

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5月20日
九州電力株式会社

1. これまでの審査会合におけるコメント

| 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 | |
| 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 | |
| 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。 | | 資料2-2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) | 次回以降説明予定 | |
| 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 | | 地下構造 モデル 設定方針: P2～15 | コメント回答①: P16～30 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。 | | コメント回答: 次回以降説明予定 | |
| 10 | 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。 | | 次回以降説明予定 | |

【コメントNo. 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。

【コメントNo. 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。



- ・最新の知見、観測記録を取り入れた地盤減衰及び速度構造の検討による新たな地下構造モデルの設定方針について説明。
- ・今回の設置変更許可申請時(令和3年4月26日)からの変更点は下記の通り。
 - －地盤減衰の検討に加えて、標準応答スペクトルが定義される地震基盤相当面($V_s=2200\text{m/s}$ 以上)を設定するため、速度構造を検討。
 - －既許可の地下構造モデルを、新たな地下構造モデルへ見直し。

2.1 新たな地下構造モデルの設定方針(1/3)

◆地下構造モデル評価の基本スタンス

【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

・今回、最新の知見・観測記録を取り入れ、精度・信頼性を向上させた評価により精緻化し、新たな地下構造モデルを設定。

◆今回新たに設定する地下構造モデル

- ・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が、既許可の地下構造モデルは、長周期帯における理論的手法による評価を目的として設定していたため、短周期帯も含む地震動評価を目的として、地盤減衰を検討。
- ・標準応答スペクトルが定義される地震基盤相当面($V_s=2200\text{m/s}$ 以上)を設定するため、速度構造を検討。
- ・今回の検討では、次頁に示す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を整理して取り入れ精緻化し、新たな地下構造モデルを設定。
- ・既許可の地下構造モデルを、新たな地下構造モデルへ見直し。

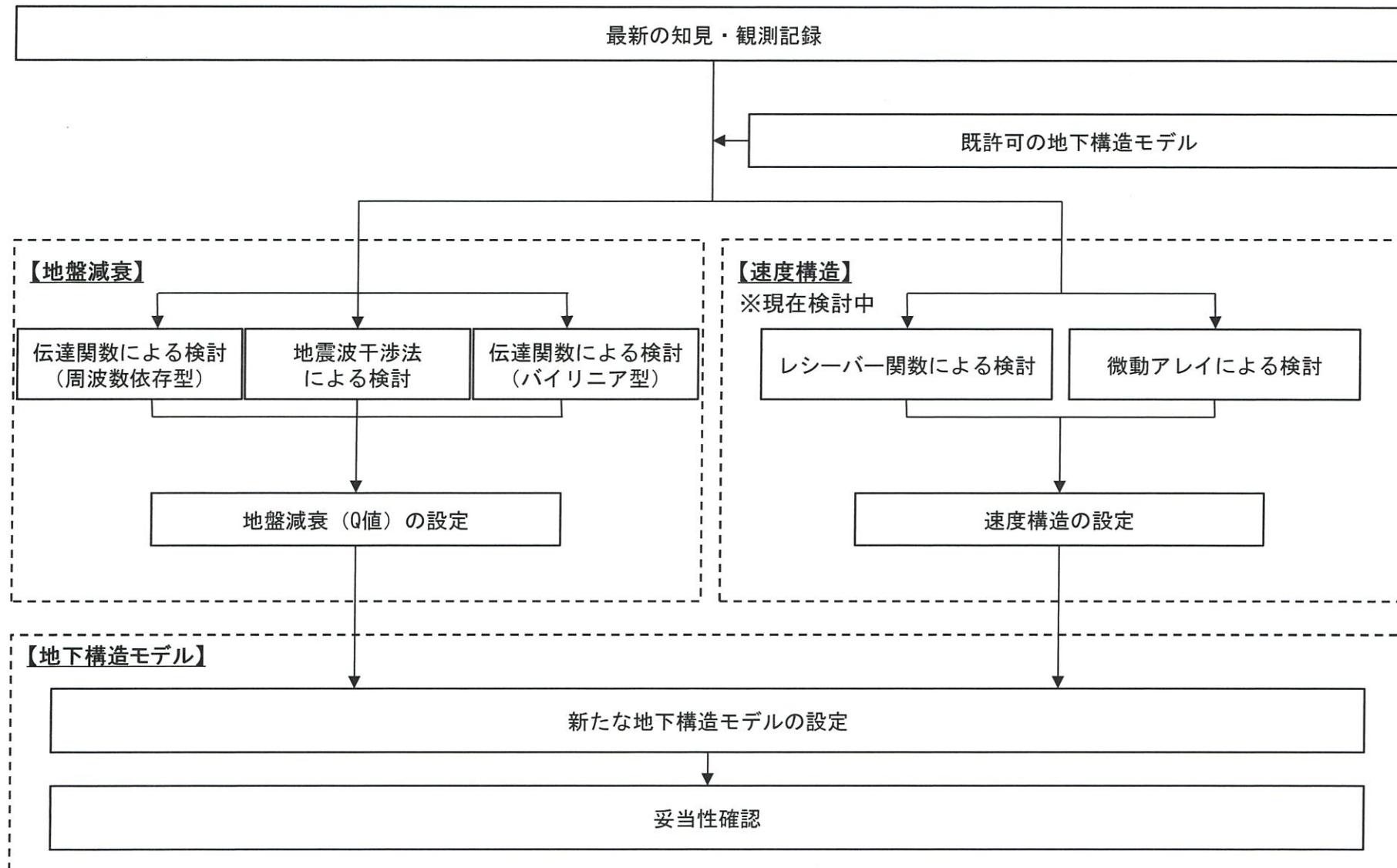
2.1 新たな地下構造モデルの設定方針(2/3)

◆今回取り入れる新たな知見や考え方

| 項目 | 新たな知見 | 新たな考え方 | 新たな地下構造モデルの設定 |
|------|------------------------------------|--|--|
| 地盤減衰 | 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 |
| 速度構造 | 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レシーバー関数により速度構造を検討し、地震基盤相当面 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層を設定 | <ul style="list-style-type: none"> ・レシーバー関数による検討 ・速度構造検討の多面化 |
| | 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妥当性を確認 | <ul style="list-style-type: none"> ・設定した速度構造の確認の多面化 |

2.1 新たな地下構造モデルの設定方針(3/3)

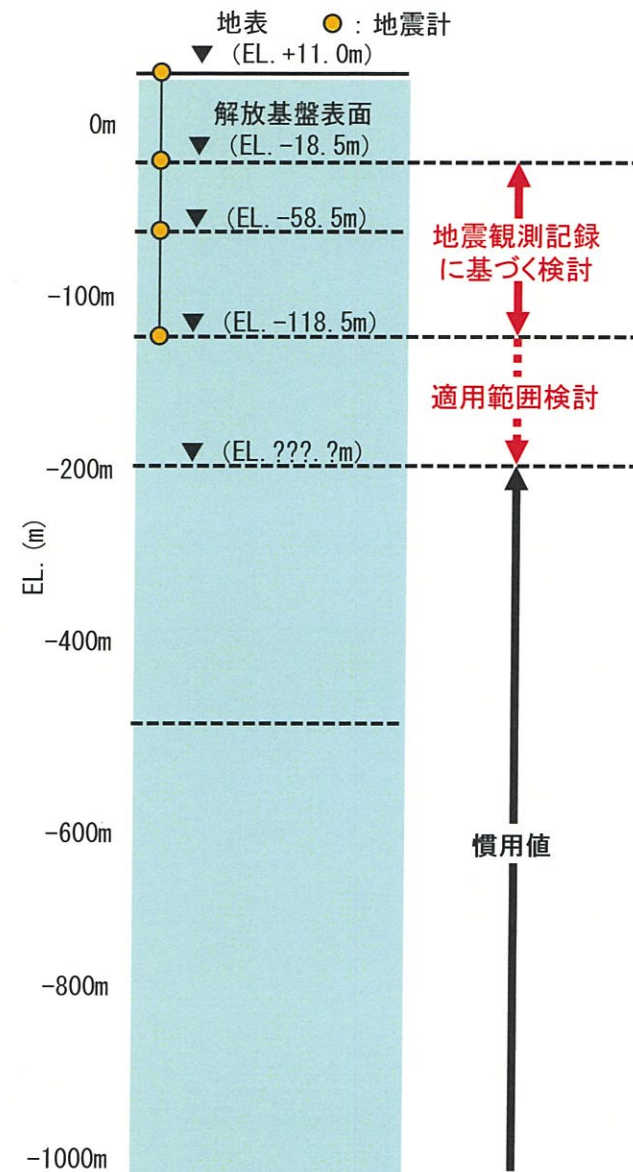
◆新たな地下構造モデルの検討の流れ



2.2 新たな地下構造モデルにおける地盤減衰(Q値)の検討方針(1/2)

