Fig. 2 Subsurface structure of reference stations and theoretical amplification factors as constraint condition

【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ 不均質減衰構造の推定結果

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

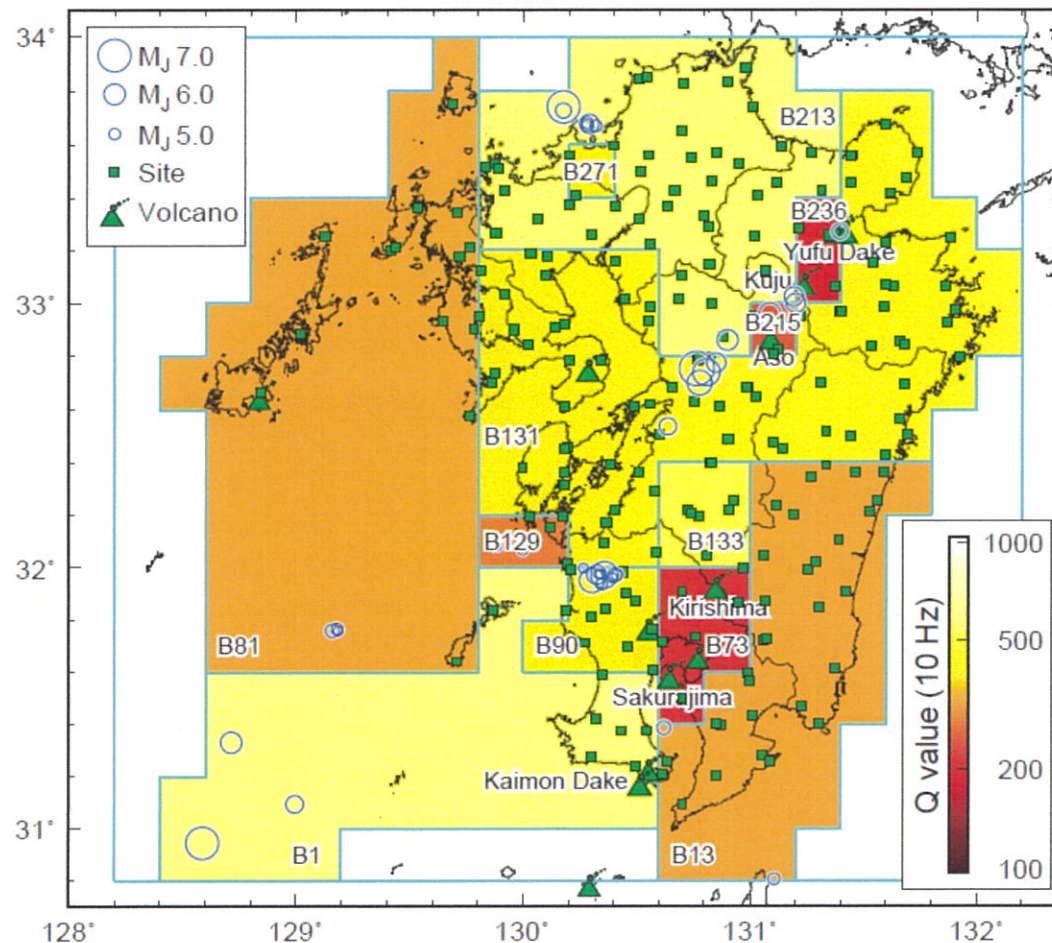


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure

※友澤ほか（2021）より抜粋

【参考5】友澤ほか（2021）の概要

■ サイト増幅率の推定結果

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

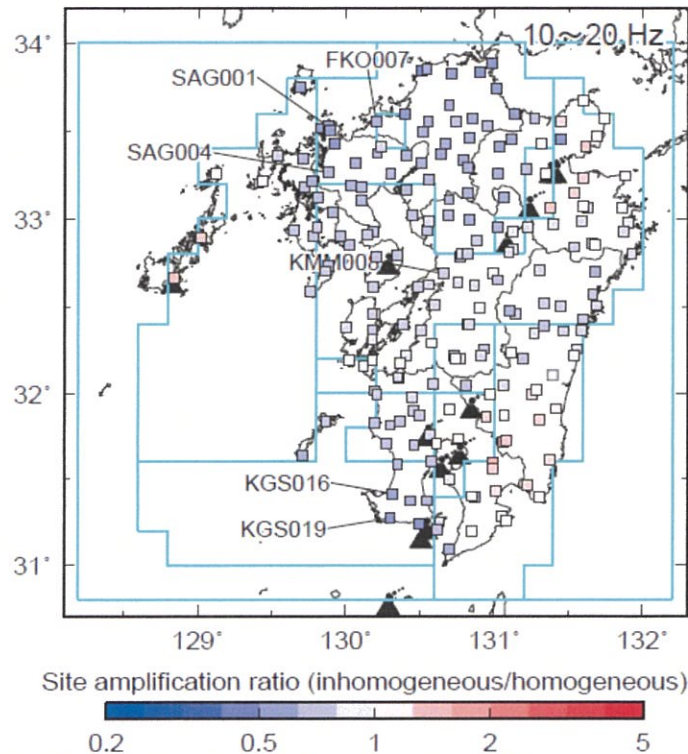


Fig.13 Spatial distribution of site amplification ratio

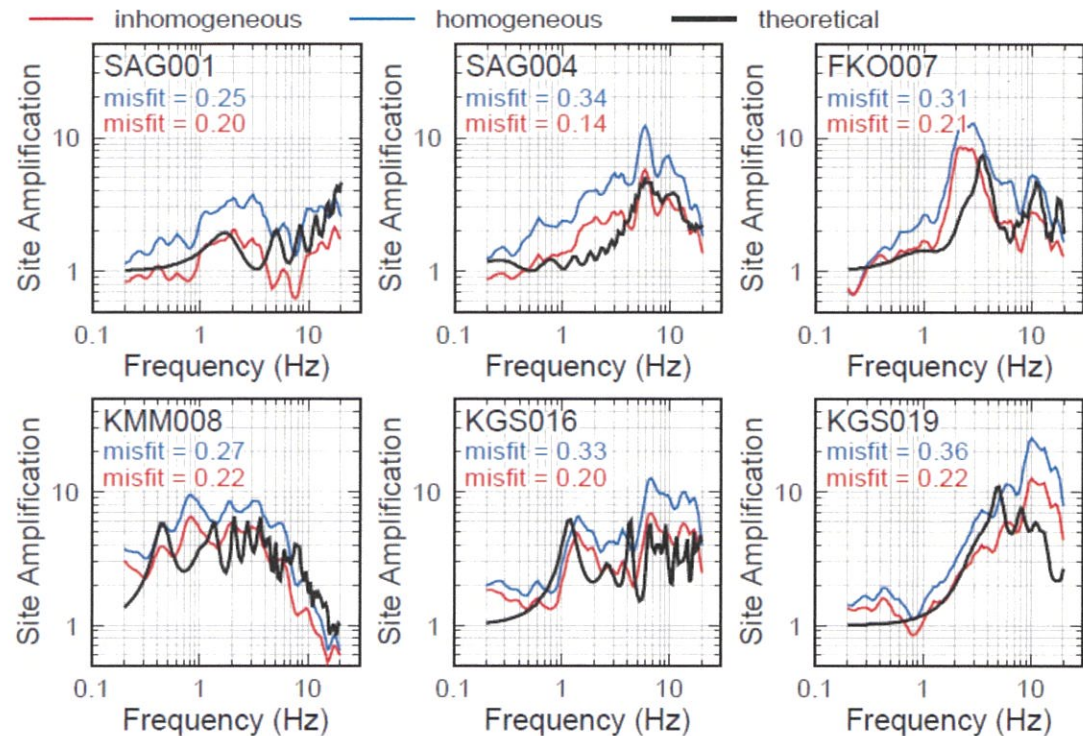


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

【参考5】 友澤ほか（2021）の概要

■ 回帰残差の比較

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

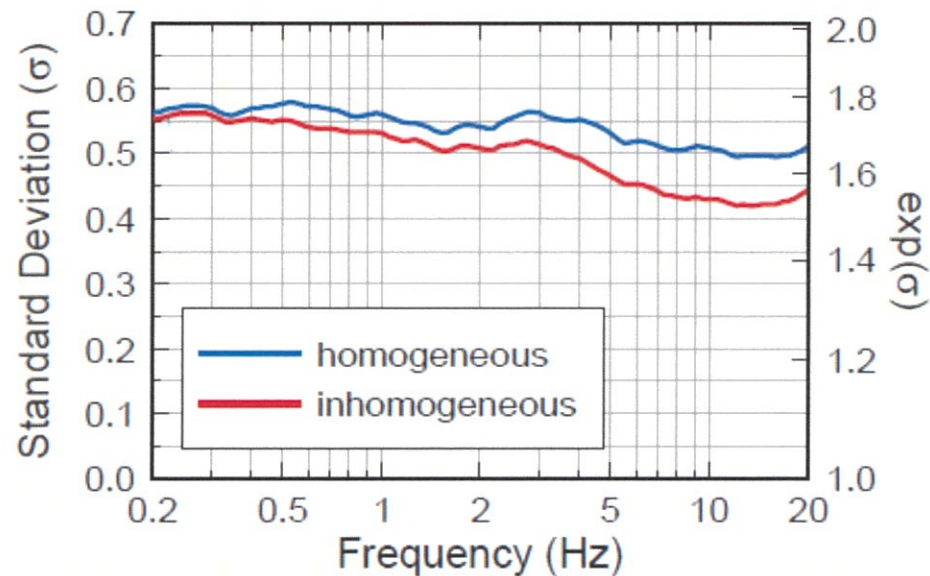


Fig.15 Comparison of standard deviation

参考文献

- 1) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎(2021):九州地域の震源特性・不均質伝播経路特性・サイト増幅特性の推定、強震観測記録のブロックインバージョン解析に基づく検討、日本建築学会構造系論文集、第86巻、第790号、1597-1606、2021年12月。
