
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:地盤モデルの妥当性)

令和3年12月17日

日本原子力発電株式会社

審査会合コメントリスト(1/2)

新規

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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・P5~7 ・P9~16 ・P34 ・P50
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。	<ul style="list-style-type: none"> ・P6 ・P17~23 ・P35
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。 	<ul style="list-style-type: none"> ・P24~28 ・P35 ・P6 ・P10~16 ・P31, 32 ・P34 ・P50

審査会合コメントリスト(2/2)

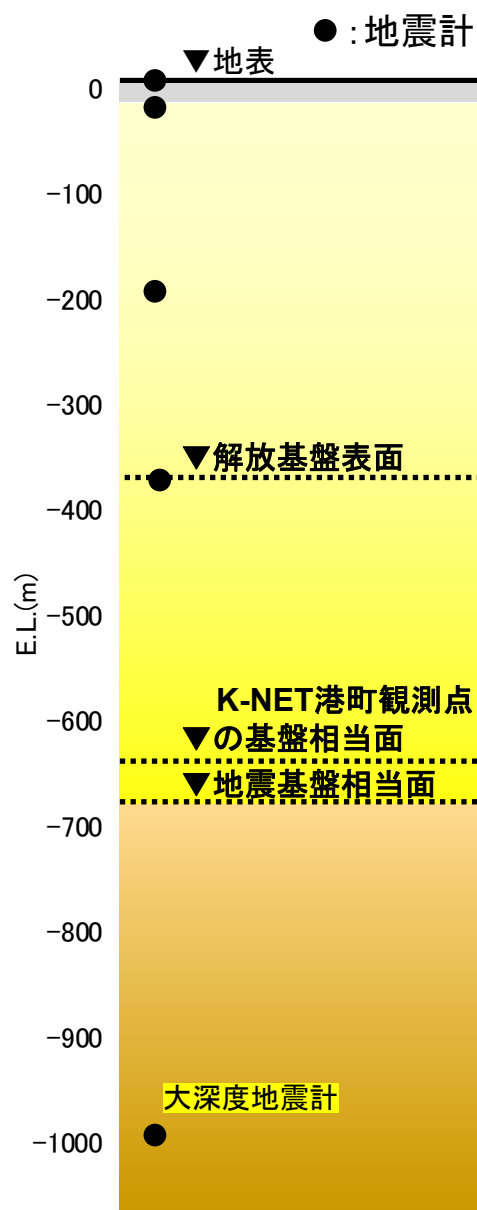
新規

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。	次回以降回答	—
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Ss-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。	次回以降回答	—
6	令和3年 7月30日	第994回 審査会合	乱數位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定で、M6.9, Xeq10kmとした根拠を説明すること。	次回以降回答	—
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。	次回以降回答	—
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。	次回以降回答	—

目次

標準応答スペクトルに基づく地震動評価の方針	5
地盤モデルの設定	6
(1) 新たな地盤モデルの設定について	6
(2) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定	7
(3) 減衰定数の設定	17
(4) まとめ	34
参考文献	36
補足説明資料	37
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)	38
② 既許可審査時の地盤モデルと今回設定した地盤モデル	49
③ 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)	50

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E.L.-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

1. 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。
2. 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。
3. 地盤増幅特性の考慮
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模擬地震波について比較検討を行う。
4. 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Vs938m/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Vs2200m/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(E.L.-679m)～大深度地震計設置位置(E.L.-992m)	地表～大深度地震計設置位置(E.L.-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E.L.-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。