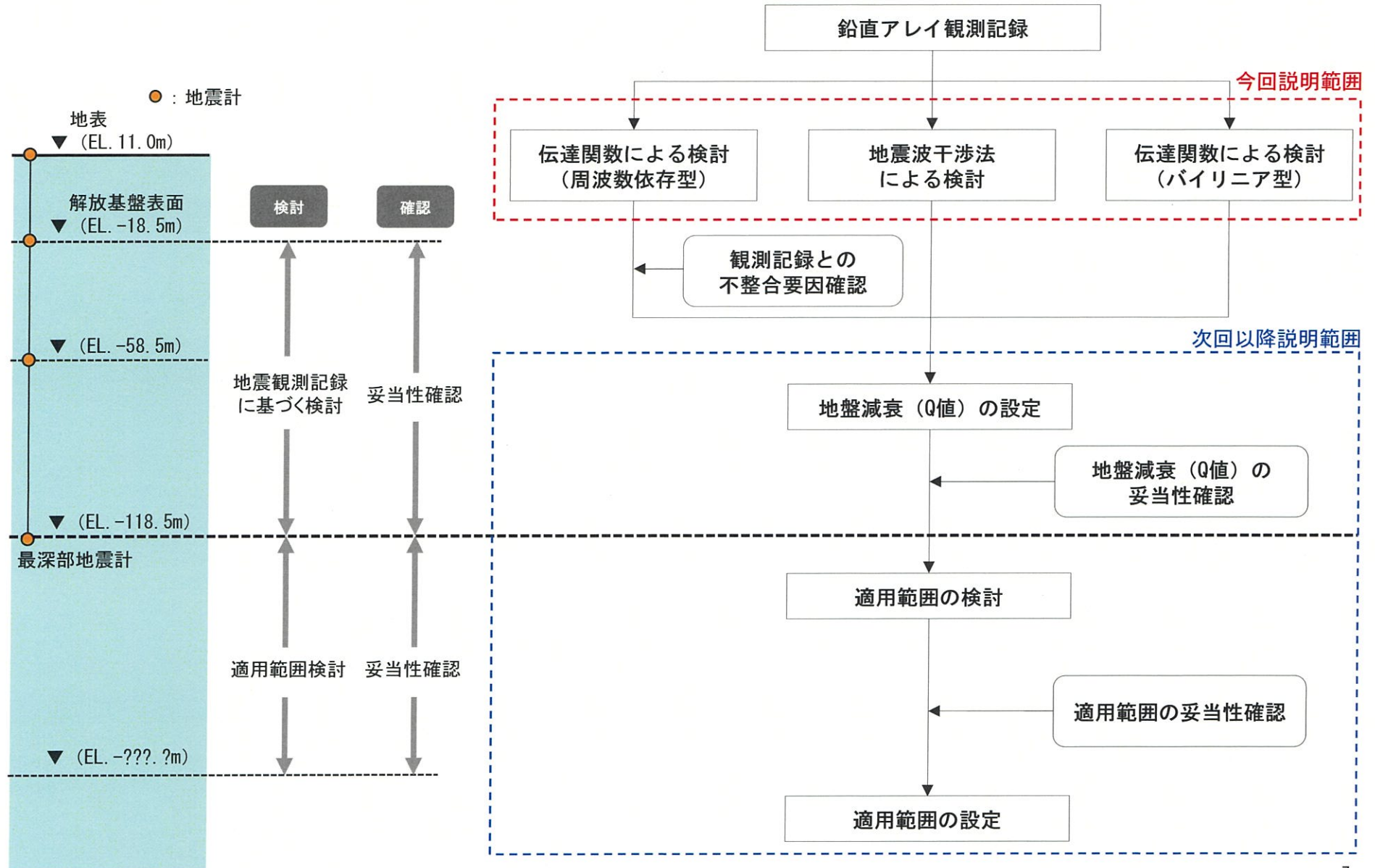
○標準応答スペクトルを考慮した評価に用いる地下構造モデル

- ・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ており、今回の地下構造モデルは、短周期帯も含む地震動評価への適用を目的に設定。
 - 一般的に短周期帯では、長周期帯に比べ地盤減衰(Q値)が地震動評価結果に与える影響が大きい。
- ・解放基盤表面から最深部地震計までの範囲について、蓄積された地震観測記録を用い、複数の手法により地盤減衰(Q値)を検討。
- ・複数の手法で算出した地盤減衰(Q値)に対して、それぞれの手法に含まれる不確かさを考慮し、地盤減衰(Q値)を設定。
- ・最深部地震計以深の地盤減衰(Q値)については、解放基盤表面から最深部地震計までの範囲で設定した地盤減衰(Q値)の適用範囲を検討し、設定。



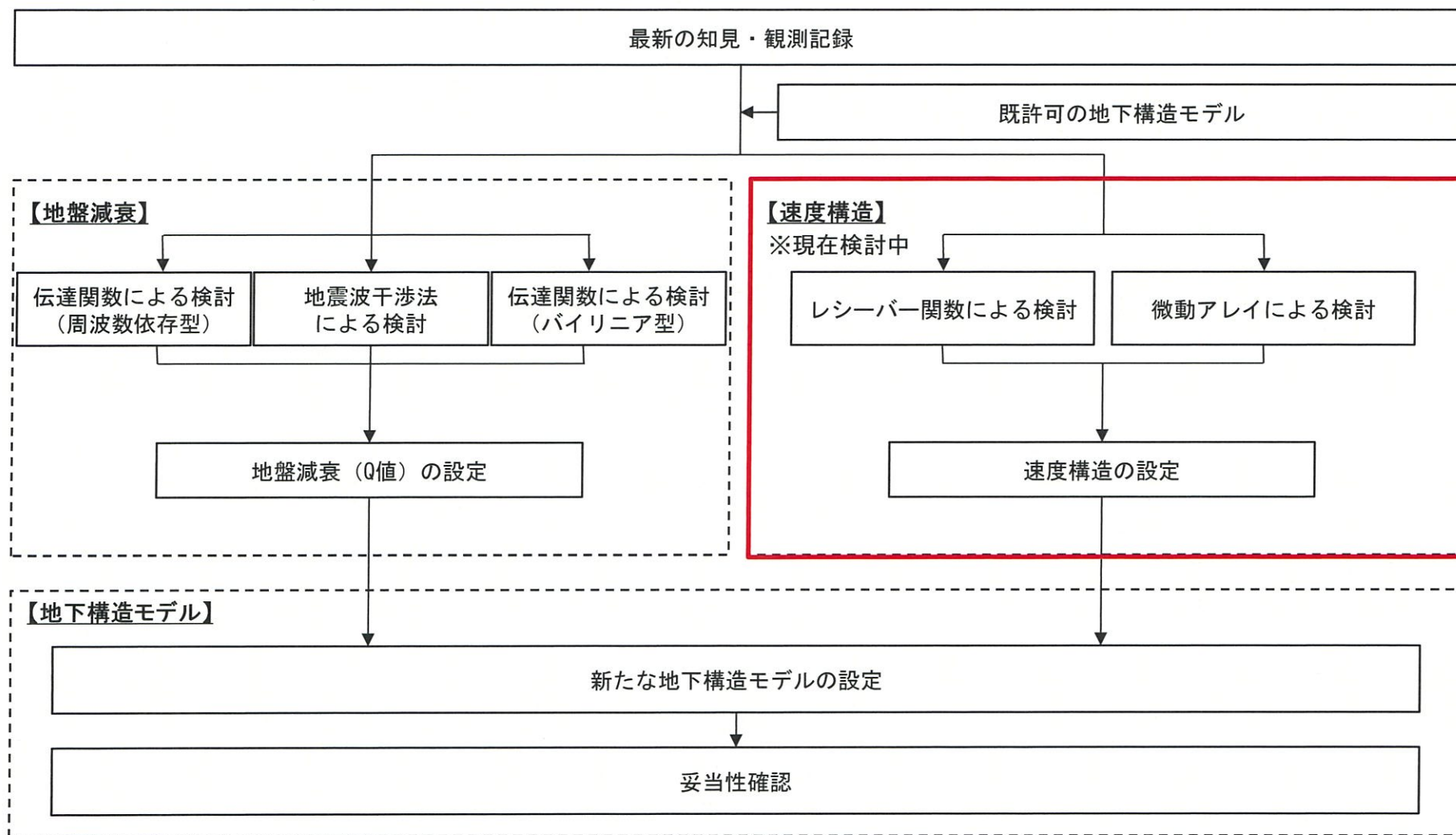
2.2 新たな地下構造モデルにおける地盤減衰(Q値)の検討方針(2/2)

○地盤減衰 (Q値) の設定にあたり、以下のフローに従い検討を実施



2.3 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(1/4)

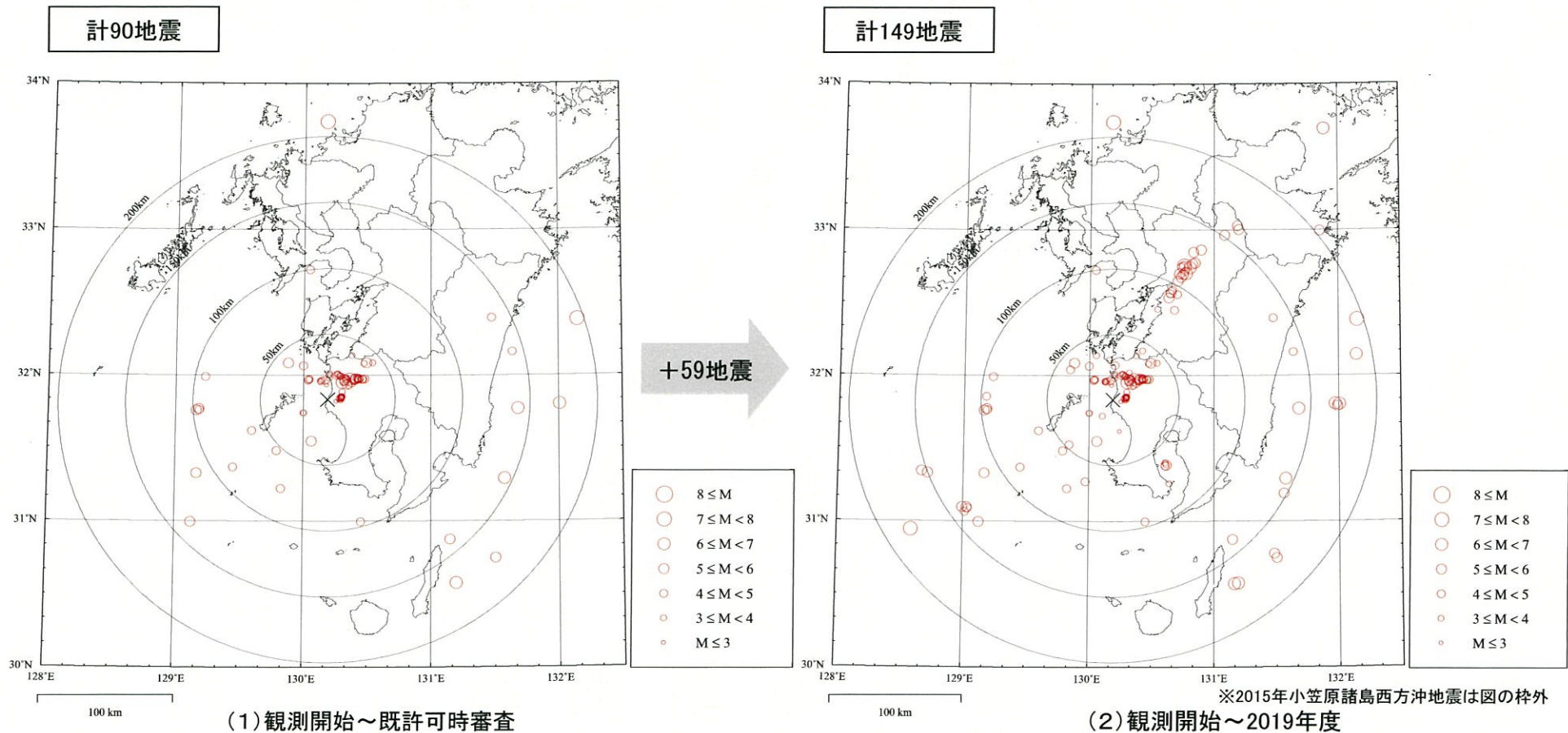
- ・標準応答スペクトルは、 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面で定義されるため、速度構造を検討。
- ・検討にあたっては、既許可時審査以降に蓄積された地震観測記録を基に、浅部から深部地盤を対象にレシーバー関数を用いた検討を実施。
- ・微動アレイなどの既許可で実施した検討結果を踏まえて速度構造を検討。



2.3 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(2/4)

◆既許可以降に取得した敷地地盤の鉛直アレイ観測記録

- ・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)
- ・敷地の浅部から深部地盤までの情報を含んだ地表の地震観測記録を用いてレシーバー関数による検討を実施。



2.3 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(3/4)

