
東海第二発電所 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価について (コメント回答:地震動評価)

令和4年4月25日

日本原子力発電株式会社

審査会合コメントリスト(1/3)

| No. | 日付 | 回次 | 内容 | 回答概要 | 該当箇所 |
|-----|---------------|---------------|--|--|------------------------|
| 1 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | PS検層データの扱いに関し、既許可ではダウンホール法の結果を採用しているところ、今回はサスペンション法の結果を用いている点について、考え方を説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> 今回の検討では、標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面($V_s2200\text{m/s}$以上)に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングのデータに着目して速度構造の検討を行っている。 その結果、地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認の上、サスペンション法に準拠して新たに速度構造を設定している。 | 第1020回 審査会合 にて回答 |
| 2 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | 減衰定数の同定に関し、今回、減衰定数の下限を考慮することに至った考え方を説明すること。 | 減衰定数に関する知見については、従来振動数が大きくなるにつれて減衰定数が小さくなることが指摘されていたところ、現在では下限の存在を示す評価事例が蓄積されてきたことから、減衰定数の同定に際しては下限を考慮している。 | 第1020回 審査会合 にて回答 |
| 3 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | <ul style="list-style-type: none"> 同定解析の際、3つの地震による観測記録を用いているが、その妥当性については他の地震の記録でも検証すること。 既許可の審査で用いた物理探査等の結果との整合性も確認すること。 | <ul style="list-style-type: none"> 同定解析に用いる地震の候補として23地震を選定し、その23地震の伝達関数の比較を通して代表性のある5地震を選定している。この5地震の伝達関数に大きな差異は見られないことを確認した上で、最終的に3地震の伝達関数を用いている。 以上のとおり、検討に用いる3地震の選定プロセスの段階で、3地震以外の地震の記録での検証を行い、最終的に用いる3地震の記録の妥当性を確認している。 新たに設定した地盤モデルの妥当性については、既往の物理探査結果や地震観測記録との比較により確認している。 | 第1020回 審査会合 にて回答 |

審査会合コメントリスト(2/3)

| No. | 日付 | 回次 | 内容 | 回答概要 | 該当箇所 |
|-----|---------------|---------------|---|--|---------|
| 4 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | 標準応答スペクトル用地盤モデルによる既往の断層モデル地震動評価への影響については、基準地震動への影響の観点から、基準地震動に選定しているケースに対しての検討結果を示すこと。 | 基準地震動 S_s に選定されている地震動評価ケースに対し、標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、既往の地盤モデルを用いた場合の評価結果と比較したところ、結果はほぼ同等であり、地盤モデルの違いが経験的グリーン関数法で評価した基準地震動 S_s との関係に影響を与えないことを確認している。従って、経験的グリーン関数法により策定した基準地震動 S_s の評価にも影響を与えない。 | ・P84～94 |
| 5 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | 標準応答スペクトル用地盤モデルによる S_s -31(留萌波)への影響に関し、保守性を考慮する前の地震動(解放基盤表面上において 598cm/s^2)の応答スペクトルも示すこと。 | 2004年北海道留萌支庁南部地震による検討について、標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて評価した地震動と基準地震動 S_s -31(留萌波)に保守性を考慮する前の地震動(解放基盤表面上において 598cm/s^2)を比較し、地盤モデルの違いが両者の地震動のレベルに影響を与えないことを確認している。従って、基準地震動 S_s -31の評価にも影響を与えない。 | ・P95～97 |
| 6 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | 乱数位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定で、 $M6.9$, $X_{eq}10\text{km}$ とした根拠を説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> ・M_Iについては、審査ガイドにおける「全国共通に考慮すべき地震動」の地震規模が$M_w6.5$程度未満と記載されていることから、M_wとMの換算式を用いて$M_w6.5$の時のMを求めると$M6.9$となる。ここで、ガイドでは「$M_w6.5$程度」と幅を持った記載であることから換算式から求められるM_Iにも幅を持たせ、保守的に$M7.0$として設定している。 ・X_{eq}については、震源近傍を想定し$X_{eq}10\text{km}$として設定している。 | ・P37～41 |

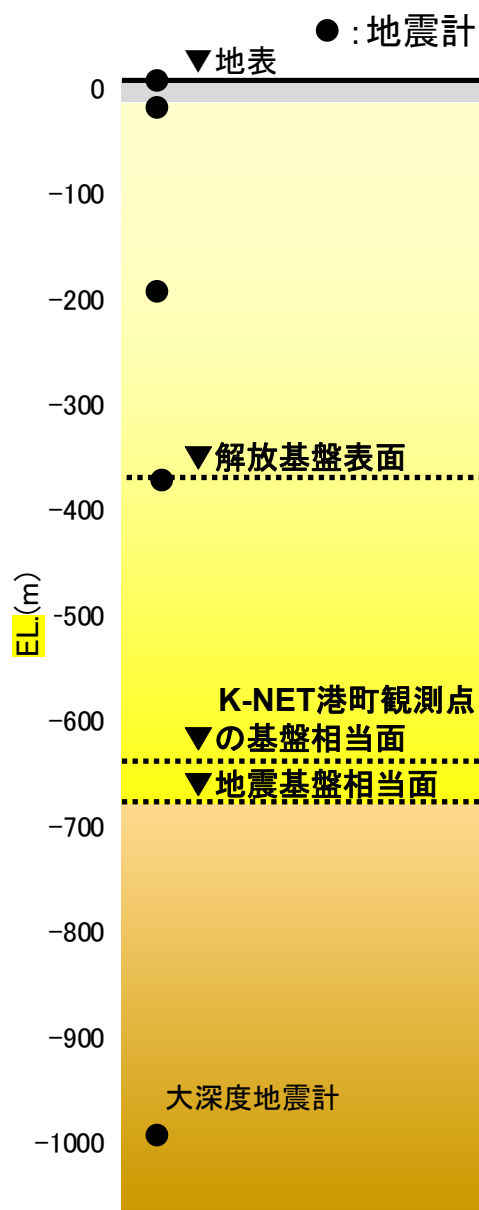
審査会合コメントリスト(2/3)

| No. | 日付 | 回次 | 内容 | 回答概要 | 該当箇所 |
|-----|---------------|---------------|--|---|---|
| 7 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | 実観測記録の位相を用いた検討に関し、2011年茨城県北部地震のKiK-net高萩の観測記録を選定した理由や、実際に位相として用いている佐藤他(2019)の基盤地震動の詳細について説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> ・実観測記録の位相を用いた検討について、使用する観測記録の候補として、まず、敷地近傍で発生した内陸地殻内地震を対象に敷地で得られた記録の有無を確認したところ、そのような記録はないので、敷地と同様に正断層型の応力場である福島県浜通りから茨城県北部にかけての領域におけるKiK-net観測点で得られた震源近傍の観測記録の中から選定している。 ・具体的には、2011年茨城県北部地震(正断層)の揺れを震源近傍で観測し、地震基盤相当面(V_s2200m/s以上)で得られたKiK-net観測点IBRH13(高萩)の記録を用いている。この記録については、佐藤他(2019)により露頭基盤波が推定されているため、実観測記録の位相として、佐藤他(2019)による露頭基盤波の位相を用いている。 ・佐藤他(2019)より、露頭基盤波を推定する際に用いた地盤モデルやその設定方法等について説明する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・P37 ・P42～54 |
| 8 | 令和3年 7月30日 | 第994回 審査会合 | 複数の手法として乱數位相、実観測記録の位相を用いた手法を選定した理由を説明すること。また、この2つの手法の中から、乱數位相の模擬地震波を採用するに至った考え方を詳細に説明すること。 | <ul style="list-style-type: none"> ・乱數位相については、既許可の模擬地震波作成において使用実績があることから今回も検討対象としている。実観測記録の位相については、実現象を評価に反映する観点から検討対象としている。 ・地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性について、乱數位相の場合と実観測記録の位相の場合を比較した結果、応答スペクトルでは差が生じないが、時刻歴波形では乱數位相の方が継続時間が長く、フーリエスペクトルでも乱數位相の方が大きいことから、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相は、乱數位相で代表させることとしている。 | <ul style="list-style-type: none"> ・P37 ・P58～64 |

目次

| | |
|--|----|
| 1. 標準応答スペクトルに基づく地震動評価の方針 | 6 |
| 2. 地盤モデルの設定 | 7 |
| (1) 新たな地盤モデルの設定について | 7 |
| (2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定 | 8 |
| (3) 減衰定数の設定 | 18 |
| (4) まとめ | 35 |
| 3. 模擬地震波作成の方針 | 37 |
| 4. 地震基盤相当面位置における模擬地震波の検討 | 38 |
| (1) 乱數位相による検討 | 38 |
| (2) 実観測記録の位相による検討 | 42 |
| 5. 解放基盤表面の地震動評価 | 55 |
| (1) 乱數位相, 実観測記録の位相による地震動評価 | 56 |
| (2) 比較検討 | 58 |
| 6. 基準地震動 S_s の策定 | 65 |
| 7. まとめ | 69 |
| 参考文献 | 70 |
| 補足説明資料 | |
| ① 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた地盤モデル (第409回審査会合資料の再掲) | 72 |
| ② 既往の各種物理探査結果との関係: 位相速度の分散曲線(評価点追加) | 83 |
| ③ 標準応答スペクトル用地盤モデルによる既往の地震動評価への影響 | |
| (1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響 | 84 |
| (2) 基準地震動 S_s -31(留萌波)への影響 | 95 |

1. 標準応答スペクトルに基づく地震動評価の方針



■敷地における地盤増幅特性の考慮

敷地における解放基盤表面は $V_s700\text{m/s}$ 以上となるEL-370m位置に設定している。一方、標準応答スペクトルが地震基盤相当面($V_s2200\text{m/s}$ 以上の地層)で定義されていることを踏まえ、標準応答スペクトルを解放基盤表面において評価するうえでは、地震基盤相当面から解放基盤表面までの増幅特性を考慮する。

■地盤モデルの新規設定

- ・既許可の留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤に相当する層が $V_s938\text{m/s}$ の層であったことから、地震基盤相当面以浅に着目していた。
- ・一方、今回の検討では、標準応答スペクトルが $V_s2200\text{m/s}$ 以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると考え、既許可審査以降も蓄積されている地震観測記録等を活用し、標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定する。

■標準応答スペクトルに基づく地震動評価の流れ

【地盤モデルの設定】

(1) 新たな地盤モデルの設定について

標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定する。

(2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定

大深度ボーリング調査結果を含めた地下構造調査結果に基づき、検討に用いる速度構造と地震基盤相当面位置を設定する。

(3) 減衰定数の設定

大深度地震計の地震観測記録を用いた伝達関数の逆解析により、地震基盤相当面から解放基盤表面までの区間を含め、地盤の減衰定数を設定する。

【地震基盤相当面位置における模擬地震波の検討】

標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を複数の手法により検討する。

【解放基盤表面の地震動評価】

地震基盤相当面位置から解放基盤表面までの地盤増幅特性を考慮した地震動を評価する。また、複数の手法により検討した地震動評価結果について比較検討を行う。

【基準地震動 S_s の策定】

既許可の基準地震動 S_s との比較より、基準地震動 S_s を策定する。

左図： 東海第二発電所敷地地盤のイメージ図

(1) 新たな地盤モデルの設定について

■新たな知見等を踏まえた地盤モデルの設定

- ・ 既許可の留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤に相当する層が $V_s938\text{m/s}$ の層であったことから、地震基盤相当面以浅に着目していた。
- ・ 一方、今回の検討では、標準応答スペクトルが $V_s2200\text{m/s}$ 以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると考え、物理探査結果との整合性の確認や既許可審査以降も蓄積されている地震観測記録等、下表で示す既許可審査では取り入れていなかった新しい知見や考え方を整理した上で今回取り入れることにより、地盤モデルの精度を向上させ、標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定する。

■今回取り入れた新たな知見や考え方

| 設定 | 新たな知見 | 新たな考え方 | 既許可 (留萌用地盤モデル) | 今回 |
|------|------------------------|--|--|--|
| 速度構造 | 地震基盤相当面で定義された標準応答スペクトル | 大深度ボーリングデータに着目した深部速度構造の再検討 | 大深度ボーリングのダウンホール法に基づいて設定 | 地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータに着目し、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認した上で、サスペンション法に準拠して新たに設定 ⇒ 新たに設定した速度構造について地震観測記録の説明性も確認 |
| 減衰定数 | 敷地における地震観測記録の蓄積 | 大深度地震計を含む鉛直アレイ地震観測記録を用いた地盤同定解析の適用範囲の拡大 | 地震基盤相当面位置(EL-679m)～大深度地震計設置位置(EL-992m) | 地表～大深度地震計設置位置(EL-992m) ⇒ 地震基盤相当面位置から解放基盤表面位置までの増幅特性を直接的に評価 |
| | | 地盤同定解析に用いる、内陸地殻内地震の評価に特化した目標伝達関数の設定 | 海溝型地震と内陸地殻内地震を含めて地盤同定解析の目標伝達関数を設定 | 標準応答スペクトルに基づく地震動評価という目的に合わせ、内陸地殻内地震のみで地盤同定解析の目標伝達関数を設定 ⇒ 目標伝達関数の精度向上 |
| | 減衰定数の下限を示す評価事例の蓄積 | 減衰定数の下限を考慮した減衰モデルの高度化 | 振動数依存モデル | 振動数依存+減衰定数の下限考慮モデル ⇒ 増幅特性の評価における、より広帯域での精度向上 |

(2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定

■ 深部速度構造の再検討

- 既許可の留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤層 ($V_s 938\text{m/s}$) に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤以浅のボーリングデータに着目して速度構造の検討を行っている。
- 一方、今回の検討では、標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面 ($V_s 2200\text{m/s}$ 以上) に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングのデータに着目して速度構造の検討を行う。
- 地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討することとし、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認した上で、標準応答スペクトルの地震動評価に用いる新たな速度構造モデルとして設定する。
- 地震基盤相当面位置は、 $V_s 2200\text{m/s}$ 以上に相当する敷地での層の上面としてEL-679mに設定する。
- 速度構造モデルの設定については、後述する減衰定数の設定と合わせて、地震観測記録の説明性の観点においてその妥当性を確認する。

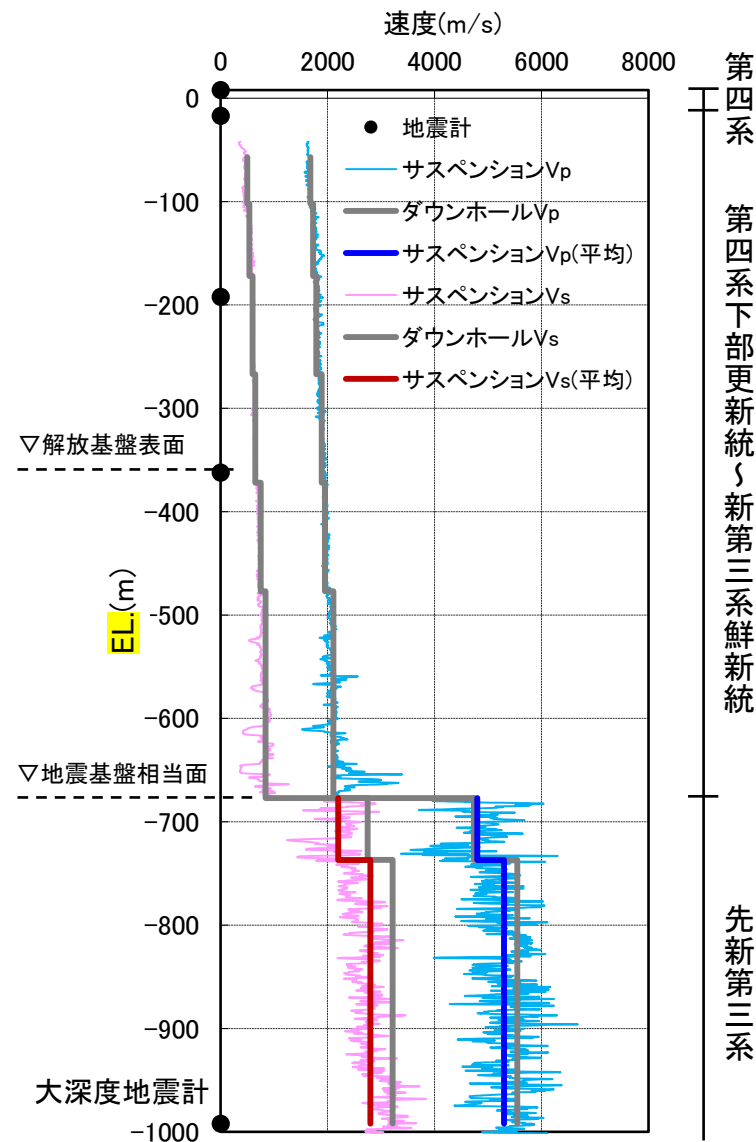
■ 新たな速度構造モデルの設定とその妥当性確認は下記の流れで行う。

速度構造モデルの設定

① 地震基盤相当面 (EL-679m) 以深においては、サスペンション法の結果に準拠した速度構造の検討を行う。 ⇒ P10

② 新たに設定した速度構造と既往の物理探査結果との比較検討を行い、整合性を確認する。 ⇒ P11~

③ 地震記録(伝達関数)の説明性を確認する。 ⇒ P32~

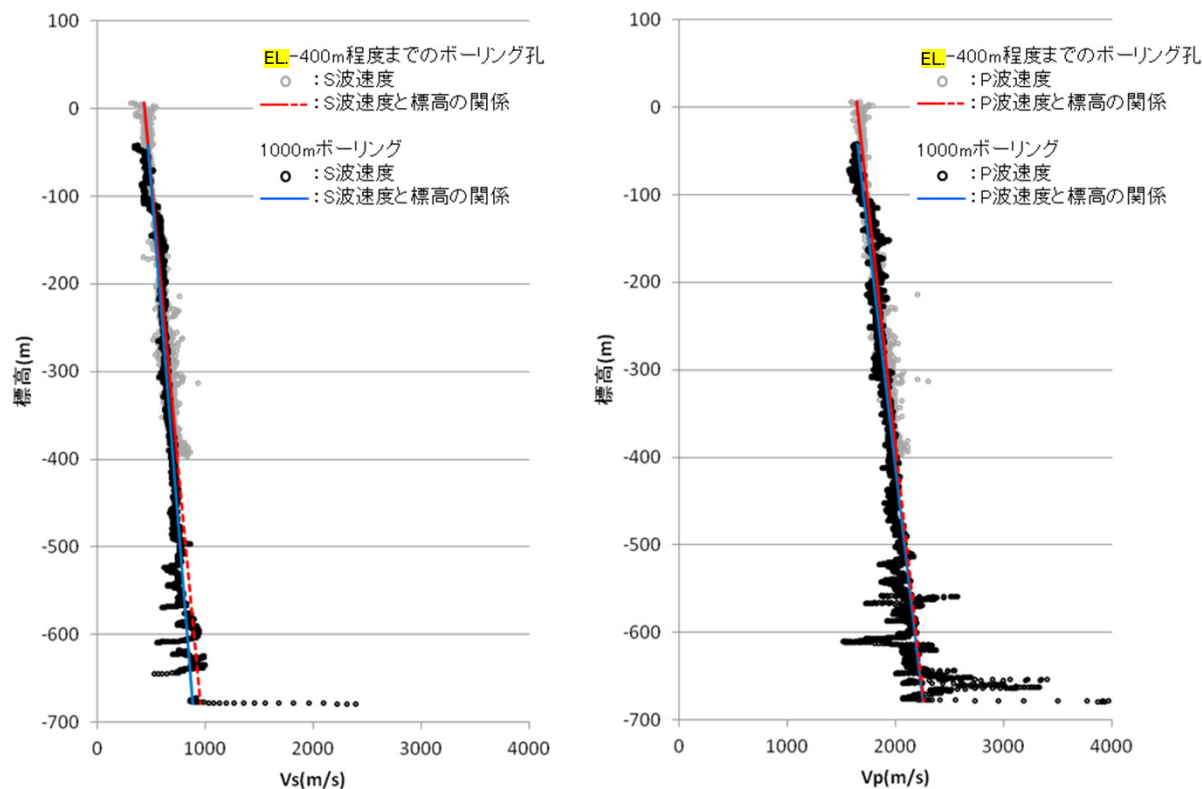


大深度ボーリングのPS検層結果の例

地震基盤相当面(EL.-679m)以浅の速度構造の設定

■EL.-679m以浅(解放基盤表面～新第三系鮮新統下端)

- ・Vs, Vpとも深くなるにつれ値が漸増する構造であり, また複数の調査結果と整合していることから, 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討においては, 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造を標高依存式により設定している。
- ・標準応答スペクトルによる地震動の検討に際しても, 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造は, 既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討で用いたものを採用する。



久米層における
地盤速度と標高の関係

$$V_s = 0.433 - 7.71 \times 10^{-4} \cdot Z$$

$$V_p = 1.65 - 9.09 \times 10^{-4} \cdot Z$$

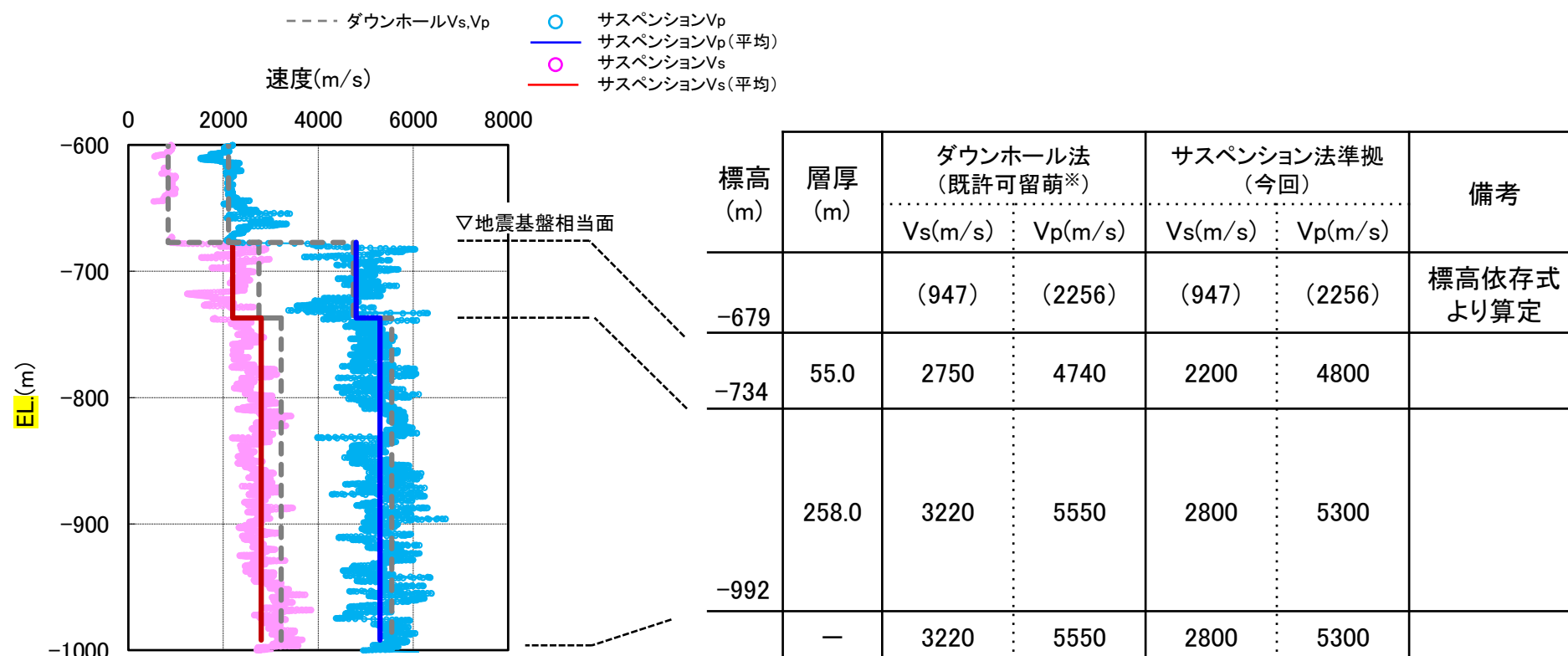
ここで, Vs: S波速度 (km/s)
Vp: P波速度 (km/s)
Z: 標高 (m)

図は第409回審査会合資料より抜粋

地震基盤相当面(EL.-679m)以深の速度構造の設定

■EL.-679m以深(先新第三系)

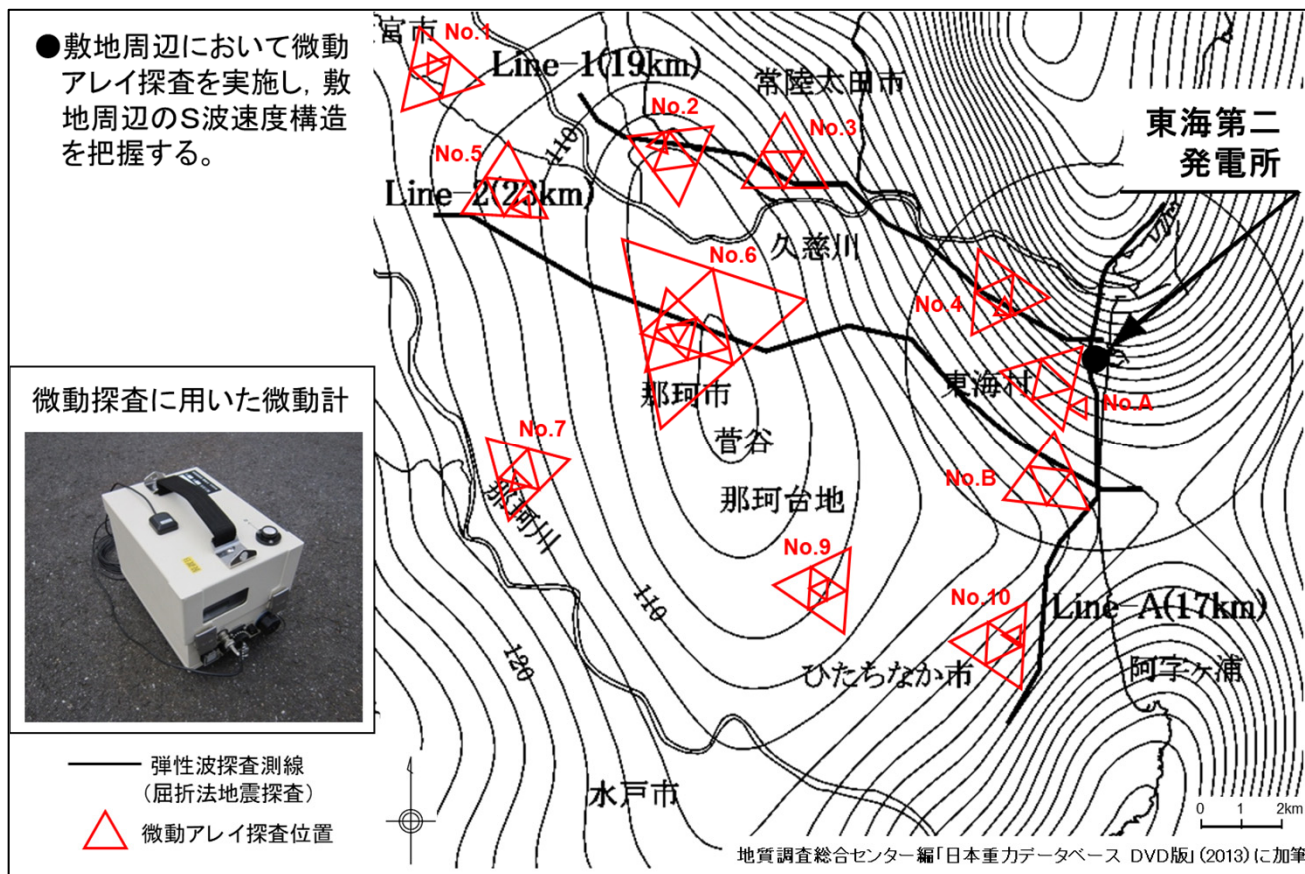
- ・地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討する。今回は、サスペンション法に準拠して速度構造を設定する。具体的には、ダウンホール法における同一層内で、サスペンション法のVs, Vpをそれぞれ平均して求めた値を用いる。
- ・地震基盤相当面位置は、Vs2200m/s以上に相当する敷地での層の上面としてEL.-679m(Vs2200m/s)に設定する。
- ・次頁以降では、今回新たに設定する速度構造について、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認する。



※ 既許可においては、地盤モデルの層区分との対応が明確なダウンホール法のVs, Vp値を設定

既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(1/6)

- 既許可の地下構造審査において、敷地内で実施している微動アレイ探査については、アレイサイズ(底辺長)が約470m以下と小さい。
- 一方、敷地周辺では、重力異常域と地下構造の関係を把握するため、屈折法地震探査及び微動アレイ探査を実施しており、この時実施した微動アレイ探査の底辺長は4kmないし2kmであることから地下数kmまで探査範囲が及んでいる。また、これらの探査結果に基づいて3次元地下構造モデルを作成している。
- そこで、この3次元地下構造モデルにおける敷地での位相速度の分散曲線と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線を比較し、関係を整理する。

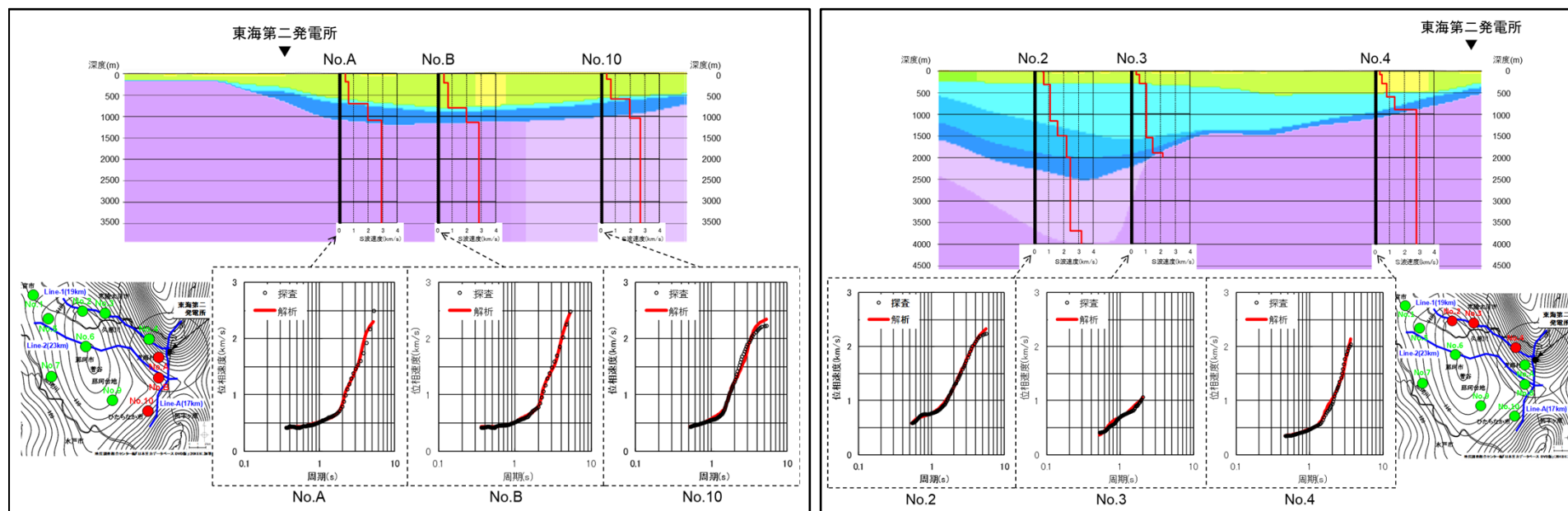


図は第338回審査会合資料より抜粋

既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(2/6)

■敷地周辺の微動アレイ探査結果

屈折法地震探査のLine-A測線付近で実施した微動アレイ探査結果及びLine-1測線付近で実施した微動アレイ探査結果を下図に示す。



屈折法地震探査のLine-A測線付近で実施した微動アレイ探査結果

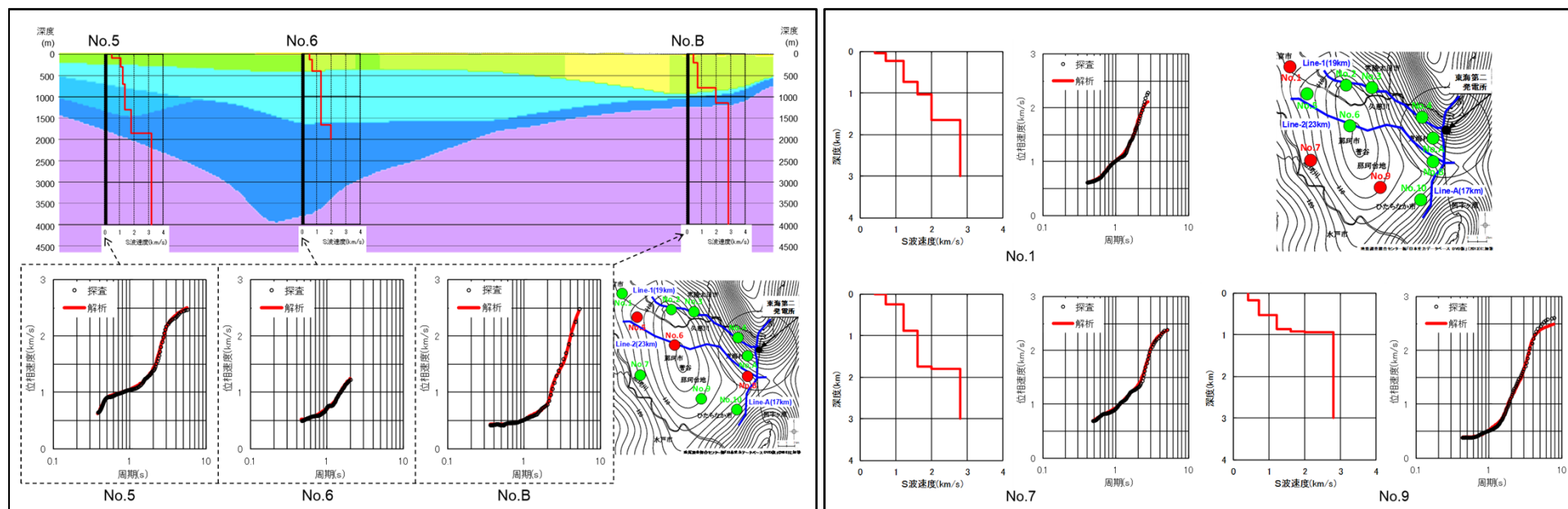
屈折法地震探査のLine-1測線付近で実施した微動アレイ探査結果

図は第338回審査会合資料より抜粋

既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(3/6)

■敷地周辺の微動アレイ探査結果

屈折法地震探査のLine-2測線付近で実施した微動アレイ探査結果及びその他の場所で行った微動アレイ探査結果を下図に示す。



屈折法地震探査のLine-2測線付近で実施した微動アレイ探査結果

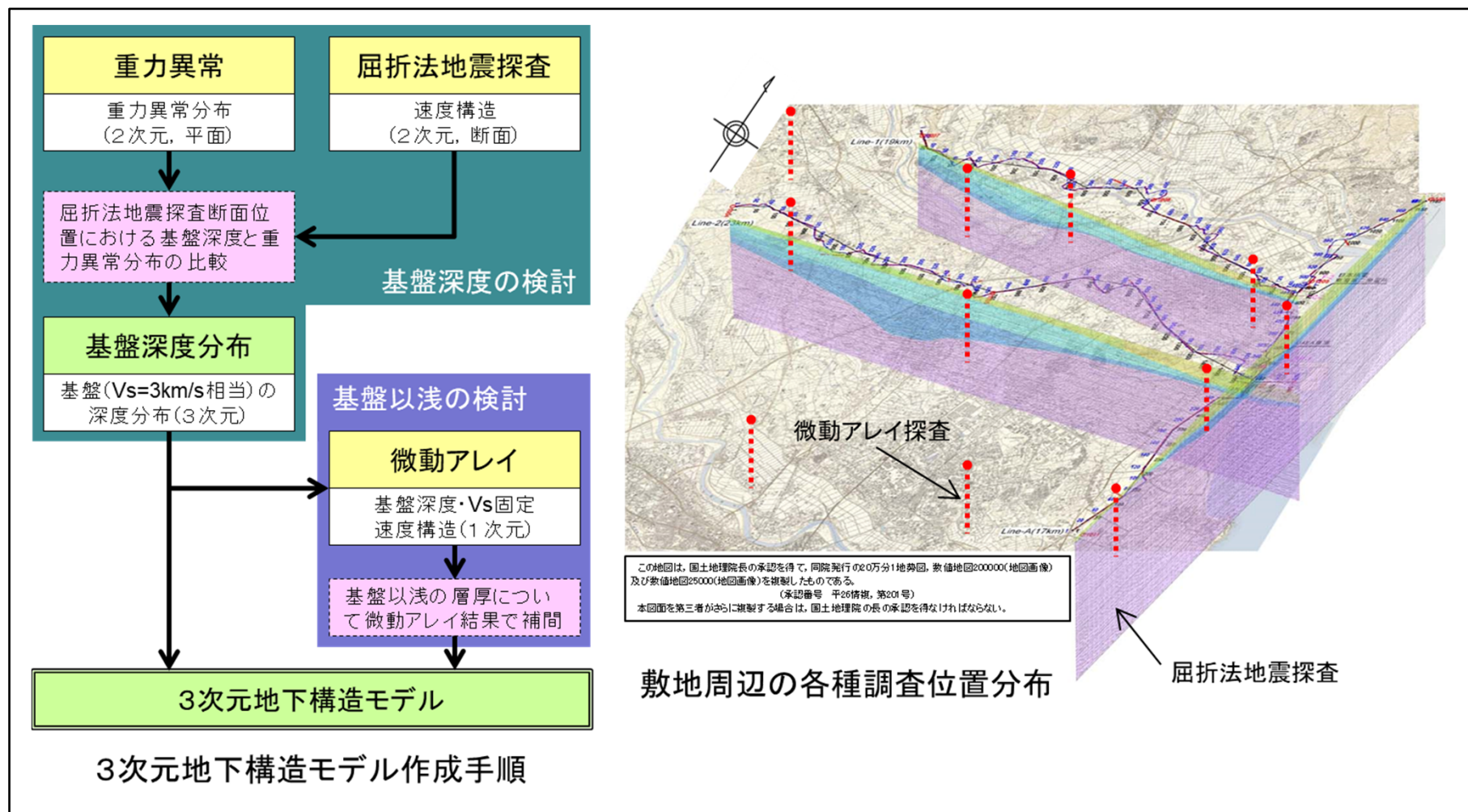
その他の場所で行った微動アレイ探査結果

図は第338回審査会合資料より抜粋

既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(4/6)

■3次元地下構造モデルの作成

敷地周辺における重力異常分布, 屈折法地震探査結果及び微動アレイ探査結果を基に, 下記の手順で3次元地下構造モデルを作成している。

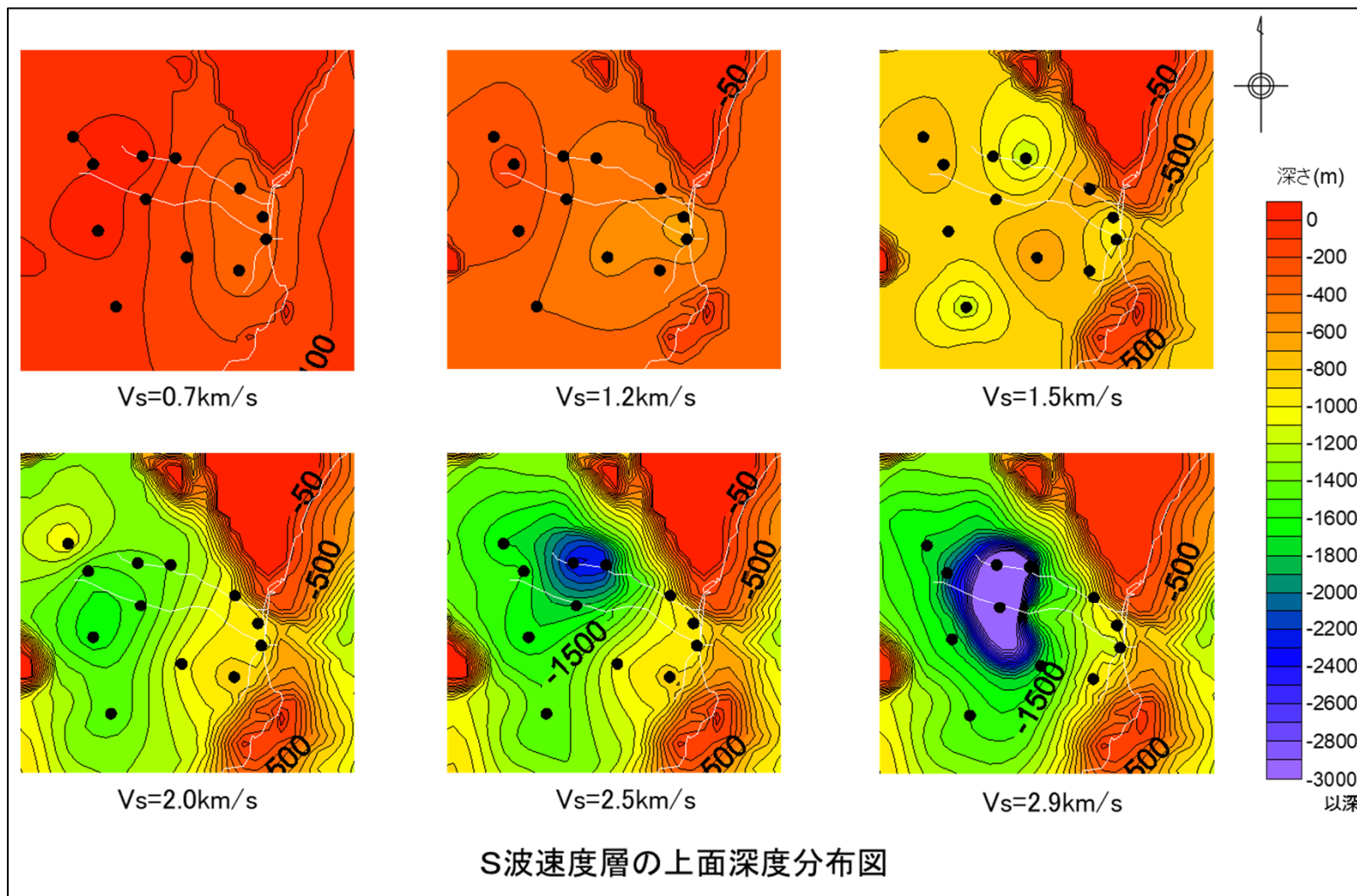


図は第338回審査会合資料より抜粋

既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(5/6)