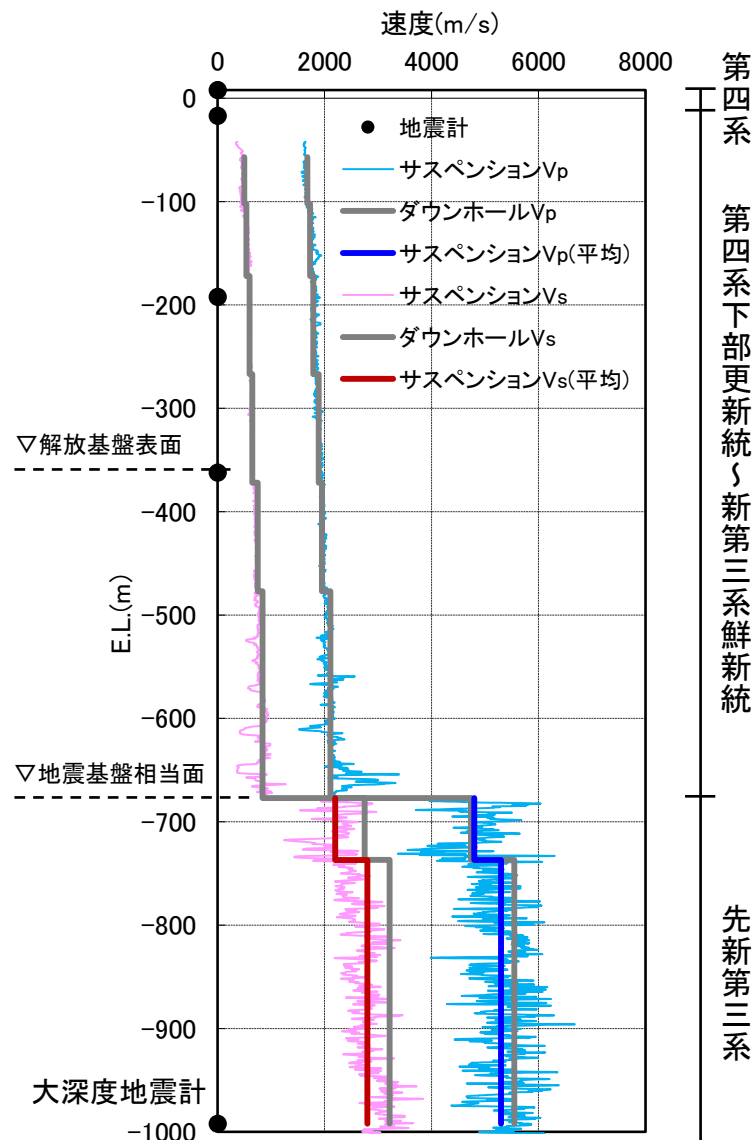
■ 新たな速度構造モデルの設定とその妥当性確認は下記の流れで行う。

速度構造モデルの設定

① 地震基盤相当面 (E.L.-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。 ⇒ P9

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。 ⇒ P10~

③ 地震記録(伝達関数)の説明性を確認する。 ⇒ P31~

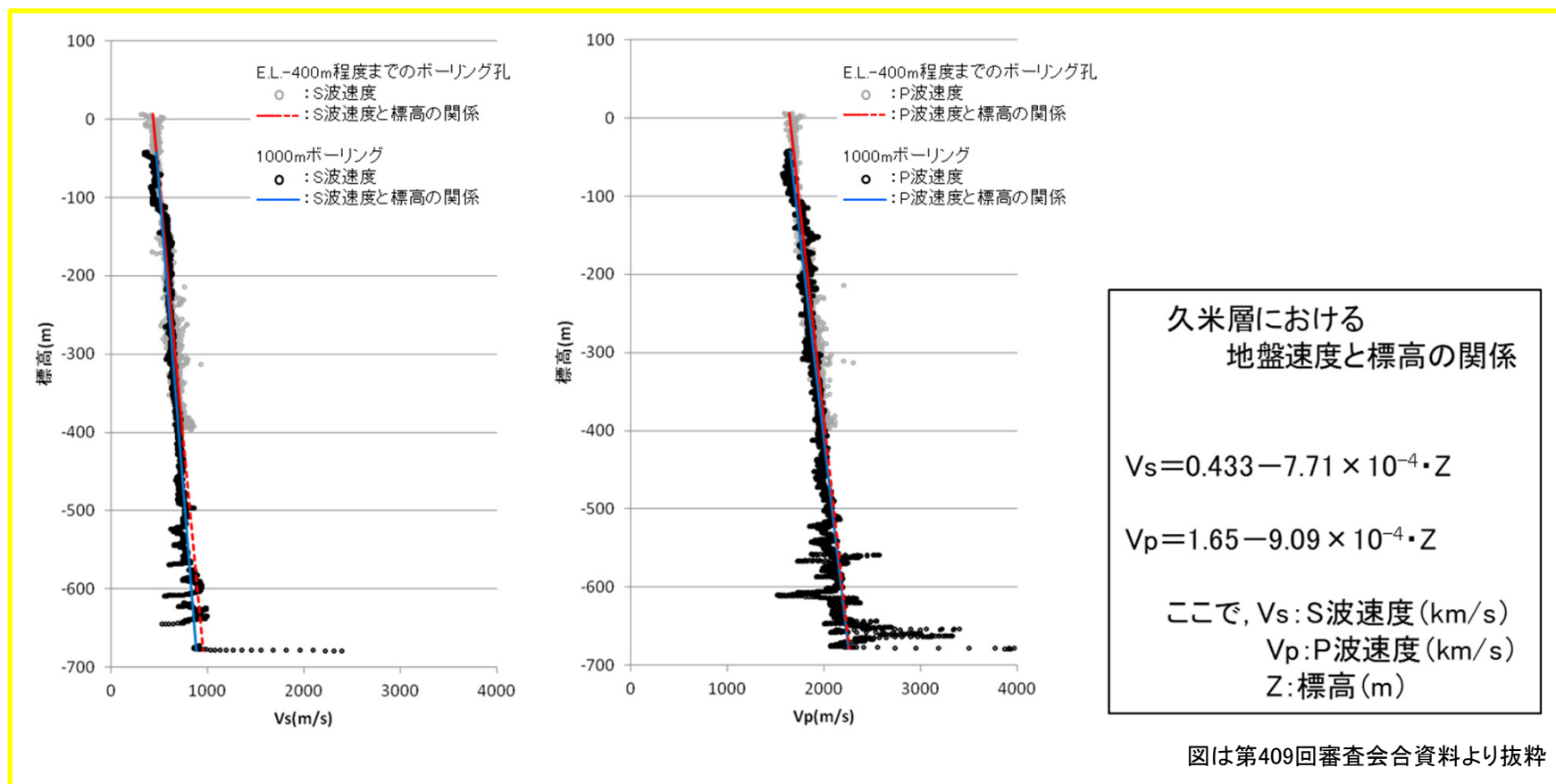


大深度ボーリングのPS検層結果の例

地震基盤相当面(E.L.-679m)以浅の速度構造の設定

■E.L.-679m以浅(解放基盤表面～新第三系鮮新統下端)