◆レシーバー関数による検討に用いる地震の選定

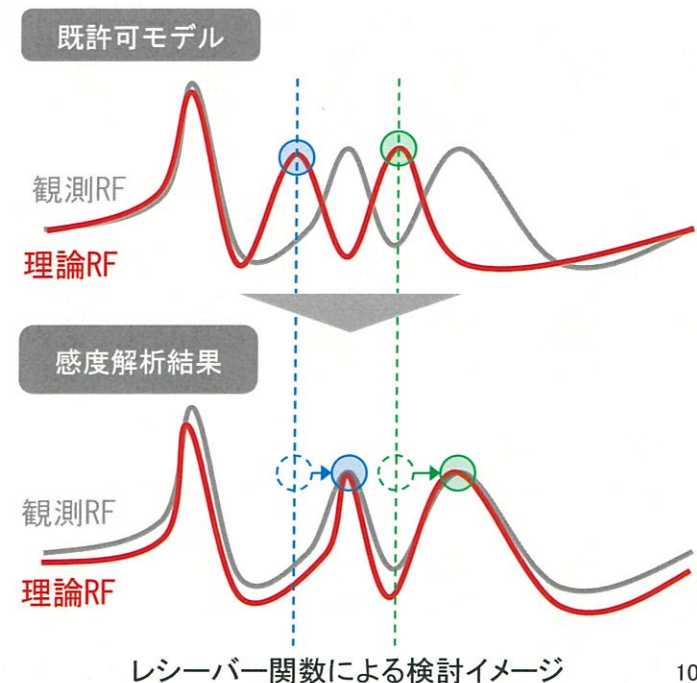
- ・ばらつきの少ない観測記録群の平均値をターゲットとすることで、精度の高い地下構造モデルを評価。
- ・検討対象地震については、敷地地盤における計149地震の地震観測記録の中から、下記の方針で選定する。

【検討対象地震の選定方針】

- ・発生様式: 内陸地殻内地震
- ・震央距離: 記録の精度が確保できる地震
- ・地震規模: 記録の精度が確保できる地震
- ・発生位置: 入射角等が概ね等しい発生位置の地震
- ・観測記録: P波初動が観測され、明確に確認できる地震、かつPS時間が確保された地震

◆レシーバー関数による検討の諸条件

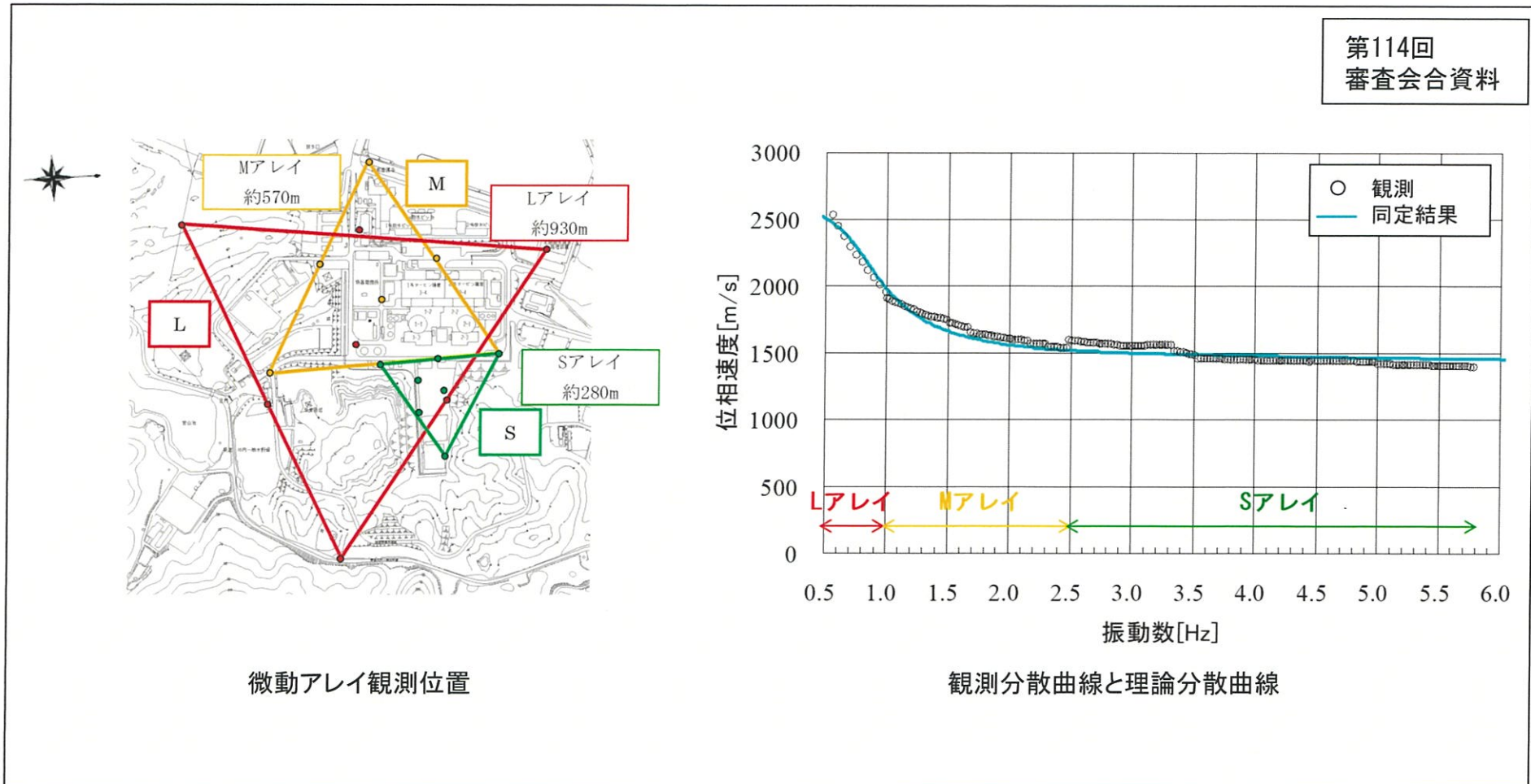
- ・速度構造の検討範囲は感度解析結果を基に設定。
 - 既許可の地下構造モデルを参照し、全層を対象とした感度解析を実施。
 - 感度解析結果と既許可の地下構造モデルを比較して、検討範囲を設定。
- ・探索パラメータの初期値は、既許可の地下構造モデルを参照して設定。
- ・設定した速度構造による理論地盤増幅率と友澤ほか(2019)^{1),2)}に基づく地盤増幅率との比較から、設定した速度構造の妥当性を検証。



2.3 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(4/4)

◆微動アレイによる検討

- ・レシーバー関数による検討に加えて、既許可において実施した微動アレイ観測の観測分散曲線との整合性を確認し検討。



2.4 既許可の地震動評価について(1/2)

- 既許可では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動 S_s-1 及び「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動 S_s-2 を策定。また、免震構造施設を対象とした基準地震動 S_s-L を策定。

◆「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」

① 応答スペクトルに基づく地震動評価

- ・ Noda et al. (2002)³⁾の手法により、解放基盤表面 ($V_s=1500\text{m/s}$) における地震動を評価。
- ・ 「応答スペクトルに基づく地震動評価」においては、地下構造モデルを使用していない。

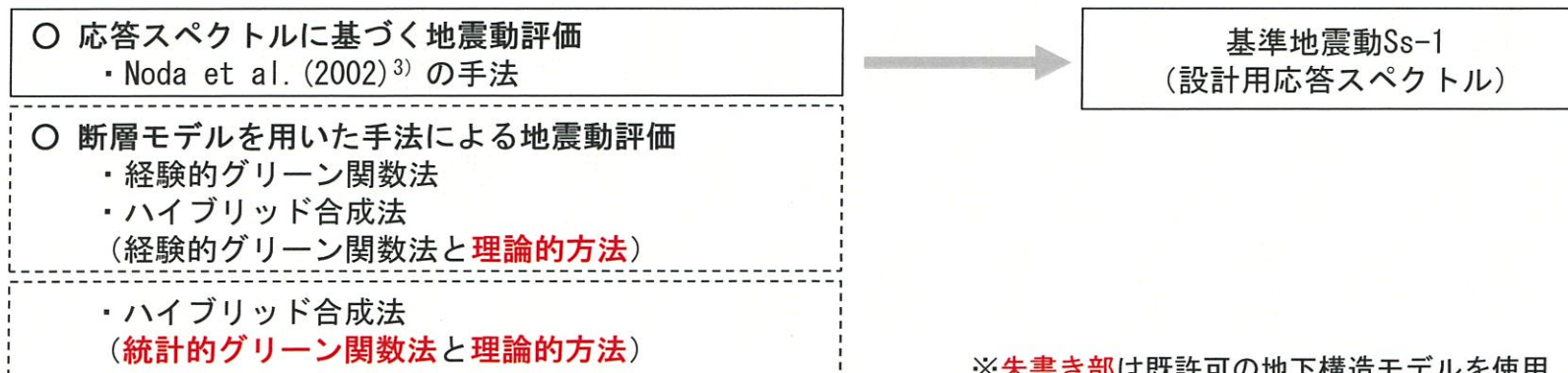
② 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・ 敷地地盤で得られた観測記録を要素地震として用いた経験的グリーン関数法により解放基盤表面における地震動を評価。
- ・ 長周期帯は理論的方法により解放基盤表面の地震動を評価を実施し、短周期帯の経験的グリーン関数法による地震動評価結果を周期0.8秒で接続したハイブリッド合成法による評価を実施。

(経験的グリーン関数法の妥当性検証として統計的グリーン関数法の評価を実施)

- ・ 長周期帯における理論的方法への適用を目的に設定した解放基盤表面以深の地下構造モデルを使用。

- ・ 検討用地震の「応答スペクトルに基づく手法」による地震動評価結果を包絡して、基準地震動 S_s-1 を策定。
- ・ 基準地震動 S_s-1 は、「断層モデルを用いた手法」による地震動評価結果を上回ることから、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の基準地震動は、基準地震動 S_s-1 で代表。
- ・ **基準地震動 S_s-1 は、地下構造モデルを使用していない。**



※朱書き部は既許可の地下構造モデルを使用

2.4 既許可の地震動評価について(2/2)

◆「震源を特定せず策定する地震動」

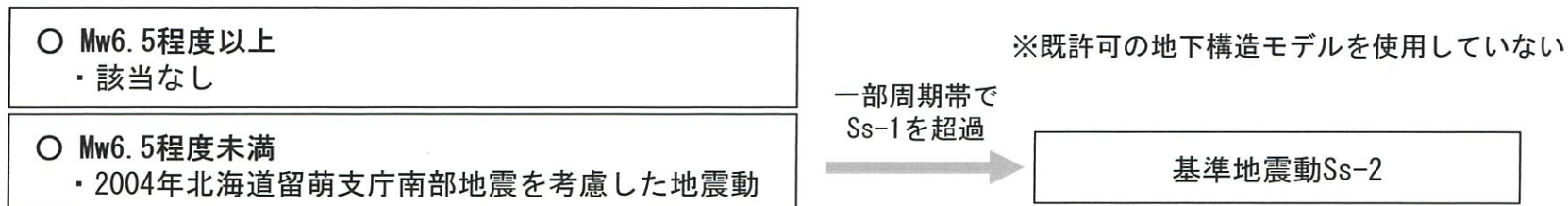
①Mw6.5程度以上

- ・2000年鳥取県西部地震及び2008年岩手・宮城内陸地震の2つの地震の震源域周辺は、川内原子力発電所周辺と地質学的・地震学的背景が異なり、同様の地震は発生しないと考えられるため、該当なし。