■作成した3次元地下構造モデル

敷地周辺における重力異常分布, 屈折法地震探査結果及び微動アレイ探査結果を基に作成した3次元地下構造モデル (S波速度層の上面深度分布図)を下記に示す。

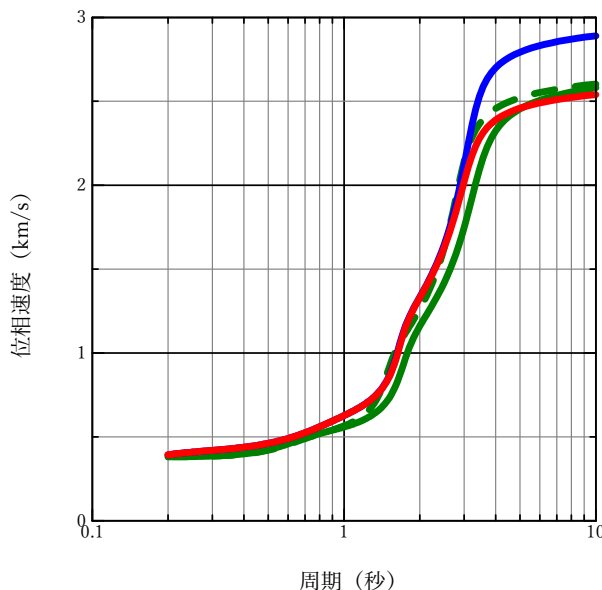


図は第338回審査会合資料より抜粋

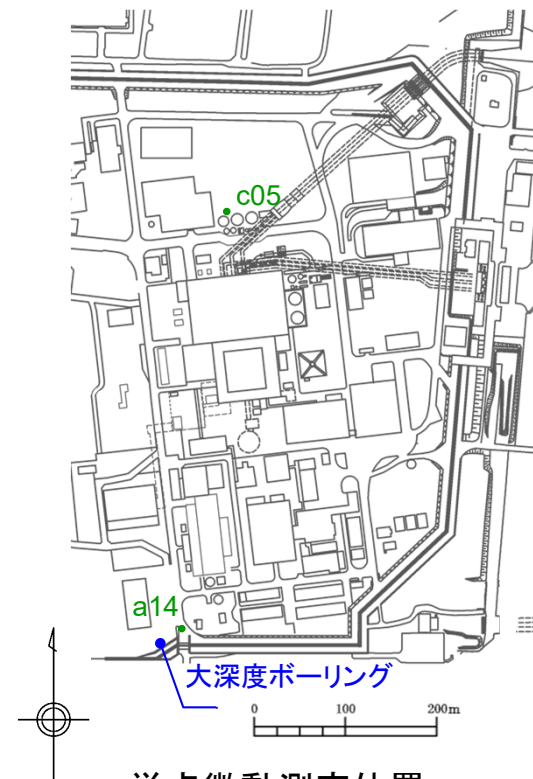
既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(6/6)

■微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから敷地(大深度ボーリング位置に近いa14地点及び既許可の審査時において実施した微動アレイ探査位置のc05地点)での情報を切り出した1次元モデルによる位相速度の分散曲線と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線を比較し、関係を整理する。

- 微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線(a14地点)
- 微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線(c05地点)
- 既許可の留萌用地盤モデルの位相速度の分散曲線
- サスペンション法に準拠して今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線



各モデルの位相速度の分散曲線に関する比較

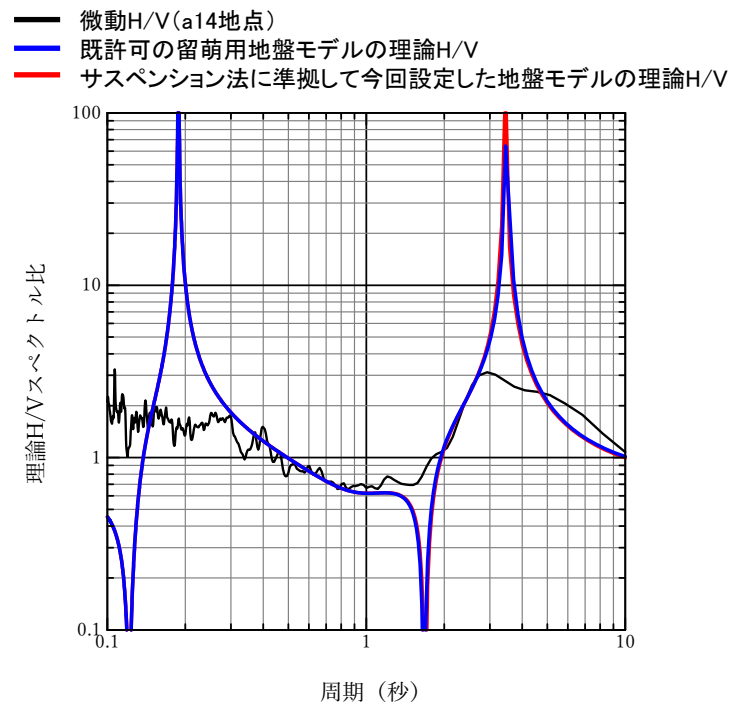


単点微動測定位置

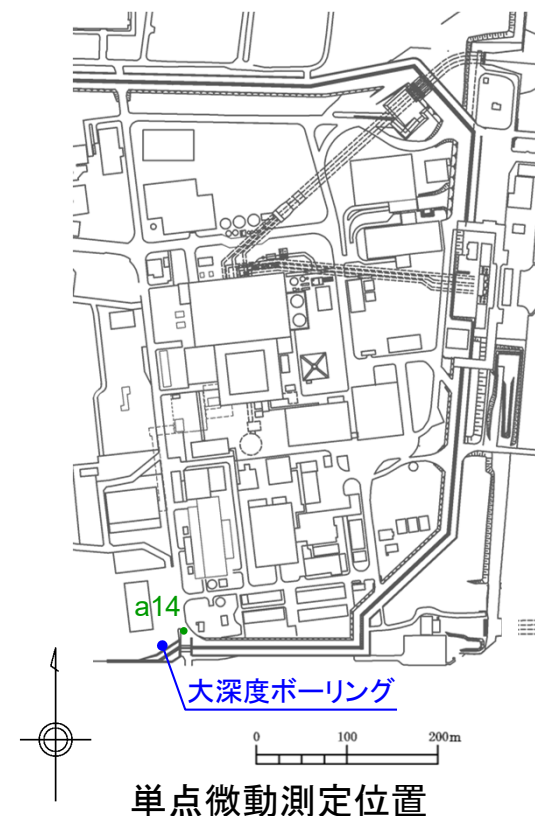
今回設定した地盤モデルと微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線は、全周期帯において、良く整合していることを確認した。なお、周期3秒よりも長周期側において既許可の留萌用地盤モデルの位相速度が他の地盤モデルの位相速度と比較して速くなっているが、これは地震基盤相当面以深における速度構造の違いによるものであり、地盤モデルのうち地震基盤相当面以浅の層のみを用いた既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の地震動評価結果には影響しない。

既往の各種物理探査結果との関係： H/Vスペクトル比

- 既許可の地下構造審査においては、敷地内における基盤の広がり把握するため、敷地内で単点微動測定を実施し、H/Vスペクトル比の空間分布を検討している。
- 大深度ボーリング位置に最も近いa14地点でのH/Vスペクトル比と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルのレイリー波の理論H/Vを比較し、関係を整理する。



探査によるH/Vと2つのモデルの理論H/Vに関する比較
(理論H/Vはレイリー波の基本モードによる)



H/Vスペクトル比に関してはモデルの違いが明瞭には現れず、ほぼ同じ形状を示しており、どちらもa14地点の微動H/Vスペクトル比のピークと同じ周期帯にピークが生じていることを確認した。

➡ 既往の物理探査結果(探査結果に基づいて作成した3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線、単点微動のH/Vスペクトル比)との比較により、今回設定した速度構造の妥当性を確認した。

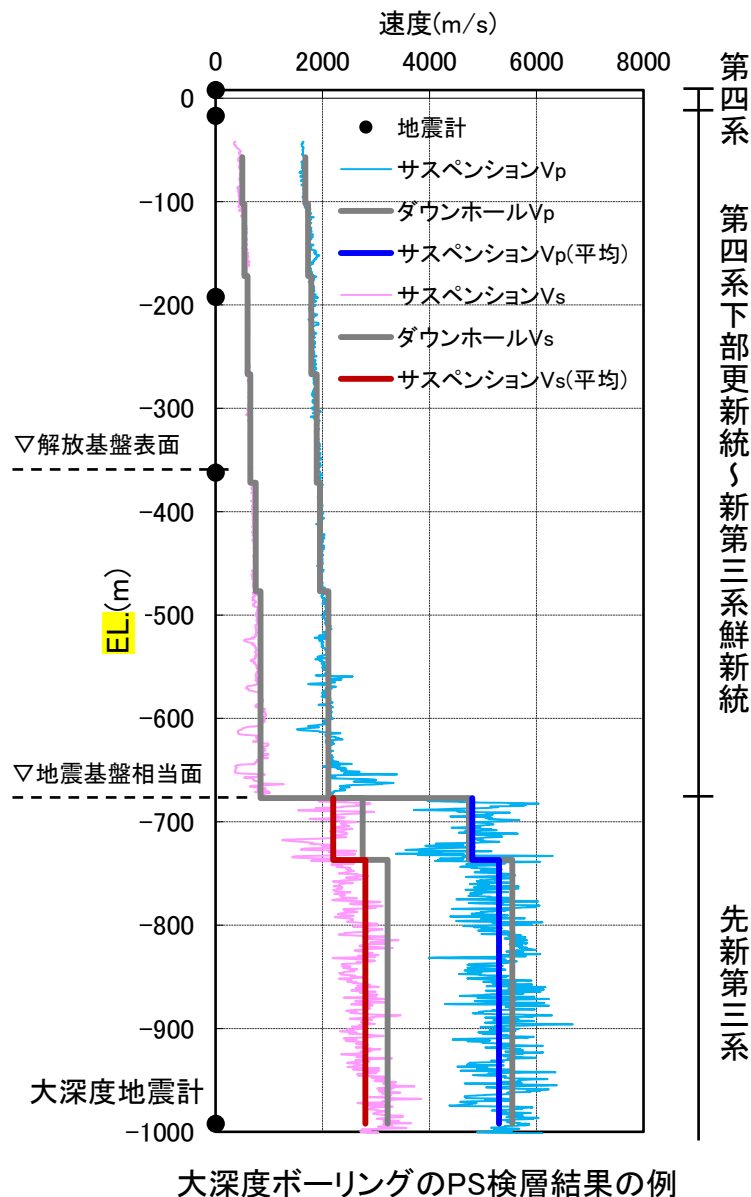
(3) 減衰定数の設定：方針

■大深度地震計を含む鉛直アレイ地震観測記録を用いて減衰定数を設定する。

- ・大深度地震計は地震基盤相当面より深い位置(EL-992m)に設置されており、他の鉛直アレイ地震観測記録と併用することで、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地震波の伝播の状況を直接調べることができる。そこで、大深度地震計を含めた鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数の逆解析により、減衰定数(Q値)を求める。
- ・伝達関数の逆解析による減衰定数の同定範囲は地表面からEL-992mの範囲とする。
- ・地盤の減衰定数は一般に振動数依存が認められ、高振動数になるほど減衰定数が低下する性質があるが、それには下限が存在すると考えられることから(例えば佐藤他(2006))、減衰定数の同定に際しては、減衰定数の下限を考慮する。

参考 既許可での評価方法との比較

| 項目 | | 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討 | 本検討 |
|----------|----------------|------------------------------|-------------------|
| 設定方法 | 地表～解放基盤表面 | EL-372m以浅の地震観測記録による同定解析 | 大深度地震観測記録を含めた同定解析 |
| | 解放基盤表面～地震基盤相当面 | 上記結果うち、第四系下部更新統～新第三系鮮新統の値を設定 | |
| | 地震基盤相当面以深 | 大深度地震観測記録を含めた同定解析 | |
| 減衰定数のモデル | | 振動数依存(下限考慮なし) | 振動数依存(下限考慮あり) |

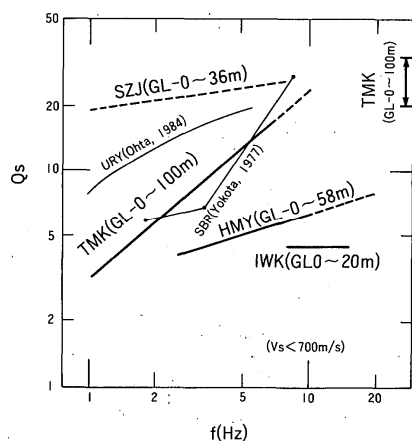


減衰定数のモデルに関する知見： 武村他(1993)

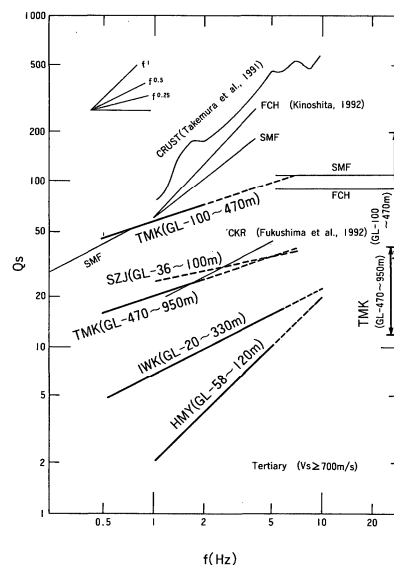
■ 概要

- ・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減衰定数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。
- ・富岡観測点(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。
- ・地震波の減衰については、Intrinsicな減衰(内部減衰)の他に不均質媒質内を地震波が伝わる際の散乱によるみかけの減衰等、複数の要因が重なり合っているものとされている。
- ・媒質の応カーひずみ関係に基づく波動エネルギーの消費が内部減衰の有力な原因の一つと考えられるとしたうえで、「低周波数側でのQ値の周波数依存性が応カーひずみ関係以外の効果によると考えると、それらの効果が低下する(Q値が大きくなる)高周波数領域では、周波数に依存しない応カーひずみ関係に基づくIntrinsicなQ値の影響が現れてくるとの解釈ができるかもしれない」とされている。

下線は当社で記載



Vs700m/s以下の浅部における
Q値の周波数依存性



Vs700m/s以上の深部における
Q値の周波数依存性

—— 本研究
(実線に続く点線はほぼ平均的にスペクトル比のレベルを合わせる事ができた領域を示す)

—— 既往研究

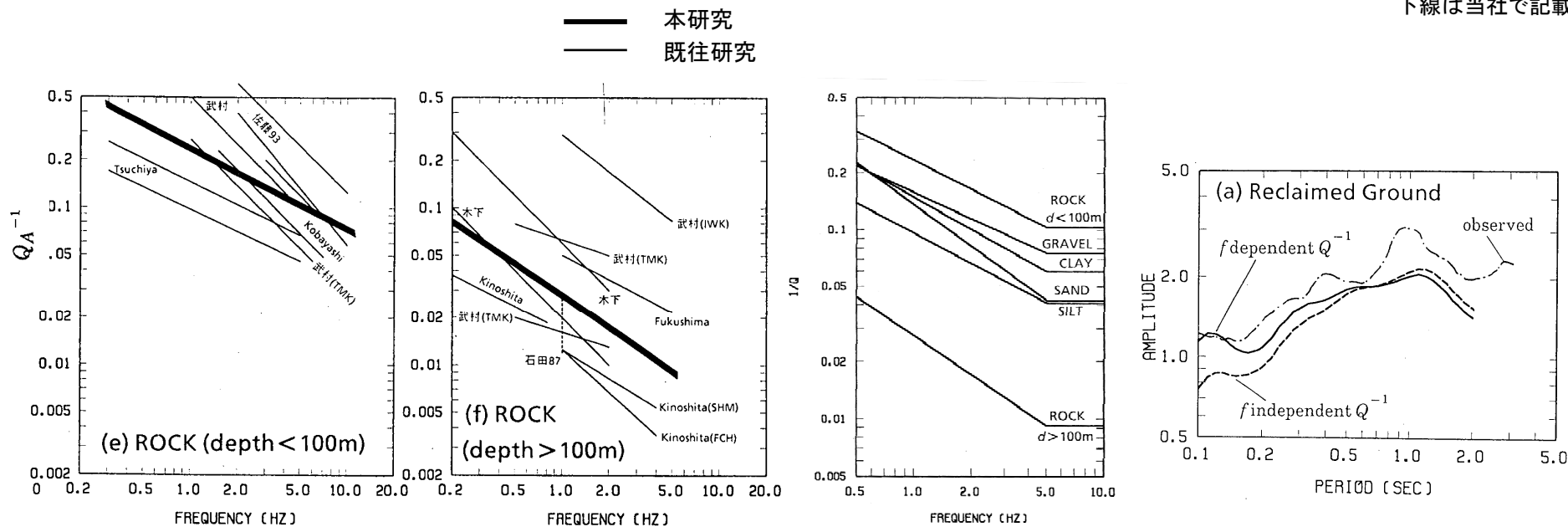
図は武村(1993)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

減衰定数のモデルに関する知見： 福島・翠川(1994)

■ 概要

- ・地盤の減衰定数に関する数多くの既往研究結果に基づき、地盤の減衰定数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の提案がなされている。
- ・5Hz以上の高周波数帯域については、既往研究結果(武村他(1993)等)を踏まえ、減衰定数を一定として設定している。
- ・周波数依存性を考慮した減衰定数を用いて計算した地盤増幅率は、周波数に依存しない減衰定数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。

下線は当社で記載



土質毎に推定された周波数と Q^{-1} 値(代表的な V_s による値となるよう補正)との関係

土質毎に設定した減衰定数のモデル (周波数依存を考慮)

地盤増幅率の比較の例

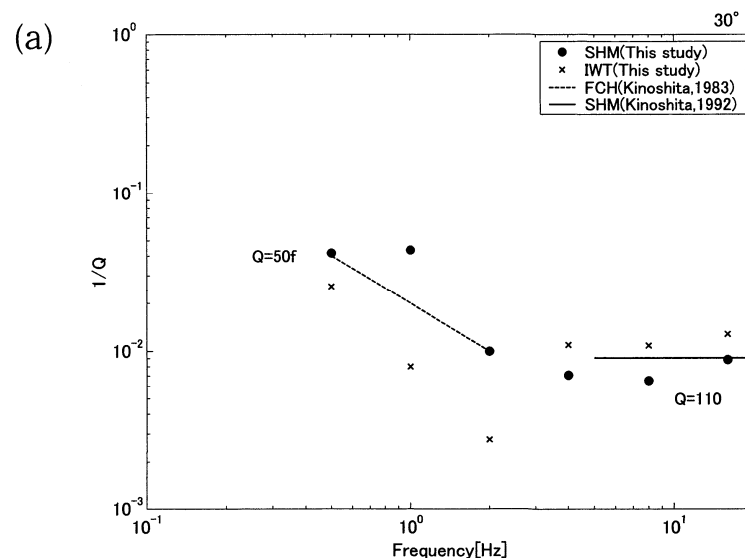
図は福島・翠川(1994)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

減衰定数のモデルに関する知見： 木下・大池(2002)

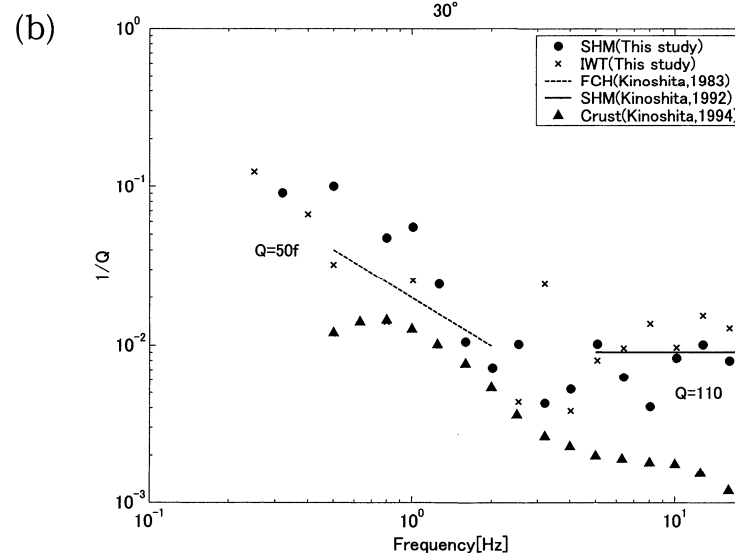
■ 概要

- ・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、減衰定数の関数モデルを設定せずに減衰定数の同定を行っている。
- ・その結果、減衰定数にはある周波数から下限値が存在し、それより高周波数側で周波数依存性が見られなくなることを示している。

下線は当社で記載



(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

同定した減衰定数と既往研究による減衰定数の比較

本研究(基盤への入射角を30°と仮定): ● SHM(下総観測点), × IWT(岩槻観測点)
 既往研究: ---- FCH(府中観測点)(木下(1983)), — SHM(下総観測点)(Kinoshita(1992)),
 ▲ 南関東地方の地殻(Kinoshita(1994))

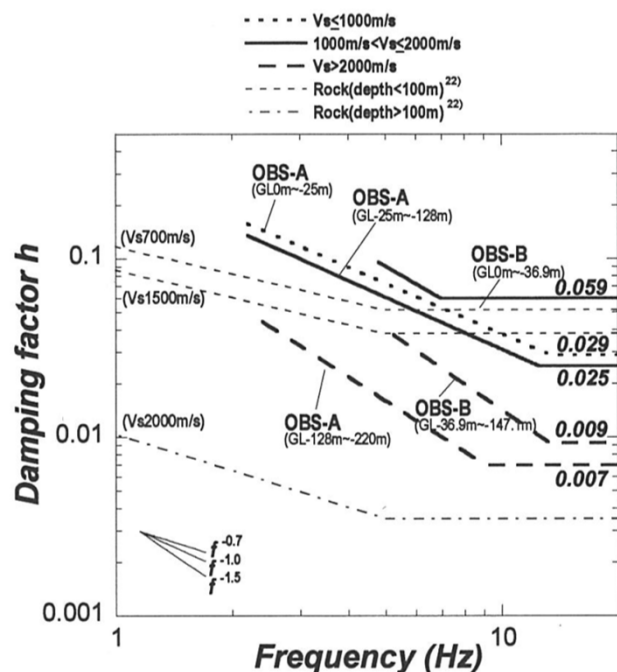
図は木下・大池(2002)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

減衰定数のモデルに関する知見： 佐藤他(2006)

■ 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)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、減衰定数の下限値を考慮できる関数モデルの提案がなされている。
- ・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を評価したところ、既往の室内試験による微小ひずみの履歴減衰とよく対応しているとされている。

下線は当社で記載



既往の室内試験による岩盤の微小ひずみの履歴減衰

| Rock | Damping factor | Shear strain (%) | Vs (m/s) | Depth (m) | References |
|--------------|----------------|------------------|----------|-----------|---------------------------------|
| Sandstone | 0.01~0.02 | 0.001 | 1400 | 74.4 | Shima et al. ²⁵⁾ |
| | 0.006* | 0.0002 | 1200 | 520 | Yoshikawa et al. ²⁷⁾ |
| Mudstone | 0.015~0.02 | 0.002 | 540 | 50 | Nishi and Esashi ²⁶⁾ |
| Granite | 0.01 | 0.0001 | 2800 | 317 | Shima et al. ²⁵⁾ |
| Granodiorite | 0.005* | 0.0006 | 2800 | 990 | Yoshikawa et al. ²⁷⁾ |

*±0.005

同定した減衰定数と既往研究による減衰定数の比較

- 本研究: $V_s \leq 1000\text{m/s}$
 ——— $1000\text{m/s} < V_s \leq 2000\text{m/s}$
 - - - $V_s > 2000\text{m/s}$
- 既往研究: - - - 深さ<100mの観測点(堆積岩)(福島・翠川(1994))
 - · - 深さ>100mの観測点(堆積岩)(福島・翠川(1994))

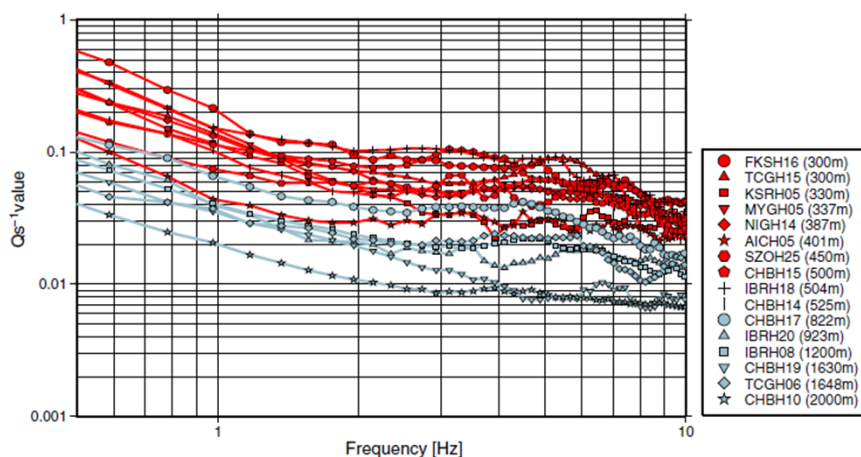
図は佐藤他(2006)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

減衰定数のモデルに関する知見: Fukushima et al.(2016)

■ 概要

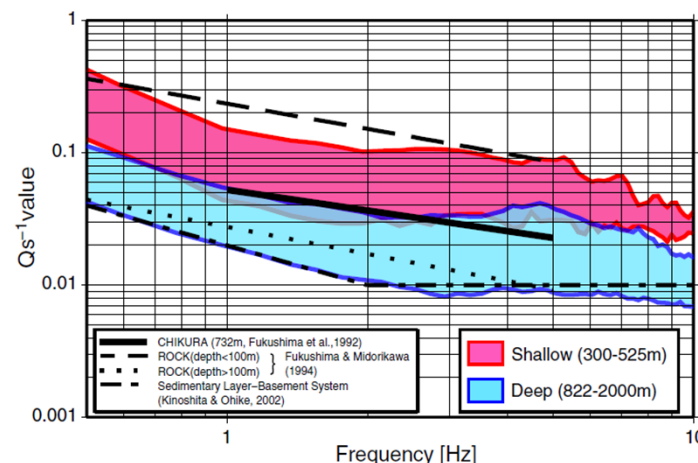
- ・ボアホール記録のSH波を用いて Q^{-1} 値(減衰定数)を推定する方法として、デコンボリューションを用いた方法を提案し、KiK-netひたちなか(IBRH18)観測点を含む16箇所のKiK-net地中観測点を対象に、 Q^{-1} 値の推定を行っている。
- ・その結果、0.5~10Hzで安定して Q^{-1} 値が得られ、約2~3 Hzまでの振動数で減少するが、それより高い振動数ではほぼ一定となることを示した。
- ・このような Q^{-1} 値の折れ曲がり(減衰定数の下限)は、岩盤の減衰定数には下限が存在することを示した木下・大池(2002)の結果と共通するとされている。

下線は当社で記載



16箇所のKiK-net地中観測点における減衰定数の推定結果

- 深さ500m以浅の観測点
- 深さ800m以深の観測点



推定した減衰定数と既往研究による減衰定数の比較

- 本研究:
 - 深さ300~525mの観測点の推定領域
 - 深さ822~2000mの観測点の推定領域
- 既往研究:
 - 千倉観測点(深さ732m)(Fukushima et al.(1992))
 - 深さ<100mの観測点(堆積岩)(福島・翠川(1994))
 - 深さ>100mの観測点(堆積岩)(福島・翠川(1994))
 - .-.- 非常に深い観測点(堆積層-基盤系)(木下・大池(2002))

図はFukushima et al.(2016)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

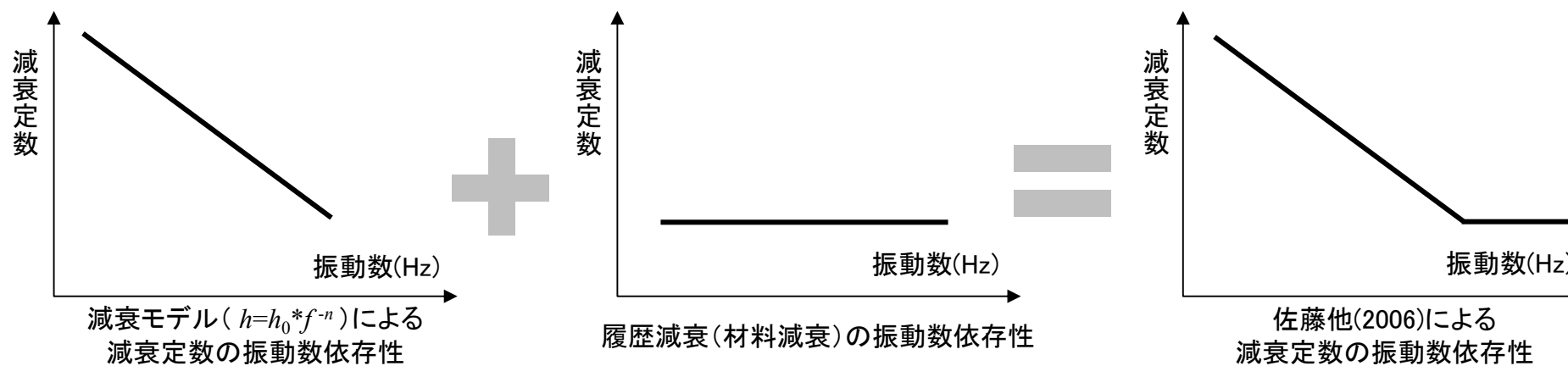
減衰モデルの考え方

■ 地震動評価に用いる減衰定数の設定に関する知見の整理

- ・伝達関数の逆解析に関する既往研究(例えば福島・翠川(1994))では, 対象とする振動数帯域で減衰定数が振動数の負のべき乗に比例する関数モデル($h=h_0*f^{-n}$)を用いている。
- ・一方, 減衰定数の関数モデルを設定しないで同定を行った木下・大池(2002)によれば, 減衰定数にはある振動数から下限値が存在し, それより高振動数側で振動数依存性が見られなくなることを示している。
- ・高振動数帯で減衰定数が一定となる要因として, 振動数に依存しない微小ひずみの履歴減衰(材料減衰)の存在が指摘されている(例えば武村他(1993), 佐藤他(2006))。
- ・最近の研究として, 複数のKiK-net観測点を対象に地震波のデコンボリューションを用いる方法により減衰定数を推定したFukushima et al.(2016)においても, 木下・大池(2002)と同様, 減衰定数の下限値の存在が示されている。



以上のように, 減衰定数の下限を示す評価事例が蓄積されてきたことから, 減衰定数の同定に際しては, 振動数依存性と高振動数帯での下限を考慮する。



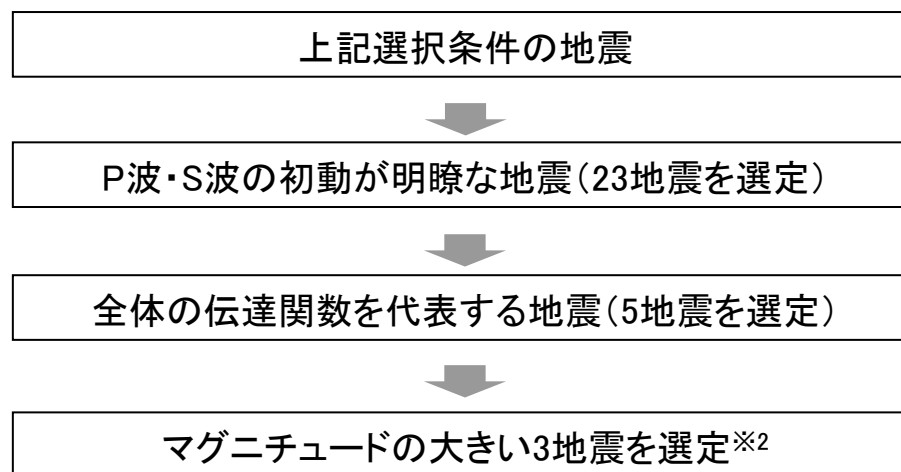
逆解析に用いる減衰モデルのイメージ図

地盤同定解析に用いる地震の選定

■地盤同定解析に用いる検討対象地震については、標準応答スペクトルの策定において対象とされた地震同様、内陸地殻内地震とし、具体的には下記に示す手順に従って選定する。

【検討対象地震の選定条件】

- ・地震発生様式 : 内陸地殻内地震
- ・対象期間^{※1} : 2012年8月～2019年1月
- ・震源深さ : 25km以浅



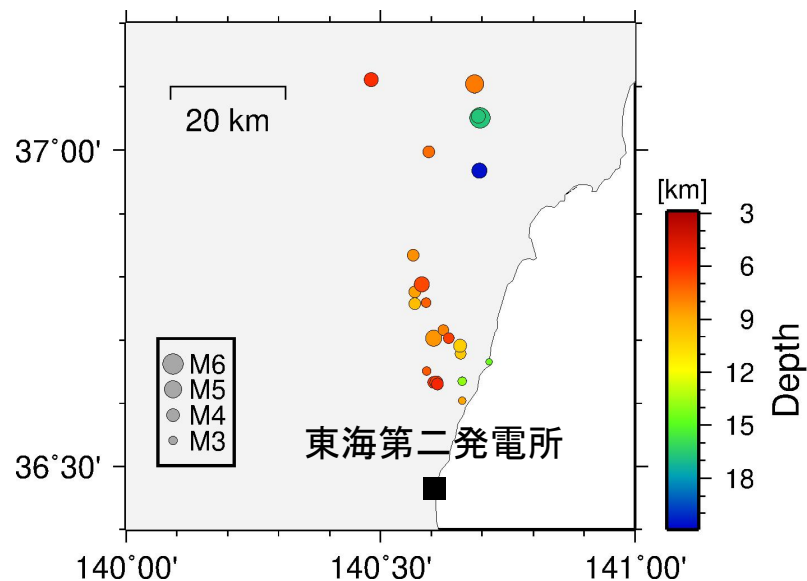
地盤同定解析に用いる地震の選定フロー

※1 検討対象とした地震記録は、大深度地震観測開始時期の2012年から地盤同定解析を開始した2019年までのものとした。

※2 比較的規模の大きい地震を選定することで、振幅が大きく、また広帯域の振動数成分が含まれることになる。その結果、S/Nが大きくなり、地盤同定解析に用いる伝達関数の精度が高まる。

地盤同定解析に用いる地震の選定： 23地震の選定

- 2012年8月～2019年1月に観測した地震から、ノイズや機器の不具合による影響のないデータを選定し、P波・S波の初動が明瞭に見られた下記に示す23地震を選定する。
- 2015年以降に解放基盤表面以浅の地震計の一部が連続して故障したこと等により、結果として、検討に用いる地震観測記録が2014年以前に偏っているが、2011年東北地方太平洋沖地震をきっかけに活発化した福島県南部から茨城県北部にかけての地震活動により、今回の地盤同定解析に用いる地震の選定にあたり十分な記録が得られていること、時間経過とともに地震活動が沈静化傾向にあることを確認している。



選定した23地震の震央分布図

23地震の諸元

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | マグニチュード | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 1 | 2012/08/10 | 07:18 | 36.7590 | 140.5900 | 3.2 | 7.2 | 32.6 |
| 2 | 2012/11/12 | 00:12 | 36.6350 | 140.6600 | 3.0 | 13.9 | 19.4 |
| 3 | 2013/01/13 | 02:54 | 36.6510 | 140.5910 | 3.1 | 7.0 | 20.6 |
| 4 | 2013/01/15 | 09:08 | 36.6040 | 140.6600 | 2.9 | 8.8 | 16.1 |
| 5 | 2013/01/31 | 23:53 | 36.7030 | 140.6040 | 4.7 | 8.4 | 26.0 |
| 6 | 2013/02/24 | 13:55 | 36.9680 | 140.6940 | 4.5 | 20.6 | 56.0 |
| 7 | 2013/04/25 | 16:16 | 37.1110 | 140.4820 | 4.2 | 6.0 | 72.5 |
| 8 | 2013/06/04 | 13:09 | 36.7580 | 140.5670 | 3.7 | 9.6 | 32.6 |
| 9 | 2013/07/12 | 03:18 | 36.7760 | 140.5670 | 3.8 | 8.7 | 34.6 |
| 10 | 2013/07/23 | 12:02 | 37.1040 | 140.6850 | 5.2 | 7.8 | 71.2 |
| 11 | 2013/08/14 | 09:45 | 36.6330 | 140.6040 | 3.8 | 6.3 | 18.6 |
| 12 | 2013/08/14 | 14:31 | 36.6330 | 140.6100 | 4.1 | 6.3 | 18.6 |
| 13 | 2013/08/19 | 11:22 | 36.6310 | 140.6120 | 3.8 | 5.7 | 18.3 |
| 14 | 2013/09/20 | 02:25 | 37.0510 | 140.6950 | 5.9 | 16.7 | 65.0 |
| 15 | 2013/09/26 | 14:44 | 36.7160 | 140.6230 | 3.6 | 8.0 | 27.8 |
| 16 | 2013/09/27 | 07:37 | 37.0530 | 140.6920 | 4.2 | 16.7 | 65.6 |
| 17 | 2013/11/12 | 03:28 | 36.7030 | 140.6338 | 3.6 | 6.4 | 26.4 |
| 18 | 2014/01/09 | 04:08 | 36.7885 | 140.5810 | 4.6 | 6.6 | 35.9 |
| 19 | 2014/03/27 | 14:20 | 36.8345 | 140.5643 | 3.8 | 8.3 | 41.1 |
| 20 | 2014/04/01 | 01:15 | 36.6780 | 140.6570 | 3.6 | 10.0 | 24.0 |
| 21 | 2014/07/03 | 07:57 | 36.6910 | 140.6560 | 4.0 | 10.2 | 25.4 |
| 22 | 2014/08/08 | 03:47 | 36.6660 | 140.7130 | 2.5 | 14.6 | 24.2 |
| 23 | 2014/11/17 | 08:59 | 36.9970 | 140.5950 | 3.8 | 7.5 | 59.0 |

地盤同定解析に用いる地震の選定結果: Transverse方向

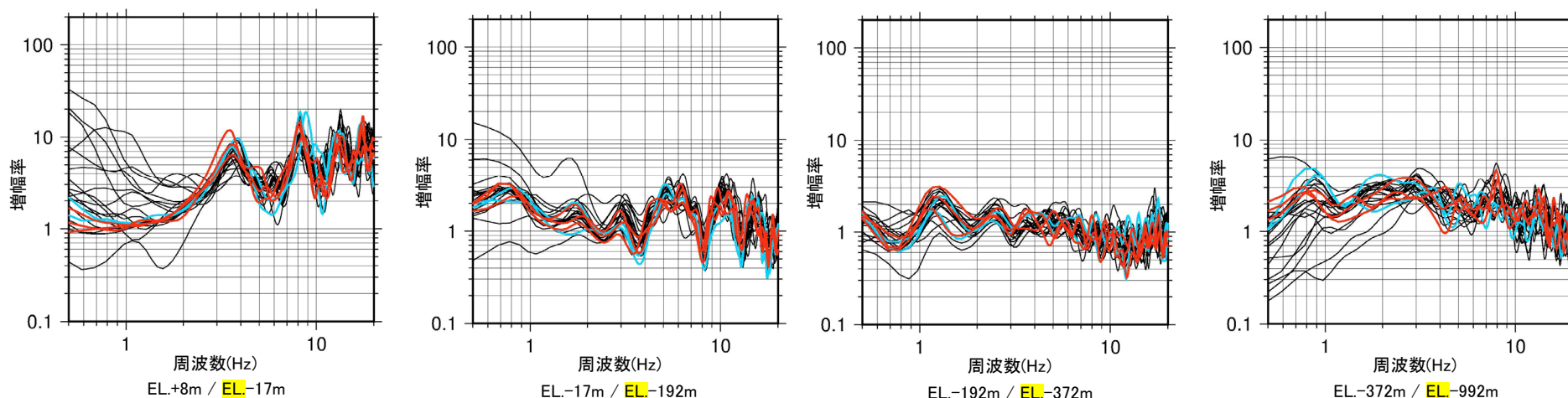
■P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数を比較して、全体の伝達関数を代表する地震を5地震選定し、このうちマグニチュードが大きい3地震を地盤同定解析に用いる地震に選定する。