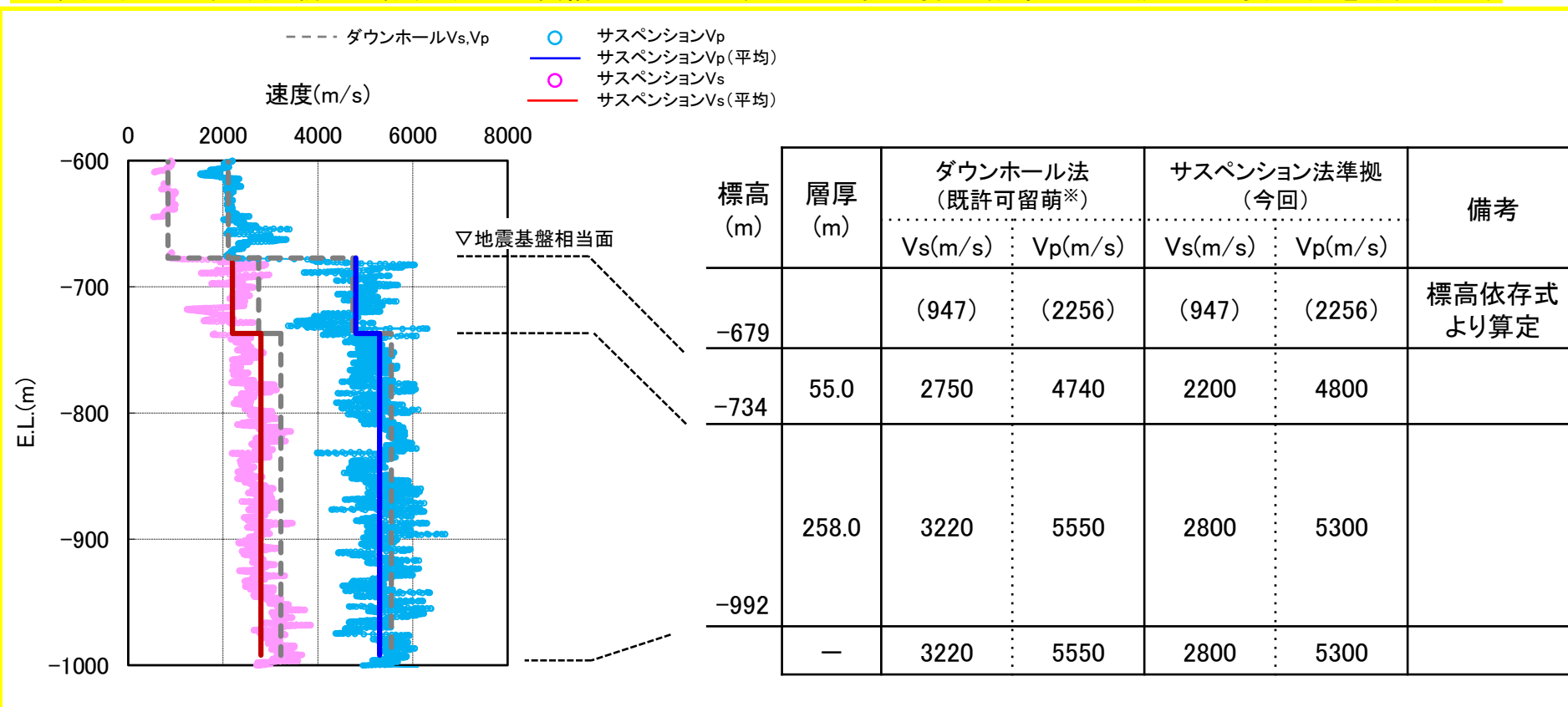
- ・Vs, Vpとも深くなるにつれ値が漸増する構造であり, また複数の調査結果と整合していることから, 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討においては, 解放基盤表面からE.L.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造を標高依存式により設定している。
- ・標準応答スペクトルによる地震動の検討に際しても, 解放基盤表面からE.L.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造は, 既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討で用いたものを採用する。



地震基盤相当面(E.L.-679m)以深の速度構造の設定

■E.L.-679m以深(先新第三系)

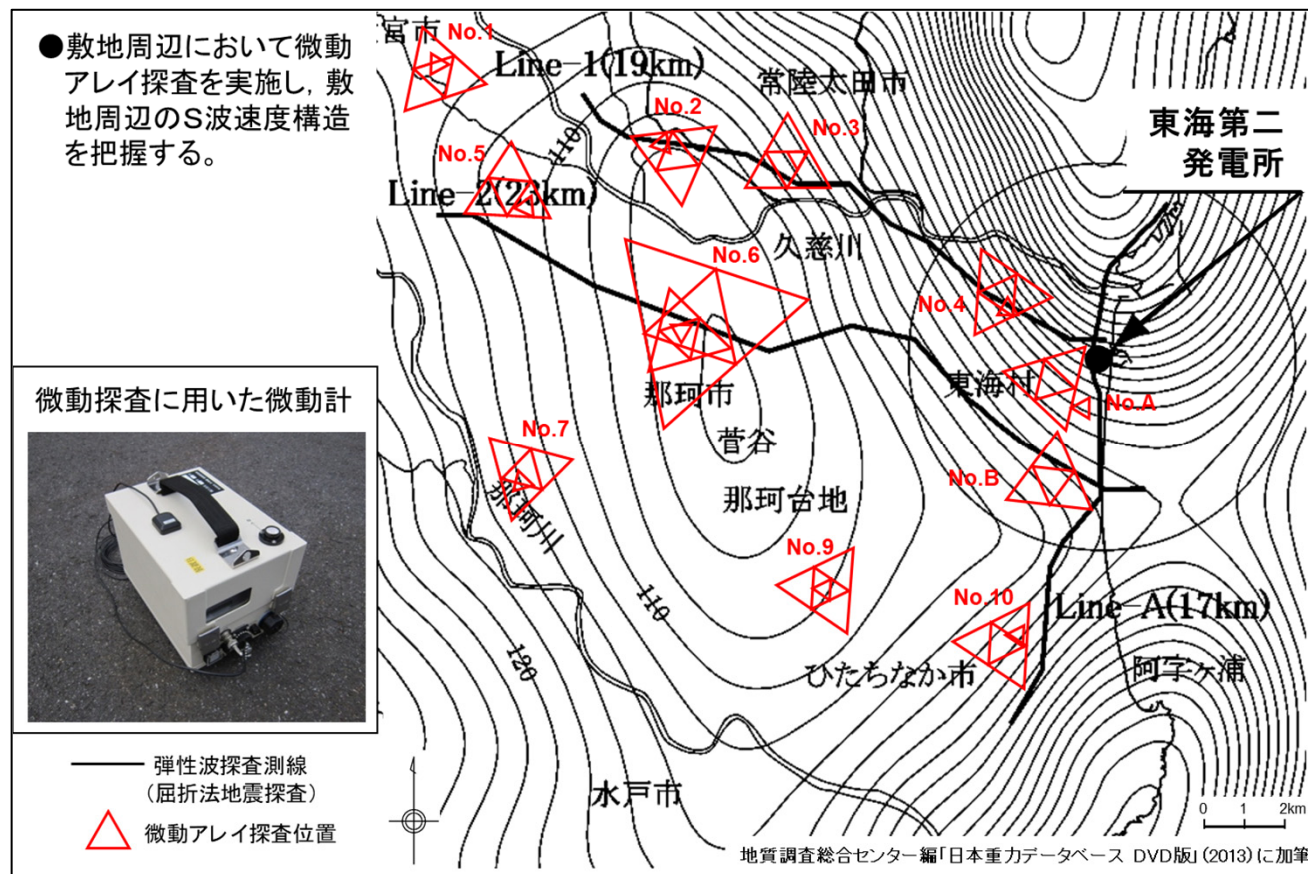
- 地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討する。今回は、サスペンション法に準拠して速度構造を設定する。具体的には、ダウンホール法における同一層内で、サスペンション法のVs, Vpをそれぞれ平均して求めた値を用いる。
- 地震基盤相当面位置は、Vs2200m/s以上に相当する敷地での層の上面としてE.L.-679m(Vs2200m/s)に設定する。
- 次頁以降では、今回新たに設定する速度構造について、既往の物理探査結果との比較により妥当性を確認する。