②Mw6.5程度未満

- ・2004年北海道留萌支庁南部地震の震源近傍のK-NET港町観測点の解放基盤波に当社独自の検討から余裕を持たせた地震動を設定。設定した地震動が、一部の周期帯で基準地震動Ss-1を上回ることから、基準地震動Ss-2として策定。
- ・K-NET港町観測点の解放基盤波 ($V_s=938\text{m/s}$ におけるはぎとり波) を、川内原子力発電所の解放基盤表面 ($V_s=1500\text{m/s}$) の地震動として採用。
- ・「震源を特定せず策定する地震動」においては、地下構造モデルを使用していない。

- ・基準地震動Ss-2は、地下構造モデルを使用していない。



◆「免震構造施設を対象とした地震動」

- ・免震構造施設を対象とした基準地震動について、免震構造の周波数特性に着目した地震動評価を実施し基準地震動Ss-Lを策定。今後、免震構造施設を設置する際に使用。
- ・琉球海溝におけるプレート間地震を対象に、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において統計的グリーン関数法及び理論的方法による地震動評価結果をハイブリッド合成法により評価。
- ・「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において解放基盤表面以深の地下構造モデルを使用。

- ・基準地震動Ss-Lは、地下構造モデルを使用していない。

- ・既許可において地下構造モデルを用いた地震動評価については、新たな地下構造モデルに見直し再評価を実施する。
- ・再評価した「断層モデルを用いた手法」による地震動評価結果が、基準地震動Ss-1及びSs-L（設計用応答スペクトル）に包絡され、現行の基準地震動が変わらないことを確認する。

(参考) 既許可の地下構造モデル

既許可の地下構造モデル（長周期帯における理論的手法による評価で使用）

| EL. | 層上面 (km) | 密度 ρ (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | Q 値 | 設定根拠 | |
|------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----|---------------------------------|-------------------|
| | | | | | | Vs、Vp | Q値 |
| 解放基盤表面 -18.5m | 0.0 | 2.70 | 1500 | 3200 | 100 | 試掘坑内 弾性波試験 | 慣用値 (Vs/15~10) |
| -28.5m | -0.01 | 2.70 | 1600 | 3700 | 100 | 鉛直アレイ及び微動アレイ の速度構造を基に設定 | |
| -480m | -0.462 | 2.70 | 2150 | 4400 | 200 | 微動アレイの速度構造を 基に設定 | |
| -1018.5m | -1.0 | 2.70 | 3010 | 5200 | 200 | 宮腰ほか(2004) ⁴⁾ | |
| -2018.5m | -2.0 | 2.70 | 3240 | 5600 | 300 | | |
| -3018.5m | -3.0 | 2.70 | 3500 | 5900 | 300 | | |
| -17018.5m | -17.0 | 3.00 | 3800 | 6600 | 500 | 地震調査委員会 (2003) ⁵⁾ | |
| -33018.5m | -33.0 | 3.30 | 4300 | 7600 | 500 | | |

2.5 今後のスケジュール

| | 2022. 4 | 5 | 6 | ... |
|--------------------------|---------------------|------------------------|---|--|
| モデル位置づけ (コメントNo. 7) | | | | ▽資料提出(コメント回答) |
| 地盤減衰 (コメントNo. 8) | | ▽審査会合 (設定方針・コメント回答) | | ▽資料提出(コメント回答) |
| 地震基盤相当面 (コメントNo. 9) | | ▽審査会合 (設定方針) | | ▽資料提出(コメント回答) |
| | レシーバー関数等の解析により新たに設定 | | | |
| 変はんれい岩 (コメントNo. 6) | | ▽審査会合 (コメント回答) | | |
| 模擬地震波 (コメントNo. 4, 10) | | | | 資料提出(コメント回答)▽ 模擬地震波作成 <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 5px auto;"></div> |

【コメントNo. 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。

- ・ 15Hz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
- ・ 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
- ・ 地盤減衰の不確かさの考え方



・15Hz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について、地盤減衰(Q値)の高周波数帯における上限値に関する知見等を基に検討。

※その他については、次回以降説明予定。

3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(1/7)

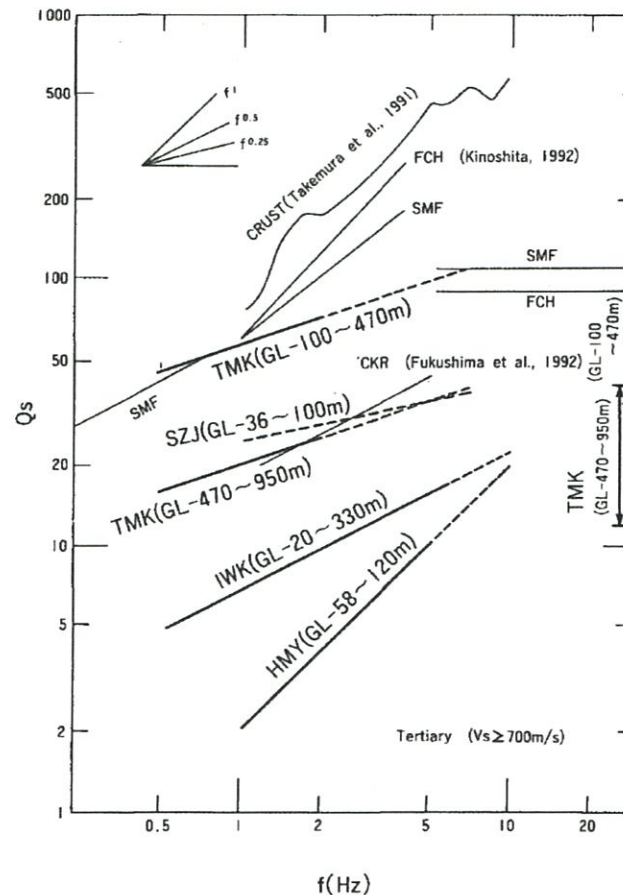
- 地盤減衰(Q値)は、一般に周波数依存が認められ、高周波数になるほど地盤減衰(Q値)が増加する性質があるが、ある周波数で上限が存在すると考えられる。
- 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見を下表の通り整理。

| 文献 | 概要 |
|--------------------------------------|--|
| 武村ほか(1993) ⁶⁾ | <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) ⁷⁾ | <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)等)を踏まえ、減衰定数を一定として設定 |
| 木下・大池(2002) ⁸⁾ | <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) ⁹⁾ | <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) ¹⁰⁾ | <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) ¹¹⁾ | <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)¹²⁾)とも整合している。 |

3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(2/7)

◆武村ほか(1993)⁶⁾の概要

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



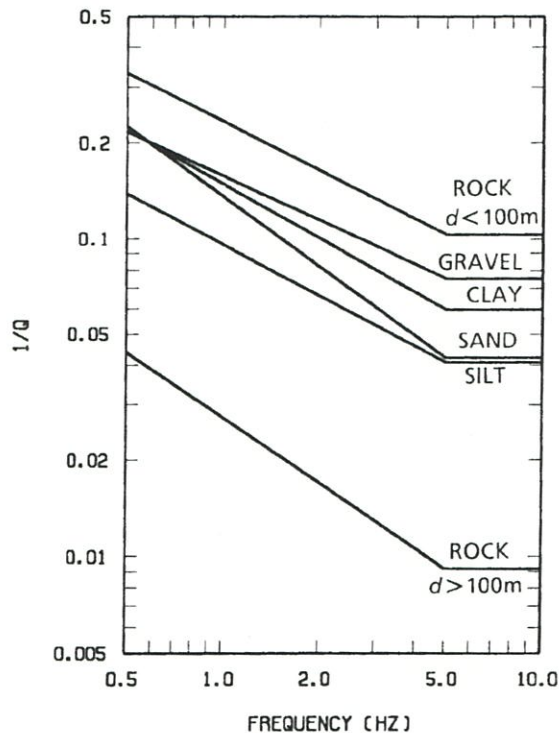
Vs=700m/s以上の深部におけるQ値の周波数依存性

武村ほか(1993)より抜粋

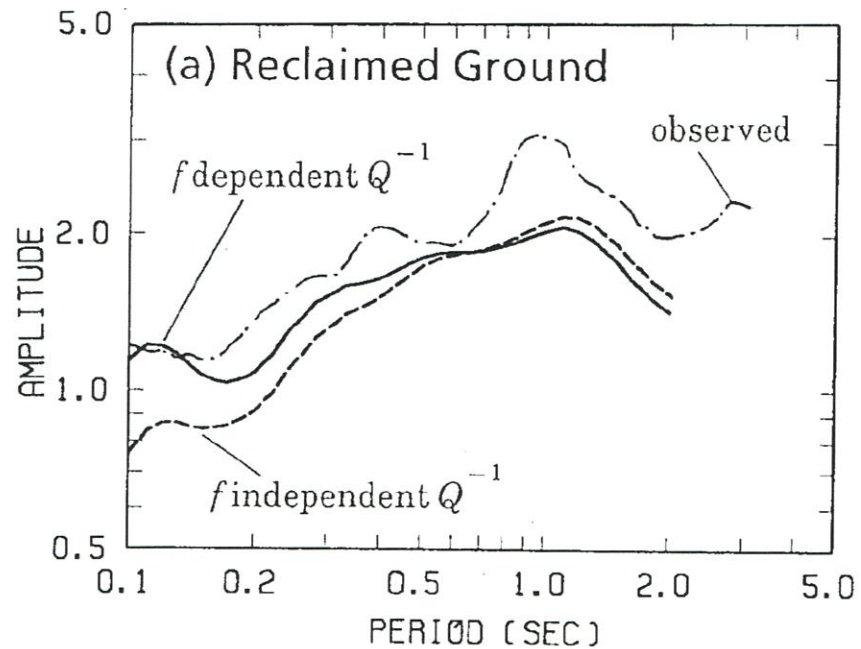
3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(3/7)

◆福島・翠川(1994)⁷⁾の概要

- 地盤減衰 (Q^{-1} 値) に関する数多くの既往研究結果に基づき、地盤減衰 (Q^{-1} 値) の関数モデルとして、対象とする周波数帯域 (0.5Hz~5Hz) において周波数依存性を考慮したモデルが提案されている。
- 5Hz以上の高周波数帯域については、既往研究結果 (武村ほか(1993)⁶⁾等) を踏まえ、地盤減衰 (Q^{-1} 値) を一定として設定している。
- 周波数依存性を考慮した地盤減衰 (Q^{-1} 値) を用いて計算した地盤増幅率は、周波数に依存しない地盤減衰 (Q^{-1} 値) を用いた場合に比べて、短周期領域 (高周波数帯域) で、強震記録による地盤増幅率をよく説明しているとされている。