伝達関数を代表する5地震

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | マグニチュード | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 5 | 2013/01/31 | 23:53 | 36.7030 | 140.6040 | 4.7 | 8.4 | 26.0 |
| 6 | 2013/02/24 | 13:55 | 36.9680 | 140.6940 | 4.5 | 20.6 | 56.0 |
| 14 | 2013/09/20 | 02:25 | 37.0510 | 140.6950 | 5.9 | 16.7 | 65.0 |
| 18 | 2014/01/09 | 04:08 | 36.7885 | 140.5810 | 4.6 | 6.6 | 35.9 |
| 21 | 2014/07/03 | 07:57 | 36.6910 | 140.6560 | 4.0 | 10.2 | 25.4 |

網掛け: 地盤同定解析に用いる3地震

— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いる3地震
— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いない2地震
— 残りの18地震



備考

伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。

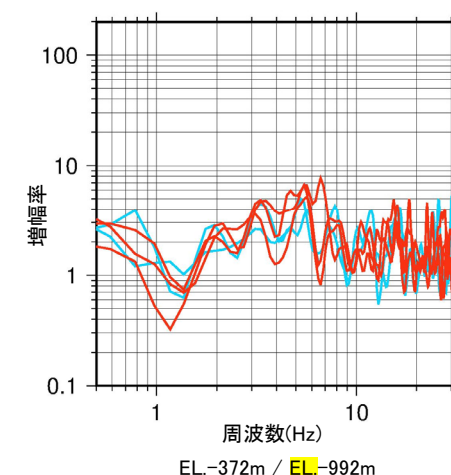
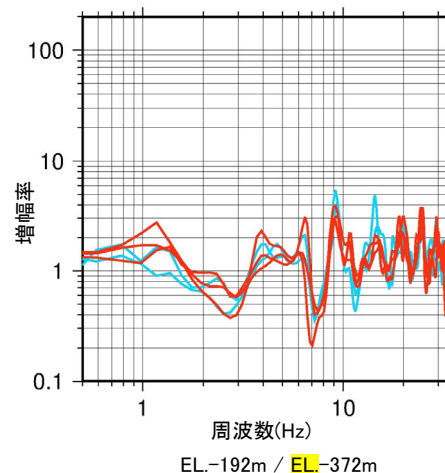
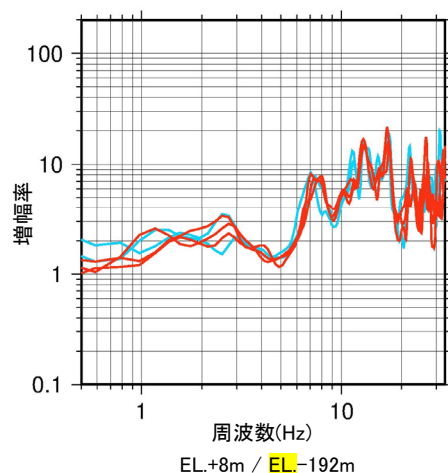
23地震の伝達関数(Transverse方向)

- ・P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数については、3Hz以下の周波数帯では、イベント毎のばらつきが大きいものの3Hz以上の周波数帯では小さくなっている。
- ・全体の伝達関数を代表するよう5地震を選定した段階で、3Hz以下も含めた全周波数帯において伝達関数のばらつきは小さくなり、地盤同定解析に用いる3地震と他の2地震の伝達関数に大きな差はない。

地盤同定解析に用いる地震の選定結果：UD方向

- UD方向の地盤同定解析に用いる地震は、Transverse方向の地盤同定解析に用いた地震と同じものを用いる。
- UD方向の伝達関数に関して、Transverse方向の検討で選定した5地震と地盤同定解析に用いる3地震の伝達関数を比較して下に示す。

— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いる3地震
— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いない2地震



選定した5地震の伝達関数(UD方向)

備考

- ・伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。
- ・UD方向のEL.-17mの地震計は故障のため欠測。現在は復旧済。

UD方向の伝達関数についても、Transverse方向同様、5地震を選定した段階で、全周波数帯において伝達関数のばらつきは小さく、地盤同定解析に用いる3地震と他の2地震の伝達関数に大きな差はない。

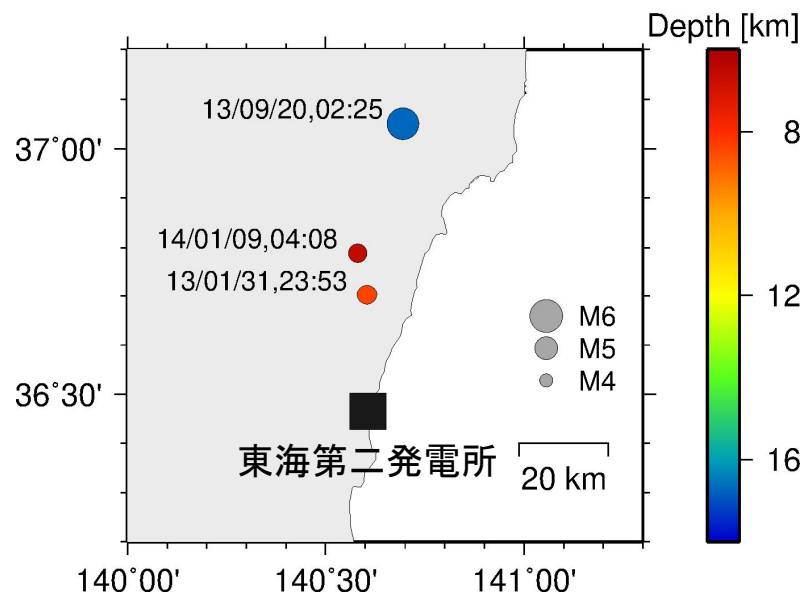
地盤同定解析に用いる3地震について

■前頁までの検討により、地盤同定解析に用いる3地震の伝達関数について、以下のとおり整理する。

- ・P波、S波初動の明瞭な23地震選定の段階では、およそ3Hz以下の低周波数帯でばらつきは大きいものの、3Hz以上の高周波数帯では小さくなり、更に、全体を代表する5地震を選定した段階で全周波数帯でばらつきは小さくなる。
- ・全体を代表する5地震の伝達関数では、Transverse方向、UD方向とも伝達関数の違いは小さいことを確認した上で、マグニチュードの大きい3地震を地盤同定解析に用いる地震として選定する。

23地震全体の伝達関数の中から代表性のあるものとして5地震の伝達関数を選定し、それらの伝達関数に大きな差はないことを確認している。従って、検討に用いる3地震の選定プロセスの段階で、3地震以外の地震の記録での検証を行い、最終的に用いる3地震の記録の妥当性を確認している。

■地盤同定解析に用いる3地震の諸元を下記に示す。



検討対象3地震の諸元

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | マグニチュード | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | | | |
| 5 | 2013/01/31 | 23:53 | 36.7030 | 140.6040 | 4.7 | 8.4 | 26.0 |
| 14 | 2013/09/20 | 02:25 | 37.0510 | 140.6950 | 5.9 | 16.7 | 65.0 |
| 18 | 2014/01/09 | 04:08 | 36.7885 | 140.5810 | 4.6 | 6.6 | 35.9 |

検討対象3地震の震央分布図

解析条件及び探索範囲(1/2)

- Q値を対象に地盤同定解析を行う。
- Q値の上限(減衰定数の下限)を考慮したバイリニア型のモデルを用いる。また、Q値のS波速度(Vs), P波速度(Vp)依存を考慮する。

- ① 地表(EL8m)からEL-372mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行い設定した地盤モデルを用いる。
- ② 概ね100m程度を目安に層厚を設定する。
- ③ EL-372m ~ -476mの地盤物性については、上層との連続性を考慮し、上層と同じ値を設定する。
- ④ EL-476m ~ -679mの地盤物性については、調査結果に基づく標高依存式より算出する。
- ⑤ EL-679m以深のS波速度及びP波速度については、1000mボーリングにおけるPS検層(サスペンション法)結果、密度については1000mボーリングにおける密度検層結果を基に設定する。
- ⑥ 地表(EL8m)からEL-992mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行う。

同定解析における探索範囲

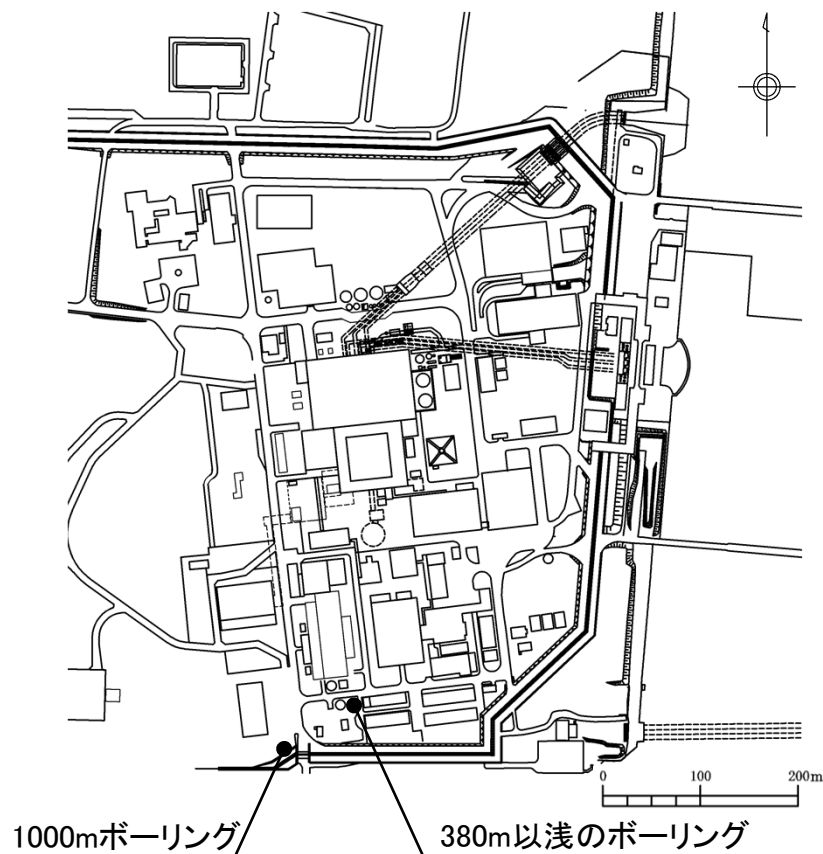
| 固定パラメータ | | | | | | 探索範囲 | | | | | | |
|-----------|-----------|----------------------------------|---------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------|----------|-----------------------------|---------|----------|------|
| EL (m) | 層厚 (m) | 地層 | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | Q=(Vs/n)(f/f0) ^α | | | Q=(Vp/n)(f/f0) ^α | | | |
| | | | | | | 水平 | | | 鉛直 | | | |
| | | | | | | n | α | f0 | n | α | f0 | |
| ● | 8.0 | | | | | | | | | | | |
| | 2.5 | 第四系 | ① 130 | 280 | 1.71 | ⑥ | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 1-200 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 | |
| | 5.5 | | 151 | 403 | | | | | | | | |
| | 1.0 | | 308 | 1589 | 1.66 | | | | | | | |
| | 8.0 | | 478 | 1509 | 1.82 | | | | | | | |
| | 8.0 | | | | | | | | | | | |
| ● | -15.0 | 第四系 下部更新統 ~ 新第三系 鮮新統 | 477 | 1753 | 1.69 | 10-80 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 10-320 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 | |
| ● | -17.0 | | 2.0 | 477 | 1753 | | | | | | | 1.69 |
| | 89.0 | | 557 | 1742 | 1.74 | | | | | | | |
| | -106.0 | | 62.0 | 557 | 1742 | | | | | | | 1.74 |
| | -168.0 | | 24.0 | 669 | 2067 | | | | | | | 1.78 |
| ● | -192.0 | | 68.0 | 669 | 2067 | | | | | | | 1.78 |
| | -260.0 | | 108.0 | 756 | 2256 | | | | | | | 1.82 |
| | -368.0 | | 2.0 | 756 | 2256 | | | | | | | 1.82 |
| ▽ | 解放基盤表面 | | 2.0 | 790 | 2000 | | | | | | | 1.85 |
| | -370.0 | | 2.0 | 790 | 2000 | | | | | | | 1.85 |
| ● | -372.0 | 104.0 | ② 790 | ③ 2000 | 1.85 | 10-100 | 0.0-1.5 | 1.0-20.0 | 10-400 | 0.0-1.5 | 1.0-33.3 | |
| | -476.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | | | | | | | |
| | -566.0 | 89.0 | 904 | ④ 2205 | 2.00 | | | | | | | |
| | -655.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | | | | | | | |
| ▽ | 地震基盤相当面 | -679.0 | | | | | | | | | | |
| | 55.0 | | ⑤ 2200 | 4800 | 2.65 | | | | | | | |
| ● | -734.0 | 258.0 | 2800 | 5300 | 2.78 | | | | | | | |
| | -992.0 | - | 2800 | 5300 | 2.78 | | | | | | | |

●: 地震計位置

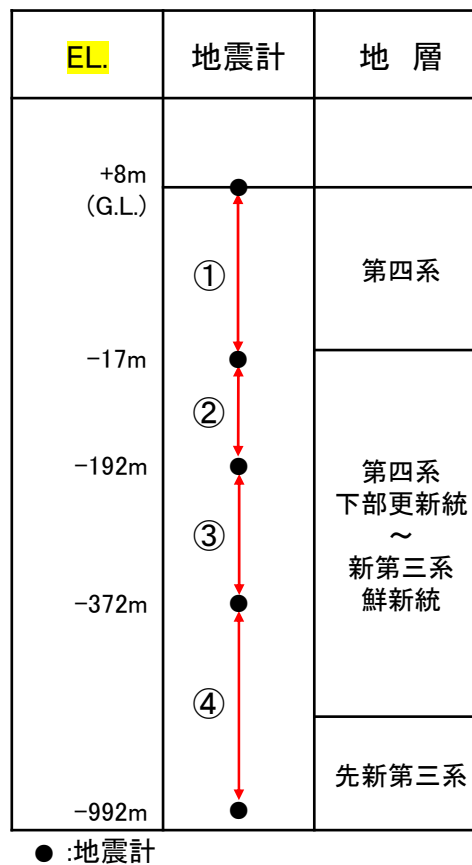
網掛け: 第409回審査会合の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた値と異なる箇所

解析条件及び探索範囲(2/2)

- 地震計間の伝達関数には、①EL.+8m/EL.-17m, ②EL.-17m/EL.-192m, ③EL.-192m/EL.-372m, ④EL.-372m/EL.-992mの4ペアを用いる。
- 前述した3地震の観測記録の伝達関数を同時にフィッティングさせてQ値を同定する。フィッティングに際しては3地震それぞれの入射角も未知数として同定対象とする。
- 逆解析については5回の試行を行い、そのうち最小の解を結果とする。



地震計の設置位置



地震計の設置深さ

入射角

| No. | 地震 | 入射角探索範囲* | |
|-----|------------|------------------|----------|
| | | Transverse 方向 | UD 方向 |
| 5 | 2013/01/31 | 55-65 | 60-70 |
| 14 | 2013/09/20 | 30-40 | 45-55 |
| 18 | 2014/01/09 | 25-35 | 55-65 |

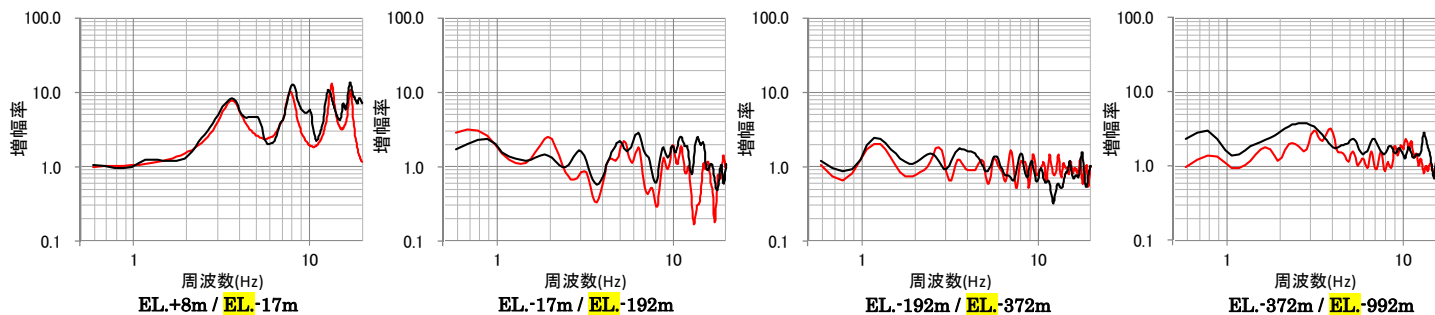
※震源と観測点の位置関係及びEL.-992mの地震計のUD方向-Transverse方向のオービットに基づき設定。

観測伝達関数と理論伝達関数の比較(Transverse方向)

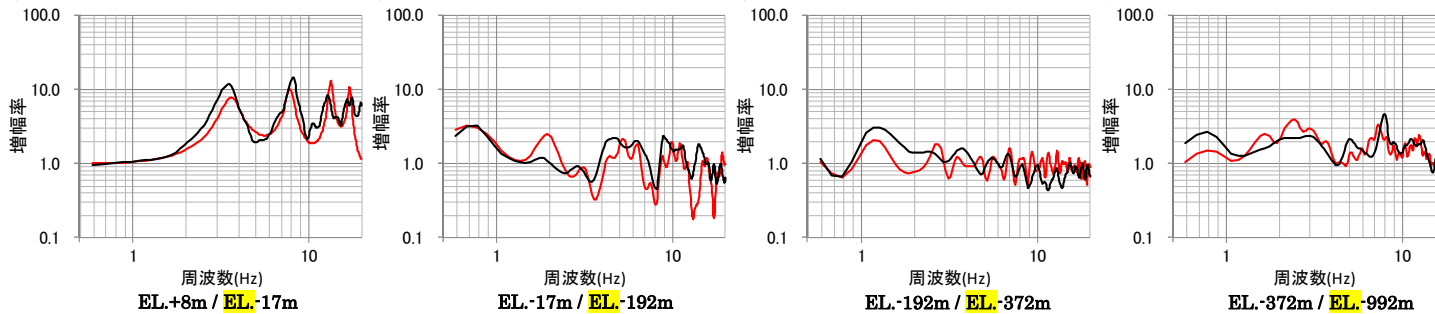
■ 観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数を下記に示す。同定結果は観測記録を再現している。

— 同定結果
— 観測記録

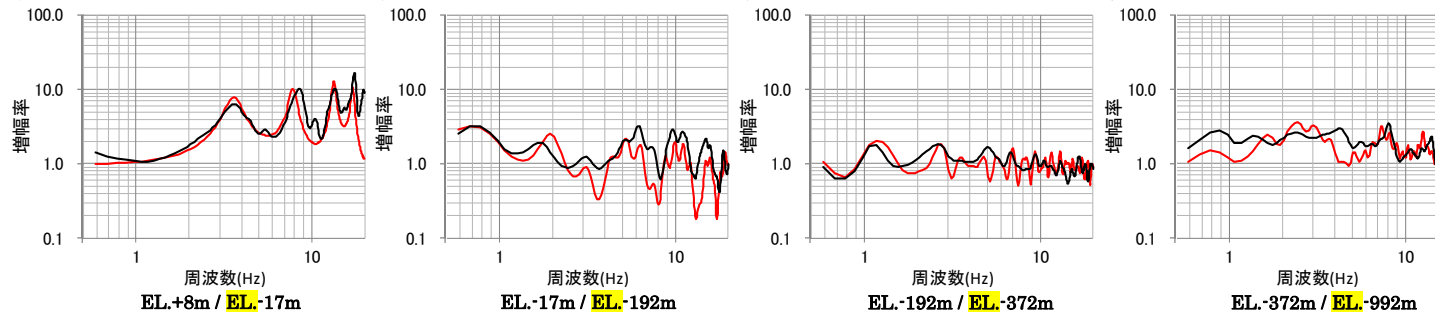
2013年1月31日
入射角: 55.63°



2013年9月20日
入射角: 30.22°



2014年1月9日
入射角: 34.30°



観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数

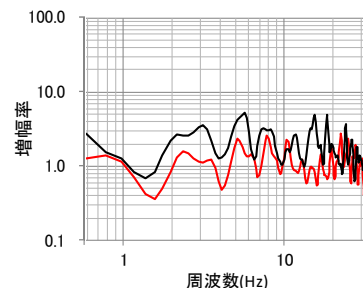
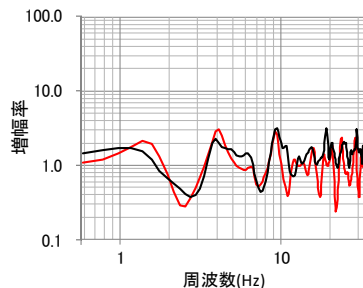
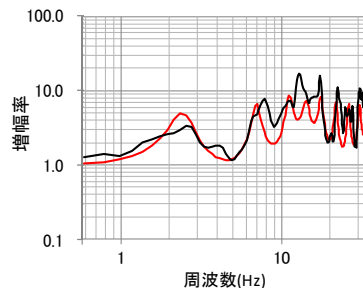
備考

対象周波数: 0.5~20Hz。地震観測記録の伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。

観測伝達関数と理論伝達関数の比較(UD方向)

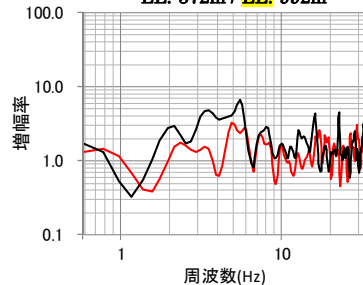
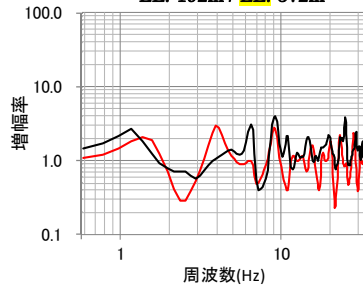
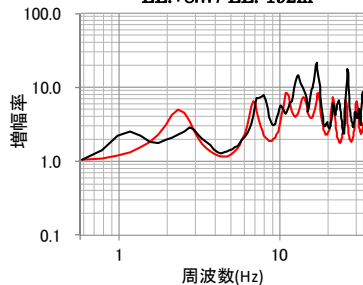
■ 観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数を下記に示す。同定結果は観測記録を再現している。

2013年1月31日
入射角: 60.74°

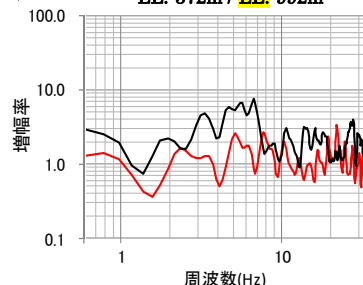
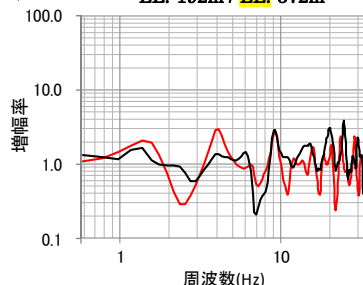
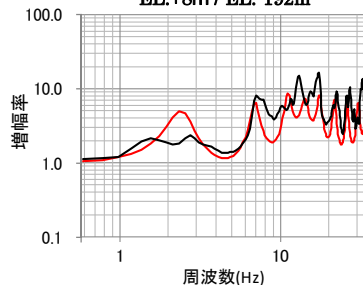


— 同定結果
— 観測記録

2013年9月20日
入射角: 45.27°



2014年1月9日
入射角: 55.99°



観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数



以上より、今回新たに設定した速度構造及び同定した減衰定数は、観測記録の伝達関数をよく再現しており、地震観測記録の説明性の観点において新しい地盤モデルの妥当性について確認した。

備考

・対象周波数: 0.5~33Hz。地震観測記録の伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。 ・UD方向のEL.-17mの地震計は故障のため欠測。現在は復旧済。

地盤モデルの設定結果

■Q値の同定結果及び標準応答スペクトルに基づく地震動評価のために新たに設定した地盤モデルを下表に示す。

新たに設定した地盤モデル

(減衰定数hは $Q=1/(2h)$ の関係より算定)

| 固定パラメータ | | | | | | 同定結果 (f: 周波数 (Hz)) | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|----------------------------------|---------------|---------------|----------------------------|---------------------------|----------|-------|---------------------------|----------|-------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------------|------------------------------------|
| EL (m) | 層厚 (m) | 地層 | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | $Q=(Vs/n)(f/fo)^{\alpha}$ | | | $Q=(Vp/n)(f/fo)^{\alpha}$ | | | 減衰定数h(f) | | | | | | | |
| | | | | | | 水平 | | | 鉛直 | | | 水平 | | 鉛直 | | | | | |
| | | | | | | n | α | fo | n | α | fo | | | | | | | | |
| ● | 8.0 | 第四系 | 130 | 280 | 1.71 | 5 | 1.32 | 18.74 | 44 | 0.91 | 19.45 | $0.921f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | $1.170f^{0.91}$ ($f \leq 19.45$) | | | | | | |
| | 2.5 | | | | | | | | | | | 0.019 ($f > 18.74$) | 0.079 ($f > 19.45$) | | | | | | |
| | 5.5 | | | | | | | | | | | 151 | 403 | 0.793 | 0.813 | 0.017 | 0.055 | | |
| | 4.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | $0.793f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | $0.813f^{0.91}$ ($f \leq 19.45$) |
| | 1.0 | | | | | | | | | | | 8.0 | 308 | 1589 | 1.66 | 0.389 | 0.206 | 0.008 | 0.014 |
| -7.0 | 8.0 | 478 | 1509 | 1.82 | 0.250 | 0.217 | 0.005 | 0.015 | | | | | | | | | | | |
| ● | -15.0 | 第四系 下部更新統 ~ 新第三系鮮 新統 | 477 | 1753 | 1.69 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | $0.102f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.301f^{1.05}$ ($f \leq 31.74$) | | | | | | |
| | 2.0 | | | | | | | | | | | 0.014 ($f > 6.78$) | 0.008 ($f > 31.74$) | | | | | | |
| | -17.0 | | | | | | | | | | | 89.0 | 557 | 1742 | 1.74 | 0.087 | 0.303 | 0.012 | 0.008 |
| | -106.0 | | | | | | | | | | | 62.0 | | | | | | | |
| ● | -168.0 | 24.0 | 669 | 2067 | 1.78 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | $0.072f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.256f^{1.05}$ ($f \leq 31.74$) | | | | | | |
| | -192.0 | 68.0 | | | | | | | | | | 0.010 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) | | | | | | |
| | -260.0 | 108.0 | | | | | | | | | | $0.064f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.234f^{1.05}$ ($f \leq 31.74$) | | | | | | |
| ▽解放基盤表面 | -368.0 | 2.0 | 756 | 2256 | 1.82 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | 0.009 ($f > 6.78$) | 0.006 ($f > 31.74$) | | | | | | |
| | ▽地震基盤相当面 | -370.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{1.05}$ ($f \leq 31.74$) | | | | | |
| | | -372.0 | | | | | | | | | | | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) | | | | | |
| | ▽地震基盤相当面 | -476.0 | 104.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{1.05}$ ($f \leq 31.74$) | | | | | |
| | | -566.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) | | | | | |
| | | -655.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | $0.054f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.240f^{1.05}$ ($f \leq 31.74$) | | | | | |
| | | -679.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 13 | 1.05 | 6.78 | 28 | 1.05 | 31.74 | 0.007 ($f > 6.78$) | 0.006 ($f > 31.74$) | | | | | |
| | | -734.0 | 55.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | 53 | 0.21 | 1.31 | 20 | 0.23 | 16.46 | $0.013f^{0.21}$ ($f \leq 1.31$) | $0.004f^{0.23}$ ($f \leq 16.46$) | | | | | |
| | ● | -992.0 | 258.0 | 2800 | 5300 | 2.78 | 53 | 0.21 | 1.31 | 20 | 0.23 | 16.46 | 0.012 ($f > 1.31$) | 0.002 ($f > 16.46$) | | | | | |
| | | - | - | 2800 | 5300 | 2.78 | 53 | 0.21 | 1.31 | 20 | 0.23 | 16.46 | $0.010f^{0.21}$ ($f \leq 1.31$) | $0.004f^{0.23}$ ($f \leq 16.46$) | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | 0.009 ($f > 1.31$) | 0.002 ($f > 16.46$) | | | | | | |

●: 地震計位置

(4) まとめ(1/2)

(2)速度構造と地震基盤相当面位置の設定

| 概要 | コメントに関連する事項 | |
|--|-------------|--------|
| | No.1関連 | No.3関連 |
| 標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面($V_s2200\text{m/s}$ 以上)に相当する敷地での層を検討する観点から、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングのデータに着目して速度構造の検討を行った。 | ① | |
| <ul style="list-style-type: none"> 解放基盤表面からEL-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造は、既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討で用いたものを採用した。 EL-679m以深においては、サスペンション法の結果に準拠した速度構造を新たに設定した。 | ② | |
| 地震基盤相当面位置は、 $V_s2200\text{m/s}$ 以上に相当する敷地での層の上面としてEL-679mに設定した。 | | |
| 新たに設定した速度構造については、既往の物理探査結果(探査結果に基づいて作成した3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線、単点微動のH/Vスペクトル比)との整合性を確認した。(地震観測記録の説明性については「(3)減衰定数の設定」で確認。) | | ③ |

| No. | コメント内容 | 回答概要 |
|-----|---|---|
| 1 | PS検層データの扱いに関し、既許可ではダウンホール法の結果を採用しているところ、今回はサスペンション法の結果を用いている点について、考え方を説明すること。 | 上表①, ②, ③のとおり、速度構造の設定にあたり、今回はサスペンション法の結果を用いた考え方を説明した。 |
| 3 | 既許可の審査で用いた物理探査等の結果との整合性も確認すること。 | 上表③のとおり、今回新たに設定した速度構造モデルについて、既許可での審査で用いた物理探査の結果との整合性を確認した。また、次頁「減衰定数の設定」⑧のとおり、観測記録の説明性について確認した。 |

(4) まとめ(2/2)

(3) 減衰定数の設定

| 概要 | コメントに関連する事項 | |
|---|-------------|--------|
| | No.2関連 | No.3関連 |
| 減衰定数に関する知見については、従来振動数が大きくなるにつれて減衰定数が小さくなることが指摘されていたところ、現在では下限の存在を示す評価事例が蓄積されてきたことから、減衰定数の同定に際しては下限を考慮することとした。 | ④ | |
| 地盤同定解析に用いる地震については下記のとおり選定した。 | | ⑤ |
| ・ 地盤同定解析に用いる地震の候補として23地震を選定し、その23地震の伝達関数の比較を通して代表性のある5地震を選定した。この5地震の伝達関数に大きな差異は見られないことを確認した上で、最終的に3地震の伝達関数を用いた。 | | ⑥ |
| ・ 以上のとおり、検討に用いる3地震の選定プロセスの段階で、3地震以外の地震の記録での検証を行い、最終的に用いる3地震の記録の妥当性を確認した。 | | ⑦ |
| 地盤同定解析は、下記の条件で実施した。 | | |
| ・ Q値を対象に地盤同定解析を行った。減衰モデルについては、Q値の上限(減衰定数の下限)を考慮したバイリニア型のモデルを用いた。 | | |
| ・ Q値の同定範囲は、地表(EL+8m)～大深度地震計設置位置(EL-992m)とした。 | | |
| ・ 選定した3地震の伝達関数を同時にフィッティングさせて逆解析した。 | | |
| 今回新たに設定した速度構造及び減衰定数について、地震観測記録の説明性の観点においてその妥当性を確認した。 | | ⑧ |

| No. | コメント内容 | 回答概要 |
|-----|---|--|
| 2 | 減衰定数の同定に関し、今回、減衰定数の下限を考慮することに至った考え方を説明すること。 | 上表④のとおり、今回、減衰定数の下限を考慮することに至った考え方を説明した。 |
| 3 | 同定解析の際、3つの地震による観測記録を用いているが、その妥当性については他の地震の記録でも検証すること。 | 上表⑤～⑦のとおり、同定解析に用いる3つの地震以外の地震の記録でも検証した。 |

3. 模擬地震波作成の方針

■位相の違いによる影響

- ・敷地の地下構造に関しては、標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面位置(EL.-679m)と解放基盤表面位置(EL.-370m)が異なることから、地震動の位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討するため、模擬地震波作成に用いる位相について複数考慮する。
- ・考慮する位相としては、既許可の模擬地震波作成において使用実績のある乱數位相と実現象を評価に反映することができる実観測記録の位相とする。
- ・上記2つの位相による地震動評価結果を比較した上で、代表性のある位相を採用する。

| 地震動評価位置 | 乱數位相による地震動評価 | 実観測記録の位相による地震動評価 |
|-----------------------|--|---|
| 解放基盤表面 (EL.-370m) | 新しく設定した地盤モデルを用いて解放基盤表面上での地震動を評価する。 | 新しく設定した地盤モデルを用いて解放基盤表面上での地震動を評価する。 |
| 地震基盤相当面 (EL.-679m) | <ul style="list-style-type: none"> ・乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって模擬地震波を作成する。 ・Noda et al.(2002)に基づき振幅包絡線を設定する。 | <ul style="list-style-type: none"> ・実観測記録の位相を与えて模擬地震波を作成する。 ・用いる観測記録については、敷地における適切な記録があればこれを用いることとするが、そのような記録がない場合には敷地周辺における観測点の記録を用いる。 |

地震動の位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討し、代表性のある位相を採用。

(1) 乱数位相による検討：方針

■乱数位相を用いた模擬地震波は、乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する。振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al.(2002)の方法に基づき設定することとし、その設定に必要なMと X_{eq} は下記のとおり設定する。

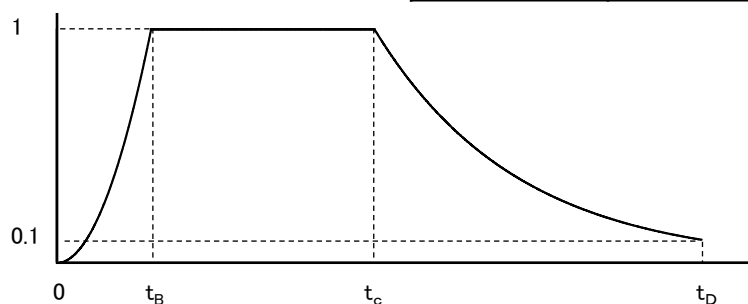
【Mの設定】

審査ガイドにおける「全国共通に考慮すべき地震動」の地震規模は、 $M_w6.5$ 程度未満と記載されており、武村(1990)の M_0 - M 関係及びHanks and Kanamori(1979)の M_0 - M_w 関係により $M_w6.5$ を M に換算すると6.9となる。ここで、ガイドでは「 $M_w6.5$ 程度未満」と幅をもって示されていることから、換算式から求められる M についても幅を持たせて保守的に $M7.0$ として設定する。

【 X_{eq} の設定】

震源近傍を想定し $X_{eq}10\text{km}$ として設定する。

| 模擬地震波 | 最大加速度 (cm/s^2) | 継続時間 (s) | 振幅包絡線の経時的変化(s) | | |
|-------|------------------------------|-------------|----------------|-------|-------|
| | | | t_B | t_C | t_D |
| 水平方向 | 600 | 29.80 | 3.72 | 16.31 | 29.80 |
| 鉛直方向 | 400 | 29.80 | 3.72 | 16.31 | 29.80 |



振幅包絡線

$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

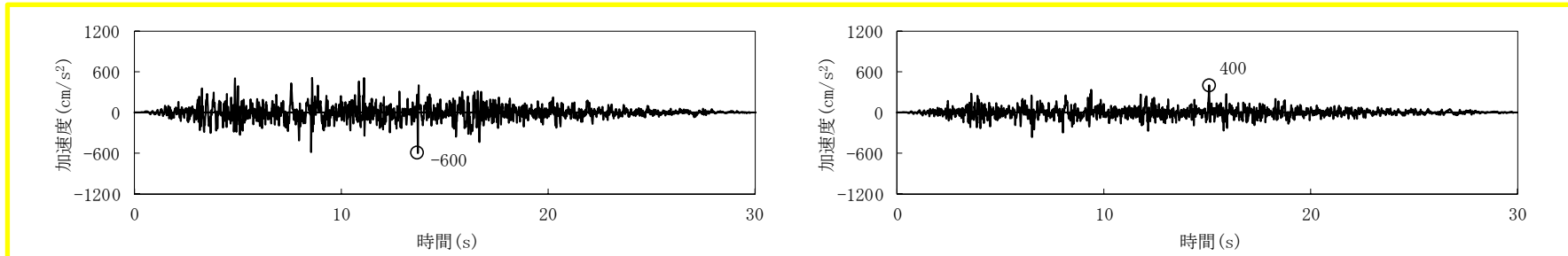
$$t_D - t_C = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \leq t \leq t_B \\ 1 & t_B \leq t \leq t_C \\ \exp[(\ln 0.1)(t - t_C)/(t_D - t_C)] & t_C \leq t \leq t_D \end{cases}$$

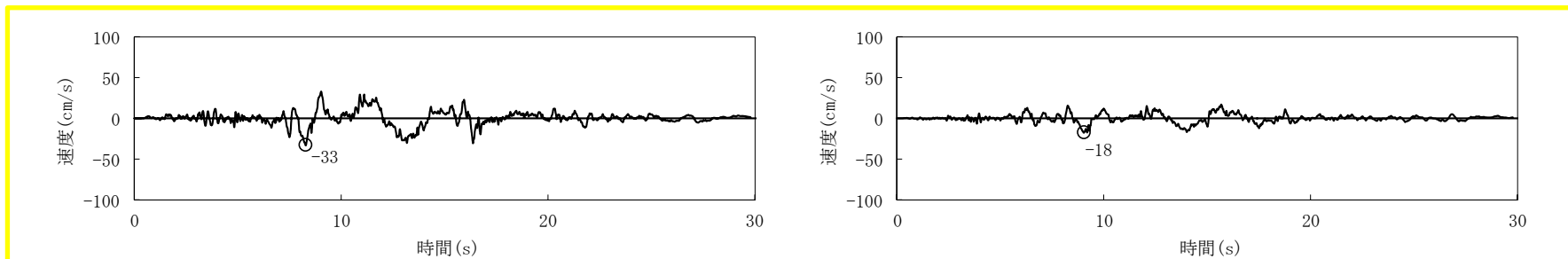
評価結果：時刻歴波形

■ 乱数位相を用いた模擬地震波の時刻歴波形を示す。

模擬地震波の加速度時刻歴波形



模擬地震波の速度時刻歴波形

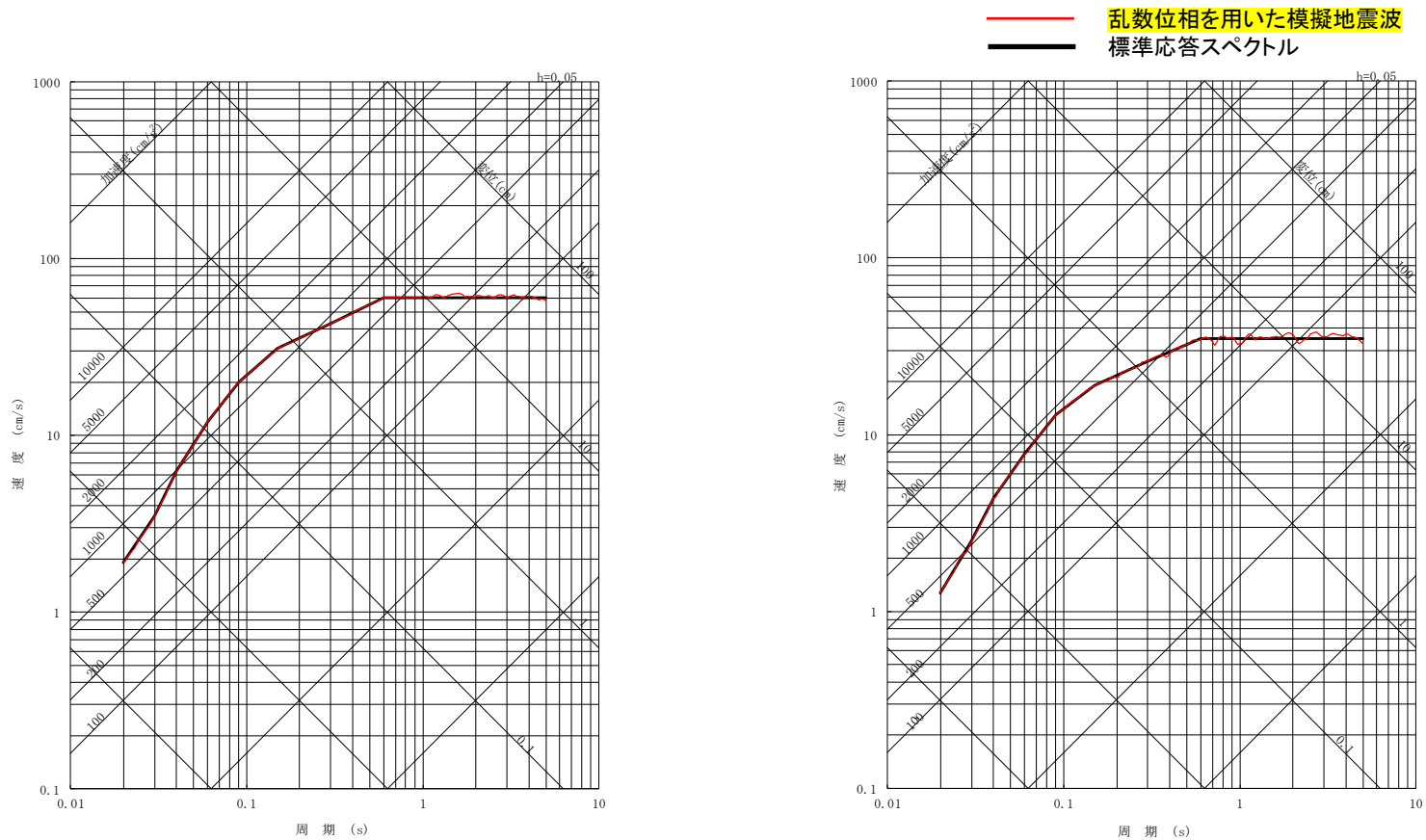


水平方向

鉛直方向

評価結果： 応答スペクトル

■ 乱数位相を用いた模擬地震波の応答スペクトルを示す。



水平方向

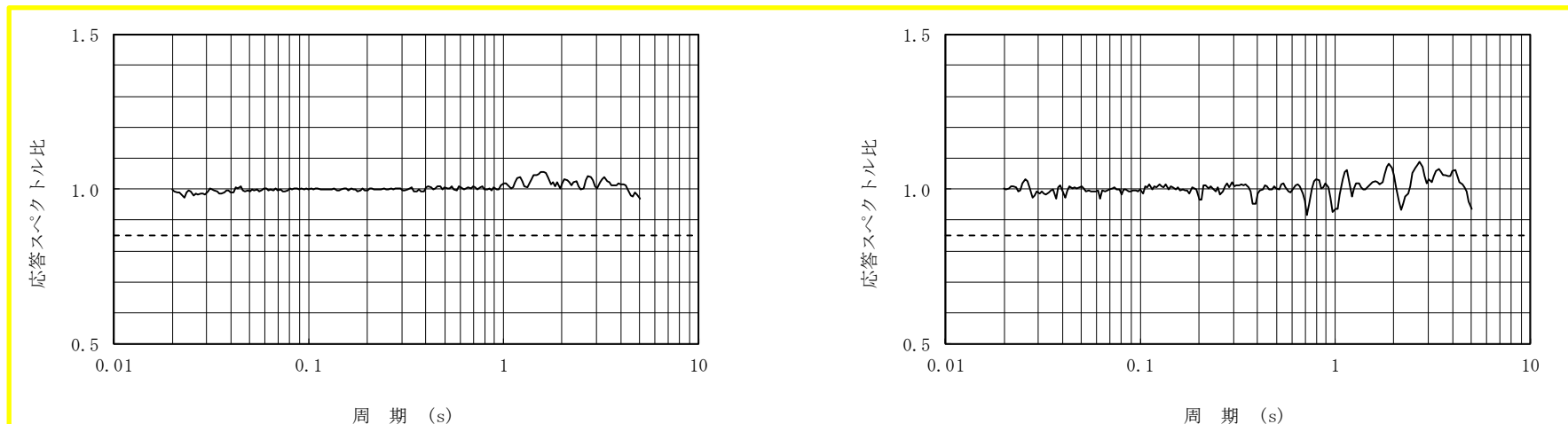
鉛直方向

擬似速度応答スペクトル

適合度の確認

■作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認する。

- ・目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比(応答スペクトル比)が全周期帯で0.85以上
- ・目標とする応答スペクトル強度値に対する模擬地震波の応答スペクトル強度値の比(SI比)が1.0以上