※ 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。

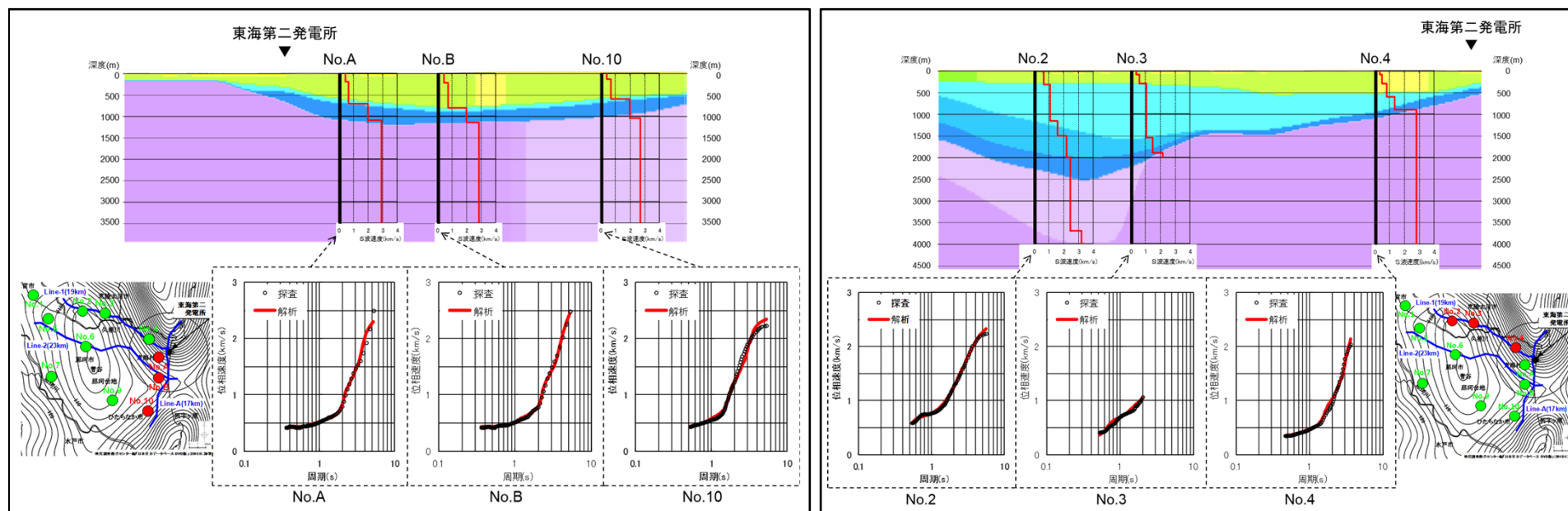


図は第338回審査会合資料より抜粋

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

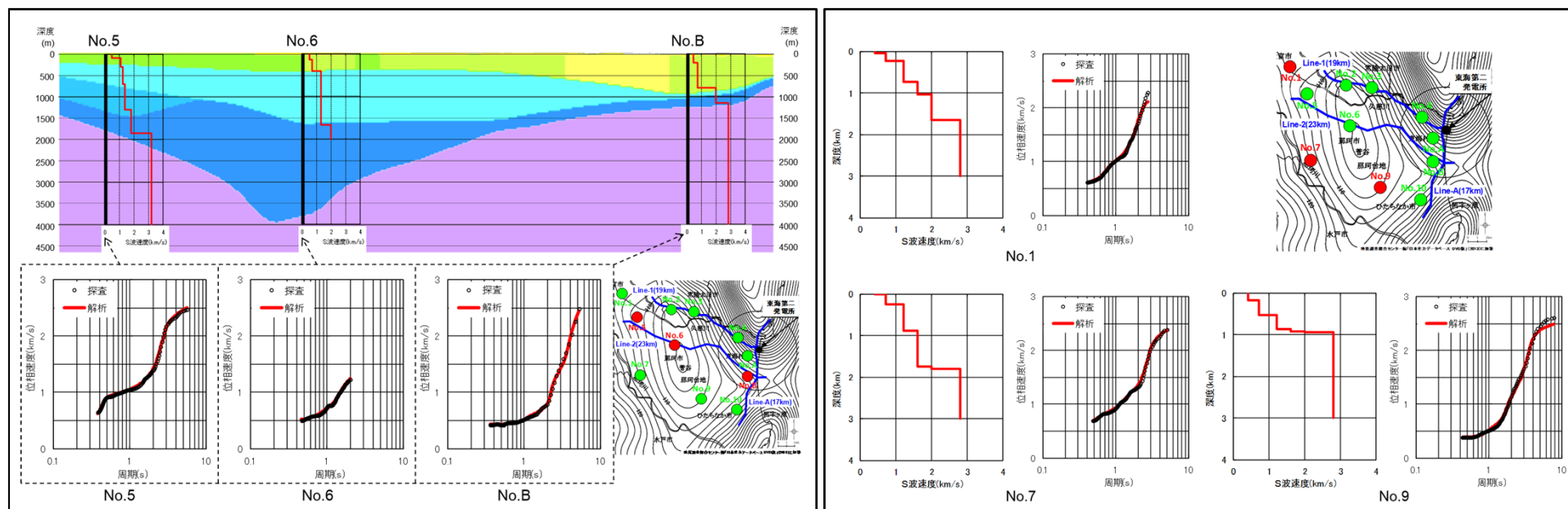