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



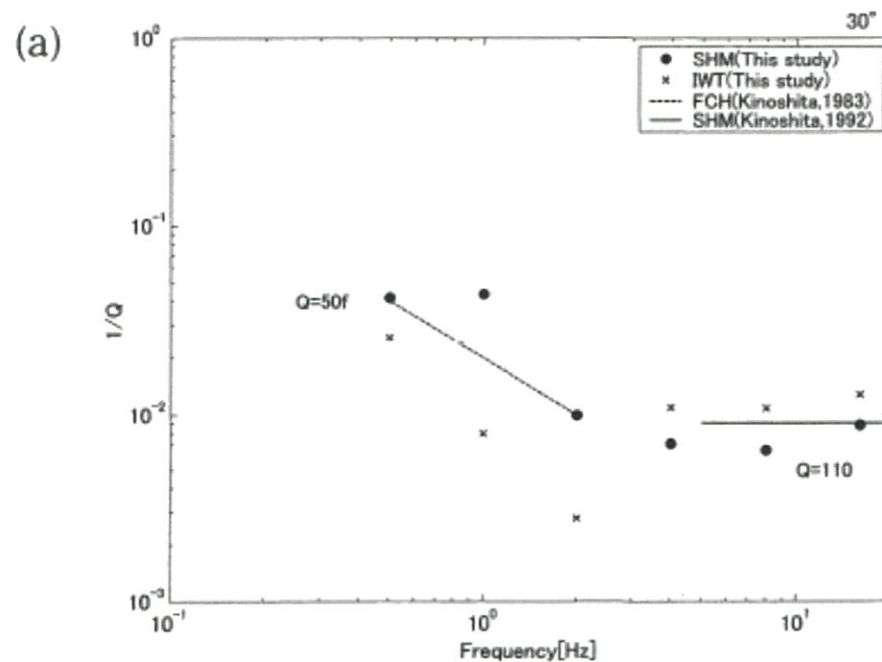
地盤増幅率の比較の例

福島・翠川(1994)より抜粋

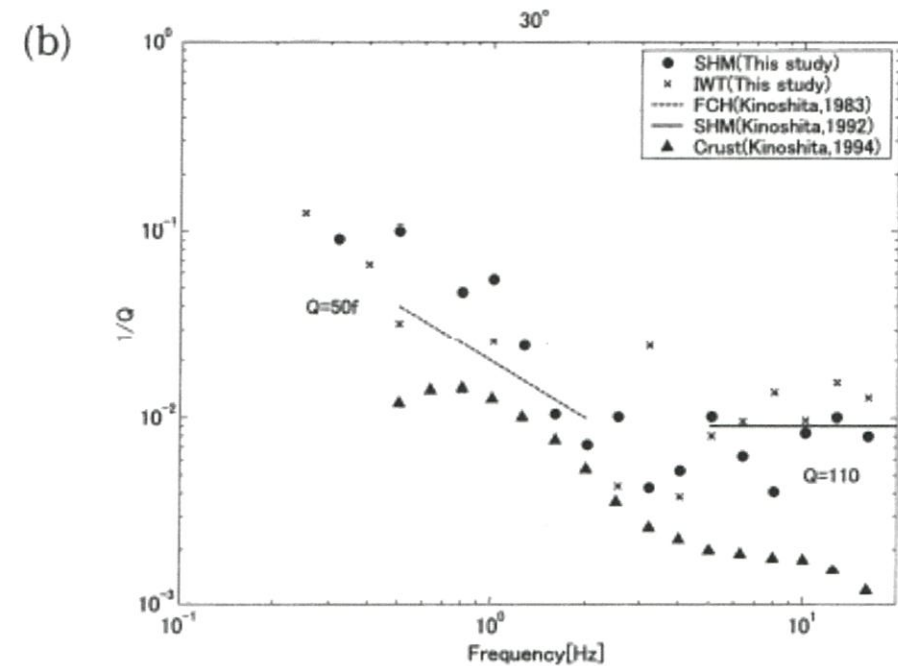
3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(4/7)

◆木下・大池(2002)⁸⁾の概要

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



(a) フーリエ振幅スペクトルをオクターブ帯域幅で平滑化した場合



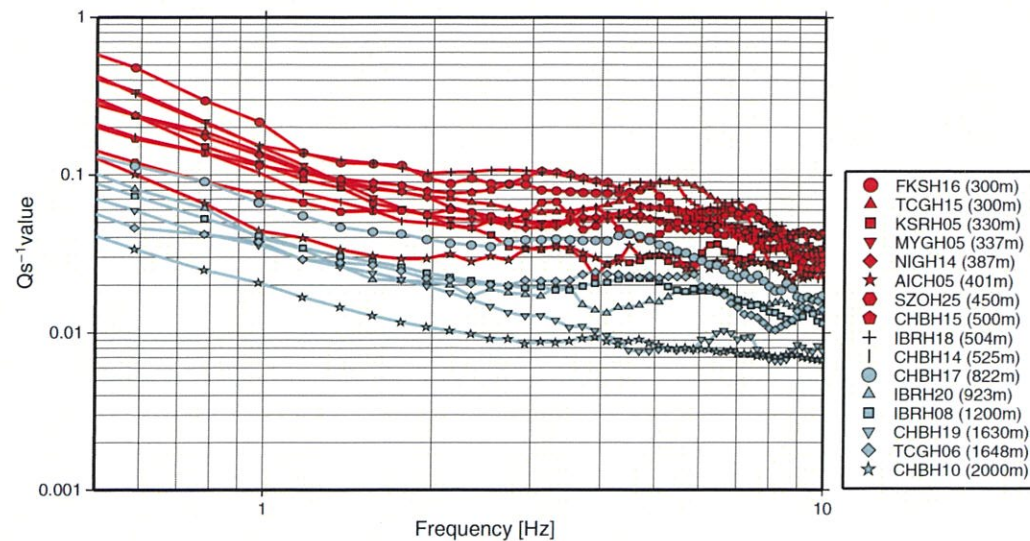
(b) フーリエ振幅スペクトルを1/3オクターブ帯域幅で平滑化した場合

同定した地盤減衰 ($1/Q$) と既往研究による減衰定数の比較

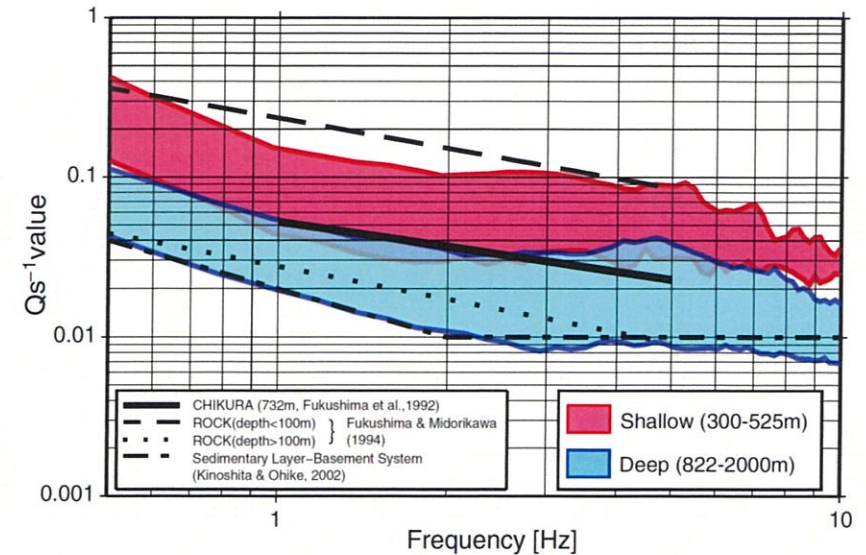
3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(5/7)

◆Fukushima et al. (2016)⁹⁾の概要

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



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



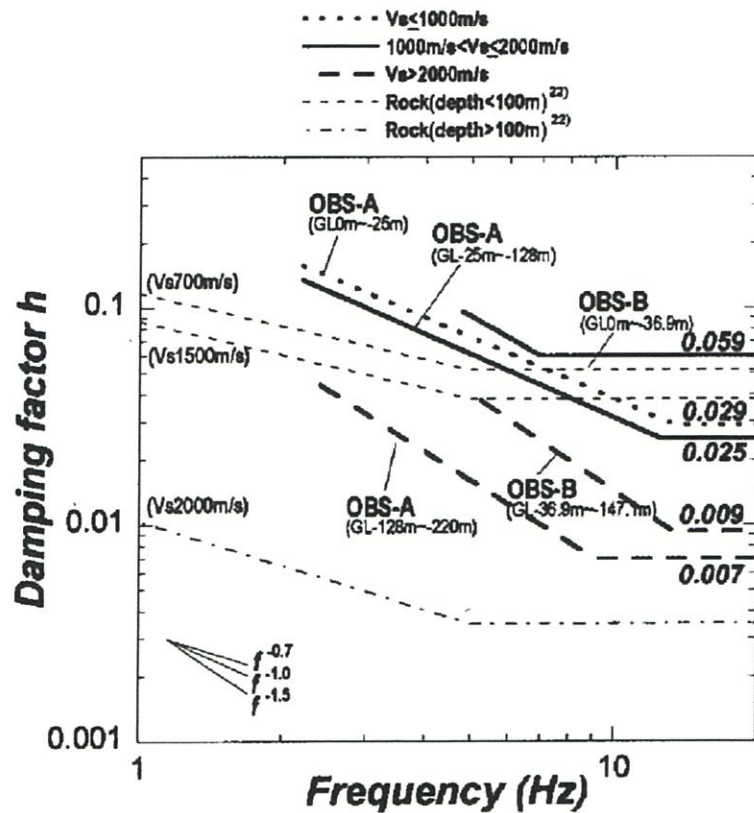
推定した地盤減衰 (Q_s^{-1} 値) と
既往研究による地盤減衰 (Q_s^{-1} 値) の比較

Fukushima et al.(2016)より抜粋

3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(6/7)

◆佐藤ほか(2006)¹⁰⁾の概要

- 岩盤の減衰定数には下限が存在することを示した木下・大池(2002)⁸⁾等の知見を踏まえ、スペクトル比の逆解析による岩盤の減衰定数の同定において、減衰定数がある周波数を境に、低周波数側では周波数に依存し、高周波数側では一定になることを表現したモデルが提案されている。
- 安山岩や凝灰角礫岩で構成される観測点(OBS-A)と砂岩や頁岩などの堆積岩で構成される観測点(OBS-B)を対象に、スペクトル比の逆解析を行い減衰定数の下限が評価されている。