水平方向

鉛直方向

応答スペクトル比

応答スペクトルの強度値の比(SI比)

| 模擬地震波 | SI比 (周期0.1~2.5秒) |
|-------|---------------------|
| 水平方向 | 1.017 |
| 鉛直方向 | 1.006 |

ここで、

$$\text{スペクトル強度値} = \int_{T_1}^{T_2} S_v(T, h) dT$$
 S_v : 擬似速度応答スペクトル
 T : 周期
 h : 減衰定数(5%)

作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

(2) 実観測記録の位相による検討：方針

■実観測記録の位相を用いた模擬地震波は、実観測記録の位相を与えて作成する。用いる観測記録の候補としては、敷地近傍で発生した内陸地殻内地震の敷地における観測記録が考えられるが、そのような記録がない場合には、応力場が敷地と類似する周辺の領域における地震基盤相当面 ($V_s2200\text{m/s}$ 以上)の観測記録とする。

①敷地における観測記録の収集・整理

- ・敷地近くで発生し、地震の規模がMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の揺れについて、敷地で得られた観測記録を収集・整理する。

(該当する記録がない場合)

②敷地周辺における観測記録の収集・整理

- ・敷地周辺は、東北地方太平洋沖地震の発生前後ともに地震活動度は低く、震源メカニズム解が得られていないが、福島県南部から敷地にかけての領域は、南西-北東方向を引張軸とする正断層型の応力場と考えられており、福島県浜通りから茨城県北部にかけての領域で正断層型の地震が多く発生している。
- ・そこで、この領域で発生し、地震の規模がMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の揺れについて、敷地周辺のKiK-net観測点で得られた震源近傍における観測記録を収集・整理する。

(該当する記録がある場合)

③実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成

- ・上記①または②で収集・整理した記録の中から、地震基盤相当面 ($V_s2200\text{m/s}$ 以上)での模擬地震波作成に用いる位相として適切なものを選定し、模擬地震波を作成する。

①敷地における観測記録の収集・整理

■ 模擬地震波の位相として用いる観測記録としては、敷地近傍で発生したMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の敷地で得られた観測記録が理想的と考えられるが、そのような観測記録は得られていない。

敷地で観測された内陸地殻内地震 (Mj5.0~7.0, 震央距離30km以内)

| 【選定条件】 | |
|---------|------------------------------|
| ・地震発生様式 | : 内陸地殻内地震 |
| ・対象期間 | : 2011年3月11日※1~2021年12月 |
| ・震源深さ | : 25km以浅 |
| ・Mj | : 5.0~7.0 |
| ・震央距離 | : 10km以内 |
| ・対象観測点 | : EL.-372m地震計, EL.-992m地震計※1 |

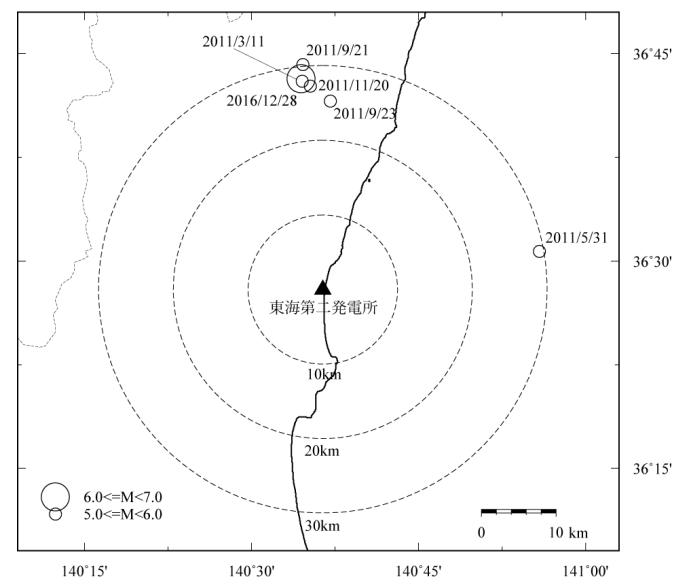
※1 EL.-992m地震計については2012年8月より観測を開始

該当する地震なし

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | 地震規模 | | 震源深さ (km) | 震央距離 (km) |
|-----|------------|-------|--------|---------|------|------|-----------|-----------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | Mj | Mw※2 | | |
| 1 | 2011/03/11 | 14:54 | 36.717 | 140.576 | 5.7 | - | 9.1 | 28 |
| 2 | 2011/05/31 | 04:36 | 36.512 | 140.931 | 5.0 | 4.7 | 15.1 | 30 |
| 3 | 2011/09/21 | 22:30 | 36.737 | 140.577 | 5.2 | 5.0 | 8.6 | 30 |
| 4 | 2011/09/23 | 17:15 | 36.693 | 140.618 | 5.1 | 4.7 | 4.2 | 25 |
| 5 | 2011/11/20 | 10:23 | 36.711 | 140.588 | 5.3 | 5.0 | 9.0 | 27 |
| 6 | 2016/12/28 | 21:38 | 36.720 | 140.574 | 6.3 | 5.9 | 10.8 | 28 |

※2 防災科学技術研究所のF-netによる。"—"は該当する地震情報がないことを示す。

・以降では、敷地及び敷地近傍におけるテクトニクス環境下で発生したMw6.5程度未満の内陸地殻内地震であって、敷地周辺の観測点において震源近傍で観測された記録について確認する。



②敷地周辺における観測記録の収集・整理(1/5)

■敷地周辺の応力場(1/2)

●Imanishi et al.(2012)

- 東北地方太平洋沖地震発生前の2003年から2010年の間に、福島・茨城県境周辺で発生した、 M_j 1.5以上、深さ20km以浅の微小地震のうち、26地震のメカニズム解を推定

- 応力テンソルインバージョン結果から、福島・茨城県境付近の応力場が正断層型であると指摘

東海第二発電所敷地周辺の福島・茨城県境付近は、東北地方太平洋沖地震発生前から、正断層型の地震が発生しやすい地域である。

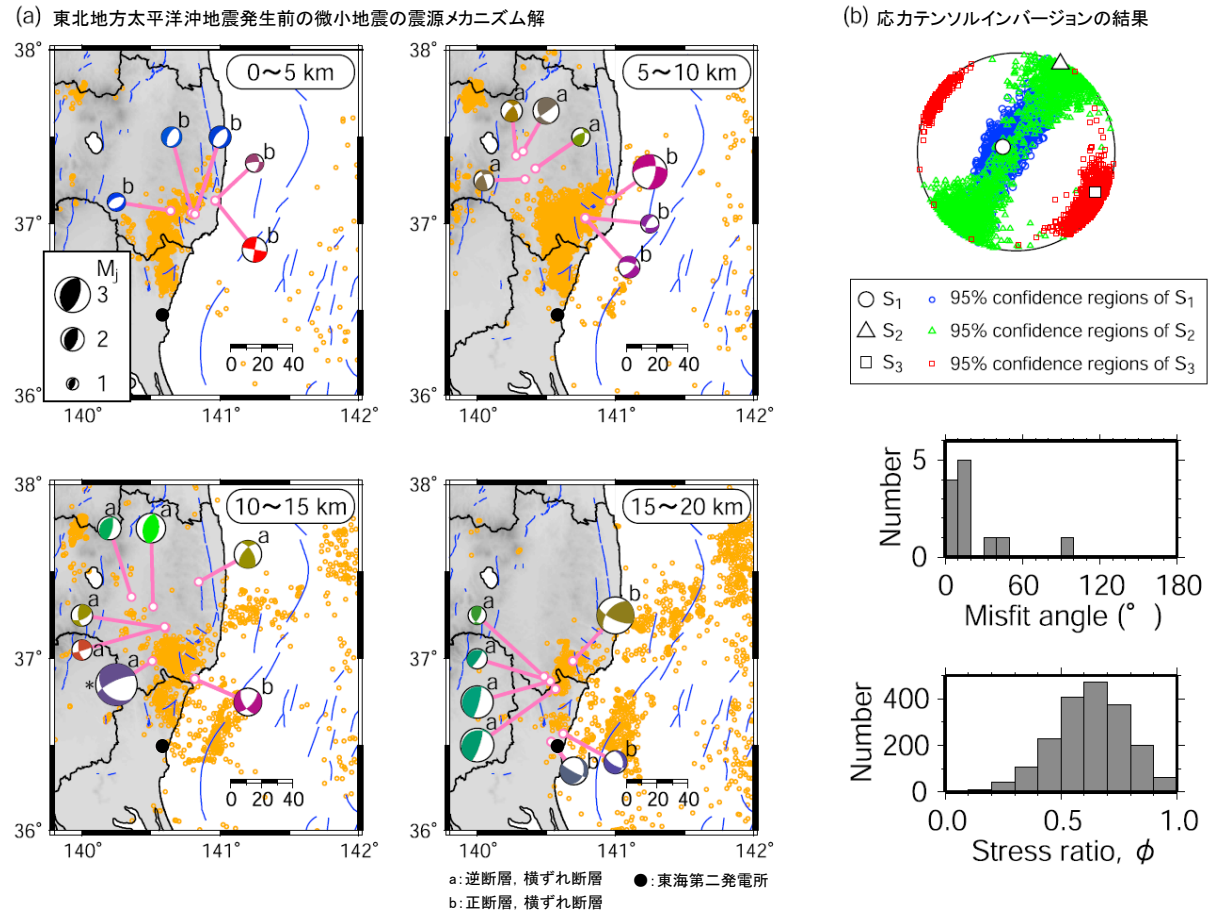


Figure 3. (a) Focal mechanism solutions of microearthquakes determined in the present study that occurred before the 2011 Tohoku earthquake (lower hemisphere, equal-area projection). The same triangle diagram as that of Figure 1 is used to differentiate faulting types. A mechanism marked with asterisk is also listed in the JMA catalogue; this is almost the same as that determined by JMA. The alphabetical letters “a” or “b” denote events which are outside or within the source area of the normal-faulting earthquake sequence. (b) Stress tensor inversion result. (top) Principal stress axes with their 95% confidence regions plotted on lower hemisphere stereonets. (middle) Misfit angle for the data with respect to the best stress tensor determined by the stress tensor inversion. Here, the misfit angle represents the angle between the tangential traction predicted by the best solution and the observed slip direction on each plane determined from the focal mechanism. (bottom) Histogram of stress ratio $\phi = (S_2 - S_3)/(S_1 - S_3)$ that belongs to the 95% confidence region.

Imanishi et al.(2012)に一部加筆

②敷地周辺における観測記録の収集・整理(2/5)

■敷地周辺の応力場(2/2)

- 東海第二発電所敷地周辺は、東北地方太平洋沖地震の発生前後ともに地震活動度は低く、震源メカニズム解が得られていない。
- 東海第二発電所敷地周辺の茨城県北部では、南西－北東方向を引張軸とする正断層型の地震が卓越している。
- GNSS観測データに基づくひずみ変化は、茨城県北部の正断層型が卓越する領域と東海第二発電所敷地周辺とで似た傾向を示しており、ともに東西引張側のひずみ変化となっている。

東海第二発電所敷地周辺は、南西－北東方向を引張軸とする正断層型の応力場と考えられる。

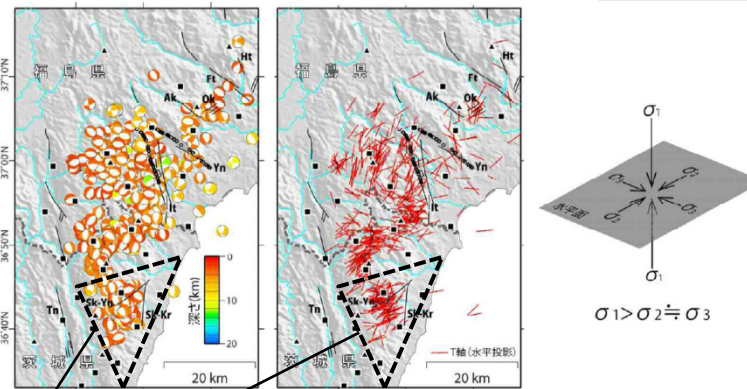
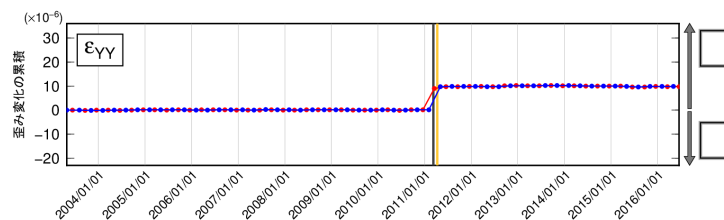
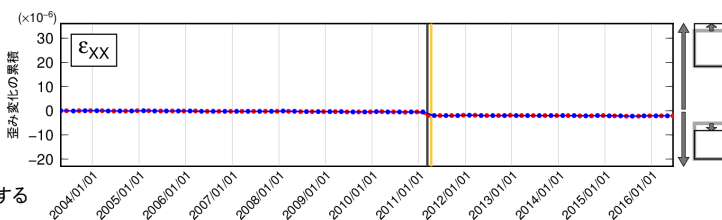
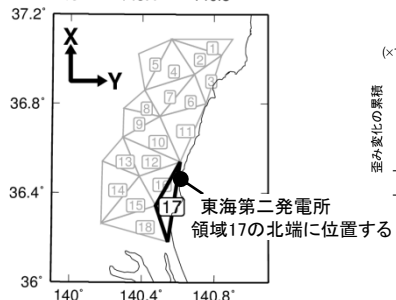
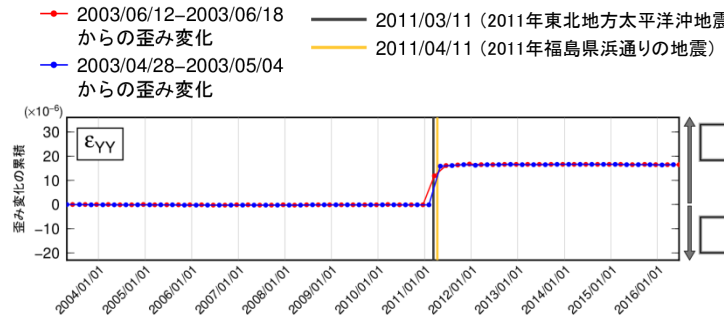
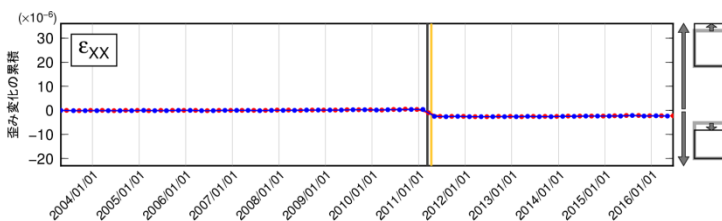
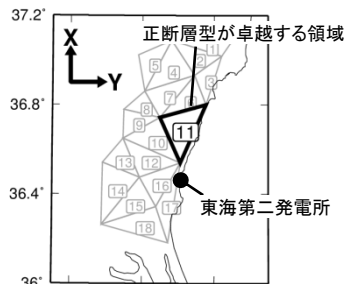


図11 得られたメカニズム解とT軸の分布
 左：下半球投影のメカニズム解。深さで色分けした。井戸沢断層(It)と湯ノ岳断層(Yn)の地表地震断層 (Mizoguchi et al., in preparation) を○で示す。中：メカニズム解のT軸方位 (水平投影)。右：推定される応力場の概念図。

青柳・上田(2012)に一部加筆

●GNSS観測データに基づく検討

国土地理院によるGNSS観測点で三角形要素を構築し、各要素内の平均的な歪み変化を評価(2003年5月時点を0と仮定)



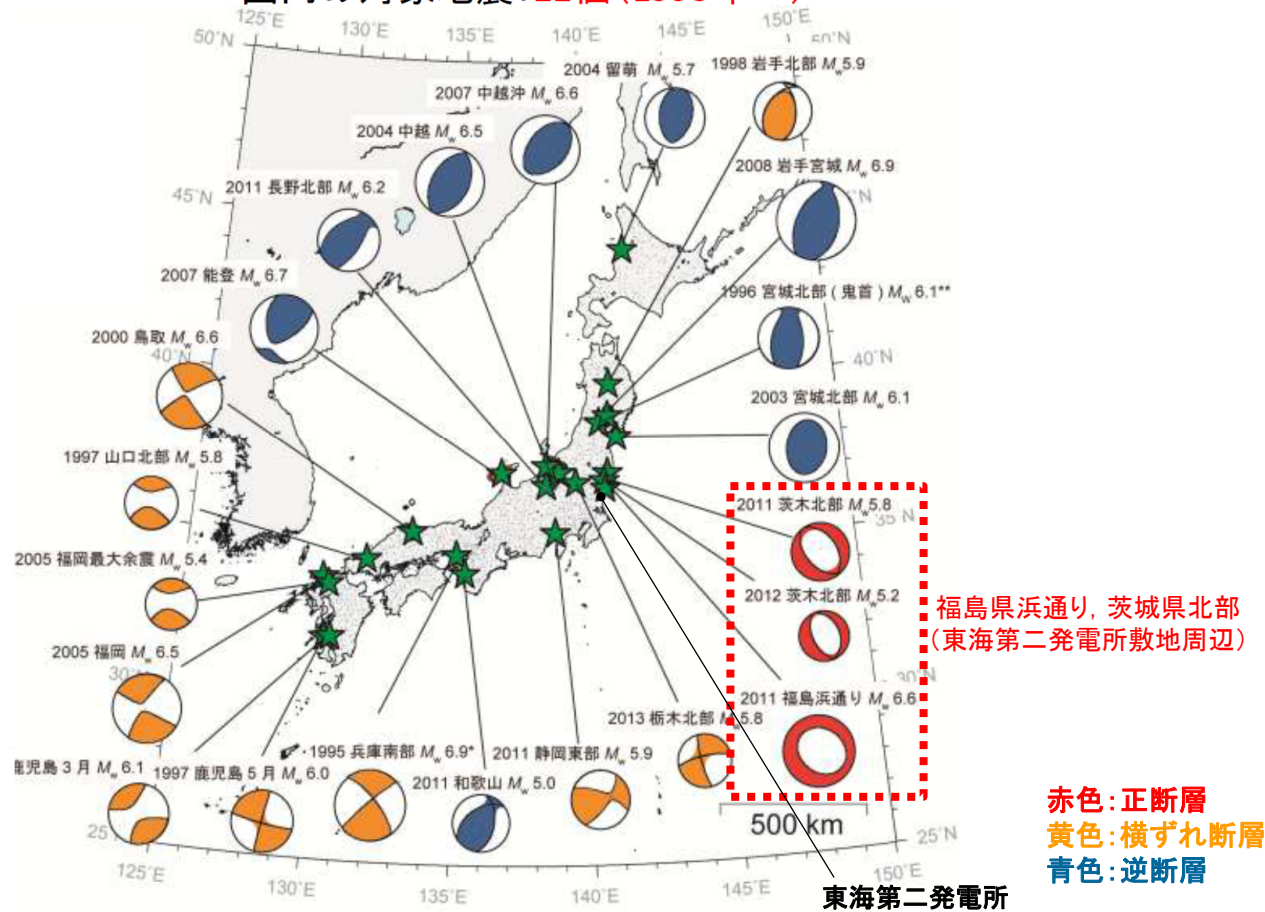
ひずみ変化の累積(東海第二発電所敷地周辺)

②敷地周辺における観測記録の収集・整理(3/5)

■震源メカニズム

- 東海第二発電所敷地周辺の福島県浜通り, 茨城県北部においては, 南西—北東引張の正断層型の地震が発生している。

国内の対象地震: 22個(1995年~)



国内の内陸地殻内地震の震源メカニズム

新安全設計基準に関する検討チーム(2013)に加筆

- 以降では, 敷地と同様に正断層型の応力場である福島県浜通りから茨城県北部にかけての領域で発生し, 地震の規模がMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の揺れについて, 敷地周辺のKiK-net観測点で得られた震源近傍における観測記録を収集・整理する。

②敷地周辺における観測記録の収集・整理(4/5)

■観測記録の収集

・福島県浜通りから茨城県北部にかけての領域で発生した内陸地殻内地震の揺れを震源近傍で観測した記録として、11地震19記録を収集した。得られた記録は、全て正断層型の地震によるものである(各地震の震源メカニズムは次頁参照)。

【収集条件】

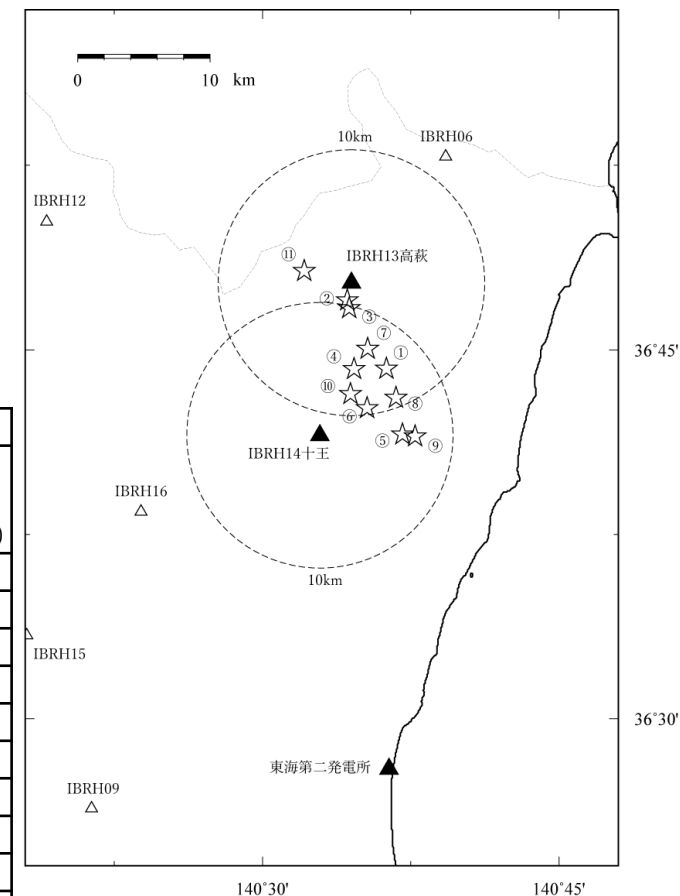
- ・地震発生様式 : 内陸地殻内地震
- ・震央地 : 福島県浜通り, 茨城県北部
- ・震源深さ : 25km以浅
- ・Mj : 5.0~7.0
- ・震央距離 : 10km以内
- ・対象観測点 : KiK-net地中観測点
- ・観測点の地盤条件 : 地震基盤相当面(Vs2200m/s以上)

収集した敷地周辺のKiK-net観測記録

| No. | 発震日時 | | 震央位置 | | 地震規模 | | 震源深さ(km) | 震央距離(km) | |
|-----|------------|-------|---------|----------|------|-----------------|----------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | 緯度(度) | 経度(度) | Mj | Mw [※] | | IBRH13 (高萩) (Vs3000m/s) | IBRH14 (十王) (Vs3200m/s) |
| ① | 2011/03/19 | 08:49 | 36.7373 | 140.6045 | 5.3 | 5.1 | 5.0 | 7 | 7 |
| ② | 2011/03/19 | 18:56 | 36.7837 | 140.5715 | 6.1 | 5.8 | 5.4 | 1 | 10 |
| ③ | 2011/04/14 | 07:35 | 36.7783 | 140.5732 | 5.1 | 4.9 | 8.8 | 2 | 10 |
| ④ | 2011/09/21 | 22:30 | 36.7372 | 140.5772 | 5.2 | 5.0 | 8.6 | 6 | 6 |
| ⑤ | 2011/09/23 | 17:15 | 36.6928 | 140.6180 | 5.1 | 4.7 | 4.2 | 12 | 6 |
| ⑥ | 2011/11/20 | 10:23 | 36.7107 | 140.5882 | 5.3 | 5.0 | 9.0 | 9 | 4 |
| ⑦ | 2012/02/19 | 14:54 | 36.7508 | 140.5887 | 5.2 | 4.9 | 7.2 | 5 | 7 |
| ⑧ | 2012/03/10 | 02:25 | 36.7177 | 140.6125 | 5.4 | 5.2 | 6.5 | 9 | 6 |
| ⑨ | 2013/12/31 | 10:03 | 36.6915 | 140.6287 | 5.4 | 5.0 | 6.6 | 12 | 7 |
| ⑩ | 2016/12/28 | 21:38 | 36.7202 | 140.5742 | 6.3 | 5.9 | 10.8 | 8 | 4 |
| ⑪ | 2017/08/02 | 02:02 | 36.8035 | 140.5352 | 5.5 | 5.1 | 8.7 | 4 | 12 |

※ 防災科学技術研究所のF-netによる。

備考 グレーハッチングの記録は震央距離が10kmより遠いため収集対象から除外

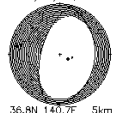


収集した内陸地殻内地震の震央位置及び観測点位置

4. 地震基盤相当面位置における模擬地震波の検討 (2) 実観測記録の位相による検討

参考: 収集した内陸地殻内地震(①~⑪)の震源メカニズム

① 2011/03/19,08:49



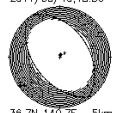
36.8N 140.7E 5km Mw5.1
strike: 4 dip: 31 slip: -99
mxx: 0.66 myz: -0.57 mzz: 0.96
mxy: 4.27 myx: -2.38 mzy: -1.93
mzx: 1.44 mzy: 1.6 moment:1.6e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2011/03/19:08:49:31.45 | 36.7373 | 140.6045 | 4.95 | 5.3 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|---------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 195.4 | 59:31 | -85:-99 | 5.30e+16 | 5 | 5.1 | 85.44 | 3 |

詳細

② 2011/03/19,18:56




36.7N 140.7E 5km Mw5.8
strike: 37 dip: 31 slip: -86
mxx: 4.27 myz: 2.01 mzz: -0.75
mxy: 4.17 myx: -0.33 mzy: -0.99
mzx: 1.17 mzy: 1.7 moment:3.5e+17Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2011/03/19:18:56:48.06 | 36.7837 | 140.5715 | 5.37 | 6.1 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|---------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 141:327 | 48:42 | -94:-86 | 6.35e+17 | 5 | 5.8 | 85.29 | 3 |

詳細

③ 2011/04/14,07:35



36.8N 140.6E 5km Mw4.9
strike: 31 dip: 31 slip: -109
mxx: 0.52 myz: 1.81 mzz: -0.34
mxy: 1.25 myx: -1.38 mzy: -0.05
mzx: 1.1e+16 moment:2.41e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2011/04/14:07:35:49.78 | 36.7783 | 140.5732 | 8.77 | 5.1 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 155:314 | 63:29 | -80:-109 | 2.41e+16 | 5 | 4.9 | 84.03 | 3 |

詳細

④ 2011/09/21,22:30




36.7N 140.6E 5km Mw5.1
strike: 34 dip: 32 slip: -93
mxx: 0.51 myz: 1.81 mzz: -0.65
mxy: 4.56 myx: -2.51 mzy: -0.37
mzx: 1.1e+16 moment:3.01e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2011/09/21:22:30:57.12 | 36.7372 | 140.5772 | 8.64 | 5.2 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|---------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 163:340 | 58:32 | -88:-93 | 5.81e+16 | 5 | 5.1 | 90.23 | 3 |

詳細

⑤ 2011/09/23,17:15




36.7N 140.6E 5km Mw4.7
strike: 33 dip: 31 slip: -76
mxx: 0.55 myz: 1.41 mzz: -0.47
mxy: 0.76 myx: -0.40 mzy: -1.09
mzx: 1.1e+16 moment:1.22e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2011/09/23:17:15:56.06 | 36.6928 | 140.6180 | 4.17 | 5.1 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|---------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 141:337 | 60:31 | -98:-76 | 1.22e+16 | 5 | 4.7 | 87.65 | 3 |

詳細

⑥ 2011/11/20,10:23



36.7N 140.6E 5km Mw5.0
strike: 30 dip: 47 slip: -122
mxx: 0.50 myz: 2.06 mzz: 0.37
mxy: 2.56 myx: -0.93 mzy: -3.16
mzx: 1.1e+16 moment:3.75e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2011/11/20:10:23:40.78 | 36.7107 | 140.5882 | 8.99 | 5.3 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 169:307 | 52:47 | -61:-122 | 3.78e+16 | 5 | 5.0 | 89.55 | 3 |

詳細

⑦ 2012/02/19,14:54




36.7N 140.6E 5km Mw4.9
strike: 45 dip: 41 slip: -61
mxx: -0.16 myz: 0.50 mzz: -0.92
mxy: 2.46 myx: -0.42 mzy: -0.32
mzx: 1.1e+16 moment:2.65e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2012/02/19:14:54:49.64 | 36.7508 | 140.5887 | 7.19 | 5.2 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 152:8 | 55:41 | -113:-61 | 2.65e+16 | 5 | 4.9 | 91.19 | 3 |

詳細

⑧ 2012/03/10,02:25




36.7N 140.7E 5km Mw5.2
strike: 34 dip: 31 slip: -87
mxx: 1.45 myz: 1.84 mzz: -0.97
mxy: 5.15 myx: -1.50 mzy: -0.69
mzx: 1.1e+16 moment:8.52e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2012/03/10:02:25:30.65 | 36.7177 | 140.6125 | 6.52 | 5.4 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|---------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 155:340 | 53:37 | -93:-87 | 6.52e+16 | 5 | 5.2 | 91.07 | 3 |

詳細

⑨ 2013/12/31,10:03



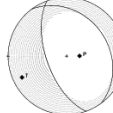
36.7N 140.7E 5km Mw5.0
strike: 34 dip: 31 slip: -135
mxx: 0.78 myz: 2.59 mzz: 0.06
mxy: 4.99 myx: -1.37 mzy: -0.68
mzx: 1.1e+16 moment:3.69e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2013/12/31:10:03:00.15 | 36.6915 | 140.6287 | 6.63 | 5.4 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 170:292 | 57:50 | -50:-135 | 3.89e+16 | 5 | 5.0 | 86.25 | 3 |

詳細

⑩ 2016/12/28,21:38



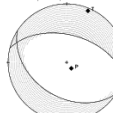
36.7N 140.6E 5km Mw5.9
strike: 32 dip: 29 slip: -105
mxx: 2.84 myz: 2.26 mzz: -0.81
mxy: 5.36 myx: -5.01 mzy: -8.24
mzx: 1.1e+17 moment:9.00e+17Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2016/12/28:21:38:49.04 | 36.7202 | 140.5742 | 10.84 | 6.3 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 324:160 | 29:62 | -105:-82 | 9.00e+17 | 5 | 5.9 | 89.04 | 3 |

詳細

⑪ 2017/08/02,02:02



36.8N 140.6E 8km Mw5.1
strike: 28 dip: 51 slip: -102
mxx: 3.43 myz: 1.38 mzz: 1.01
mxy: 0.90 myx: -0.43 mzy: -6.33
mzx: 1.1e+16 moment:4.31e+16Nm

| 気象庁による震源情報 | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|--------|-------------|-----------------------|--|
| 地震発生時刻(JST) | 緯度(°) | 経度(°) | 深さ(km) | マグニチュード(Mj) | 震央地名 | |
| 2017/08/02:02:02:07.51 | 36.8035 | 140.5352 | 8.65 | 5.5 | NORTHERN IBARAKI PREF | |

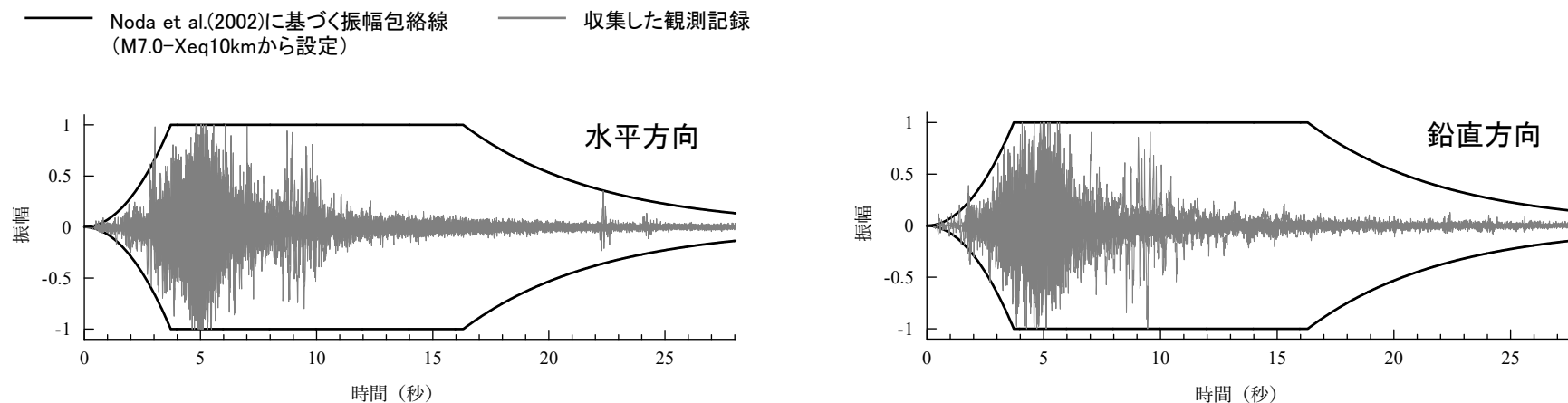
| メカニズム解推定情報 | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-----------|--------|-------------|-------|--------|
| 走向 | 傾斜 | すべり角 | モーメント(Nm) | 深さ(km) | マグニチュード(Mw) | 品質 | 使用観測点数 |
| 123:284 | 41:51 | -76:-102 | 4.31e+16 | 8 | 5.1 | 87.20 | 3 |

詳細

②敷地周辺における観測記録の収集・整理(5/5)

■時刻歴波形の確認

- ・収集した11地震19記録の加速度時刻歴波形の振幅を基準化し, Noda et al.(2002)に基づき「M7.0-Xeq10km」から設定した振幅包絡線と重ね描いた結果を下記に示す。
 - ・各観測記録の継続時間は強震部で10秒程度未満であり, Noda et al.(2002)に基づき「M7.0-Xeq10km」から設定した継続時間(強震部で12.59秒)と比較して短い。
- ⇒ 敷地周辺の地震基盤相当面($V_s2200\text{m/s}$ 以上)の観測点において震源近傍で観測された記録の振幅包絡形状に関し, 特異な地域性を有していないことを確認した。



収集した観測記録の加速度時刻歴波形の重ね描き(振幅を基準化)※

※ 水平方向, 鉛直方向ともに最大値発生時刻の5秒前より描画

③実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成

■模擬地震波作成に用いる観測記録

収集した地震基盤相当面 ($V_s 2200\text{m/s}$ 以上)の観測記録のうち、2011年茨城県北部地震 (Mj6.1, 正断層型)の揺れを震源近傍 (震央距離約1km)で観測したKiK-net観測点IBRH13 (高萩)の記録については、佐藤他(2019)により、地震基盤相当面 ($V_s 2200\text{m/s}$ 以上)における露頭基盤波が推定されている。そこで、この基盤地震動の位相を用いて、標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成する。

■2011年茨城県北部地震の概要

発生日時: 2011/03/19 18:56

地震規模: Mj6.1 (Mw5.8)

深さ : 5km

タイプ : 正断層型

震度5強: 茨城県日立市

5弱: 茨城県常陸太田市,

高萩市, 笠間市,

ひたちなか市

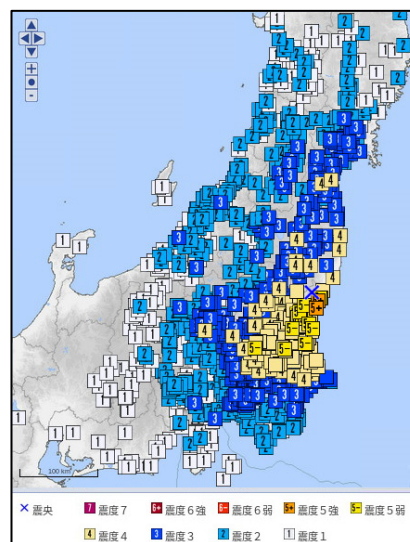
(東海第二発電所周辺は震度4)

■KiK-net観測点IBRH13 (高萩)の概要

観測点名 : 高萩

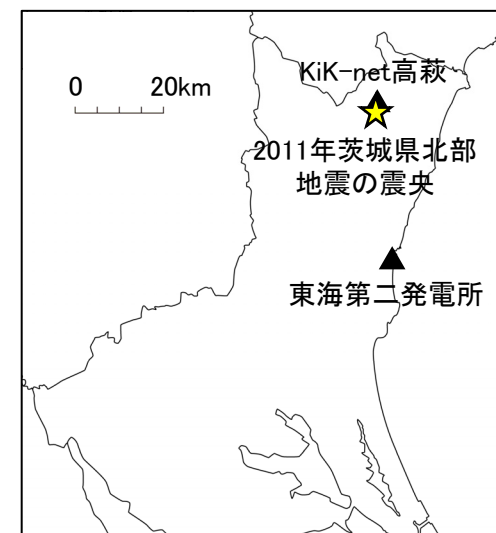
所在地 : 茨城県高萩市大字上君田

地中観測点位置: 深さ100m位置 ($V_s 3000\text{m/s}$)



震度分布図

気象庁HPより抜粋・加筆



震央と観測点位置

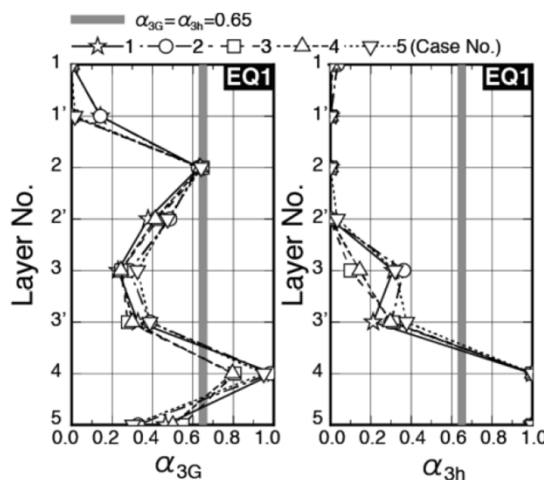
③実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成: 佐藤他(2019)