屈折法地震探査のLine-1測線付近で実施した微動アレイ探査結果

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

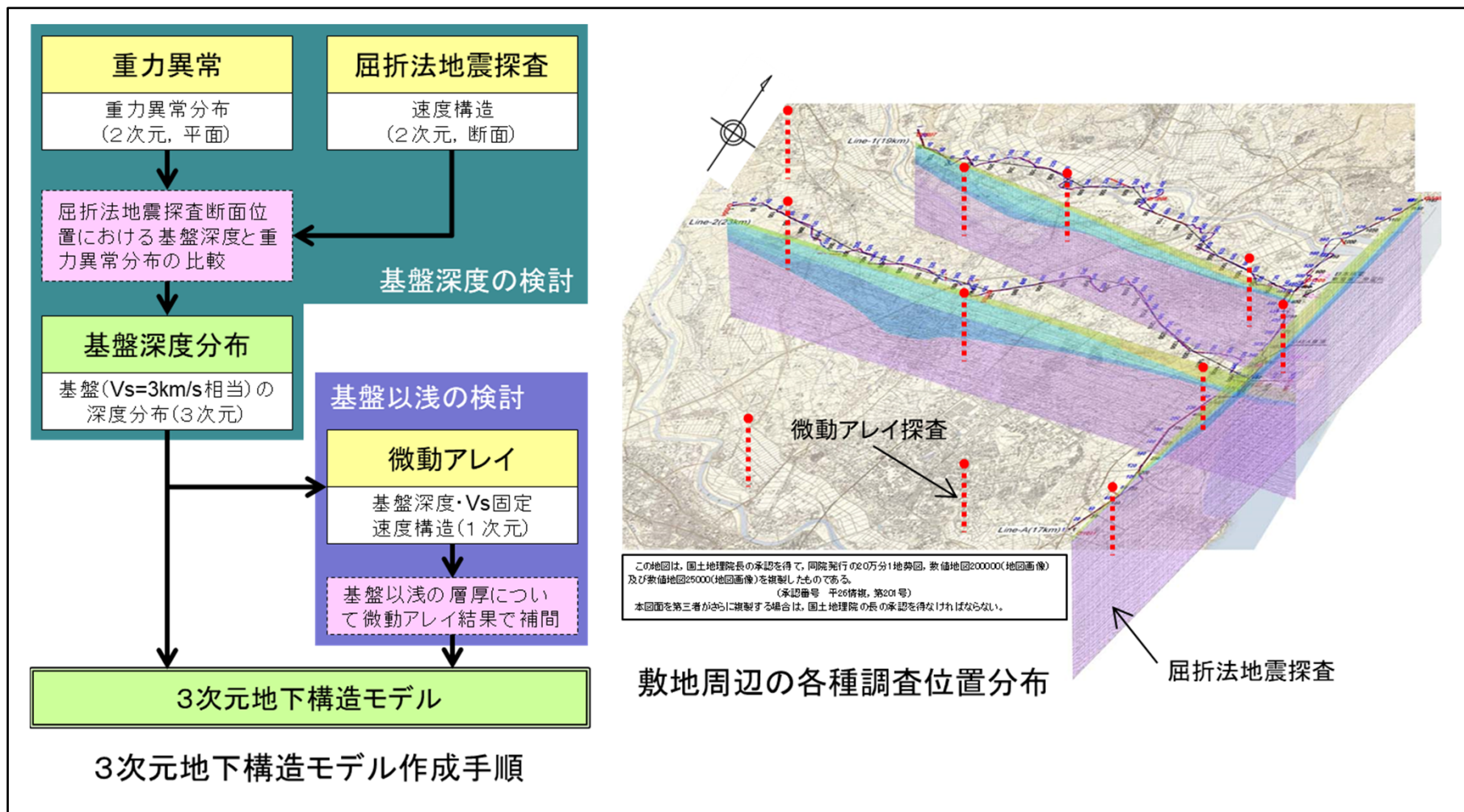
その他の場所で行った微動アレイ探査結果

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。

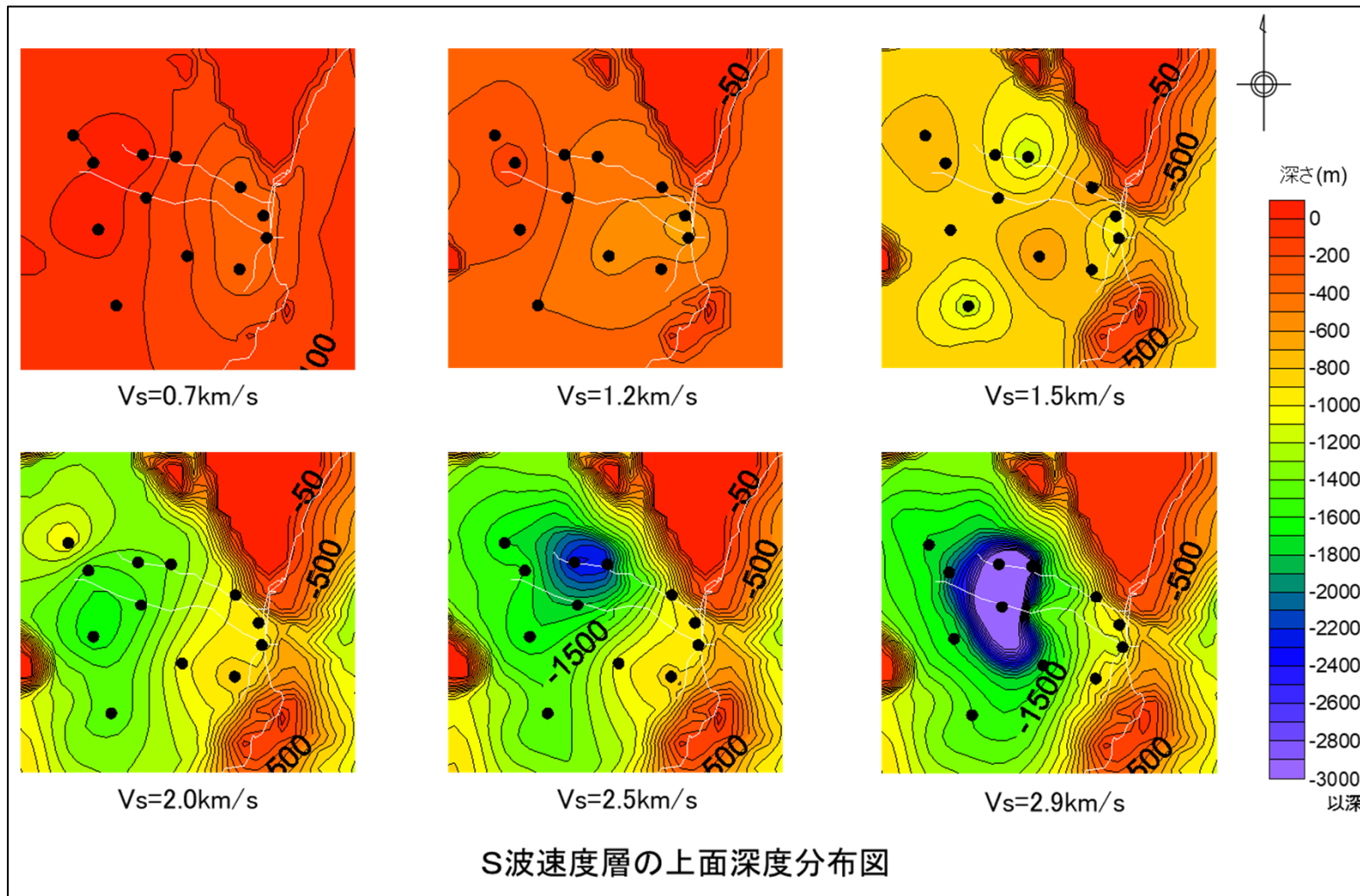