減衰定数の同定結果と既往の経験式の比較

OBS-Aにおける地盤構造と同定結果

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

() : search limits for SA inversion

OBS-Bにおける地盤構造と同定結果

| Layer | Thickness (m) | Density (g/cm ³) | Vs (m/s) | Damping | | | Incident angle (deg.) | | |
|-------|---------------|------------------------------|------------------|----------------|------|---------------------|-----------------------|------|------|
| | | | | h ₀ | α | f ₀ (Hz) | B-1 | B-2 | B-3 |
| | PS-log. | | | Identified | | | | | |
| 1 | 1.7 | 2.1 | 990 (792-1188) | 0.68 | 1.25 | 7.0 | 12.8 | 28.8 | 19.3 |
| 2 | 17 | 2.1 | 1016 (1208-1812) | | | | | | |
| 3 | 8.6 | 2.55 | 1510 (1608-2412) | | | | | | |
| 4 | 9.6 | 2.55 | 1812 (1768-2652) | | | | | | |
| 5 | 18 | 2.66 | 2010 (1700-2610) | 0.45 | 1.50 | 13.3 | | | |
| 6 | 25 | 2.7 | 2358 | | | | | | |
| 7 | 27 | 2.68 | 2610 | | | | | | |
| 8 | 40.2 | 2.68 | 2610 | | | | | | |
| 9 | - | 2.68 | 2610 | | | | | | |

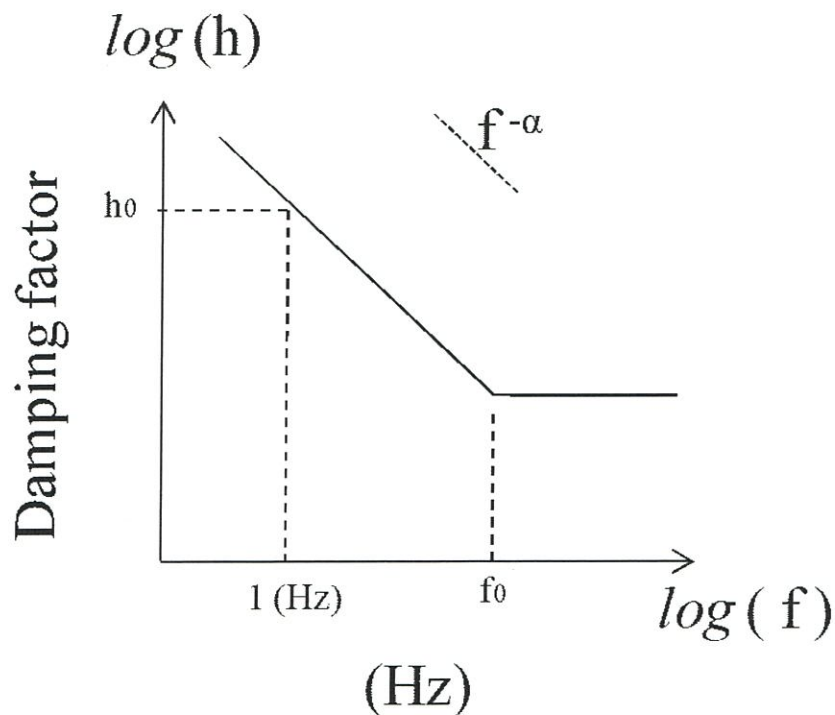
() : search limits for SA inversion

佐藤ほか(2006)より抜粋

3.1 地盤減衰(Q値)の上限に関する知見(7/7)

◆佐藤(2012)¹¹⁾の概要

- 既往研究で指摘されている地表に近い岩盤の減衰についての低周波数側(1~10Hz程度)では強い周波数依存が見られるが、高周波数側ではほとんど見られなくなる「10Hz付近での変移」を明確にすることを目的に、スペクトル比の逆解析から減衰を評価されている。
- バイリニア型周波数依存モデルを用いた評価から「10Hz付近での変移」の存在を明らかにしており、10~20Hzで周波数一定とすると既往の研究と調和的な結果とされている。また、この結果は、低周波数側の減衰を、単純に高周波数側に拡張することはできないとする指摘(Abercrombie(1998)¹²⁾)とも整合しているとされている。



バイリニア型周波数依存モデルの概略図

S波重複反射波スペクトル比の逆解析による減衰の評価結果

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

佐藤(2012)より抜粋

3.2 伝達関数による検討(周波数依存型)(1/2)

- 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20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)³⁾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

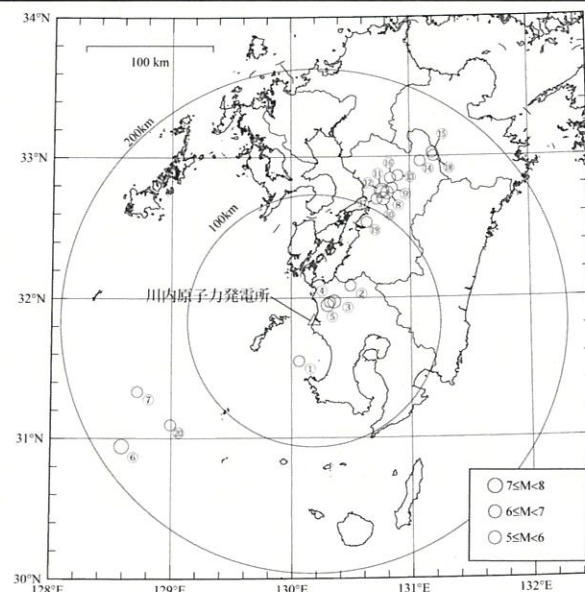
伝達関数(周波数依存型)による地盤減衰の同定に用いた地震諸元(計20地震)

| 番号 | 地震名 | 発生日 | M | 震央距離(km) | 入射角(°) |
|----|---------|-------------|-----|----------|--------|
| ① | 九州西側海域 | 1984年8月15日 | 5.5 | 34 | 24 |
| ② | 鹿児島県北西部 | 1994年2月13日 | 5.7 | 40 | 25 |
| ③ | 鹿児島県北西部 | 1997年3月26日 | 6.6 | 22 | 23 |
| ④ | 鹿児島県北西部 | 1997年4月3日 | 5.7 | 20 | 21 |
| ⑤ | 鹿児島県北西部 | 1997年5月13日 | 6.4 | 17 | 23 |
| ⑥ | 薩摩半島西方沖 | 2015年11月14日 | 7.1 | 181 | 25 |
| ⑦ | 薩摩半島西方沖 | 2015年11月15日 | 5.9 | 151 | 25 |
| ⑧ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 6.5 | 116 | 25 |
| ⑨ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 5.8 | 122 | 25 |
| ⑩ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月15日 | 6.4 | 111 | 25 |
| ⑪ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 7.3 | 116 | 25 |
| ⑫ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 115 | 25 |
| ⑬ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 132 | 25 |
| ⑭ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 151 | 25 |
| ⑮ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.8 | 162 | 25 |
| ⑯ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 128 | 25 |
| ⑰ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 108 | 25 |
| ⑱ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月18日 | 5.8 | 161 | 25 |
| ⑲ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月19日 | 5.5 | 88 | 25 |
| ⑳ | 薩摩半島西方沖 | 2016年5月7日 | 5.5 | 140 | 25 |

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

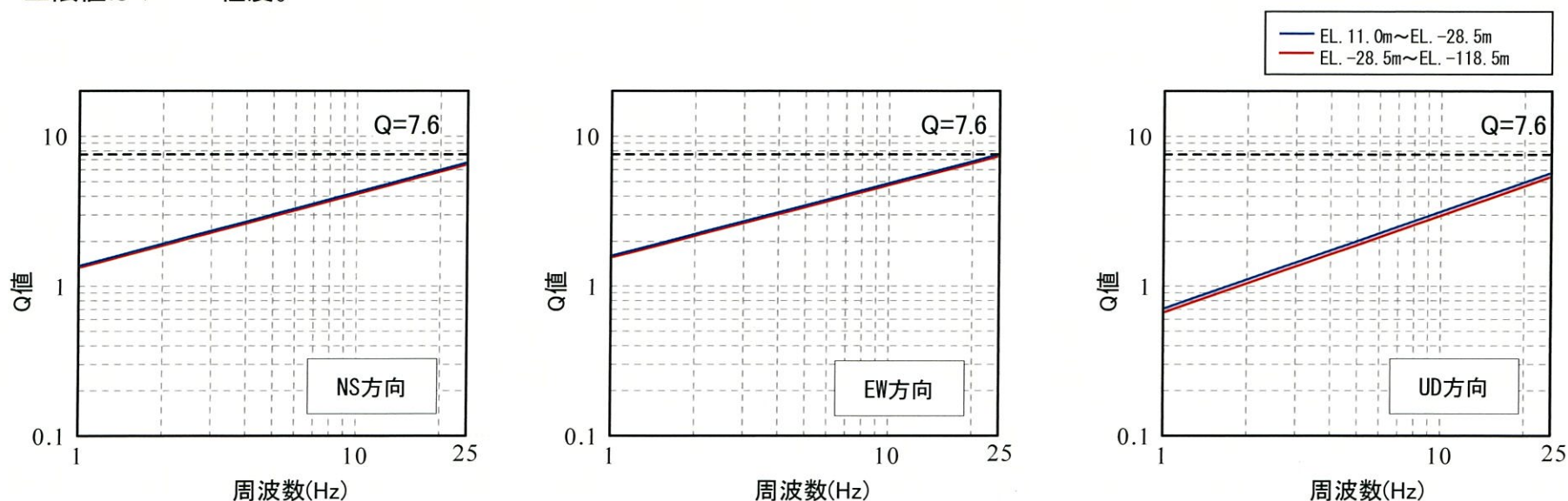
| 項目 | 条件 |
|----------------|---|
| 対象地震の選定条件 | M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震 |
| 対象地震数 | 20地震 |
| ターゲットとする観測伝達関数 | 20地震の平均伝達関数(NS, EW, UD成分) ・EL.11.0m/EL.-18.5m ・EL.11.0m/EL.-58.5m ・EL.11.0m/EL.-118.5m 観測記録全区間を使用 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ |
| 同定方法 | 層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰(Q値)を同定 |
| Q値 | $Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha$ |



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20地震)

3.2 伝達関数による検討(周波数依存型) (2/2)

- 17～23頁に示す既往の知見によると、地盤減衰(Q値)は20Hz程度までのある周波数で上限が存在し、それより高周波数側で周波数依存性が見られなくなる傾向が示唆されており、低周波数側で同定した地盤減衰(Q値)を高周波数側に拡張することは適当ではない。
- 前回までは、伝達関数による地盤減衰(Q値)の上限値として、地震計の特性等を踏まえ同定結果の信頼性が確保されていると考えられる15Hzの値を採用していた。
- 今回、高周波数側への適用性を考慮し、既往知見を踏まえ、より安全側に25Hzまで拡張し、地盤減衰(Q値)を算出すると、上限値は $Q=7.6$ 程度。



伝達関数(周波数依存型)により同定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-118.5m)

同定結果による地盤減衰(Q値)

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm ³) | 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 | 2.70 | 1500 | 3200 | 1.33 | 0.49 | 1.55 | 0.48 | 0.66 | 0.65 |
| -28.5 | 2.70 | 1600 | 3700 | 1.37 | 0.49 | 1.59 | 0.48 | 0.70 | 0.65 |