■概要

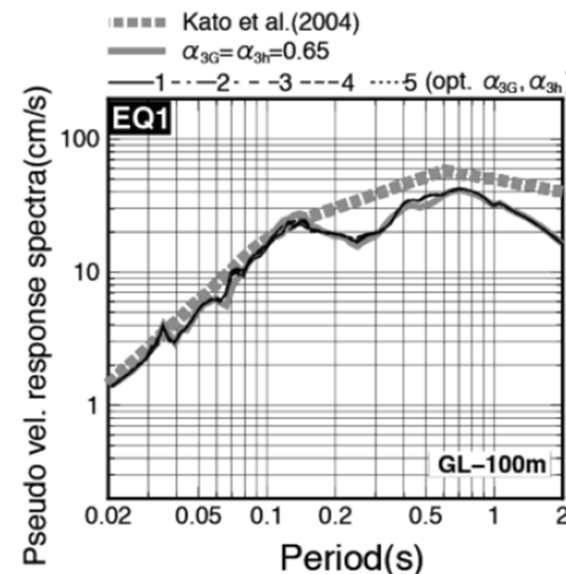
- ・KiK-net観測点のIBRH13(高萩)を対象に、現地で実施したPS検層、密度検層、現地で採取した土質試料の繰返し三軸試験による動的変形特性といった新たな調査結果に基づき、等価線形解析による非線形サイト特性評価の適用性を検討している。
- ・等価線形解析を用いて広帯域のサイト特性を評価するため、層ごとの有効ひずみ係数を最適化する方法を提案し、震源近傍の内陸地殻内地震であり、地震基盤相当での記録である2011年茨城県北部地震(Mw5.8, 正断層型)の水平動を対象に、最適化された有効ひずみ係数を用いた等価線形解析の収束地盤モデルに基づき、深さ100m位置の地中記録に対するはざとり解析から同位置での露頭基盤波の推計を行っている。

現地調査に基づくIBRH13(高萩)の地盤モデル

| Layer No. | Upper depth (m) | Thickness (m) | Vs (m/s) | Density (g/cm ³) | Geology |
|-----------|-----------------|---------------|----------|------------------------------|-----------------------|
| 1 | 0 | 2 | 170 | 1.55 | Wethered |
| 2 | 2 | 2 | 200 | 1.6 | Coarse-grained |
| 3 | 4 | 8 | 250 | 1.67 | Granite (D1) |
| 4 | 12 | 6 | 350 | 2.02 | Ditto (D2) |
| 5 | 18 | 10 | 350 | 2.02 | Wethered Granite (CL) |
| 6 | 28 | 12 | 650 | 2.21 | Granite |
| 7 | 40 | 12 | 1590 | 2.33 | |
| 8 | 52 | 48 | 2740 | 2.39 | |
| 9 | 100 | - | 2740 | 2.39 | |



最適化された有効ひずみ係数の層分布



収束地盤モデルに基づき地中記録のはざとり解析から推計した基盤地震動(深さ100m)の擬似応答スペクトル(h=5%)

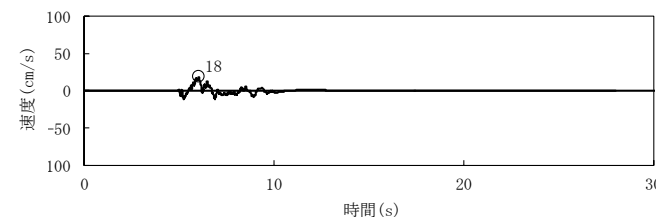
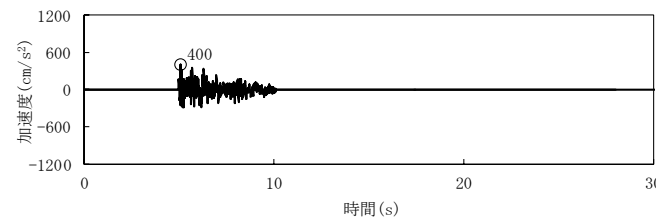
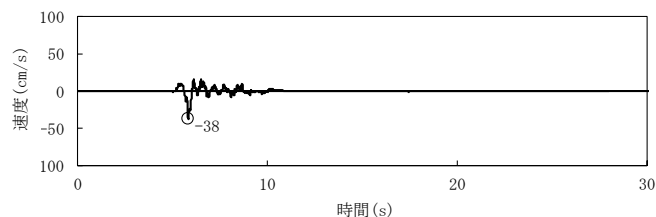
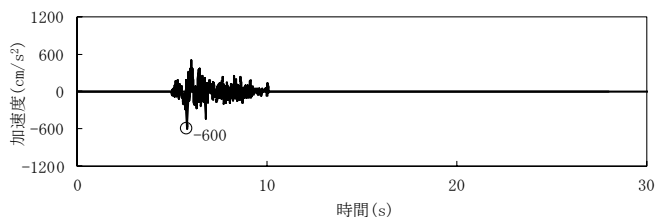
図表は佐藤他(2019)より抜粋

③実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成：時刻歴波形

■佐藤他(2019)における2011年茨城県北部地震の基盤推定波と、その位相を用いて作成した模擬地震波を下記に示す。

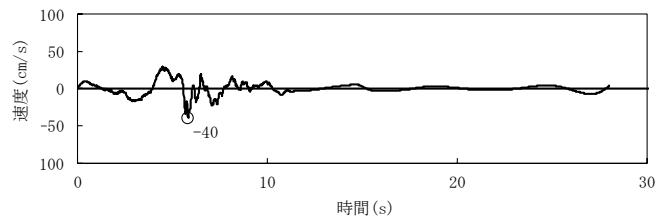
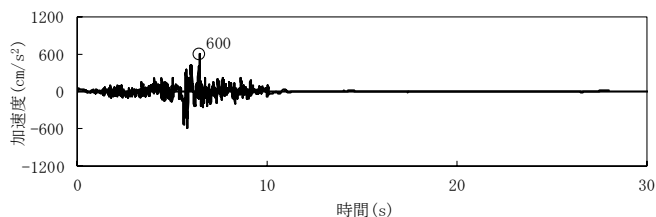
【佐藤他(2019)の地震動※】

※ 図の時刻歴波形は、佐藤他(2019)の結果を標準応答スペクトルの最大加速度に基準化して示している。

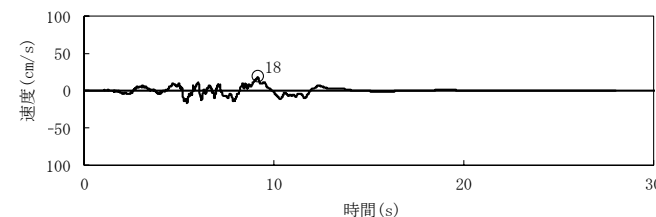
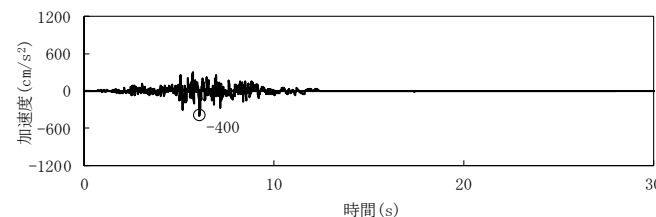


〔鉛直方向については、佐藤他(2019)において実施された地盤調査結果を参考に、別途基盤波を推定〕

【作成した模擬地震波】



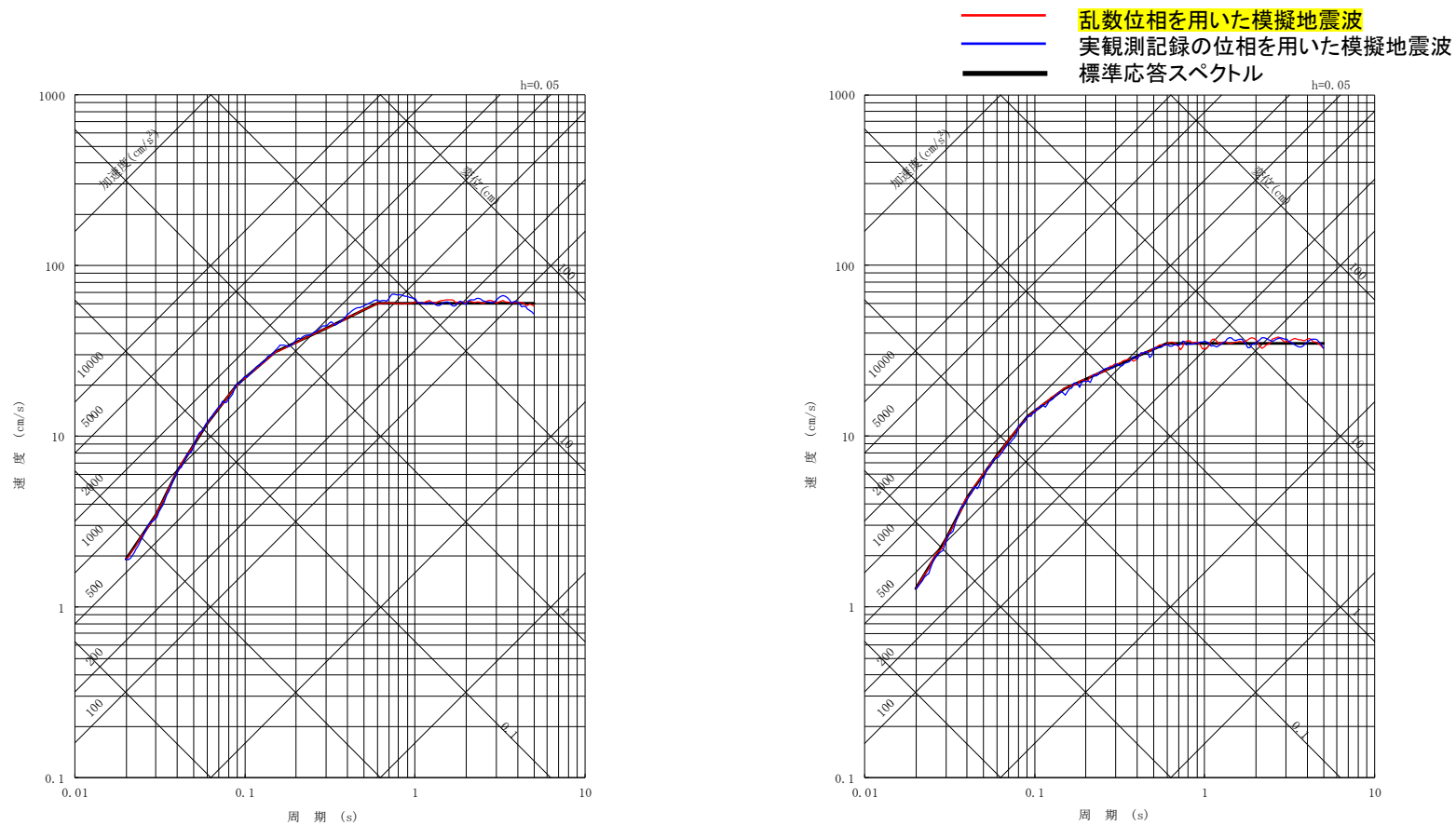
水平方向



鉛直方向

③実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成： 応答スペクトル

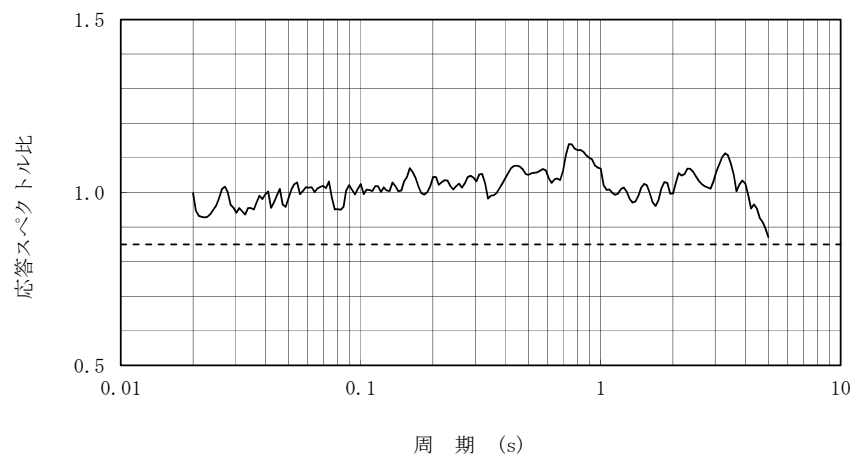
■乱數位相を用いた模擬地震波と実観測記録の位相を用いた模擬地震波の応答スペクトルを示す。



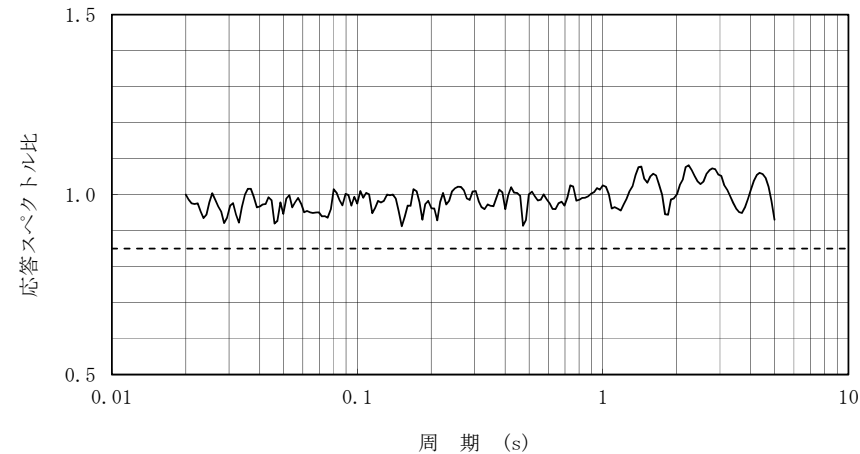
適合度の確認

■作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認する。

- ・目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比(応答スペクトル比)が全周期帯で0.85以上
- ・目標とする応答スペクトル強度値に対する模擬地震波の応答スペクトル強度値の比(SI比)が1.0以上



水平方向



鉛直方向

応答スペクトル比

応答スペクトルの強度値の比(SI比)

| 模擬地震波 | SI比 (周期0.1~2.5秒) |
|-------|---------------------|
| 水平方向 | 1.034 |
| 鉛直方向 | 1.012 |

$$\text{スペクトル強度値} = \int_{T_1}^{T_2} S_v(T, h) dT$$

ここで、
 S_v : 擬似速度応答スペクトル
 T : 周期
 h : 減衰定数(5%)

作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

5. 解放基盤表面の地震動評価

- 標準応答スペクトルに敷地の地盤増幅特性を考慮するため、地震基盤相当面 (V_s 2200m/s以上) に対応するEL-679mに標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を入力し、EL-370mの解放基盤表面の地震動を評価する。

新たに設定した地盤モデル

| EL (m) | 層厚 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数h(f) | |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | | 水平 | 鉛直 |
| 8.0 | 2.5 | 130 | 280 | 1.71 | $0.921f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | $1.170f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) |
| | | | | | 0.019 ($f > 18.74$) | 0.079 ($f > 19.45$) |
| 5.5 | 4.5 | 151 | 403 | 1.66 | $0.793f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | $0.813f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) |
| | | | | | 0.017 ($f > 18.74$) | 0.055 ($f > 19.45$) |
| 1.0 | 8.0 | 308 | 1589 | 1.82 | $0.389f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | $0.206f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) |
| -7.0 | 8.0 | 478 | 1509 | 1.82 | $0.250f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$) | $0.217f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$) |
| -15.0 | 2.0 | 477 | 1753 | 1.69 | $0.102f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.301f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -17.0 | | | | | 0.014 ($f > 6.78$) | 0.008 ($f > 31.74$) |
| -106.0 | 89.0 | 557 | 1742 | 1.74 | $0.087f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.303f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -168.0 | 24.0 | 669 | 2067 | 1.78 | $0.072f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.256f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -192.0 | | | | | 0.010 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) |
| -260.0 | 108.0 | 756 | 2256 | 1.82 | $0.064f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.234f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -368.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -370.0 | | | | | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) |
| -372.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -476.0 | 104.0 | 790 | 2000 | 1.85 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -566.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | $0.058f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.249f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -566.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | $0.054f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.240f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -655.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | $0.051f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.234f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -679.0 | | | | | 0.007 ($f > 6.78$) | 0.006 ($f > 31.74$) |
| -734.0 | 55.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | $0.013f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | $0.004f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) |
| -992.0 | 258.0 | 2800 | 5300 | 2.78 | $0.010f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | $0.004f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) |
| -992.0 | - | 2800 | 5300 | 2.78 | 0.009 ($f > 1.31$) | 0.002 ($f > 16.46$) |

標準応答スペクトルに敷地の地盤増幅特性を考慮するための地盤モデル

解放基盤表面

地震基盤相当面

| EL (m) | 層厚 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数h(f) | |
|-----------|-----------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | | 水平 | 鉛直 |
| -370.0 | 2.0 | 790 | 2000 | 1.85 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -372.0 | | | | | 0.008 ($f > 6.78$) | 0.007 ($f > 31.74$) |
| -476.0 | 104.0 | 790 | 2000 | 1.85 | $0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.264f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -566.0 | 90.0 | 835 | 2124 | 1.89 | $0.058f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.249f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -566.0 | 89.0 | 904 | 2205 | 2.00 | $0.054f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.240f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -655.0 | 24.0 | 947 | 2256 | 2.07 | $0.051f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$) | $0.234f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$) |
| -679.0 | | | | | 0.007 ($f > 6.78$) | 0.006 ($f > 31.74$) |
| -734.0 | 55.0 | 2200 | 4800 | 2.65 | $0.013f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | $0.004f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) |
| -992.0 | 258.0 | 2800 | 5300 | 2.78 | $0.010f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$) | $0.004f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$) |
| -992.0 | - | 2200 | 4800 | 2.65 | 0.012 ($f > 1.31$) | 0.002 ($f > 16.46$) |

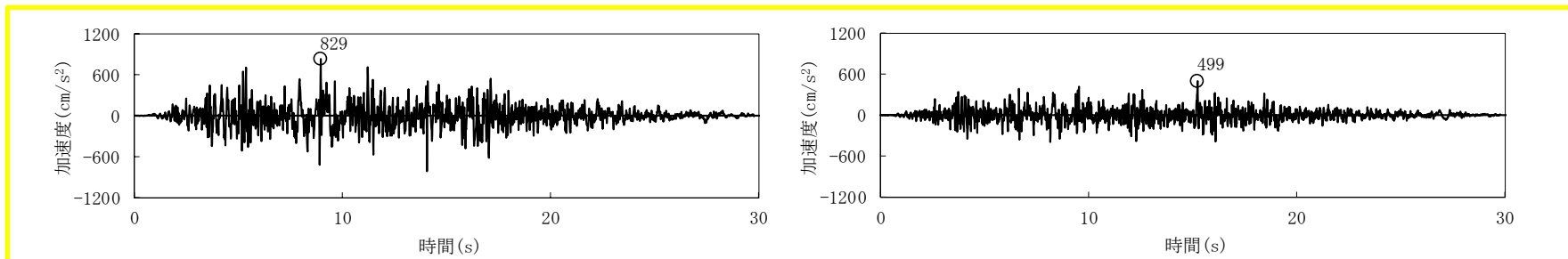
出力位置
▽

入力位置
▽

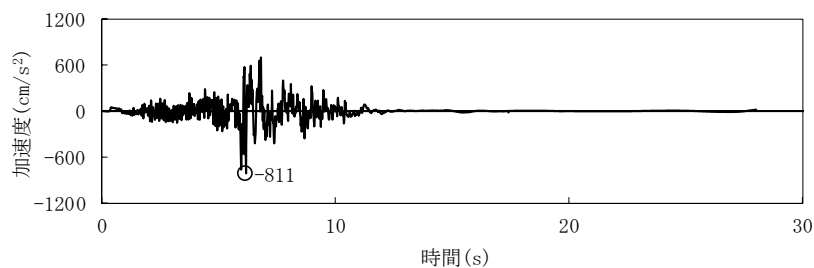
(1) 乱數位相, 実観測記録の位相による地震動評価: 時刻歴波形

■ 乱數位相, 実観測記録の位相を用いた模擬地震波の解放基盤表面における時刻歴波形を示す。

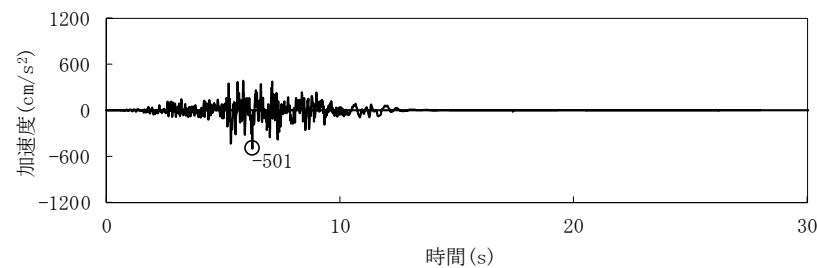
・乱數位相を用いた模擬地震波



・実観測記録の位相を用いた模擬地震波



水平方向



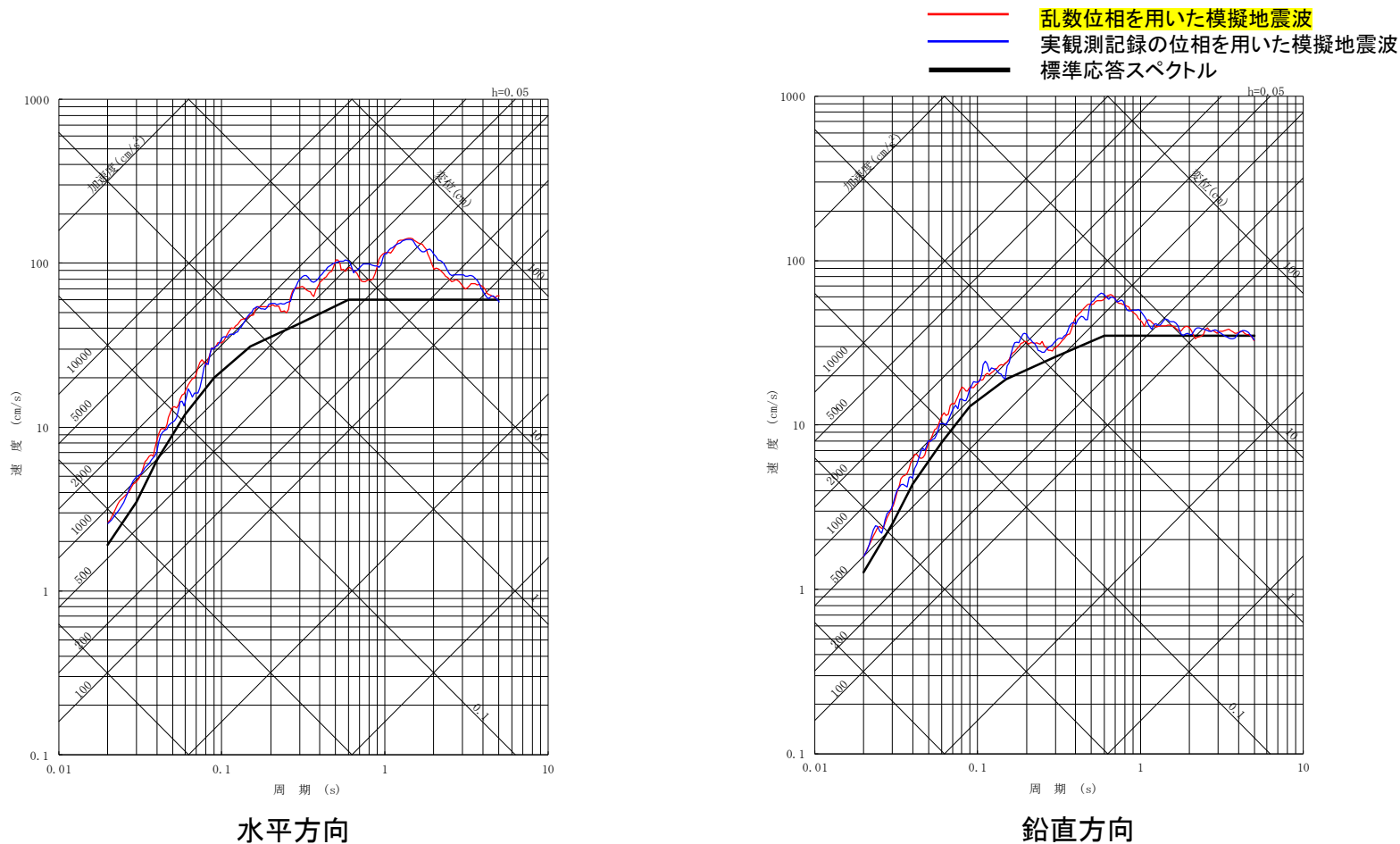
鉛直方向

解放基盤表面における加速度時刻歴波形

・横軸(時間)を10秒刻みに統一
・縦軸(加速度)最大値を1200cm/s²に統一

(1) 乱数位相, 実観測記録の位相による地震動評価: 応答スペクトル

■ 乱数位相, 実観測記録の位相を用いた模擬地震波の解放基盤表面における応答スペクトルを示す。



擬似速度応答スペクトル

(2) 比較検討

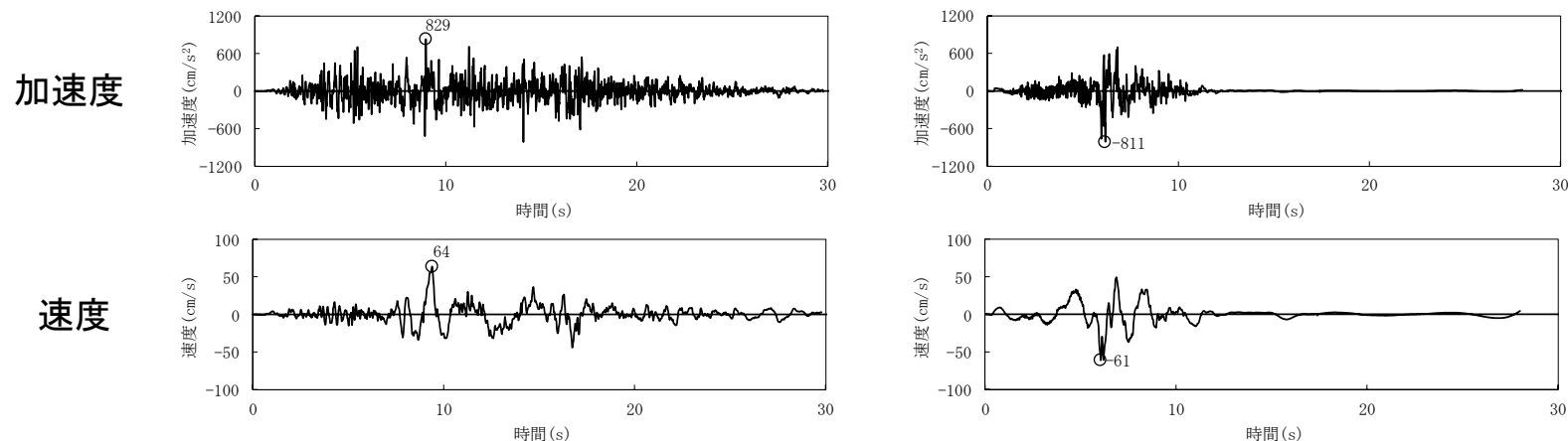
- 乱数位相, 実観測記録の位相による地震動評価結果を比較し, 位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討する。

| 比較検討項目 | 着眼点 |
|-----------|----------------|
| 時刻歴波形 | 継続時間の長さや振幅包絡形状 |
| 応答スペクトル | 振幅の大きさ |
| フーリエスペクトル | 振幅の大きさ |

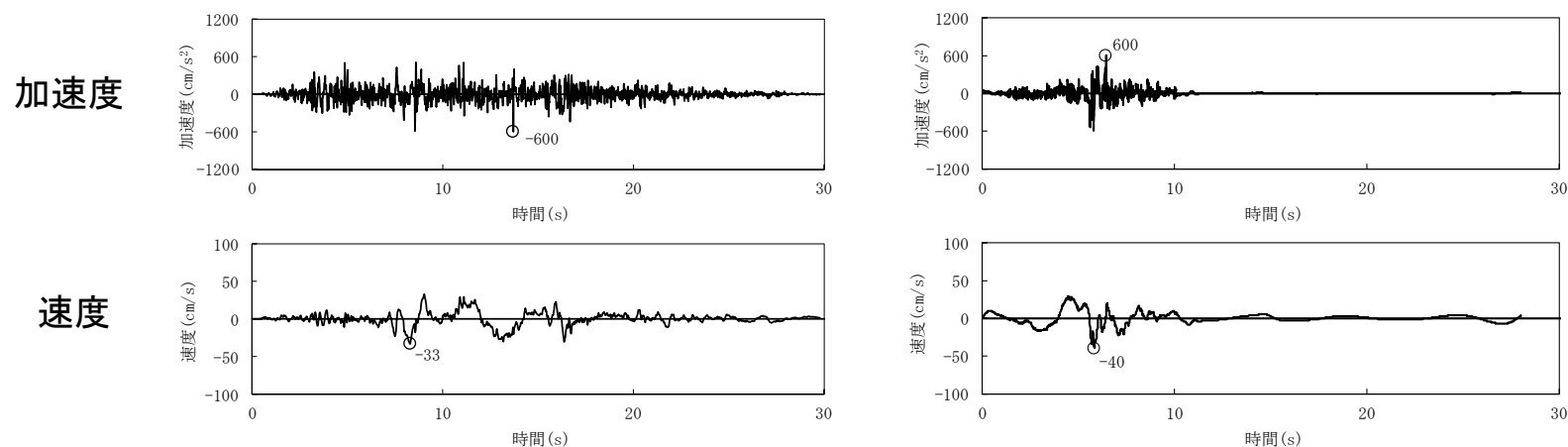
(2) 比較検討：時刻歴波形の比較(水平)

■乱數位相, 実観測記録の位相を用いた模擬地震波を解放基盤表面まで伝播させ, 時刻歴波形を比較したところ, 継続時間については, 地震基盤相当面, 解放基盤表面の両方で乱數位相による時刻歴波形の方が長いことを確認した。また, 振幅包絡形状については, 両位相とも地震基盤相当面と解放基盤表面とで傾向は大きく変わらないことを確認した。

【解放基盤表面】



【地震基盤相当面】



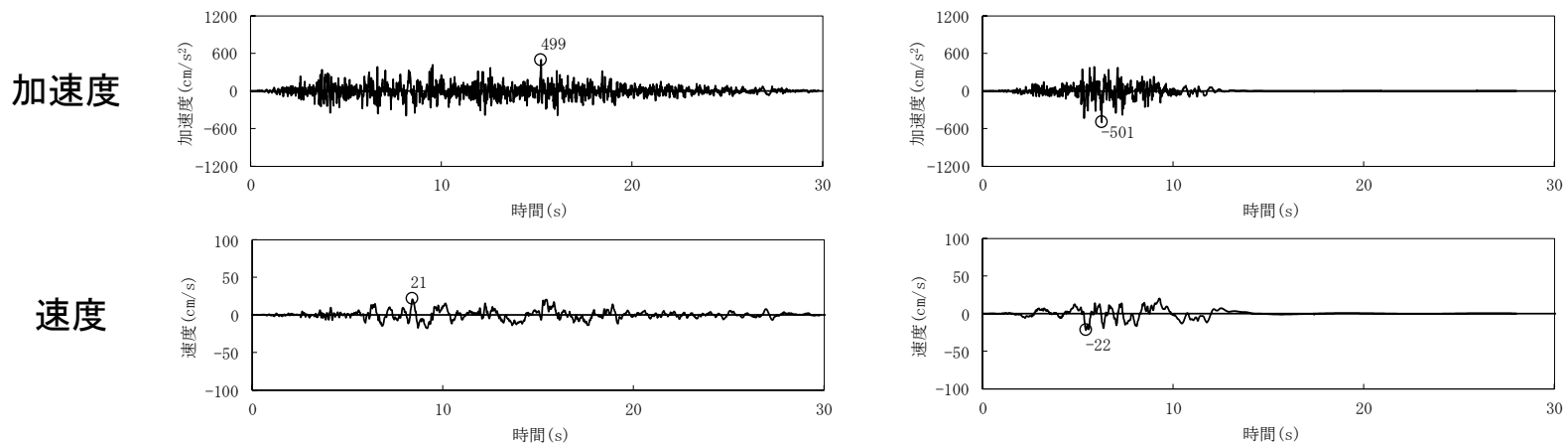
乱數位相による時刻歴波形(水平方向)

実観測記録の位相による時刻歴波形(水平方向)

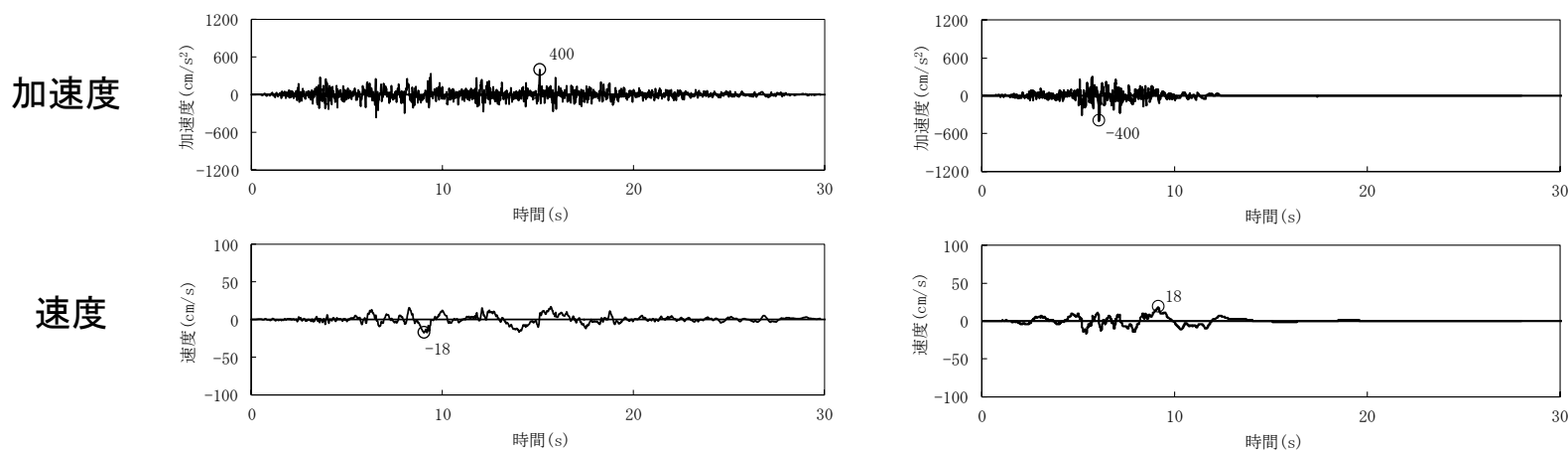
(2) 比較検討：時刻歴波形の比較(鉛直)

■乱数位相, 実観測記録の位相を用いた模擬地震波を解放基盤表面まで伝播させ, 時刻歴波形を比較したところ, 継続時間については, 地震基盤相当面, 解放基盤表面の両方で乱数位相による時刻歴波形の方が長いことを確認した。また, 振幅包絡形状については, 両位相とも地震基盤相当面と解放基盤表面とで傾向は大きく変わらないことを確認した。

【解放基盤表面】



【地震基盤相当面】

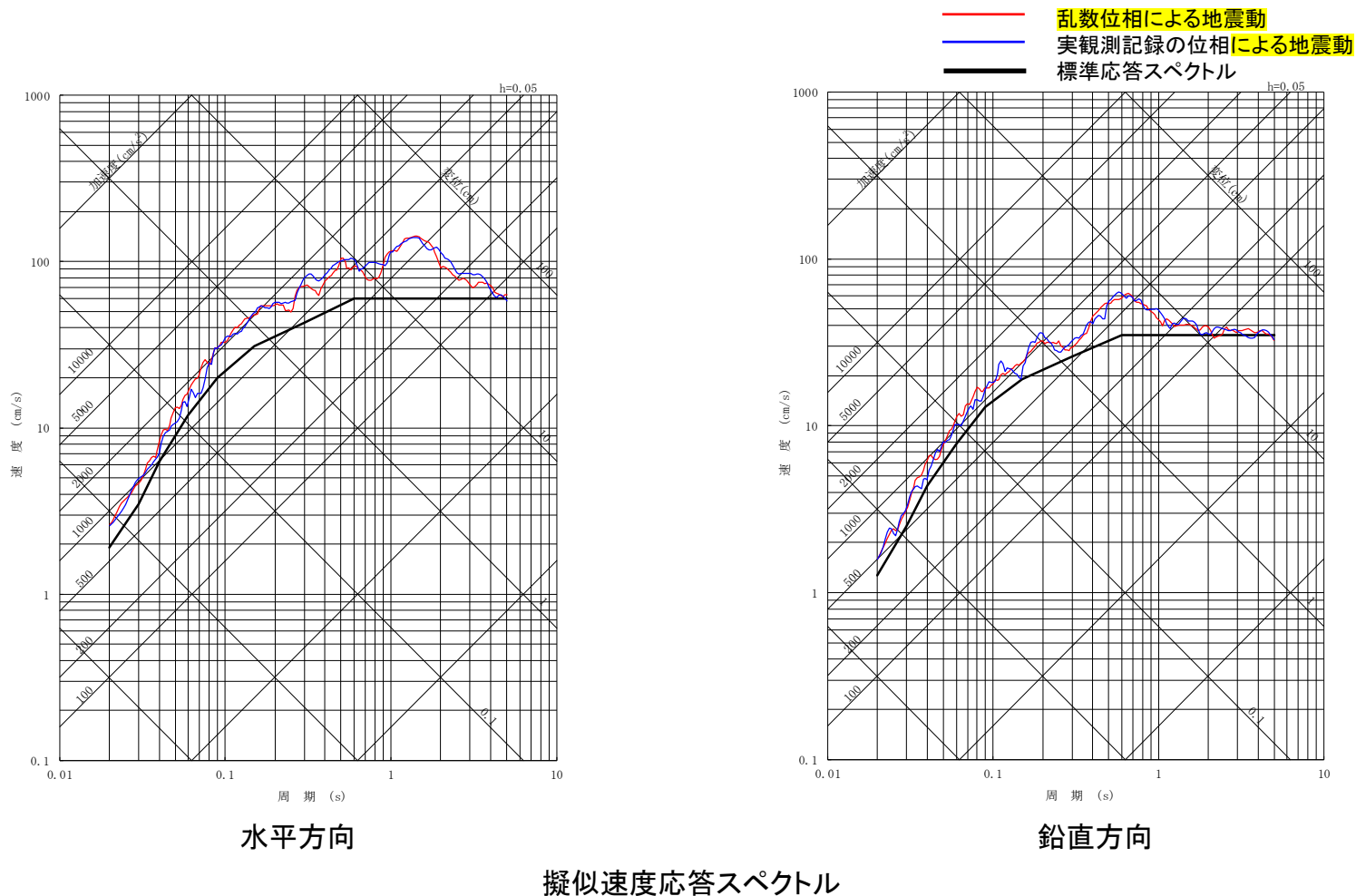


乱数位相による時刻歴波形(鉛直方向)

実観測記録の位相による時刻歴波形(鉛直方向)