図は第338回審査会合資料より抜粋

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。

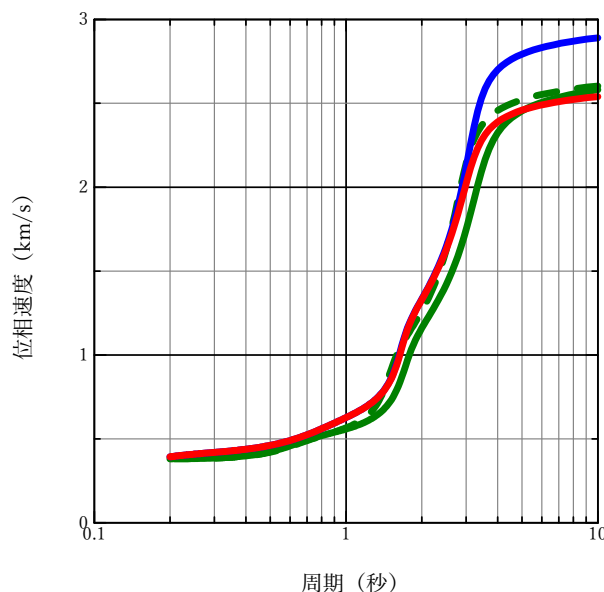


図は第338回審査会合資料より抜粋

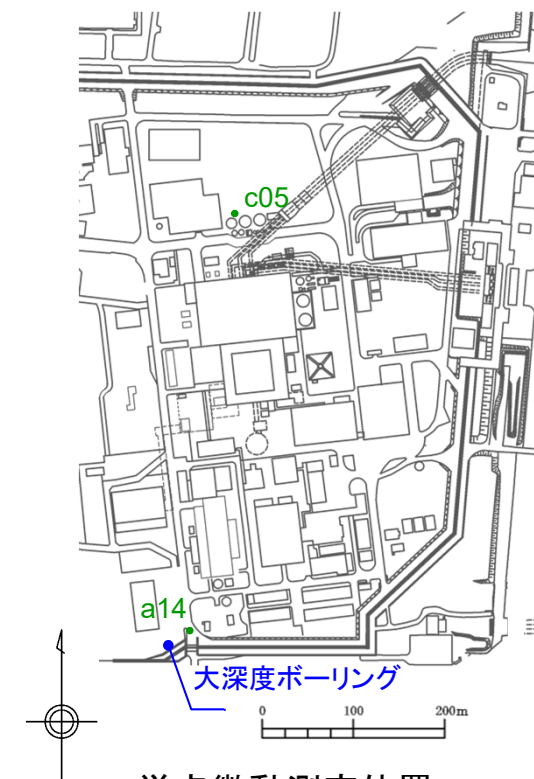
既往の各種物理探査結果との関係：位相速度の分散曲線(6/6)