3.3 地震波干渉法による検討

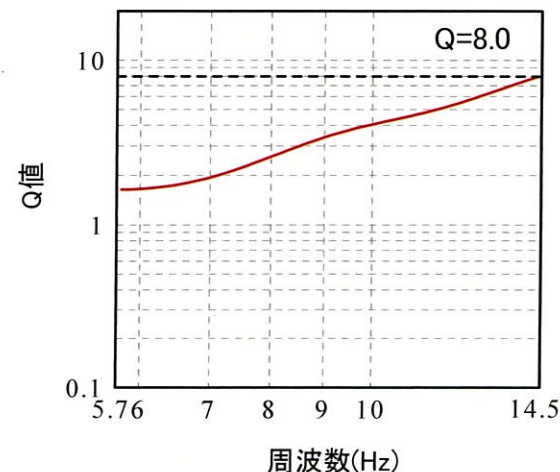
- 既許可時審査以降の最新の技術的知見として、地震波干渉法^{9),13)}により、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から地盤減衰(Q値)を直接推定。
- 地震波干渉法による地盤減衰(Q値)の上限値は、数値実験により確認している有効周波数範囲における上限値を採用。
- 地震波干渉法により推定された地盤減衰(Q値)の上限値は $Q=8.0$ 程度。

地震波干渉法による地盤減衰の推定に用いた地震諸元 (計20地震)

| 番号 | 地震名 | 発生日 | M | 震央距離(km) | 入射角(°) |
|----|---------|-------------|-----|----------|--------|
| ① | 九州西側海域 | 1984年8月15日 | 5.5 | 34 | 24 |
| ② | 鹿児島県北西部 | 1994年2月13日 | 5.7 | 40 | 25 |
| ③ | 鹿児島県北西部 | 1997年3月26日 | 6.6 | 22 | 23 |
| ④ | 鹿児島県北西部 | 1997年4月3日 | 5.7 | 20 | 21 |
| ⑤ | 鹿児島県北西部 | 1997年5月13日 | 6.4 | 17 | 23 |
| ⑥ | 薩摩半島西方沖 | 2015年11月14日 | 7.1 | 181 | 25 |
| ⑦ | 薩摩半島西方沖 | 2015年11月15日 | 5.9 | 151 | 25 |
| ⑧ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 6.5 | 116 | 25 |
| ⑨ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月14日 | 5.8 | 122 | 25 |
| ⑩ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月15日 | 6.4 | 111 | 25 |
| ⑪ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 7.3 | 116 | 25 |
| ⑫ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 115 | 25 |
| ⑬ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 132 | 25 |
| ⑭ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 151 | 25 |
| ⑮ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月16日 | 5.8 | 162 | 25 |
| ⑯ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 128 | 25 |
| ⑰ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.4 | 108 | 25 |
| ⑱ | 熊本県阿蘇地方 | 2016年4月18日 | 5.8 | 161 | 25 |
| ⑲ | 熊本県熊本地方 | 2016年4月19日 | 5.5 | 88 | 25 |
| ⑳ | 薩摩半島西方沖 | 2016年5月7日 | 5.5 | 140 | 25 |

地震波干渉法による地盤減衰の推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 | 20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 | 19地震 |
| | 解析区間 | ピーク時間×2 |
| | スムージング | 対数型Parzenウィンドウ Band幅は中心周波数 f に対して $f/1.3 \sim 1.3f$ |



3.4 伝達関数による検討(バイリニア型)(1/3)

- 17~23頁の既往の知見を踏まえ、下記の条件で佐藤(2012)¹¹⁾の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。

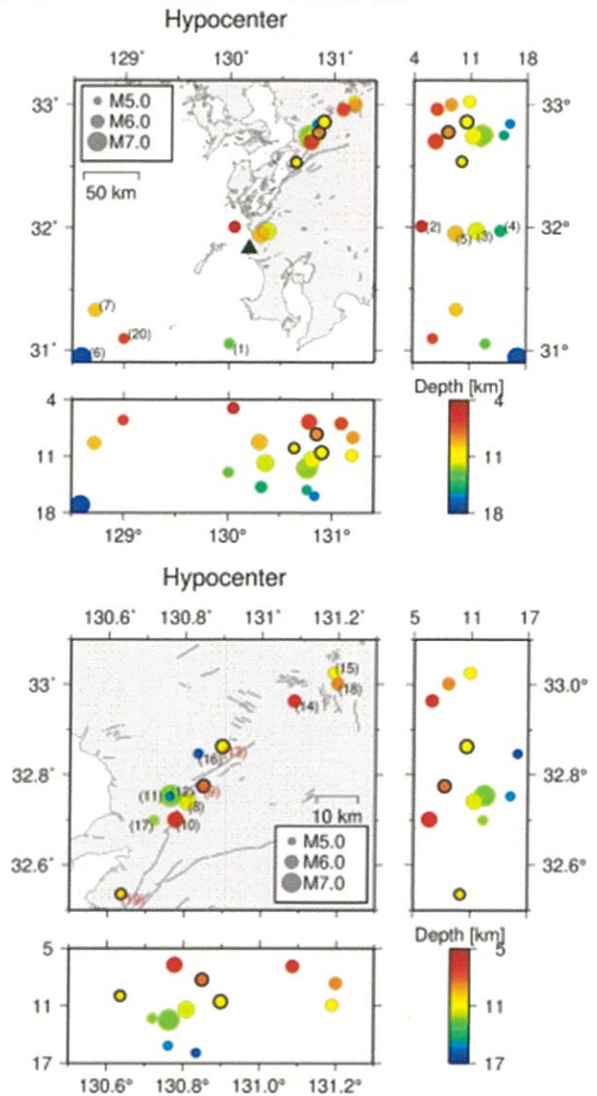
伝達関数(バイリニア型)による地盤減衰の同定における解析条件

| 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) <ul style="list-style-type: none"> EL.11.0m/EL.-18.5m EL.-18.5m/EL.-58.5m EL.11.0m/EL.-58.5m EL.-18.5m/EL.-118.5m EL.11.0m/EL.-118.5m EL.-58.5m/EL.-118.5m S波を含む10秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ |
| 同定方法 | 層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、入射角、地盤減衰(Q値)を同定 |
| Q値 | $Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha \quad (f < f_0)$ $Q(f)=Q_0 \quad (f \geq f_0)$ |

※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 | 122 |
| 熊本県熊本地方 | 2016年4月16日 | 5.9 | 132 |
| 熊本県熊本地方 | 2016年4月19日 | 5.5 | 88 |

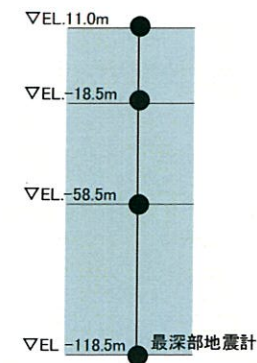
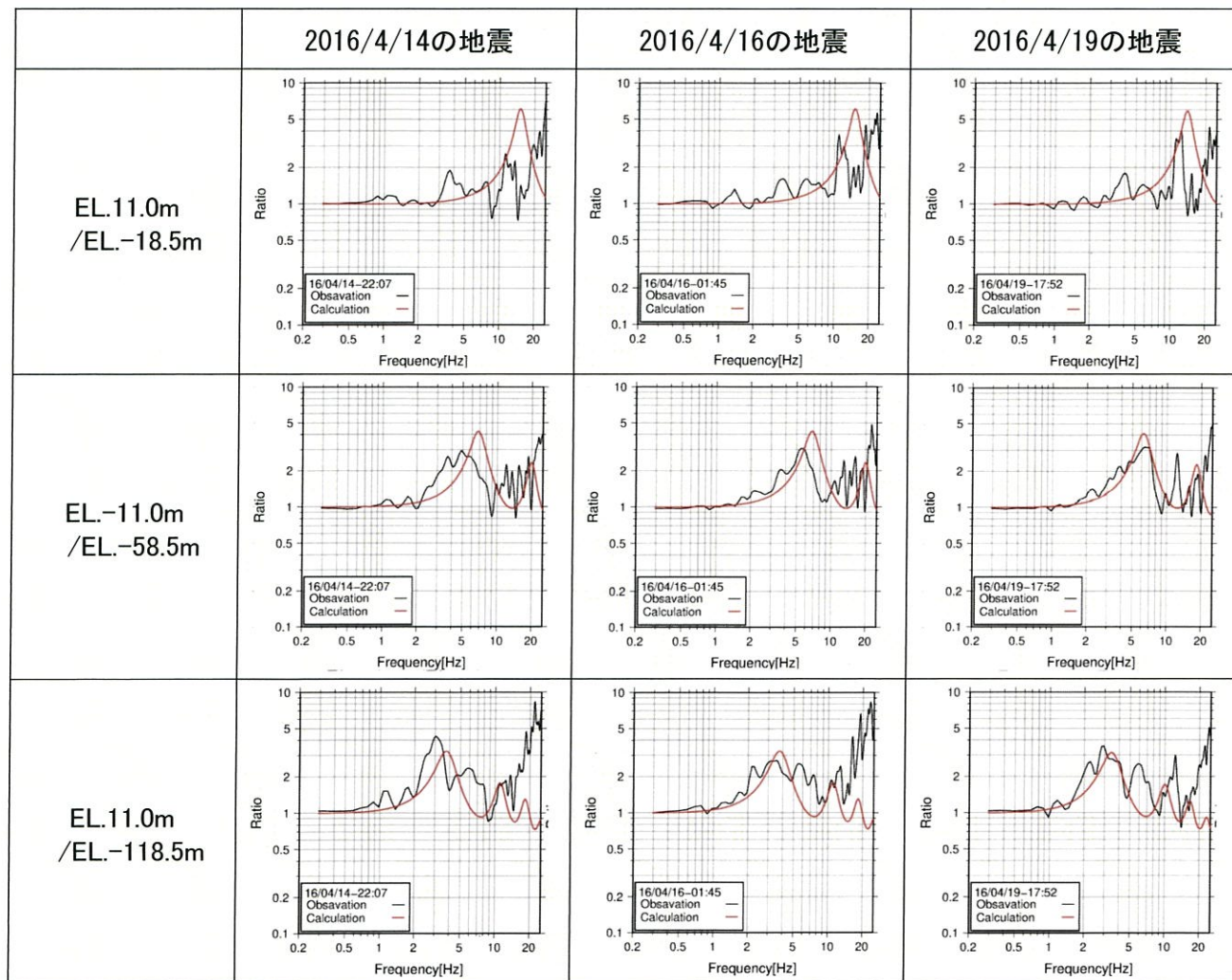


熊本付近(熊本地震)

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)

3.4 伝達関数による検討(バイリニア型)(2/3)