- 2) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎(2019a):九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定(その1) ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、21238、2019年9月。
- 3) 中尾隆、本村一成、赤司二郎、友澤裕介、加藤研一(2019a):九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定(その2) 距離減衰特性の方位性、サイト増幅特性、震源特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、21239、2019年9月。
- 4) 佐藤浩章、岡田哲実(2012):地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その5) -実岩盤における減衰付加効果の解明のための岩石コアの減衰測定-、電力中央研究所報告、N11063、2012年5月
- 5) 地盤工学会(2013):地盤の弾性波速度検層方法、JGS1122-2013、2013年3月
- 6) 信岡大、東宏幸、大場政章(2012):PS検層の手法を用いた地盤減衰特性(Q値)の評価、物理探査、第6巻、第1&2号、79-90、2012年
- 7) 地盤工学会(2020):岩石の弾性波速度計測方法、JGS2564-2020、2020年12月
- 8) 友澤裕介、加藤研一、野尻揮一郎(2019b):地震動の伝播経路特性の領域分割に着目した不均質減衰構造・震源特性・サイト増幅特性の推定 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域を対象とした検討、日本建築学会構造系論文集、第84巻、第756号、171-181、2019年2月。
- 9) 笠松健太郎、池浦友則、岡崎敦(2014):KiK-net地点における応答スペクトルのはざとり倍率、日本建築学会大会学術講演梗概集、21207、2014年9月。