■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

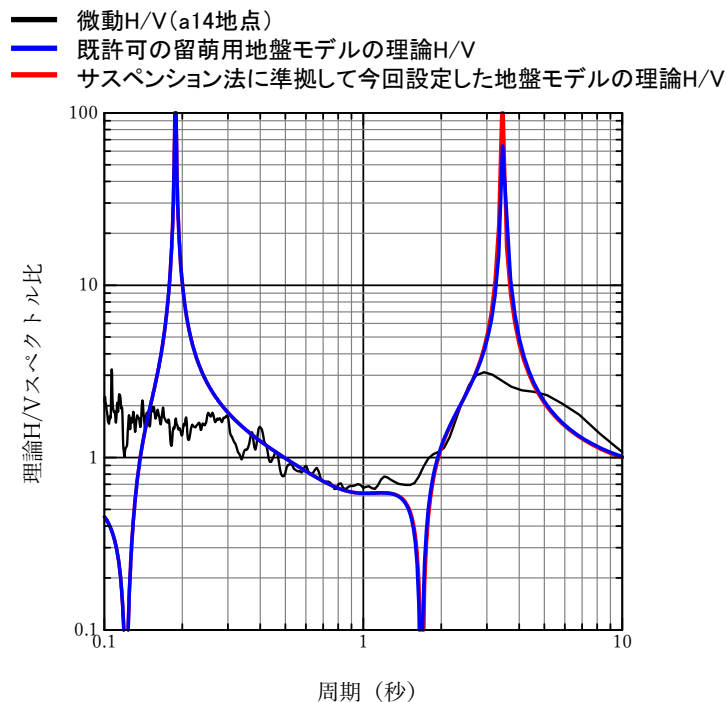


単点微動測定位置

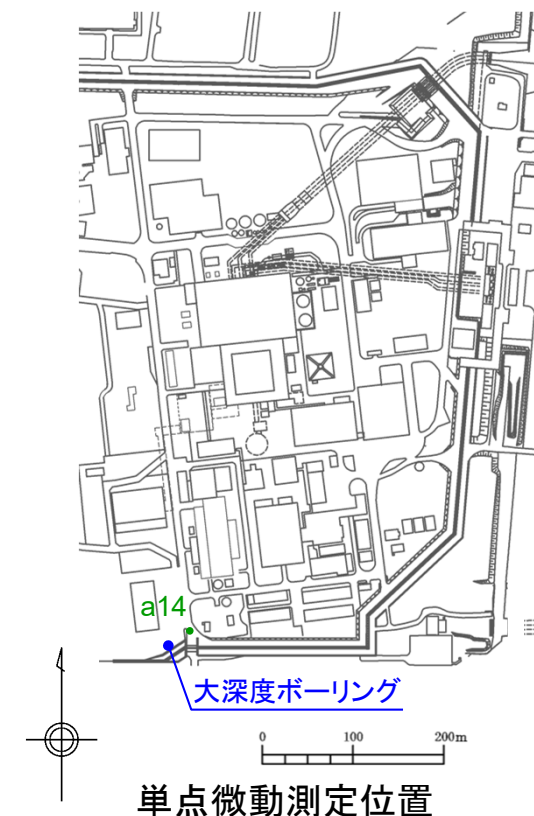
今回設定した地盤モデルと微動探査等に基づく3次元地下構造モデルから切り出した1次元モデルの位相速度の分散曲線は、全周期帯において、良く整合していることを確認した。なお、周期3秒よりも長周期側において既許可の留萌用地盤モデルの位相速度が他の地盤モデルの位相速度と比較して速くなっているが、これは地震基盤相当面以深における速度構造の違いによるものであり、地盤モデルのうち地震基盤相当面以浅の層のみを用いた既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の地震動評価結果には影響しない。

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)