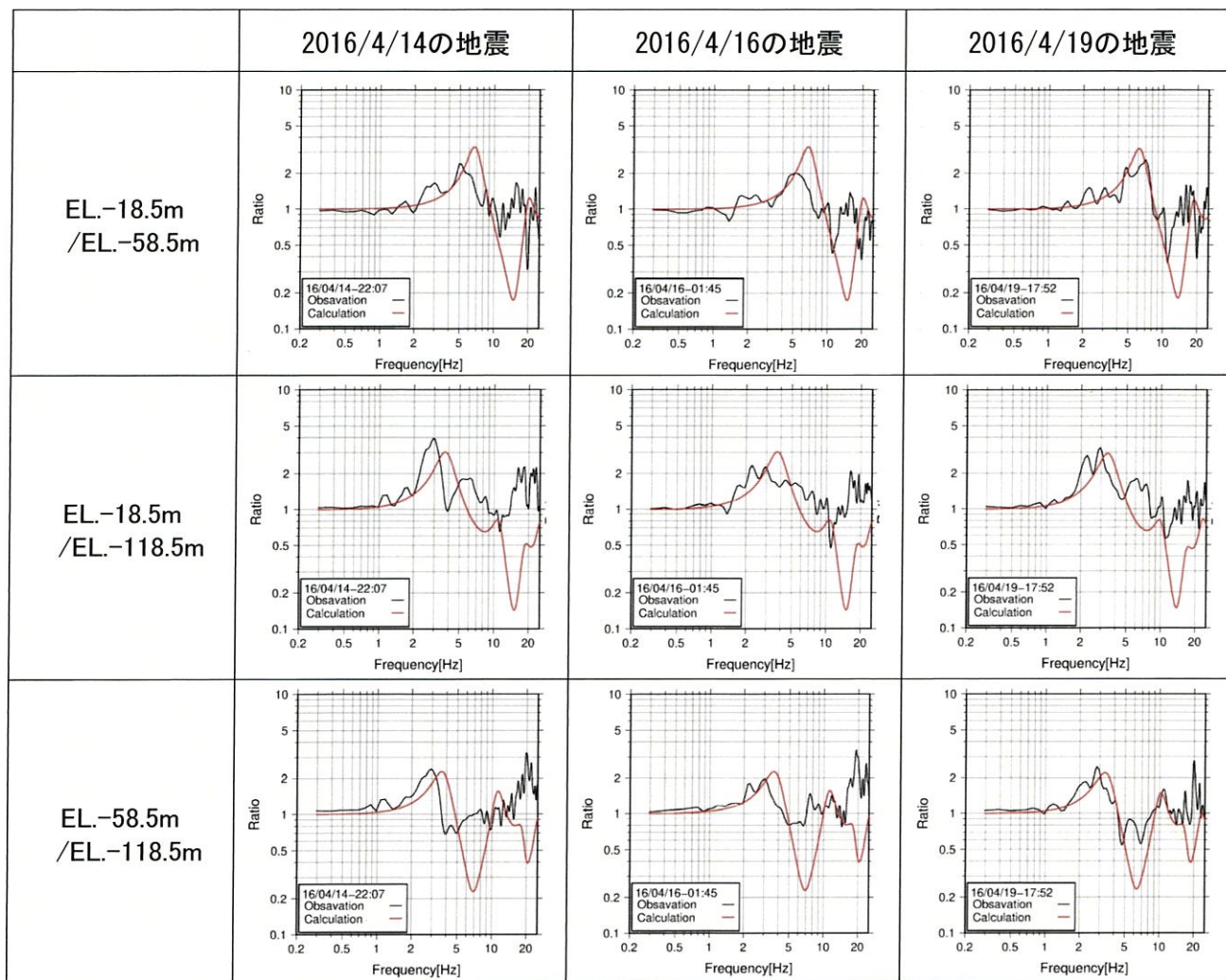
○ 地盤減衰の同定結果は以下の通り。



同定結果(1/2)

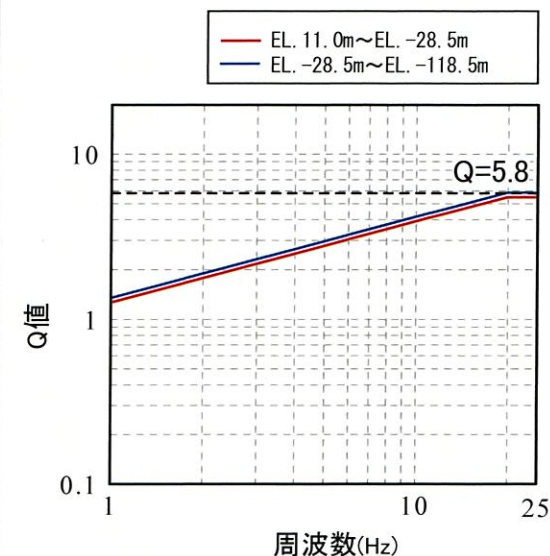
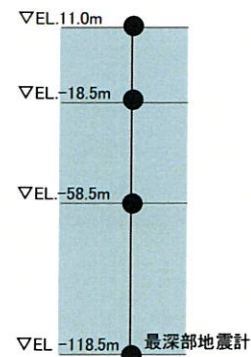
3.4 伝達関数による検討(バイリニア型)(3/3)

○ 伝達関数(バイリニア型)により同定されたQ値の上限値は Q=5.8程度。



同定結果(2/2)

| 層上面 EL (m) | 密度 ρ (g/cm^3) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | 減衰-TR | | |
|---------------|---------------------------|-------------|-------------|-------|----------|-------|
| | | | | Q_0 | α | f_0 |
| 11.0 | 2.70 | 1500 | 3200 | 1.27 | 0.49 | 19.91 |
| -28.5 | 2.70 | 1600 | 3700 | 1.35 | 0.49 | 19.91 |

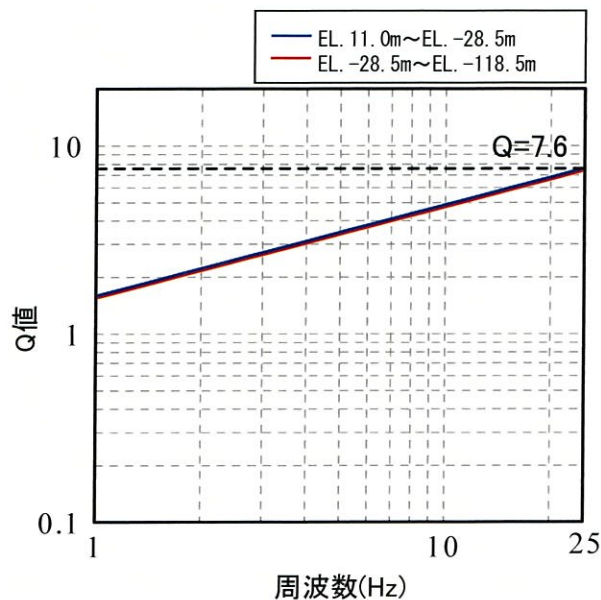


伝達関数(バイリニア型)により同定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-118.5m)

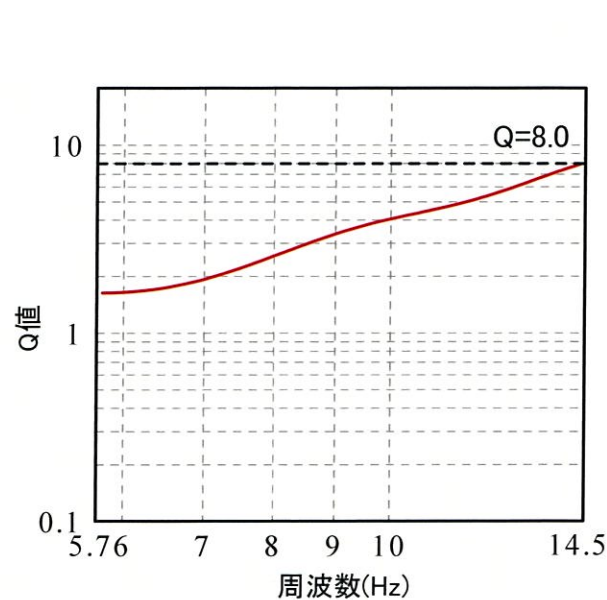
3.5 地盤減衰(Q値)の高周波数帯への適用性

- 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。

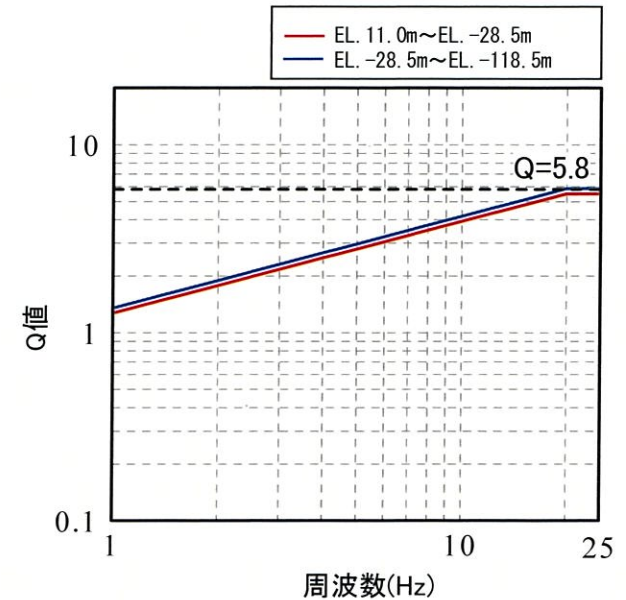
| 検討手法 | 伝達関数による検討 (周波数依存型) | 地震波干渉法による検討 | 伝達関数による検討 (バイリニア型) |
|---------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| 検討結果 (上限値) | Q=7.6程度 | Q=8.0程度 | Q=5.8程度 |



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)

参考文献

- 1) 友澤裕介, 加藤研一, 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎(2019):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.
- 2) 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎, 友澤裕介, 加藤研一(2019):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.
- 3) S. Noda, K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe (2002): RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Oct. 16-18, pp. 399-408.
- 4) 宮腰研, PETUHKHIN A, 香川敬生(2004):地殻内地震のやや短周期まで精度のある震源モデルの推定—1997年3月鹿児島県北西部地震と1997年山口県北部地震—, 日本地震学会2004年秋季大会予稿集, P065
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2003):布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価について
- 6) 武村雅之, 池浦友則, 高橋克也, 石田寛, 大島豊(1993):堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, pp. 1-11, 1993年4月.
- 7) 福島美光, 翠川三郎(1994):周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp. 37-46, 1994年6月.
- 8) 木下繁夫, 大池美保(2002):関東地域の堆積層—基盤系におけるS波の減衰特性 —0.5~16Hz—, 地震第2輯, 第55巻, pp. 19-31.
- 9) R. Fukushima, H. Nakahara, and T. Nishimura(2016):Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 552-559.
- 10) 佐藤浩章, 金谷守, 大鳥靖樹(2006):減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案 —岩盤における鉛直アレイ記録への適用と減衰特性の評価—, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp. 55-62, 2006年6月.
- 11) 佐藤浩章(2012):地震動評価のための地表に近い岩盤における減衰の測定とそのモデル化, 物理探査, 第65巻第1&2号(2012), pp. 37-51.
- 12) R. E. Abercrombie(1998):A Summary of Attenuation Measurements from Borehole Recordings of Earthquakes: The 10 Hz Transition Problem, Pure appl. geophys., 153 (1998), pp. 475-487.
- 13) Riga, Evi, F. Hollender, A. Roumelioti, P.-Y. Bard, and K. Pitilakis (2019):Assessing the Applicability of Deconvolution of Borehole Records for Determining Near-Surface Shear-Wave Attenuation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 109, No.2, pp. 621-635.