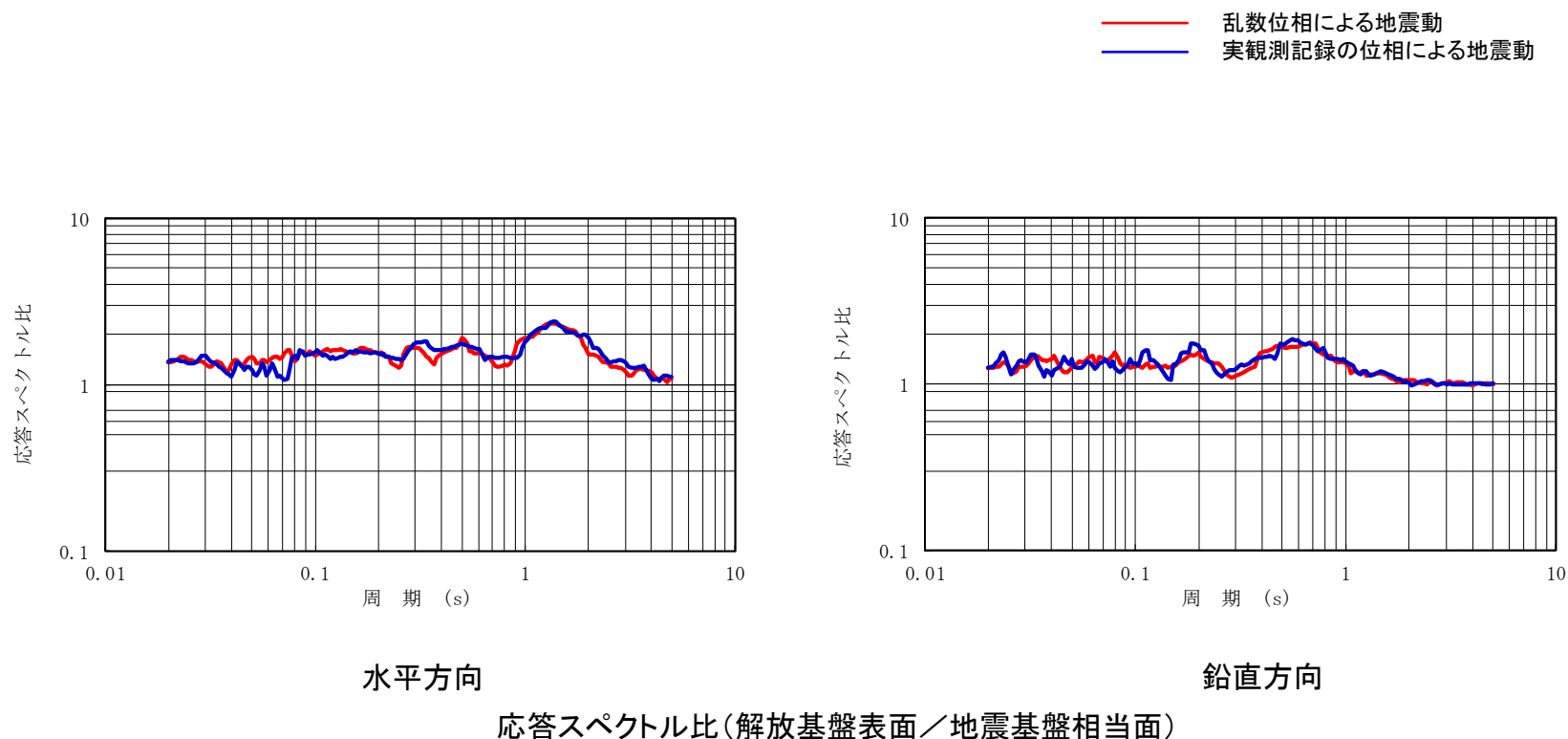
(2) 比較検討： 応答スペクトルの比較

■ 乱數位相, 実観測記録の位相による地震動について, 解放基盤表面における応答スペクトルを比較したところ, 両者は同程度であり, 差が生じていないことを確認した。



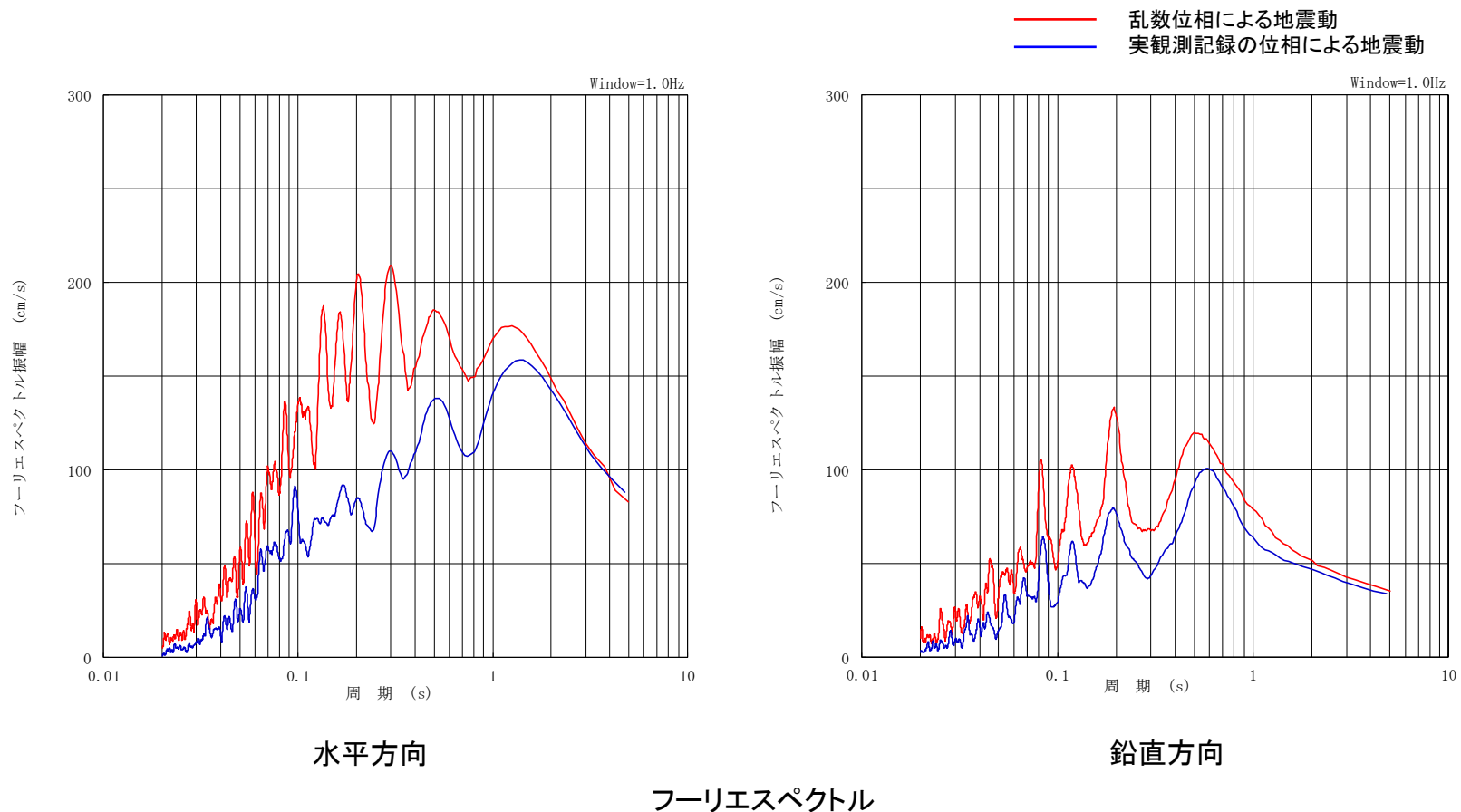
(2) 比較検討： 応答スペクトル比の比較

■ 乱数位相, 実観測記録の位相による地震動について, 地震基盤相当面における応答スペクトル値に対する解放基盤表面における応答スペクトル値の比(応答スペクトル比)を求め, 位相の違いによる影響を確認したところ, 両者に大きな違いはないことを確認した。



(2) 比較検討： フーリエスペクトルの比較

■ 乱数位相, 実観測記録の位相による地震動について, 解放基盤表面におけるフーリエスペクトルを比較したところ, 乱数位相による地震動が上回ることを確認した。



(2) 比較検討：結果

■地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性について、乱数位相の場合と実観測記録の位相の場合を比較した結果を下記のとおり整理する。

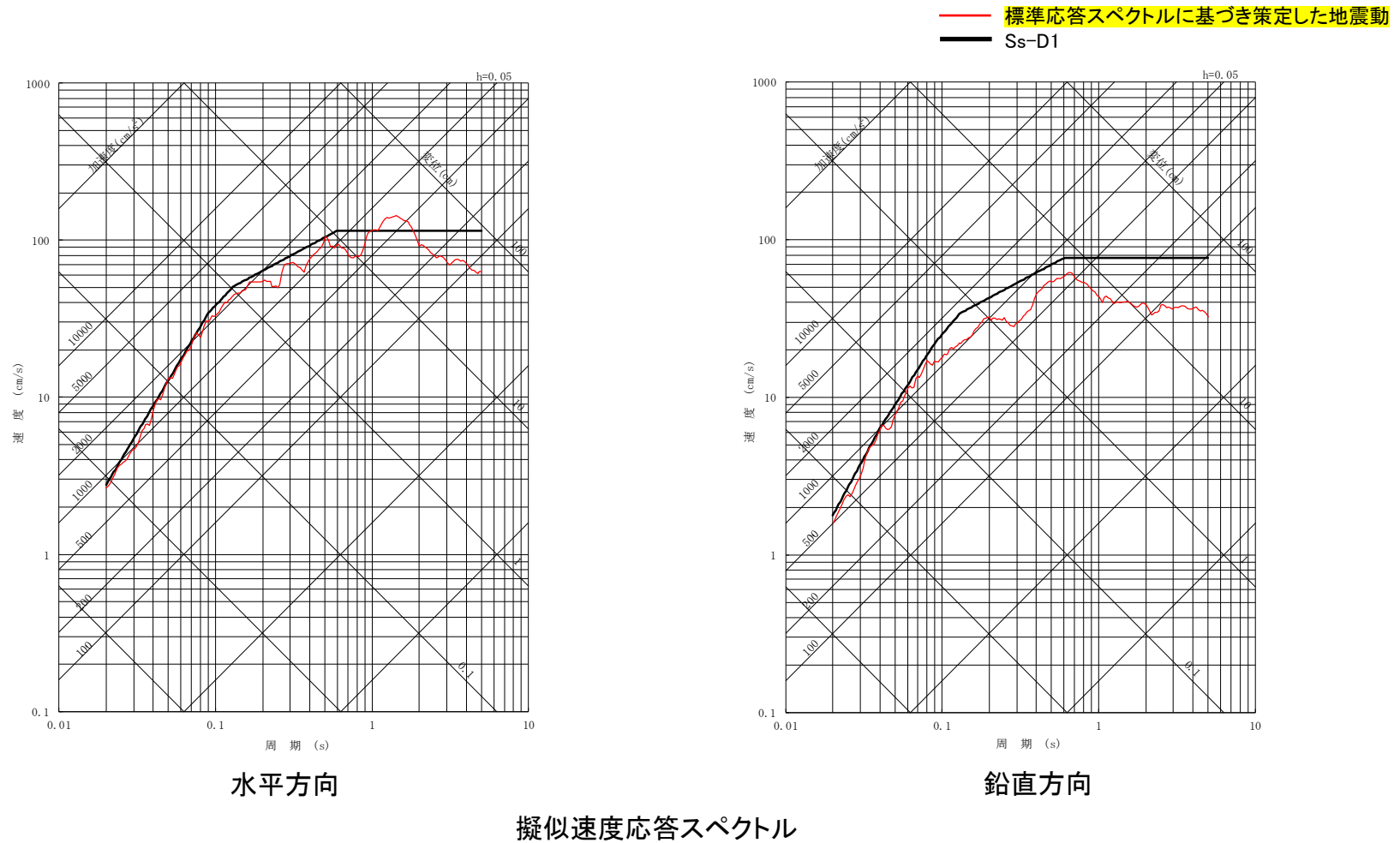
| 比較検討項目 | 比較検討結果 |
|-----------|---|
| 時刻歴波形 | <ul style="list-style-type: none"> ・継続時間については、地震基盤相当面、解放基盤表面の両方で乱数位相による時刻歴波形の方が長い。 ・振幅包絡形状については、乱数位相、実観測記録の位相とも地震基盤相当面と解放基盤表面とで傾向は大きく変わらない。 |
| 応答スペクトル | 解放基盤表面まで伝播させても、乱数位相による応答スペクトルと実観測記録の位相による応答スペクトルに差は生じていない。 |
| フーリエスペクトル | 乱数位相によるフーリエスペクトルの方が大きい。 |



乱数位相、実観測記録の位相による地震動は、応答スペクトルでは差が生じないが、時刻歴波形では乱数位相の方が継続時間が長く、フーリエスペクトルでも乱数位相の方が大きいことから、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相は、乱数位相で代表させることとする。

6. 基準地震動Ssの策定(1/4)

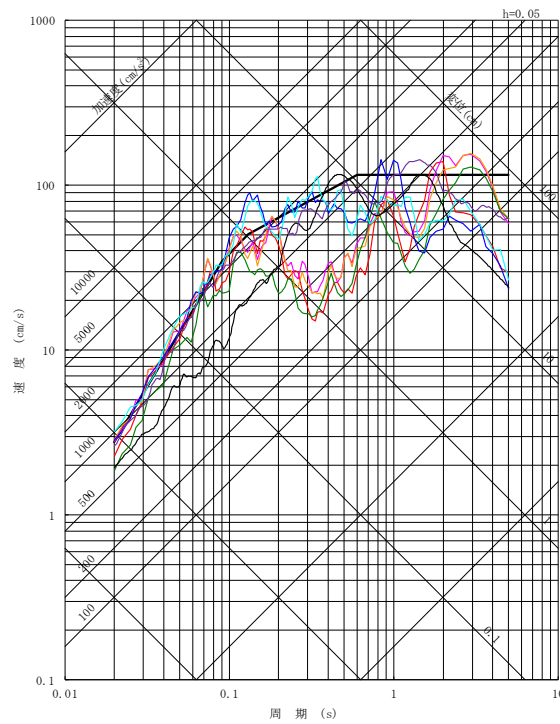
- 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動は、一部の周期帯において、基準地震動Ss-D1(応答スペクトル手法による基準地震動)を上回るため、新たに基準地震動として追加した。



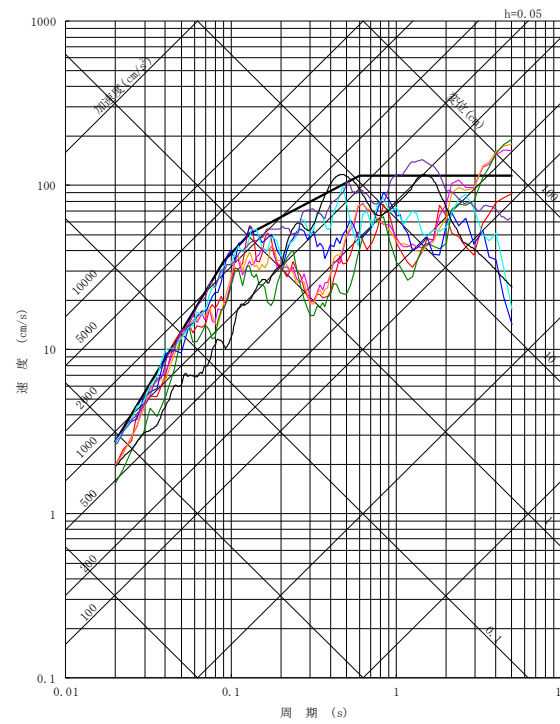
6. 基準地震動Ssの策定(2/4)

■標準応答スペクトルに基づき策定した地震動を基準地震動Ss-32とし、既許可の全ての基準地震動と合わせて下記に示す。

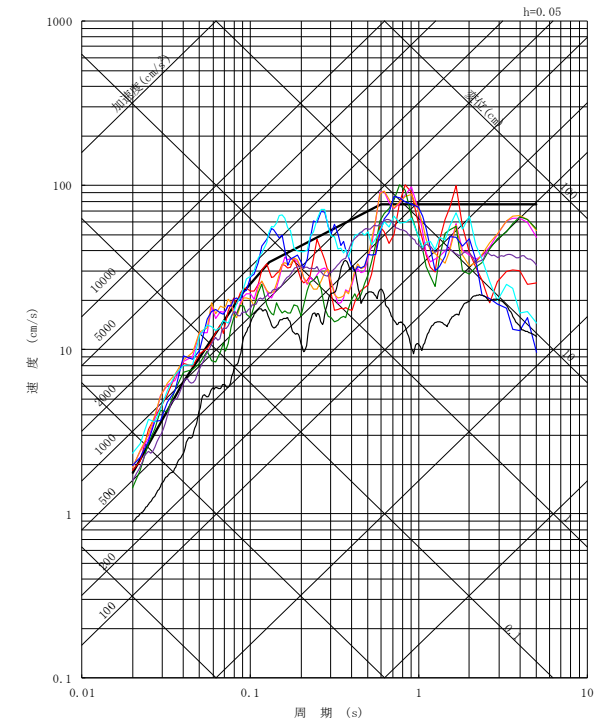
- Ss-D1 応答スペクトル手法による基準地震動
- Ss-11 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- Ss-12 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-13 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- Ss-14 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-21 2011年東北地方太平洋沖型地震(短周期レベルの不確かさ)
- Ss-22 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- Ss-31 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- **Ss-32 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動**



NS方向



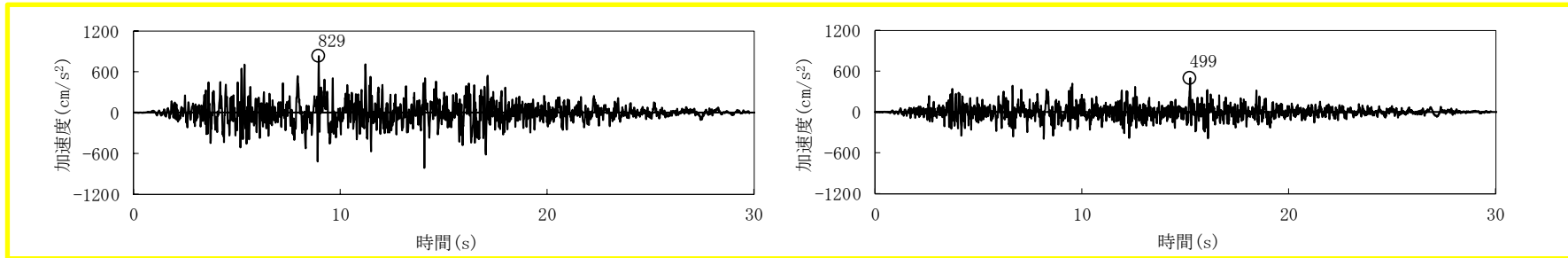
EW方向



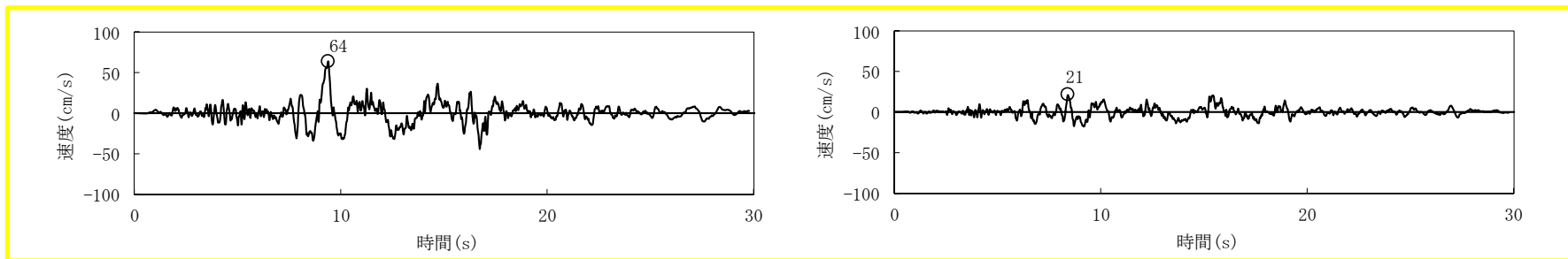
UD方向

6. 基準地震動Ssの策定(3/4)

■ Ss-32(標準応答スペクトルに基づき策定した地震動)の時刻歴波形を下記に示す。



加速度時刻歴波形



速度時刻歴波形

水平方向

鉛直方向

解放基盤表面における時刻歴波形

- ・横軸(時間)を10秒刻みに統一
- ・縦軸(加速度)最大値を1200cm/s²に統一

6. 基準地震動Ssの策定(4/4)

■ 基準地震動Ssの最大加速度の一覧を示す。

| 基準地震動 | | 最大加速度 (cm/s ²) | | |
|-------|--|----------------------------|------|------|
| | | NS方向 | EW方向 | UD方向 |
| Ss-D1 | 応答スペクトル手法による基準地震動 | 870 | | 560 |
| Ss-11 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1) | 717 | 619 | 579 |
| Ss-12 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2) | 871 | 626 | 602 |
| Ss-13 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3) | 903 | 617 | 599 |
| Ss-14 | F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2) | 586 | 482 | 451 |
| Ss-21 | 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ) | 901 | 887 | 620 |
| Ss-22 | 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳) | 1009 | 874 | 736 |
| Ss-31 | 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動 | 610 | | 280 |
| Ss-32 | 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動 | 829 | | 499 |

7. まとめ

【地盤モデル関連】

- ・ 標準応答スペクトルが $V_s 2200\text{m/s}$ 以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると考え、既許可審査以降も蓄積されている地震観測記録等を活用し、標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定した。
- ・ 新たに設定した地盤モデルについては、既往の物理探査結果との整合性や地震観測記録の説明性の観点からその妥当性を確認した。

【地震動評価関連】

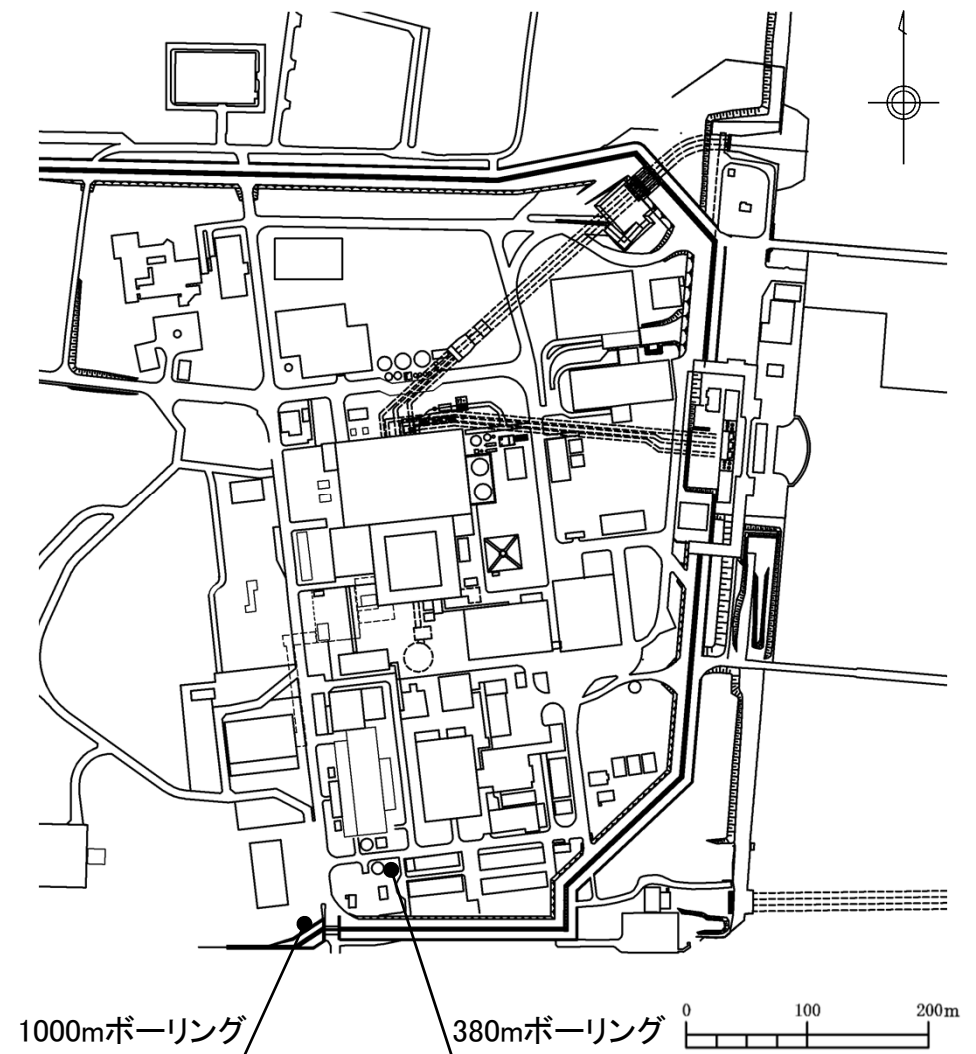
- ・ 地震動の位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討するため、模擬地震波作成に用いる位相については、乱數位相と実観測記録の位相の二つを考慮した。
- ・ これら二つの位相による解放基盤表面での地震動評価結果を比較したところ、応答スペクトルでは差が生じないが、時刻歴波形では乱數位相の方が継続時間が長く、フーリエスペクトルでも乱數位相の方が大きいことから、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相は、乱數位相で代表させることとした。
- ・ 乱數位相による地震動評価結果が一部周期帯において基準地震動 $S_s\text{-D1}$ （応答スペクトル手法による基準地震動）を上回るため、新たに基準地震動 $S_s\text{-32}$ として追加した。

参考文献

- 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, 1-11
- 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, 37-46
- 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, 19-31頁
- 佐藤浩章・金谷守・大島靖樹(2006): 減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案: 岩盤における鉛直アレイ記録への適用と減衰特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp. 55-62
- 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, <https://doi.org/10.1785/0120150059>
- 原子力規制委員会(2021): 第5回原子力規制委員会 資料1 標準応答スペクトルの規制への取り入れのための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等の一部改正-改正案に対する意見募集の結果及びこれを踏まえた修正並びに今後の対応-
- 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, Istanbul.
- 武村雅之(1990): 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震第2輯, 第43巻, 257-265頁
- T. C. Hanks, H. Kanamori (1979): A Moment Magnitude Scale, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.84, No.B5, pp.2348-2350.
- 日本電気協会(2015): 原子力発電所耐震設計技術指針
- Imanishi, K., R. Ando, and Y. Kuwahara(2012): Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Geophysical Research Letters, Vol. 39, L09306.
- 青柳恭平・上田圭一(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震による阿武隈南部の正断層型誘発地震の特徴-臨時余震観測に基づく震源分布と速度構造-, 電力中央研究所研究報告N11048, 平成24年4月
- 新安全設計基準に関する検討チーム(2013)
- 防災科研K-NET, KiK-net (<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>)
- 防災科研F-net
- 佐藤浩章・東貞成・芝良昭・藤原広行・功刀卓(2019): 等価線形解析による非線形サイト特性評価のための有効ひずみ係数の最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第760号, pp. 781-791

- ① 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた地盤モデル
(第409回審査会合資料の再掲)
- ② 既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(評価点追加)
- ③ 標準応答スペクトル用地盤モデルによる既往の地震動評価への影響
 - (1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響
 - (2) 基準地震動 S_s-31 (留萌波)への影響

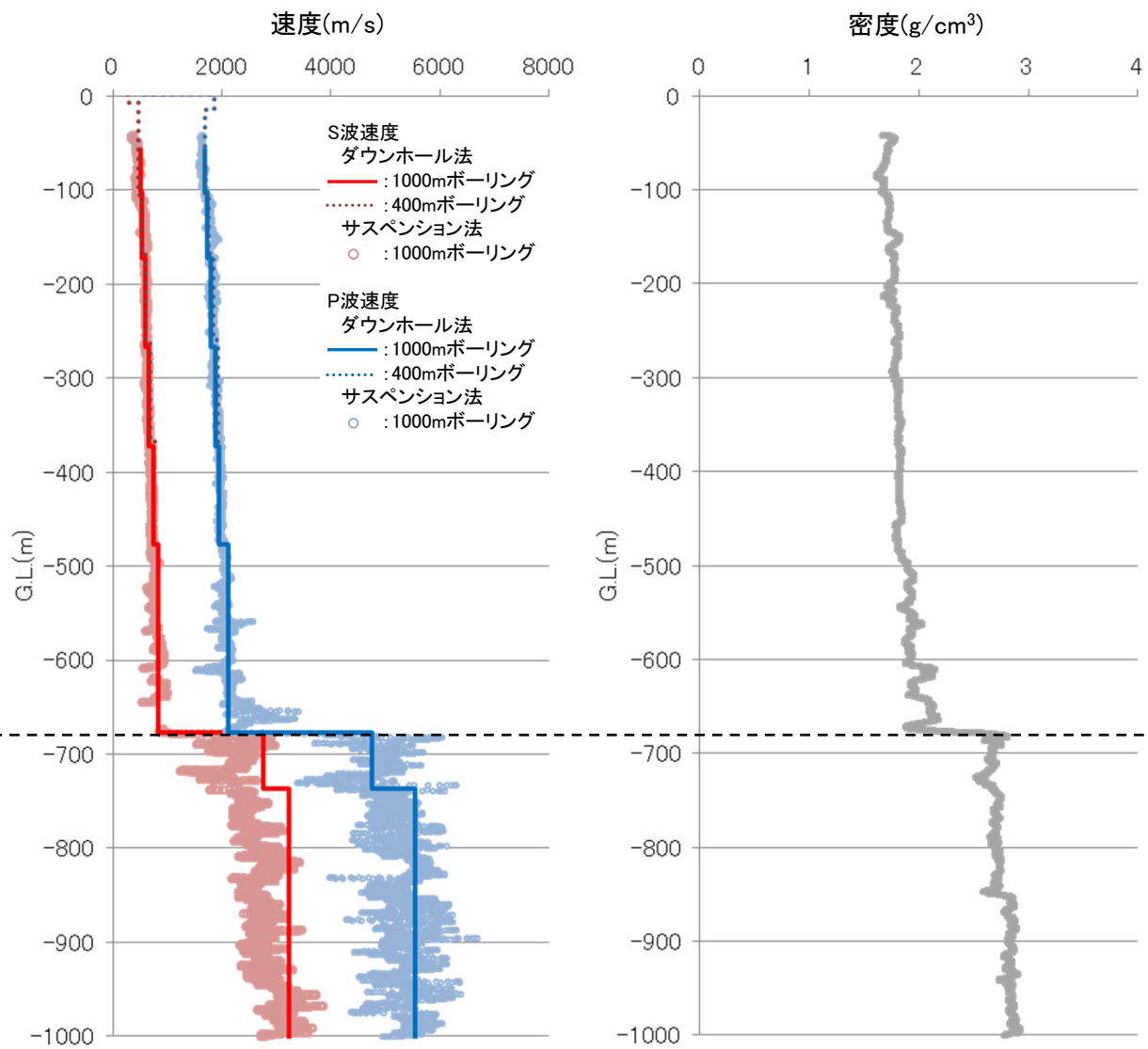
- ・第338回審査会合において、東海第二発電所で実施した1000mボーリングによる調査結果に基づく地盤モデルについて説明した。
- ・その後、1000mボーリング孔に設置している地震計による地震観測記録の中から、ノイズや機器の不具合等による影響のないデータを選定し、解放基盤表面以深の地盤モデルについて再検討を実施した。



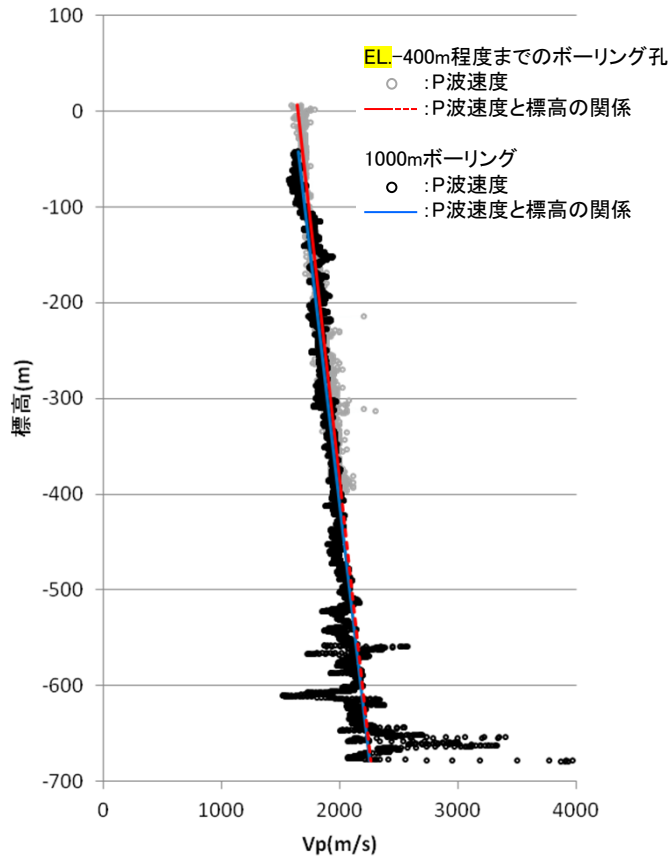
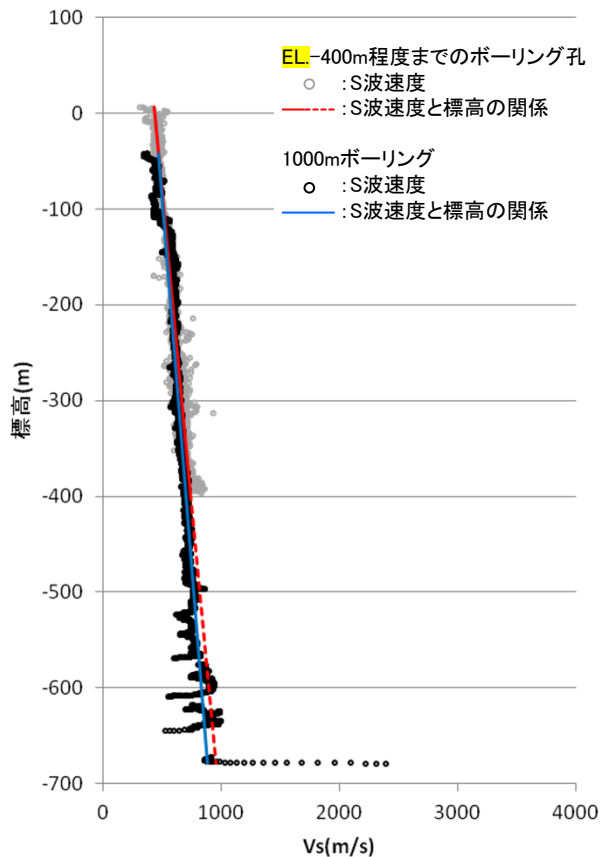
地盤モデルの検討に用いた
ボーリング位置(平面)

【1000mボーリング】

| G.L. (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 減衰定数 | | 地層 |
|-------------|---------------|---------------|--------|--------|-------|
| | | | 水平 | 鉛直 | |
| -65 | — | — | | | 新第三系 |
| -110 | 500 | 1680 | | | |
| -180 | 540 | 1730 | | | |
| -275 | 600 | 1790 | — | — | |
| -380 | 650 | 1890 | | | |
| -485 | 840 | 2110 | 0.0246 | 0.0103 | |
| -685 | 2750 | 4740 | 0.0725 | 0.0397 | 先新第三系 |
| -745 | 3220 | 5550 | 0.0154 | 0.0102 | |
| -1000 | — | — | — | — | |



- ・東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の地盤速度は、深度方向に増大する傾向を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層によって得られた地盤速度と1000mボーリングで実施したPS検層によって得られた地盤速度を以下に示す。また併せて、それぞれのPS検層結果から得られる標高と地盤速度の関係を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層データを基に作成した地盤速度と標高の関係は、1000mボーリングで実施したPS検層結果と整合的であり、久米層における地盤速度は、標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施したPS検層データを基に作成した地盤速度と標高の関係より求める。



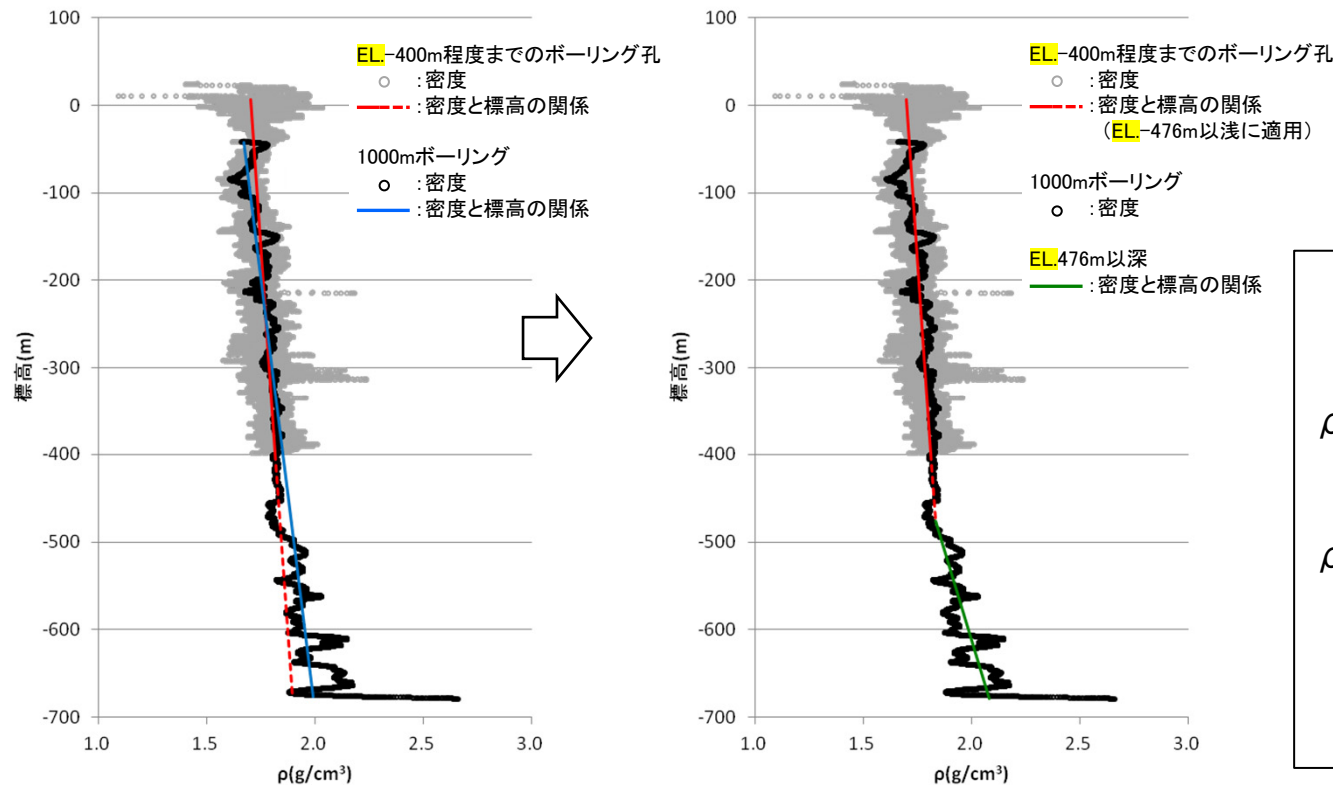
久米層における
地盤速度と標高の関係

$$V_s = 0.433 - 7.71 \times 10^{-4} \cdot Z$$

$$V_p = 1.65 - 9.09 \times 10^{-4} \cdot Z$$

ここで、 V_s : S波速度 (km/s)
 V_p : P波速度 (km/s)
 Z : 標高 (m)

- ・東海第二発電所敷地に分布する新第三系の久米層の密度は、深度方向に増大する傾向を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施した密度検層によって得られた密度と1000mボーリングで実施した密度検層によって得られた密度を以下に示す。また併せて、それぞれの密度検層結果から得られる標高と密度の関係を示す。
- ・標高-400m程度まで掘削した5孔のボーリング孔で実施した密度検層データを基に作成した密度と標高の関係は、1000mボーリングで実施した密度検層結果とEL-500m程度まで整合的であるが、EL-500m以深では密度と標高の関係より密度検層データが大きくなる。
- ・1000mボーリング結果によると、EL-476m以深では砂質泥岩層と乱堆積物層との互層が見られることより、EL-476mを境に密度と標高の関係を変えることとした。



久米層における
密度と標高の関係

$$\rho = 1.702 - 2.828 \times 10^{-4} \cdot Z$$

(EL-476m 以浅)

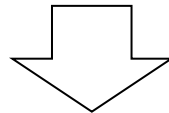
$$\rho = 1.253 - 1.220 \times 10^{-3} \cdot Z$$

(EL-476m 以深)

ここで、 ρ : 密度 (g/cm³)
Z : 標高 (m)

設定した初期地盤モデル

- ① EL-372m以浅の地盤モデルは、地表(EL.8m)からEL-372mで観測した地震記録をもとに地盤同定解析を行い設定した地盤モデルを用いた。
【第291回審査会合】
- ② 概ね100m程度を目安に層厚を設定した。
- ③ EL-372m ~ -476mの地盤物性については、上層との連続性を考慮し、上層と同じ値を設定した。
- ④ EL-476m ~ -679mの地盤物性については、調査結果に基づく標高依存式より算出した。
- ⑤ EL-372 ~ -679mの新第三系(久米層)の減衰定数は、上層との連続性を考慮し、上層と同じ値を設定した。
- ⑥ EL-679m以深のS波速度及びP波速度については、1000mボーリングにおけるPS検層(ダウンホール法)結果、密度については1000mボーリングにおける密度検層結果を基に設定した。
- ⑦ EL-679m以深の減衰定数は仮定した。

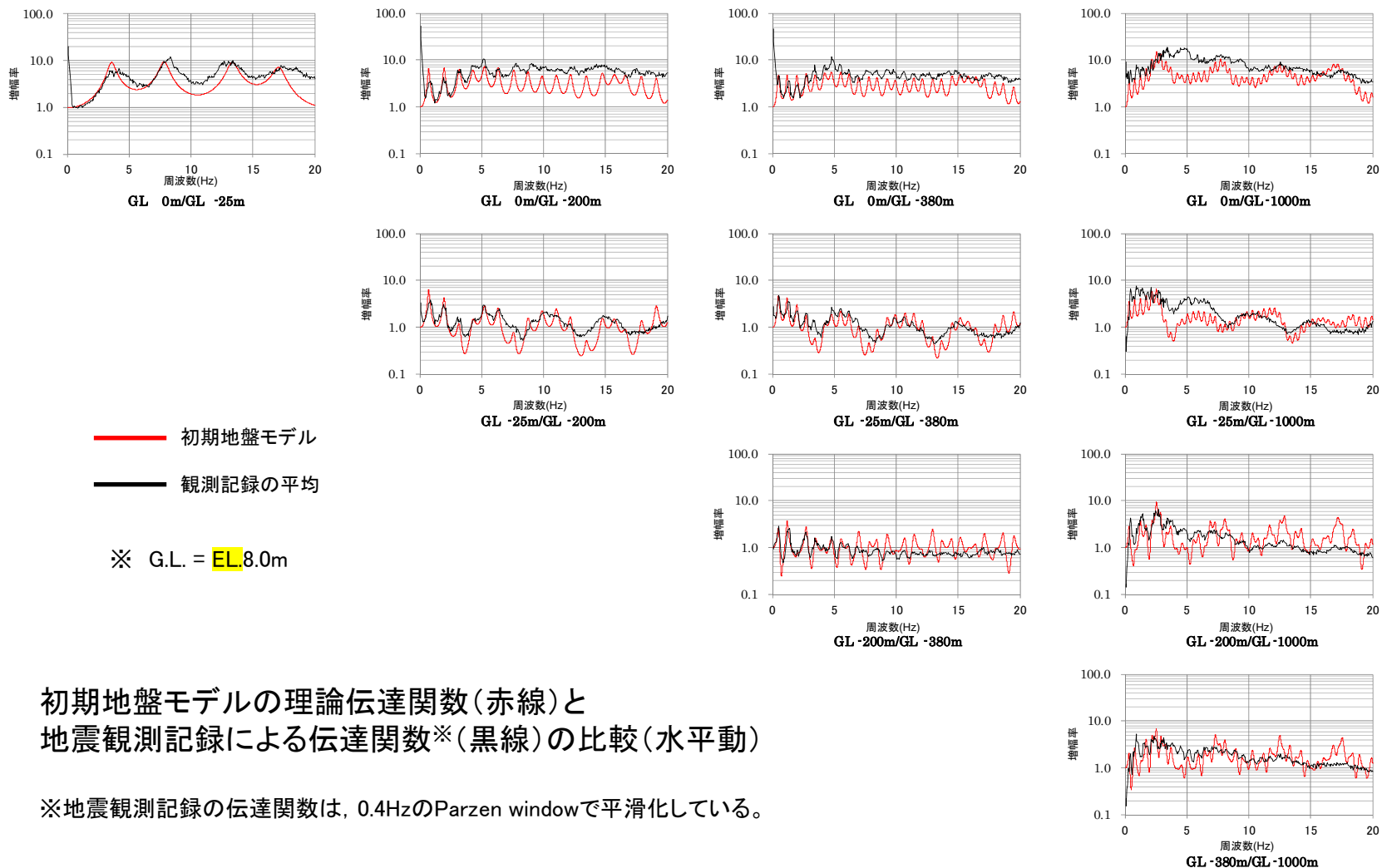


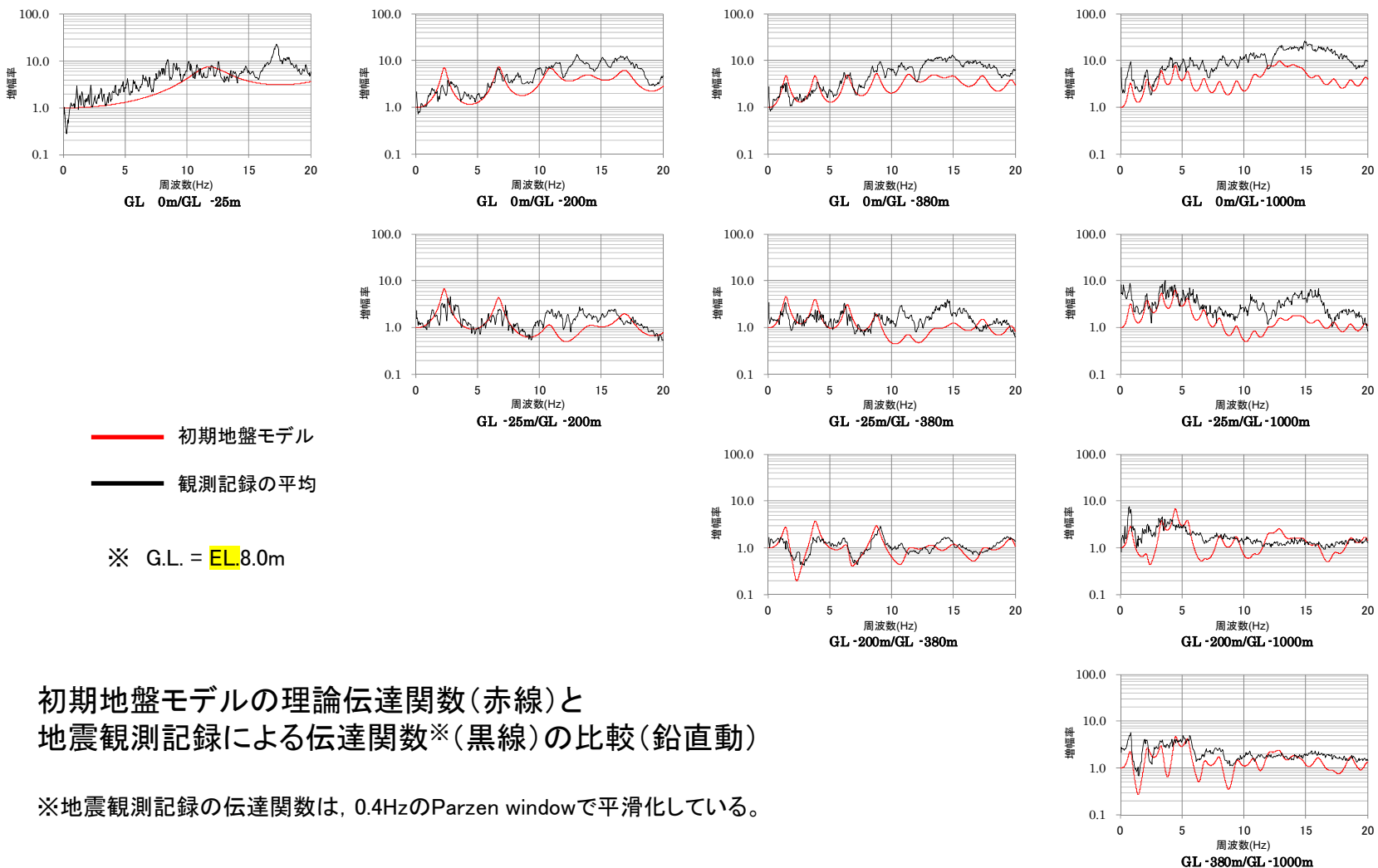
●初期地盤モデルの理論伝達関数と観測記録による伝達関数を比較する

| EL (m) | 層厚 (m) | 地層 | 密度 (g/cm ³) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 減衰定数 | | |
|-----------|-----------|-------|----------------------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------------------|------|
| | | | | | | 水平 | 鉛直 | |
| ▼ 8.0 | ① 2.5 | 第四系 | 1.71 | 130 | 280 | 0.236f ^{-0.752} | 0.203f ^{-0.21} | |
| 5.5 | 4.5 | | | 151 | 403 | | | |
| 1.0 | 8.0 | | | 308 | 1589 | | | |
| -7.0 | 8.0 | | | 478 | 1509 | | | |
| ▼ -15.0 | 2.0 | 新第三系 | 1.69 | 477 | 1753 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | |
| ▼ -17.0 | 89.0 | | | 557 | 1742 | | | |
| ▼ -106.0 | 62.0 | | | 669 | 2067 | | | |
| ▼ -168.0 | 24.0 | | | 756 | 2256 | | | |
| ▼ -192.0 | 68.0 | 先新第三系 | 1.85 | 790 | 2000 | 0.010 | 0.010 | |
| ▼ -260.0 | 108.0 | | | 3220 | 5550 | | | |
| ▼ -368.0 | 2.0 | | | 3220 | 5550 | | | |
| ▼ -370.0 | 2.0 | | | 2.78 | 3220 | | | |
| ▼ -372.0 | ② 104.0 | 先新第三系 | 2.65 | 790 | 2000 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | |
| ▼ -476.0 | 90.0 | | | 835 | 2124 | | | |
| ▼ -566.0 | 89.0 | | | ④ 2.00 | 904 | | | 2205 |
| ▼ -655.0 | 24.0 | | | 2.07 | 947 | | | 2256 |
| △ -679.0 | ⑥ 55.0 | 先新第三系 | 2.78 | 2750 | 4740 | 0.010 | 0.010 | |
| ▼ -734.0 | 258.0 | | | 3220 | 5550 | | | |
| ▼ -992.0 | - | | | 2.78 | 3220 | | | 5550 |

▼:地震計位置 ▽:解放基盤表面 △:地震基盤

- ・初期地盤モデルによる理論伝達関数を算出し、地震観測記録による伝達関数と比較した。
- ・初期地盤モデルと地震観測記録による伝達関数のピークとトラフは整合しており、初期地盤モデルの層厚と地盤速度の設定は妥当であり、地盤同定解析では減衰定数を解析対象とする。





●地盤モデルの同定結果

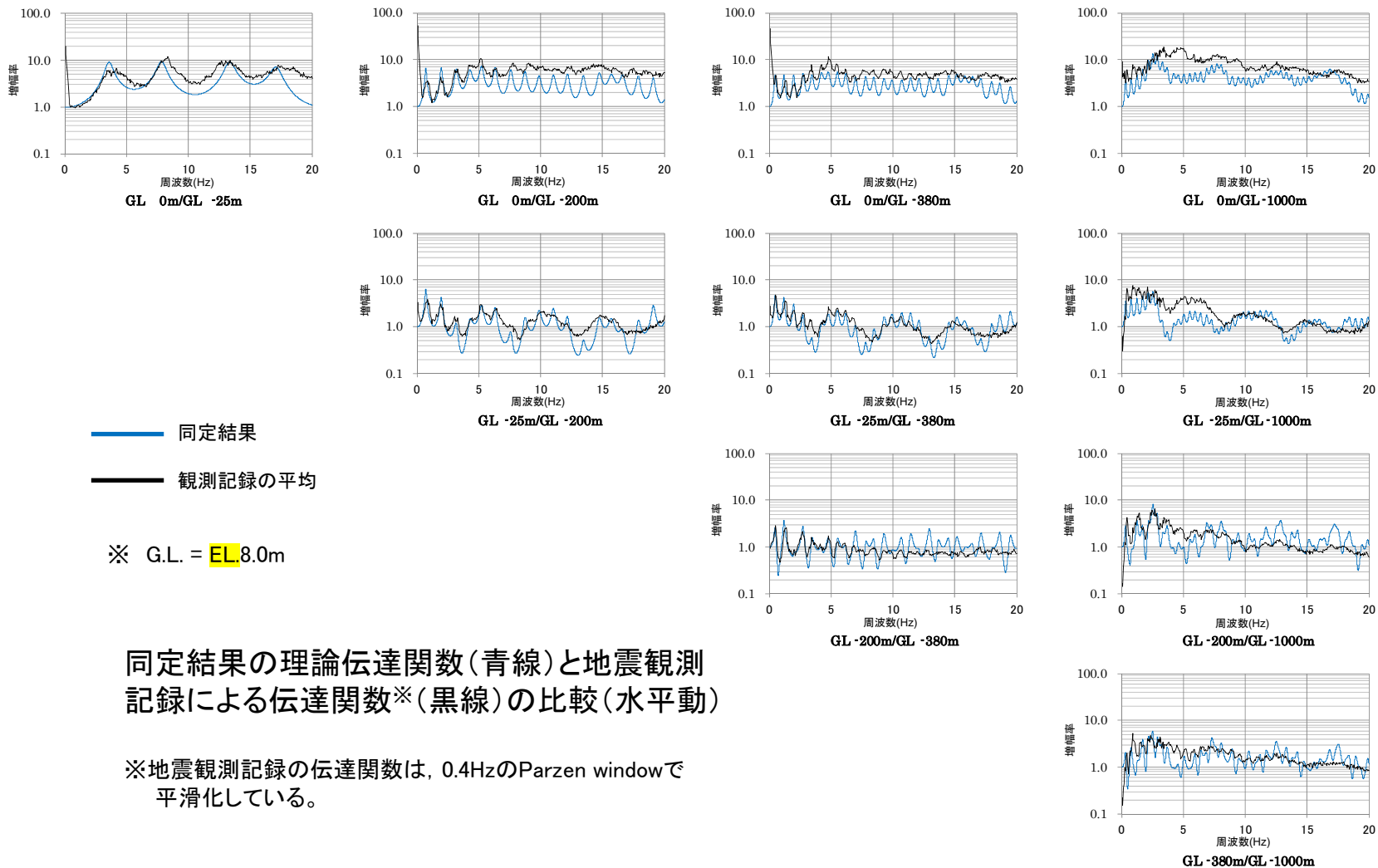
- 地震観測記録から求めた伝達関数に、一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により、地盤モデルを同定した。
- 減衰定数の初期値は0.01(1%)と仮定した。
- 解析手法は遺伝的アルゴリズムを用い、乱数の初期値を変えた5通りの計算結果の平均値を採用した。
- 解析パラメータについては、山中・石田(1995)を参考に設定した。
- 得られた結果を以下に示す。
 水平成分 $h(f)=0.022$
 鉛直成分 $h(f)=0.001 \times f^{-1.000}$

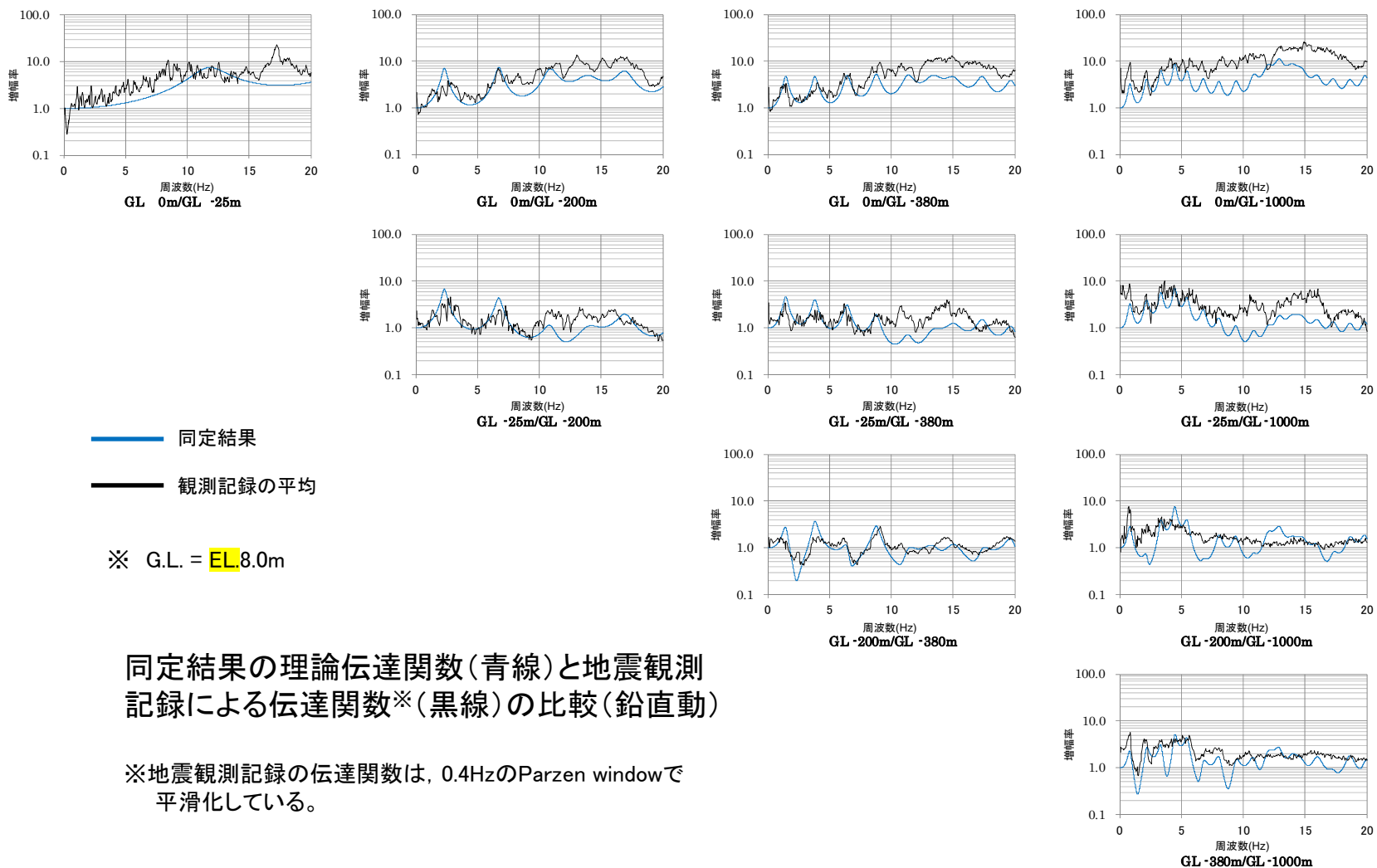
同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果

| EL (m) | 層厚 (m) | 地層 | 固定パラメータ | | | 探索範囲 | | 同定結果 | |
|-----------|-----------|-------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------|--|----------------------------------|
| | | | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$ | | 水平 | 鉛直 |
| | | | | | | 水平 | 鉛直 | | |
| ▼ 8.0 | 2.5 | 第四系 | 130 | 280 | 1.71 | 0.236f ^{-0.752} | 0.203f ^{-0.21} | - | |
| 5.5 | 4.5 | | 151 | 403 | | | | | |
| 1.0 | 8.0 | | 308 | 1589 | | | | | |
| -7.0 | 8.0 | | 478 | 1509 | | | | | |
| ▼ -15.0 | 2.0 | 新第三系 | 477 | 1753 | 1.69 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | - | |
| ▼ -17.0 | 89.0 | | 557 | 1742 | | | | | |
| -106.0 | 62.0 | | 669 | 2067 | | | | | |
| -168.0 | 24.0 | | 756 | 2256 | | | | | |
| ▼ -192.0 | 68.0 | 先新第三系 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | - | |
| ▼ -260.0 | 108.0 | | 790 | 2000 | | | | | |
| ▽ -370.0 | 2.0 | | 835 | 2124 | | | | | |
| ▼ -372.0 | 2.0 | | 904 | 2205 | | | | | |
| ▼ -476.0 | 104.0 | 先新第三系 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.072f ^{-0.931} | 0.203f ^{-0.93} | - | |
| -566.0 | 90.0 | | 2750 | 4740 | | | | | |
| -655.0 | 89.0 | | 3220 | 5550 | | | | | |
| △ -679.0 | 24.0 | | 3220 | 5550 | | | | | |
| ▼ -734.0 | 55.0 | 先新第三系 | 3220 | 5550 | 2.78 | - | - | h ₀ :0.001~1.000 α:0.000~1.000 | h ₀ :0.022 α:0.000 |
| ▼ -992.0 | 258.0 | | 3220 | 5550 | | | | | |

▼:地震計位置 ▽:解放基盤表面 △:地震基盤

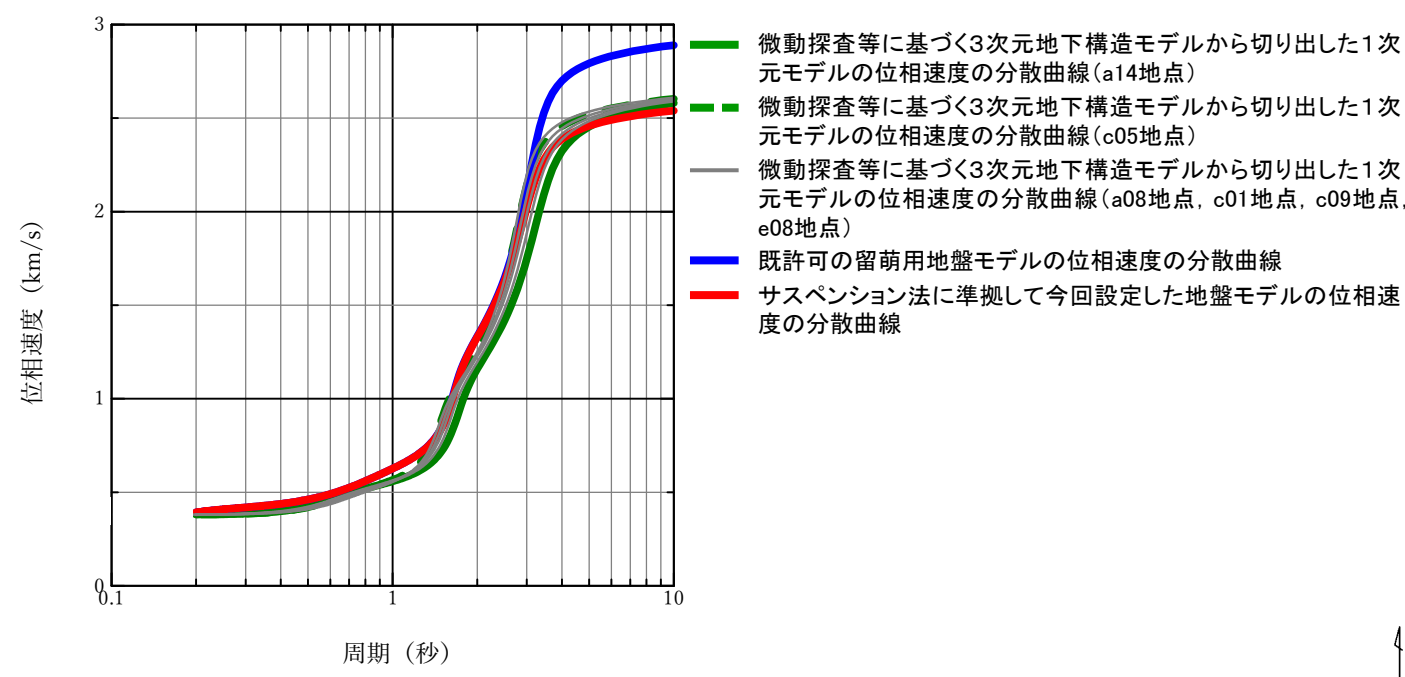
□:同定対象



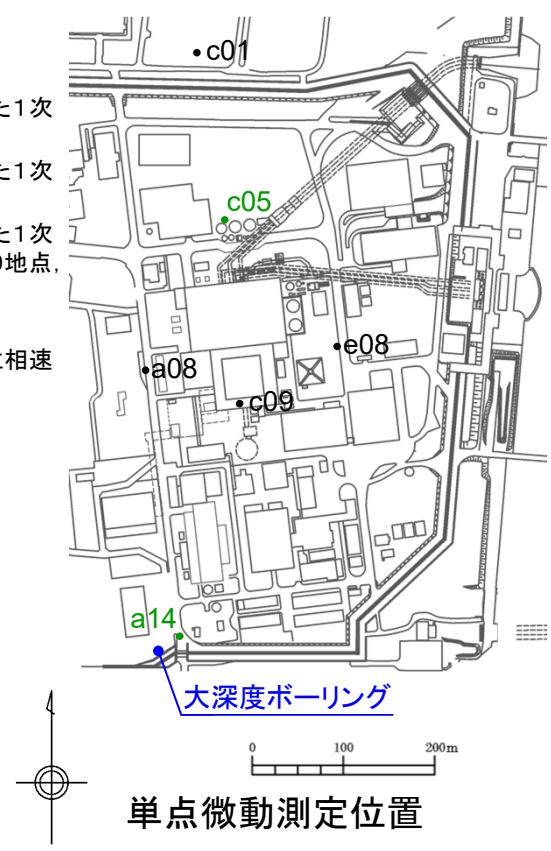


既往の各種物理探査結果との関係： 位相速度の分散曲線(評価点追加)

- 本編では、微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから敷地(大深度ボーリング位置に近いa14地点及び既許可の審査時において実施した微動アレイ探査位置のc05地点)での情報を切り出した1次元モデルによる位相速度の分散曲線と、既許可の留萌用地盤モデル、今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線を比較した。
- 参考として、上記比較に加え、微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから主要建屋周辺(既許可の審査時において実施した単点微動測定位置のa08地点、c01地点、c09地点及びe08地点)での情報を切り出した1次元モデルによる位相速度の分散曲線を比較し、関係を整理する。



各モデルの位相速度の分散曲線に関する比較



単点微動測定位置

本編のa14地点、c05地点以外の評価点における位相速度の分散曲線を追加して比較しても、これらの位相速度の分散曲線と今回設定した地盤モデルの位相速度の分散曲線は全周期帯において、良く整合していることを確認した。

(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(1/7)

- 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の断層モデル手法による地震動評価は、全て経験的グリーン関数法(EGF法)で実施しているが、結果の妥当性確認のため統計的グリーン関数法(SGF法)による地震動評価も行っている。
- そこで、EGF法による地震動評価のうち、基準地震動に選定しているケースを対象に標準応答スペクトル用地盤モデルを用いてSGF法による地震動評価を改めて行い、EGF法による基準地震動の評価に与える影響を検討する。
- また、2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた地盤モデルでのSGF法による評価も行い、併せて結果を示すこととする。

SGF法用地盤モデル

留萌用地盤モデル

標準応答スペクトル用地盤モデル

| | SGF法用地盤モデル | | | | 留萌用地盤モデル | | 標準応答スペクトル用地盤モデル | | | | | |
|---------|------------|------------|------------|-------------------------|------------------------|------|-----------------|------------|------------|-------------------------|---|---|
| | 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | | 上端標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | |
| | | | | | 水平 | 鉛直 | | | | | 水平 | 鉛直 |
| 解放基盤表面 | -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.02 | 0.01 | -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061f ^{-1.05} (f ≤ 6.78) 0.008 (f > 6.78) | 0.264f ^{-1.05} (f ≤ 31.74) 0.007 (f > 31.74) |
| | -477.0 | 840 | 2110 | 1.96 | | | -476.0 | 835 | 2124 | 1.89 | | |
| 地震基盤相当面 | -677.0 | 2750 | 4740 | 2.63 | Q=110f ^{0.69} | | -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054f ^{-1.05} (f ≤ 6.78) 0.007 (f > 6.78) | 0.240f ^{-1.05} (f ≤ 31.74) 0.006 (f > 31.74) |
| | | | | | | | -655.0 | 947 | 2256 | 2.07 | 0.051f ^{-1.05} (f ≤ 6.78) 0.007 (f > 6.78) | 0.234f ^{-1.05} (f ≤ 31.74) 0.006 (f > 31.74) |
| | | | | | | | -679.0 | 2750 | 4740 | 2.65 | 0.013f ^{-0.21} (f ≤ 1.31) 0.012 (f > 1.31) | 0.004f ^{-0.23} (f ≤ 16.46) 0.002 (f > 16.46) |

(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(2/7)

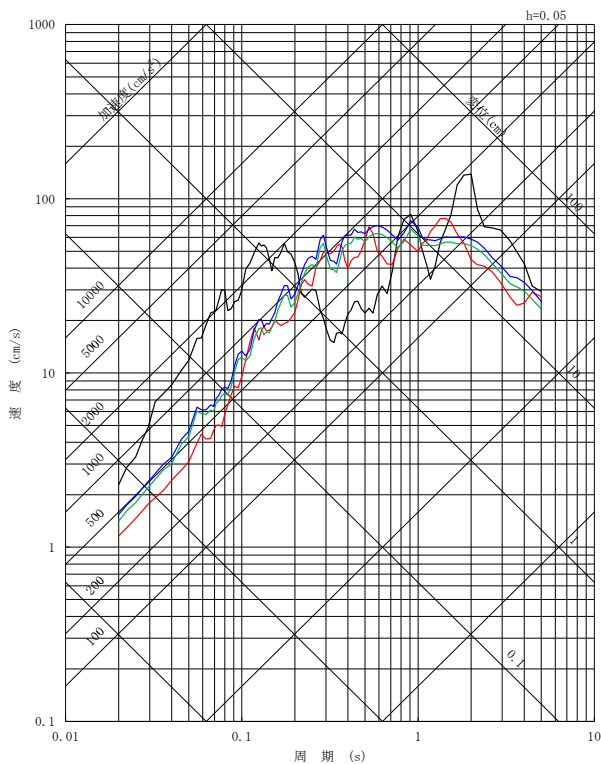
補足説明資料③

新規

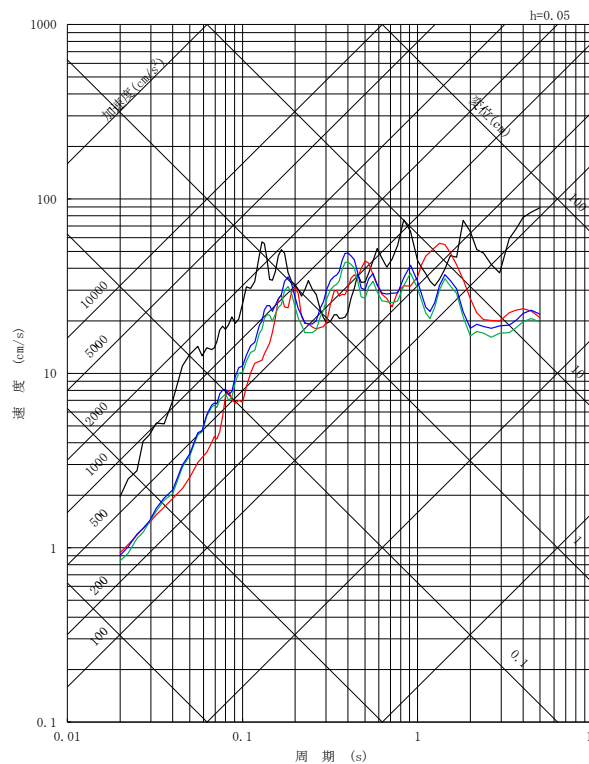
No.4 コメント回答

■ S_s-11 : F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)

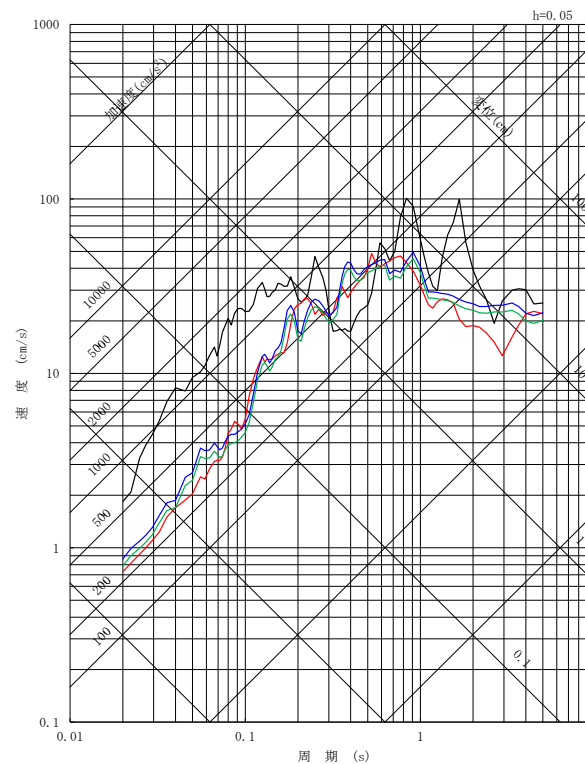
- EGF法
- SGF法(SGF法用地盤モデル)
- SGF法(留萌用地盤モデル)
- SGF法(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

擬似速度応答スペクトル

- ・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果は、従来のSGF法用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いがEGF法で評価した基準地震動との関係に影響を与えないことを確認した。
- ・従って、EGF法で策定した基準地震動 S_s-11 の評価にも影響を与えない。

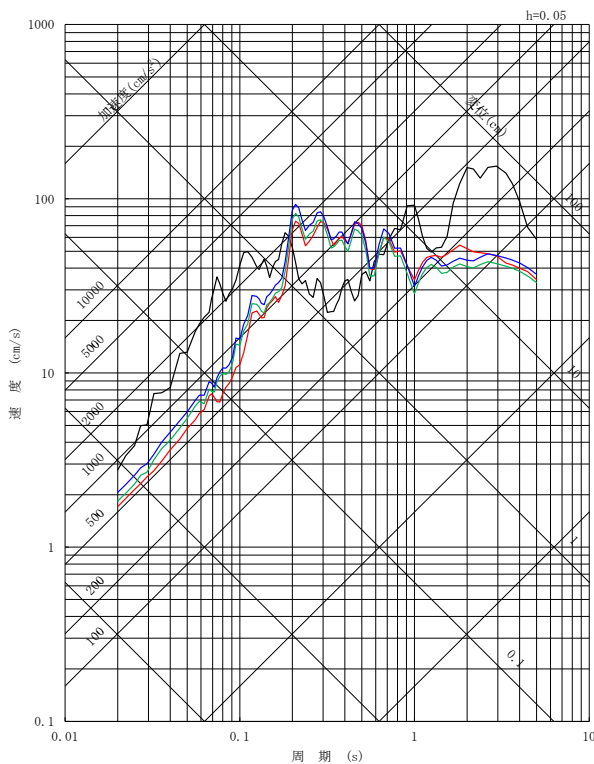
(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(3/7)

補足説明資料③

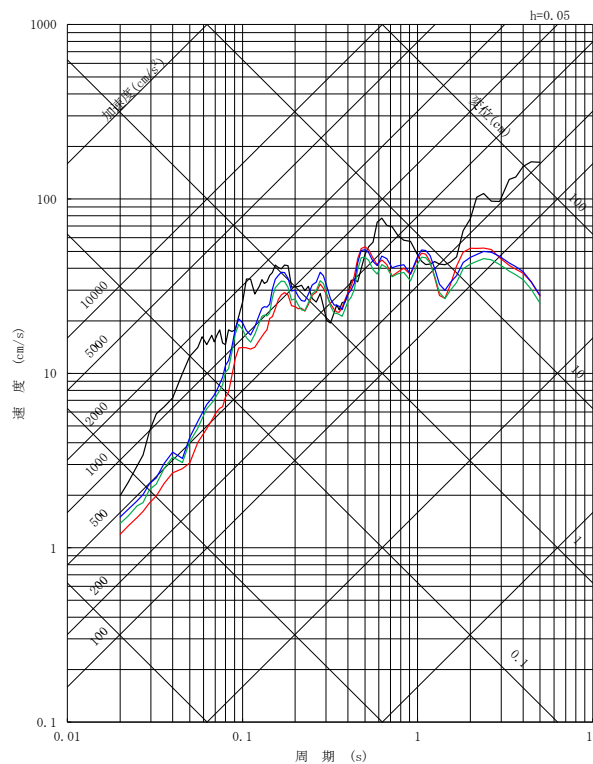
新規
No.4 コメント回答

■ S_s-12 : F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)

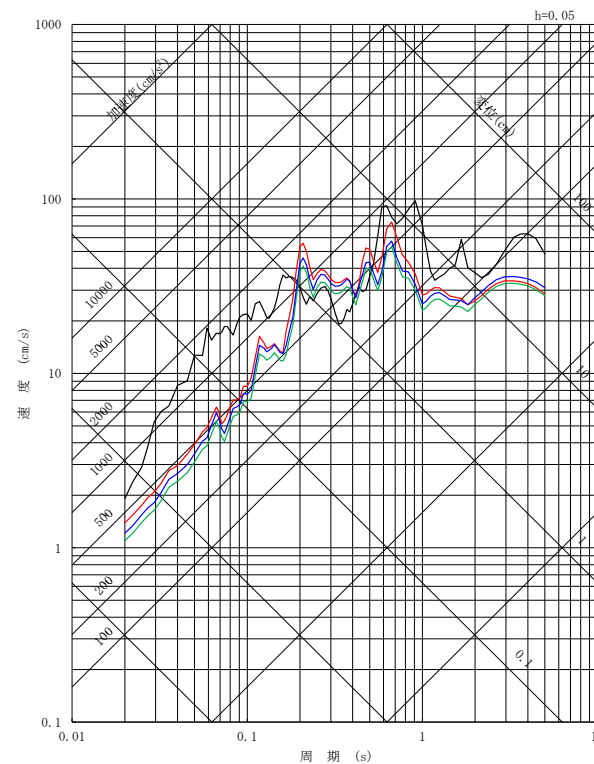
- EGF法
- SGF法(SGF法用地盤モデル)
- SGF法(留萌用地盤モデル)
- SGF法(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

擬似速度応答スペクトル

・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果は、従来のSGF法用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いがEGF法で評価した基準地震動との関係に影響を与えないことを確認した。
 ・従って、EGF法で策定した基準地震動 S_s-12 の評価にも影響を与えない。

(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(4/7)

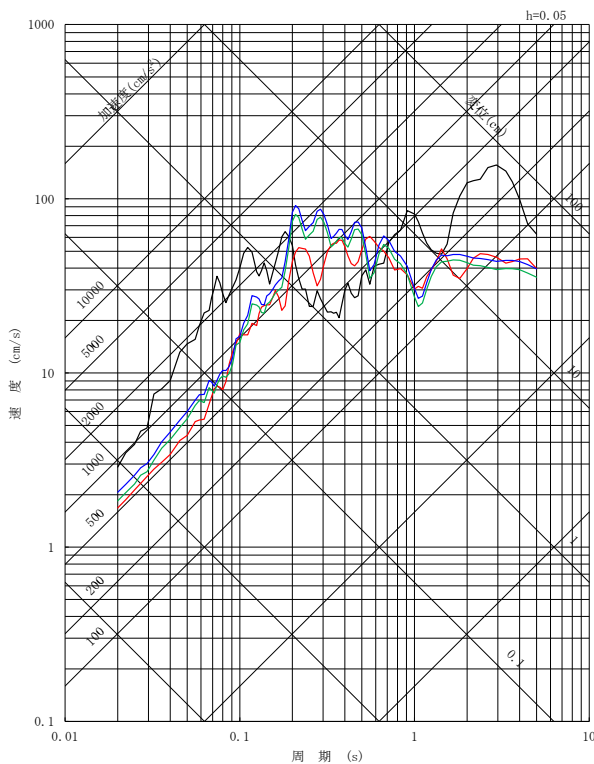
補足説明資料③

新規

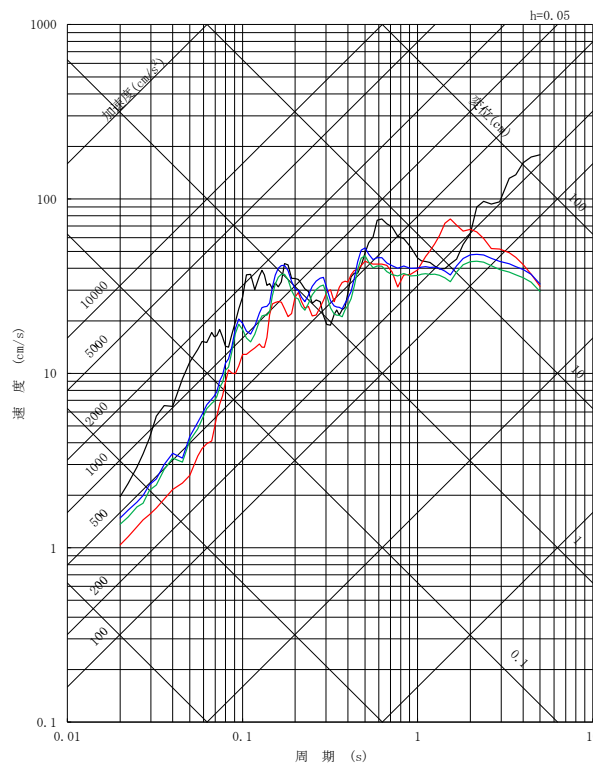
No.4 コメント回答

■ S_s -13: F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)

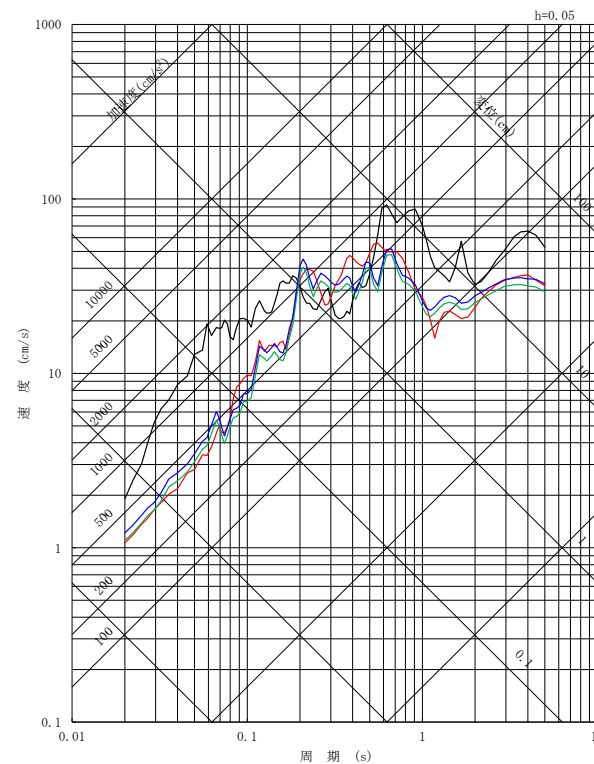
- EGF法
- SGF法(SGF法用地盤モデル)
- SGF法(留萌用地盤モデル)
- SGF法(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

擬似速度応答スペクトル

・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果は、従来のSGF法用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いがEGF法で評価した基準地震動との関係に影響を与えないことを確認した。
 ・従って、EGF法で策定した基準地震動 S_s -13の評価にも影響を与えない。

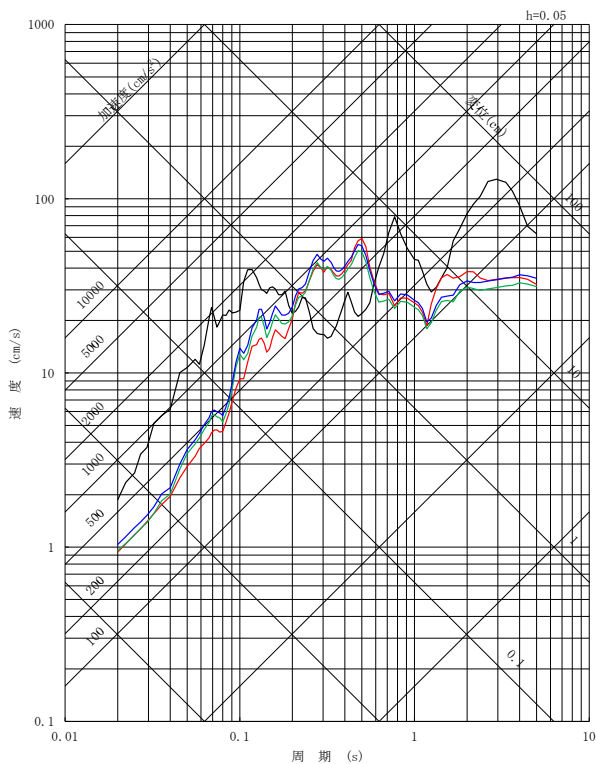
(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(5/7)

補足説明資料③

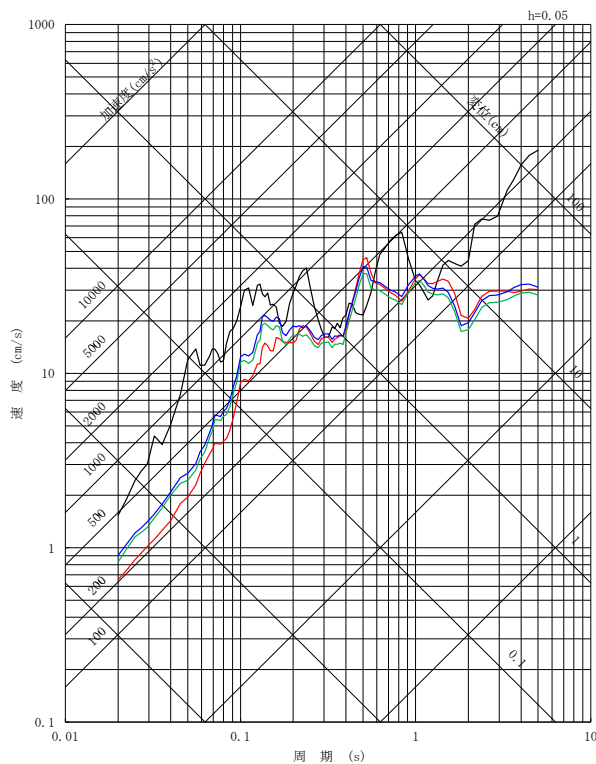
新規
No.4 コメント回答

■ S_s-14 : F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)

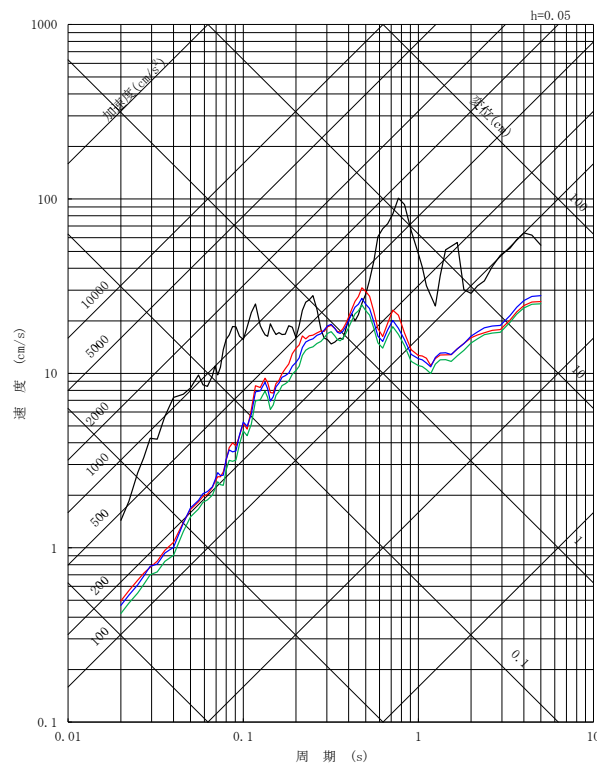
- EGF法
- SGF法(SGF法用地盤モデル)
- SGF法(留萌用地盤モデル)
- SGF法(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

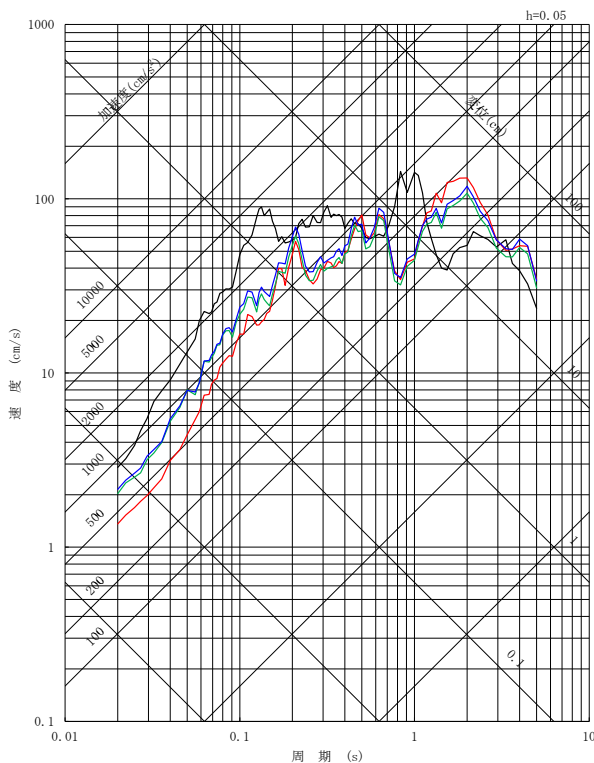
擬似速度応答スペクトル

・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果は、従来のSGF法用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いがEGF法で評価した基準地震動との関係に影響を与えないことを確認した。
 ・従って、EGF法で策定した基準地震動 S_s-14 の評価にも影響を与えない。

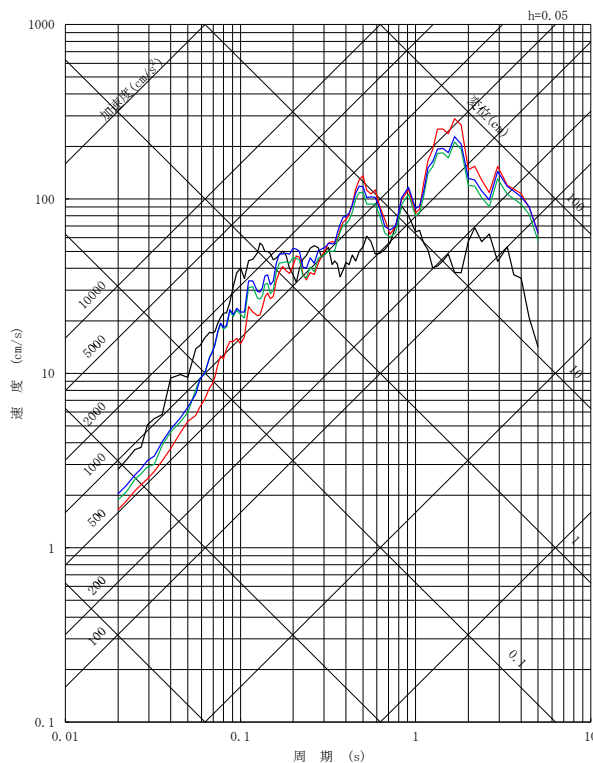
(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(6/7)

■ S_s -21: 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)

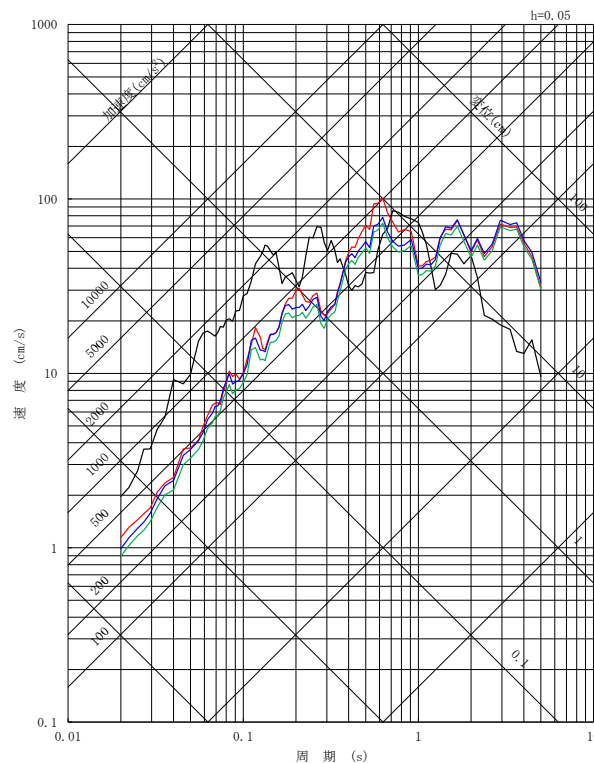
- EGF法
- SGF法(SGF法用地盤モデル)
- SGF法(留萌用地盤モデル)
- SGF法(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

擬似速度応答スペクトル

・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果は、従来のSGF法用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いがEGF法で評価した基準地震動との関係に影響を与えないことを確認した。
 ・従って、EGF法で策定した基準地震動 S_s -21の評価にも影響を与えない。

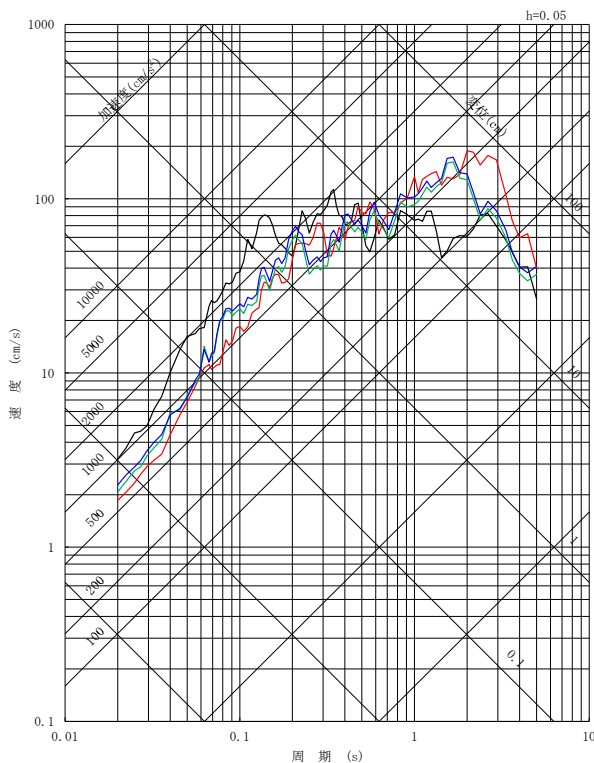
(1) 断層モデル手法による基準地震動 S_s への影響(7/7)

補足説明資料③

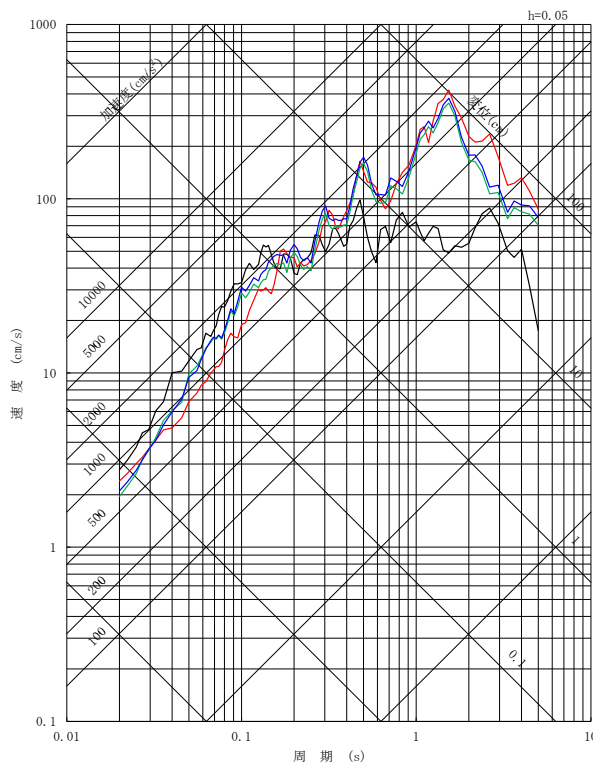
新規
No.4 コメント回答

■ S_s -22: 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)

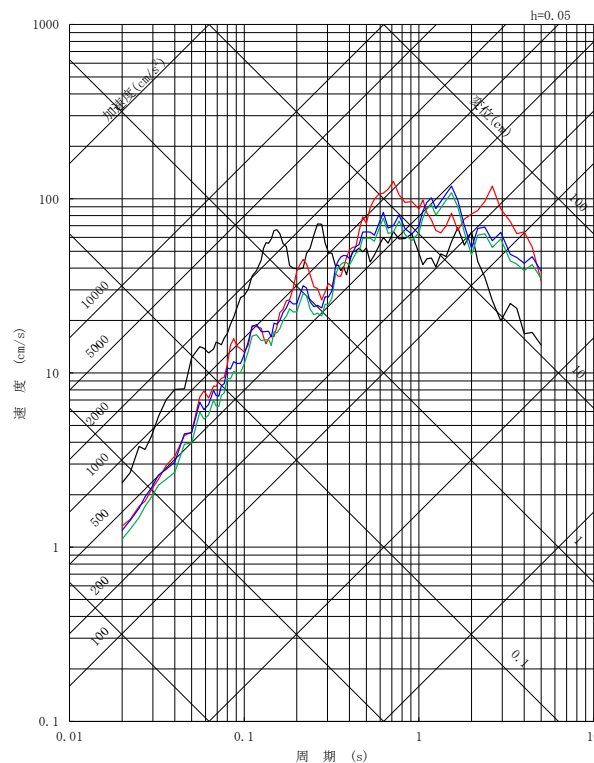
- EGF法
- SGF法(SGF法用地盤モデル)
- SGF法(留萌用地盤モデル)
- SGF法(標準応答スペクトル用地盤モデル)



NS方向



EW方向



UD方向

擬似速度応答スペクトル

・標準応答スペクトル用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果は、従来のSGF法用地盤モデルを用いたSGF法の評価結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いがEGF法で評価した基準地震動との関係に影響を与えないことを確認した。
 ・従って、EGF法で策定した基準地震動 S_s -22の評価にも影響を与えない。

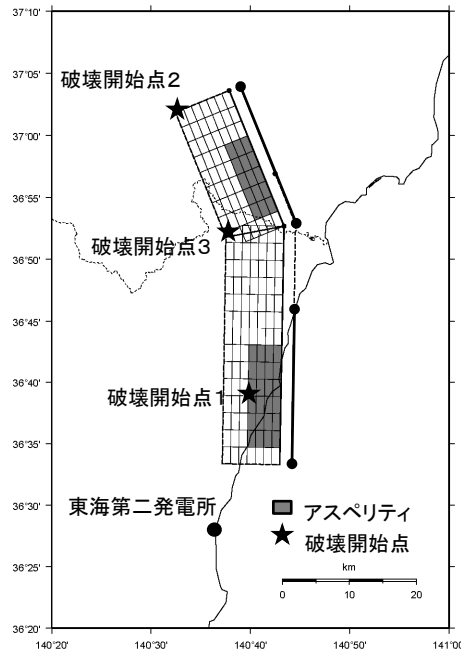
参考 既往のSGF法とEGF法の比較: 内陸地殻内地震(1/2)

補足説明資料③

第404回審査会合
資料2修正
No.4 コメント回答

■評価条件

経験的グリーン関数法に用いる要素地震の妥当性確認のため、基本震源モデルに対し、統計的グリーン関数法による地震動評価を実施する。震源モデル及び評価に用いる地盤モデルを示す。

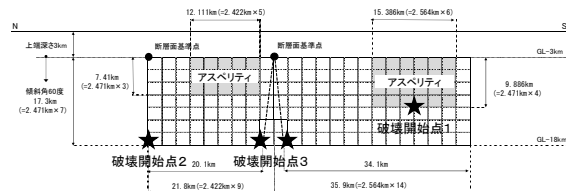


主な計算条件

- 地震基盤への鉛直入射を仮定し、一次元波動論に基づき解放基盤表面における地震波を作成する。
- 要素地震のスペクトル特性、経時特性ともBoore(1983)を用いる。
- Dan et al.(1989)の手法により波形合成を行う。

統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル

| 上面深度 | | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | hs | hp | 備考 |
|---------|-------|-----------|----------------------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| G.L.(m) | EL(m) | | | | | | | |
| 0 | 8 | 378 | — | — | — | — | — | ▼解放基盤表面 EL-370m |
| -378 | -370 | 107 | 1.85 | 790 | 2000 | 0.02 (Q=25) | 0.01 (Q=50) | ▼地震基盤 EL-677m |
| -485 | -477 | 200 | 1.96 | 840 | 2110 | | | |
| -685 | -677 | — | 2.63 | 2750 | 4740 | Q=110f ^{0.69} | Q=110f ^{0.69} | |



基本震源モデル

参考 既往のSGF法とEGF法の比較: 内陸地殻内地震(2/2)

補足説明資料③

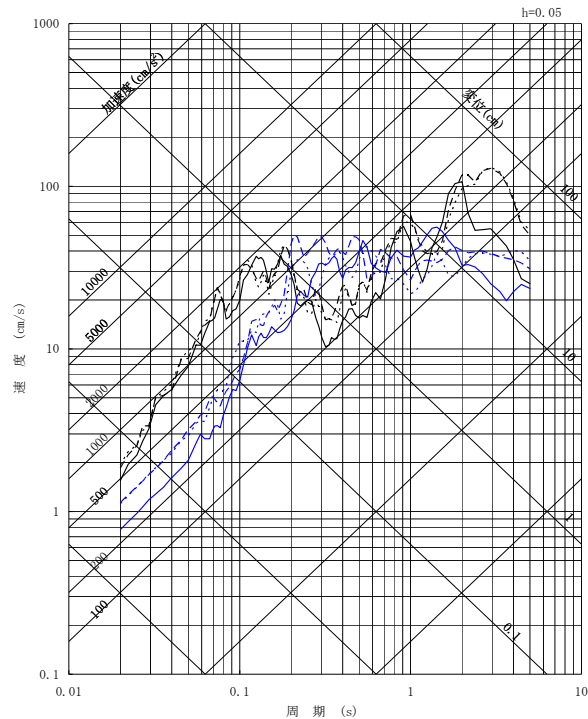
第404回審査会合
資料2修正

No.4 コメント回答

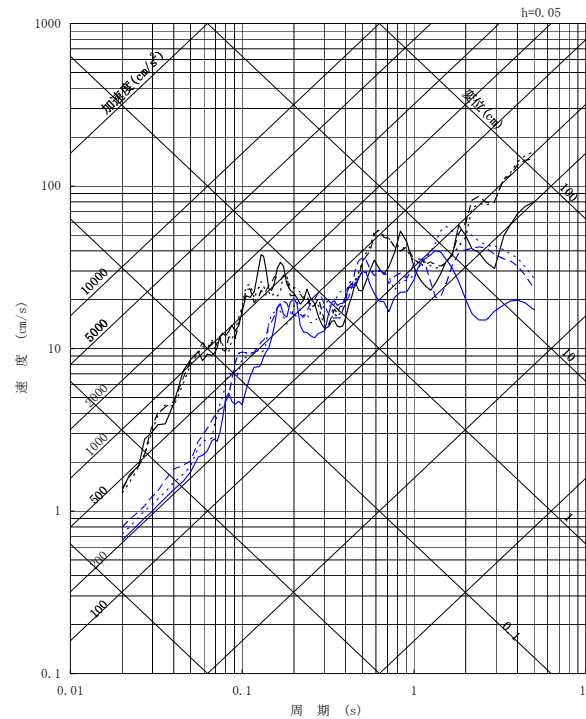
■ 基本震源モデルによる地震動評価結果の応答スペクトル

基本震源モデルに対し、経験的グリーン関数法による評価結果と統計的グリーン関数法による評価結果を比較する。

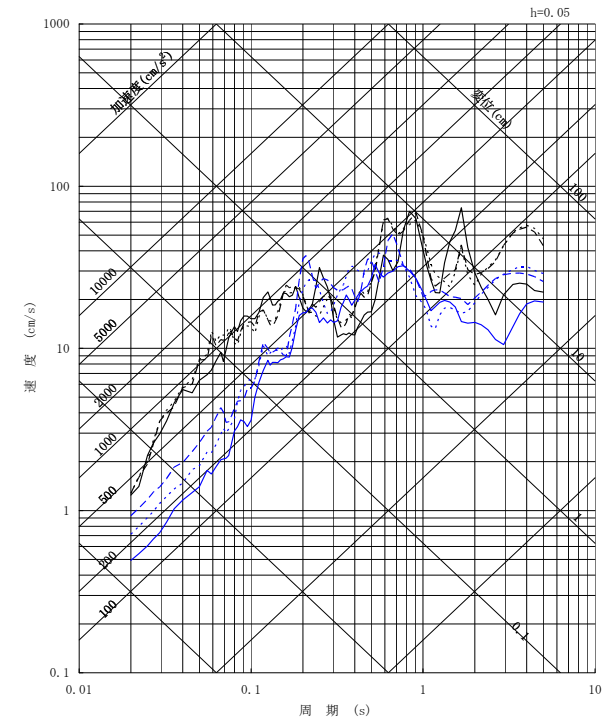
経験的グリーン関数法 破壊開始点1 ——— 破壊開始点2 - - - 破壊開始点3 - - - -
 統計的グリーン関数法 破壊開始点1 ——— 破壊開始点2 - - - 破壊開始点3 - - - -



NS方向



EW方向



UD方向

- 統計的グリーン関数法による評価結果について、周期0.3~1秒程度から長周期側において経験的グリーン関数法による評価結果と概ね整合している。
- 短周期側における評価結果の差異は、経験的グリーン関数法において f_{max} の補正無しで評価したことにより、要素地震の f_{max} の特性がそのまま合成結果に現れたためと考えられる。

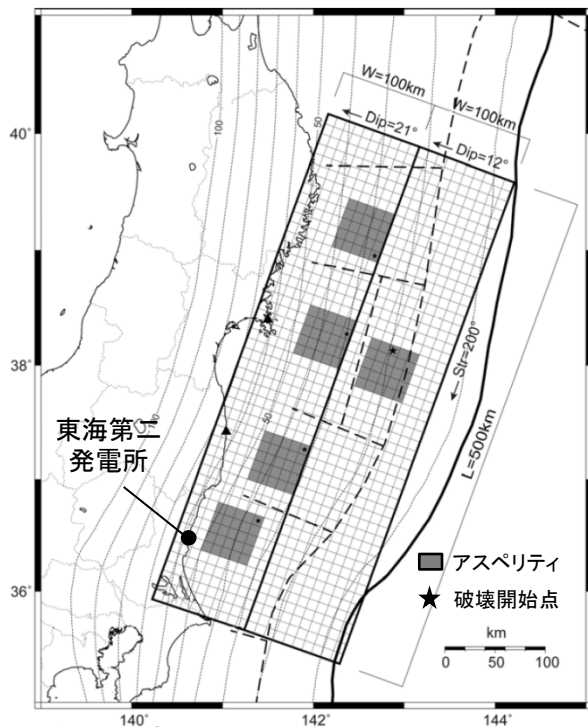
参考 既往のSGF法とEGF法の比較: プレート間地震(1/2)

補足説明資料③

第358回審査会合
資料1修正

No.4 コメント回答

■基本震源モデルに対して統計的グリーン関数法による評価を行う。



背景の太線は日本海溝, 破線は海溝型地震の発生領域

統計的グリーン関数法の評価に用いる地盤モデル

| 上面深度 | | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | Vs (m/s) | Vp (m/s) | hs | hp | 備考 |
|---------|-------|-----------|----------------------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| G.L.(m) | EL(m) | | | | | | | |
| 0 | 8 | 378 | — | — | — | — | — | ▼解放基盤表面 EL-370m |
| -378 | -370 | 107 | 1.85 | 790 | 2000 | 0.02 (Q=25) | 0.01 (Q=50) | ▼地震基盤 EL-677m |
| -485 | -477 | 200 | 1.96 | 840 | 2110 | | | |
| -685 | -677 | — | 2.63 | 2750 | 4740 | Q=110 ^{f0.69} | Q=110 ^{f0.69} | |

震源モデル

主な計算条件

| 審査会合 | 地盤モデル | 入射方法 | 鉛直成分の計算方法 | f _{max} | 放射特性係数の補正 |
|-----------------------|--------------------|------|---|------------------|---|
| 第243回 (諸井ほか(2013)) | 耐震バックチェックで用いた地盤モデル | 斜め入射 | 地震基盤においてSV波の平行成層地盤に対する斜め入射により算出する。 | 13.5Hz | 短周期成分を一定値(SV波, SH波で各0.445)とし, 長周期成分を理論値とし, その間是对数軸上で線形補間した値とする。 |
| 第336回 | 耐震バックチェックで用いた地盤モデル | 鉛直入射 | 地震基盤において耐専スペクトルの鉛直/水平の応答スペクトル比を水平方向(SV波)のフーリエスペクトルに乗じて算出する。 | 13.5Hz | 短周期成分を一定値(SV波, SH波で各0.445)とし, 長周期成分を理論値とし, その間是对数軸上で線形補間した値とする。 |
| 今回 | 最新の地盤モデル | 鉛直入射 | 地震基盤において耐専スペクトルの鉛直/水平の応答スペクトル比を水平方向(SV波)のフーリエスペクトルに乗じて算出する。 | 13.5Hz | 短周期成分を一定値(SV波, SH波で各0.445)とし, 長周期成分を理論値とし, その間是对数軸上で線形補間した値とする。 |

参考 既往のSGF法とEGF法の比較: プレート間地震(2/2)

補足説明資料③

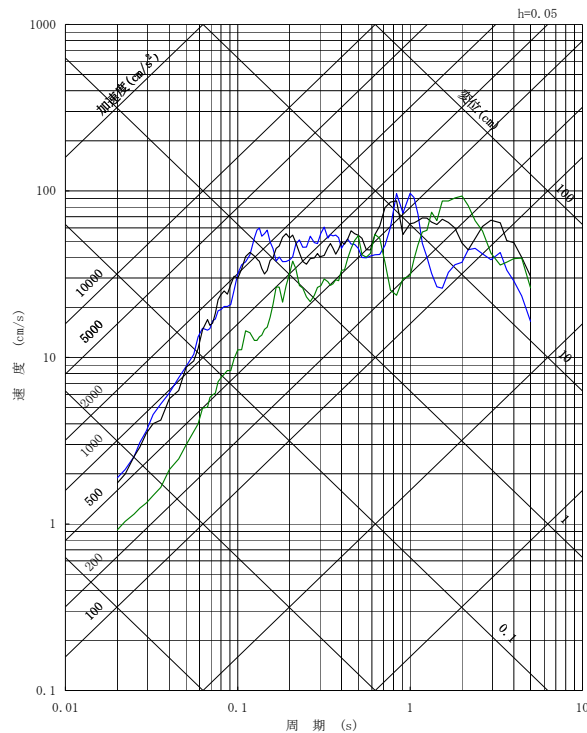
第358回審査会合
資料1修正

No.4 コメント回答

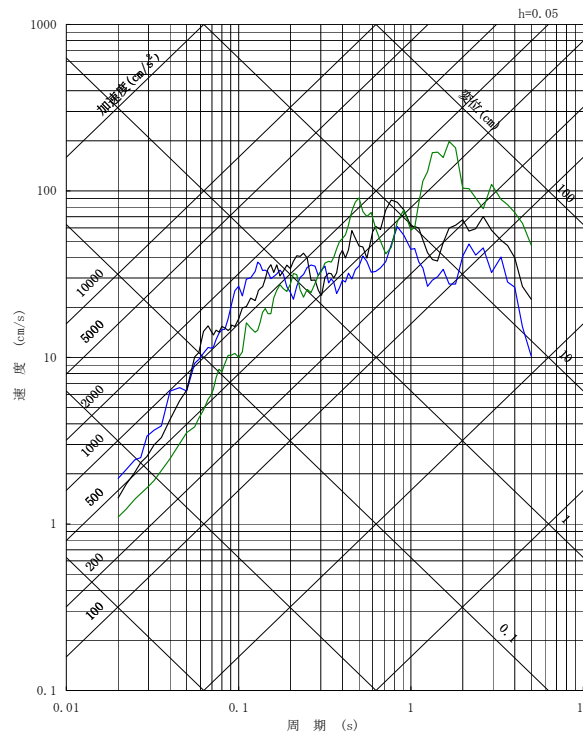
■断層モデルを用いた手法による地震動評価結果と東北地方太平洋沖地震の解放基盤波の比較

基本震源モデルを対象に、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果(統計的グリーン関数法及び経験的グリーン関数法)と東北地方太平洋沖地震の解放基盤波とを比較する。

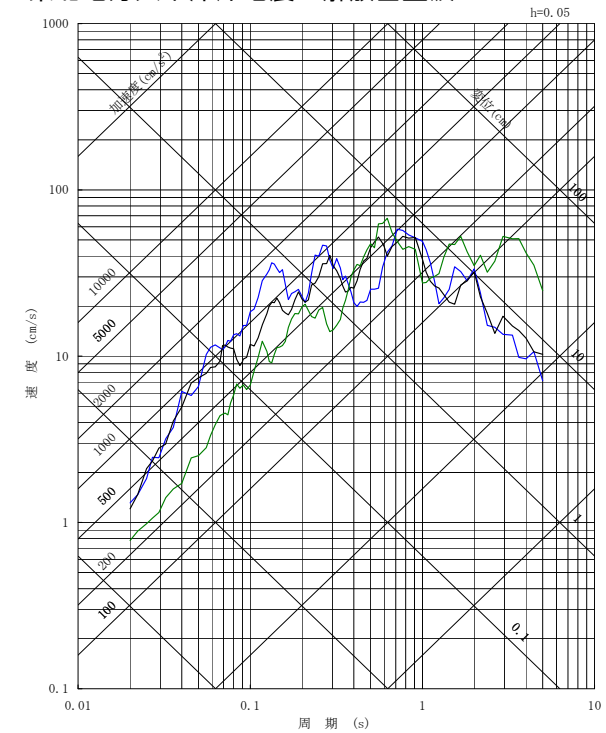
- 統計的グリーン関数法
- 経験的グリーン関数法
- 東北地方太平洋沖地震の解放基盤波



NS方向



EW方向



UD方向

- 統計的グリーン関数法による評価結果について、経験的グリーン関数法による評価結果と概ね整合しているものの、短周期側はどの成分も統計的グリーン関数法による評価結果の方が小さい。
- 短周期側における評価結果の差異は、経験的グリーン関数法において f_{max} の補正無しで評価したことにより、要素地震の f_{max} の特性がそのまま合成結果に現れたためと考えられる。
- どの成分も経験的グリーン関数法を用いた方が観測記録との対応がよいことを確認した。

(2) 基準地震動Ss-31(留萌波)への影響(1/3)

- 2004年北海道留萌支庁南部地震による検討では、SGF法用地盤モデルとは別に設定した地盤モデル(留萌用地盤モデル)を用いて地盤増幅特性の検討を行っている。
- そこで、標準応答スペクトル用地盤モデルを用いて2004年北海道留萌支庁南部地震による検討を行い、従来の基準地震動Ss-31(留萌波)の評価に与える影響を検討する。

留萌用地盤モデル

標準応答スペクトル用地盤モデル

| | 上端 標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | | 上端 標高 (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) | 減衰定数 | |
|---------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------------|--|--|
| | | | | | 水平 | 鉛直 | | | | | 水平 | 鉛直 |
| 解放基盤 表面 | -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.072f ^{0.93} | 0.203f ^{0.93} | -370.0 | 790 | 2000 | 1.85 | 0.061f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.264f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| | -476.0 | 835 | 2124 | 1.89 | | | -476.0 | 835 | 2124 | 1.89 | 0.058f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78) | 0.249f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74) |
| | -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 | | | -566.0 | 904 | 2205 | 2.00 | 0.054f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.240f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |
| 基盤地震動 推定位置 | -655.0 | 938 | 2245 | 2.05 | | | -655.0 | 938 | 2245 | 2.05 | 0.051f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.007 (f>6.78) | 0.234f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.006 (f>31.74) |

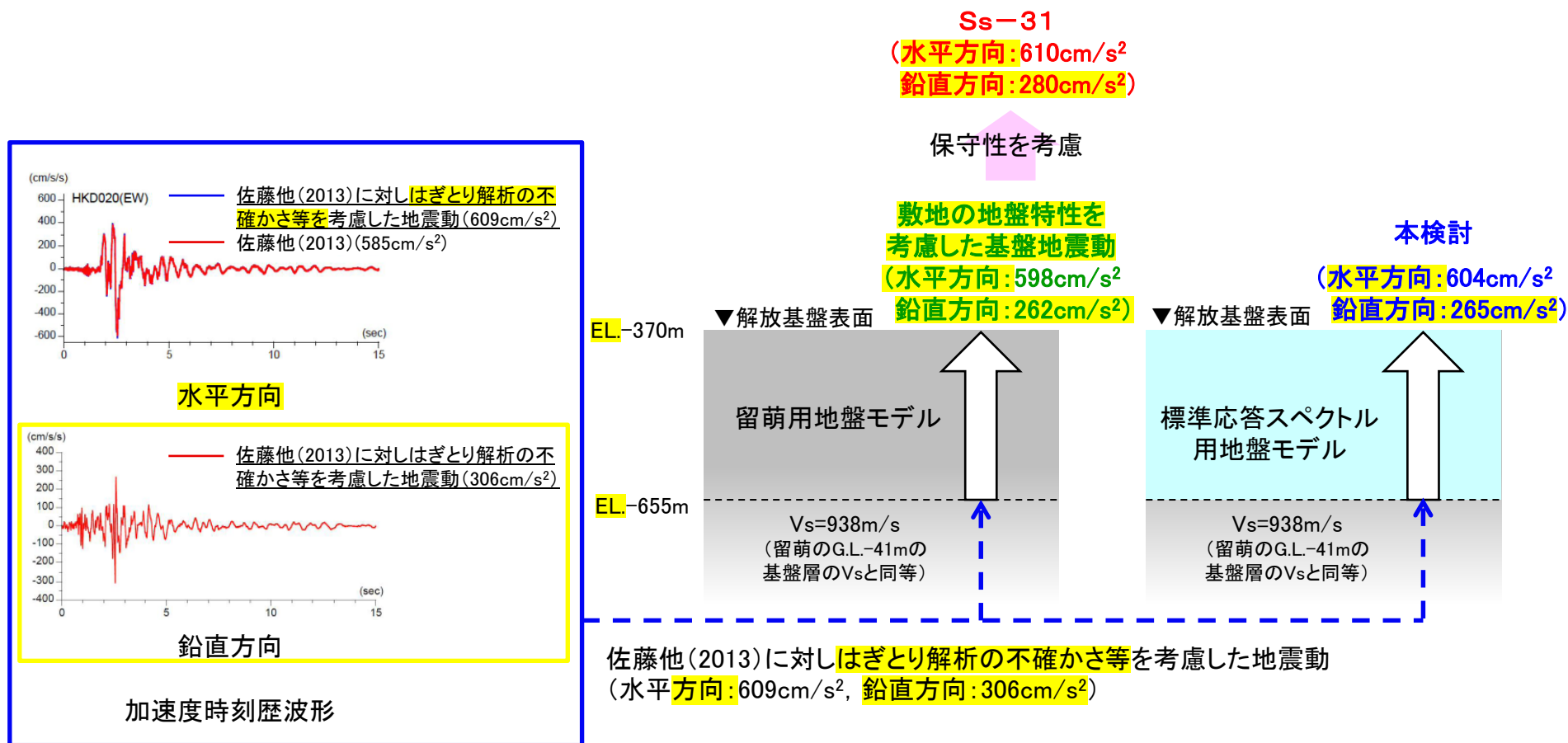
留萌用地盤モデルと異なる物性値

備考

- ・基盤地震動推定位置は、K-NET港町観測点においてはぎとり波が推定された基盤とVsが同等の基盤の位置
- ・P84の留萌用地盤モデル、標準応答スペクトル用地盤モデルにおける地震基盤相当面以浅のVs、Vp、密度についてはP74、P75に示す標高依存式により、当該層の中心位置で求めた値をそれぞれ設定している。一方、本ページにおける基盤地震動推定位置直下のVs、Vp、密度は、標高依存式によりEL-655m位置で求めた値を設定している。

(2) 基準地震動Ss-31(留萌波)への影響(2/3)

■ Ss-31(留萌波)のもとになった、佐藤他(2013)に対しはぎとり解析の不確かさ等を考慮した地震動を標準応答スペクトル用地盤モデルに入力して解放基盤表面における地震動を評価する。

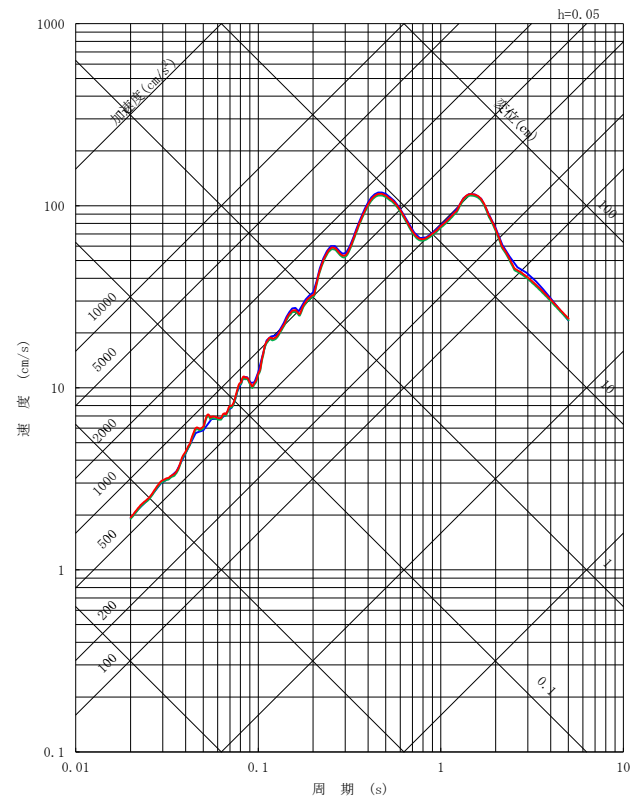


参考文献

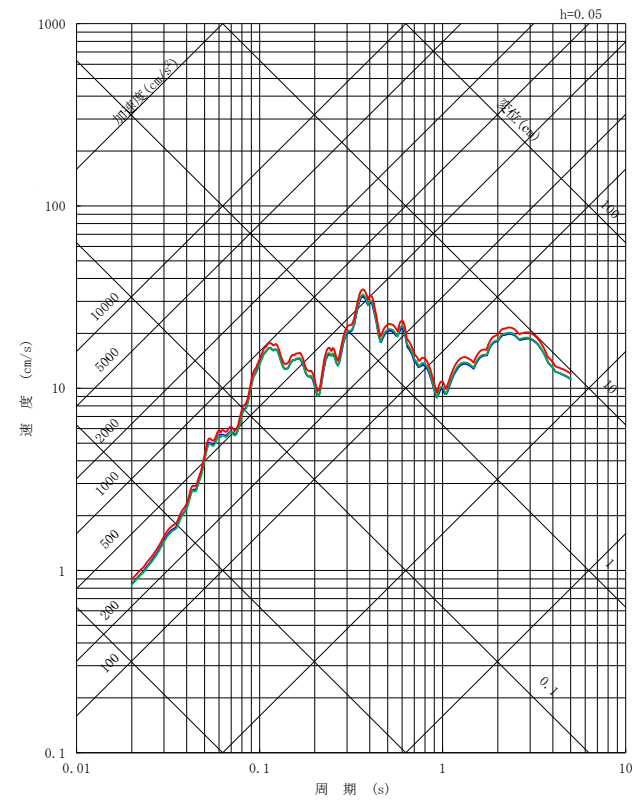
・佐藤浩章・芝良昭・東貞成・功刀卓・前田宜浩・藤原広行(2013): 物理探査・室内試験に基づく2004年留萌支庁南部の地震によるK-NET港町観測点(HKD020)の基盤地震動とサイト特性評価, 電力中央研究所報告N13007

(2) 基準地震動Ss-31(留萌波)への影響(3/3)

- Ss-31
- 佐藤他(2013)に対しはざとり解析の不確かさ等及び敷地の地盤特性を考慮した地震動(留萌用地盤モデルに入力)
- 本検討結果(佐藤他(2013)に対しはざとり解析の不確かさ等及び敷地の地盤特性を考慮した地震動(標準応答スペクトル用地盤モデルに入力))



水平方向



鉛直方向

擬似速度応答スペクトル

・本検討結果(佐藤他(2013)に対しはざとり解析の不確かさ等及び敷地の地盤特性を考慮した地震動を標準応答スペクトル用地盤モデルに入力した結果)は、留萌用地盤モデルに入力した結果とほぼ同等であり、地盤モデルの違いが地震動評価に影響を与えないことを確認した。

・従って、留萌用地盤モデルに入力した結果に保守性を考慮した基準地震動Ss-31の評価にも影響を与えない。