単点微動測定位置

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。

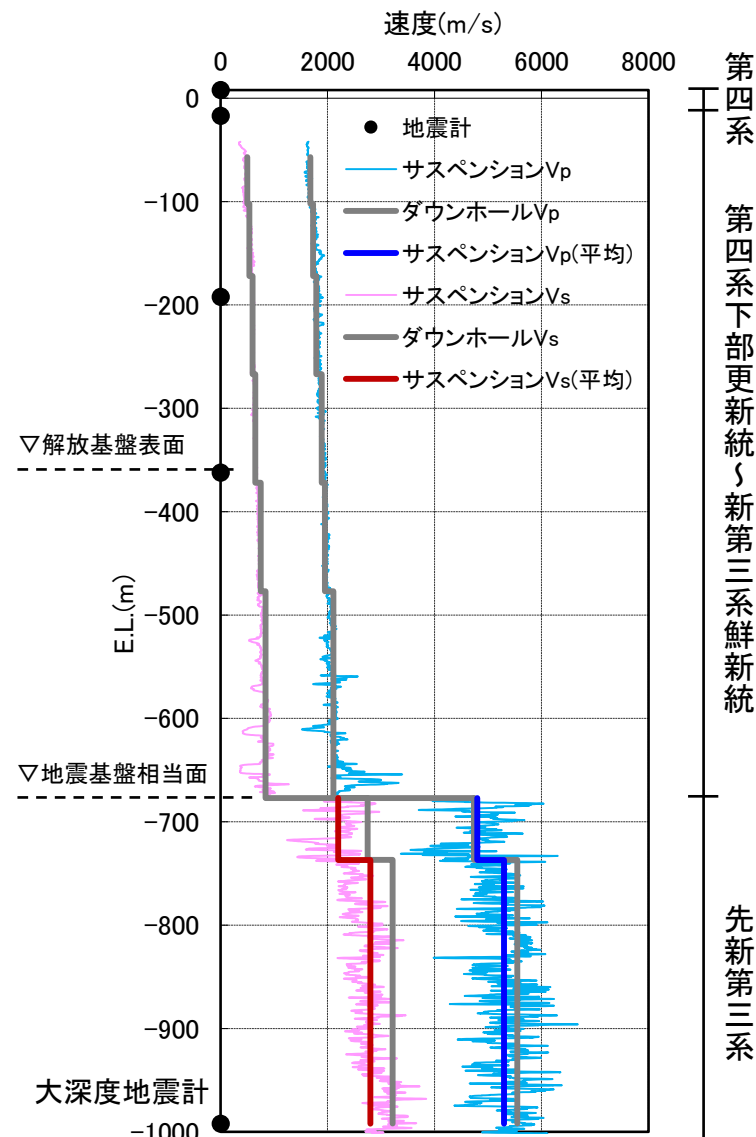
(3) 減衰定数の設定：方針

■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(E.L.-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E.L.-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	E.L.-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)



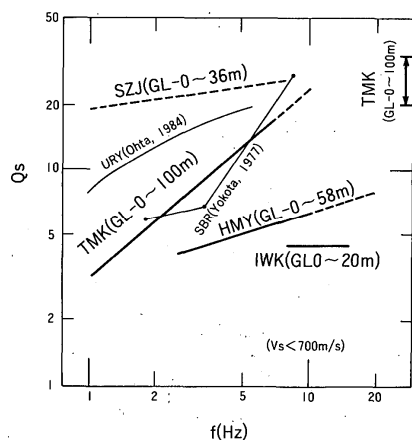
大深度ボーリングのPS検層結果の例

減衰定数のモデルに関する知見： 武村他(1993)

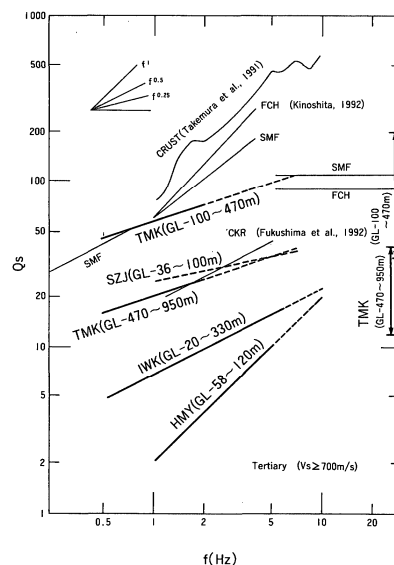
■ 概要

- ・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

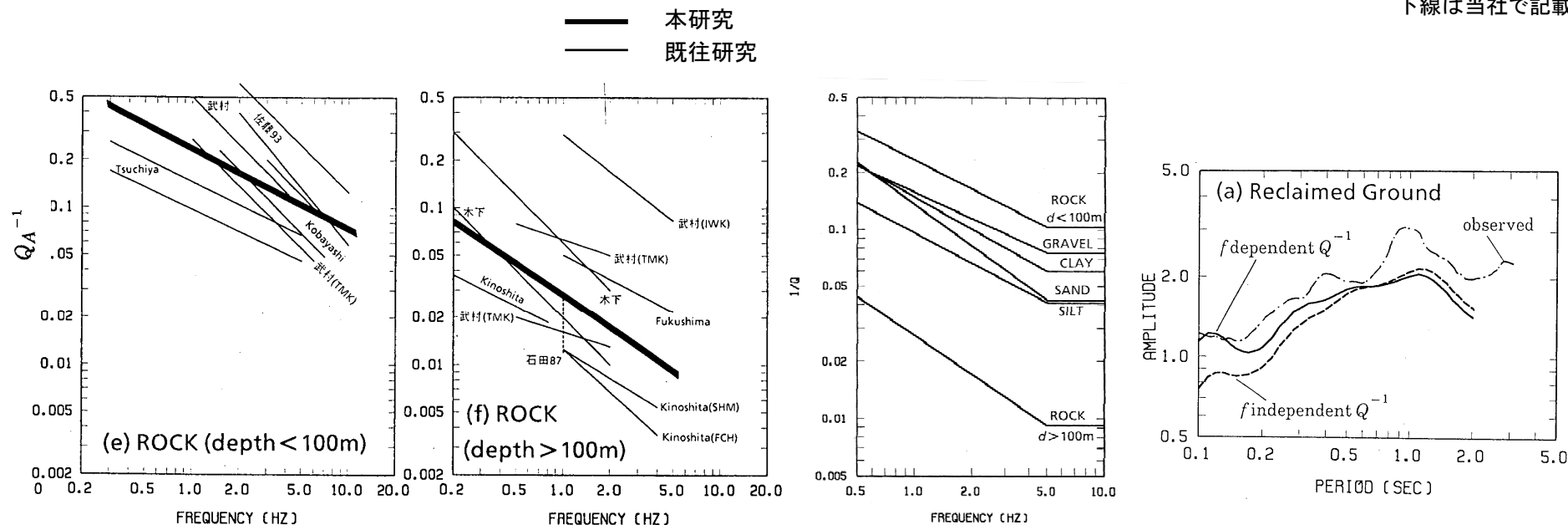
図は武村(1993)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

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

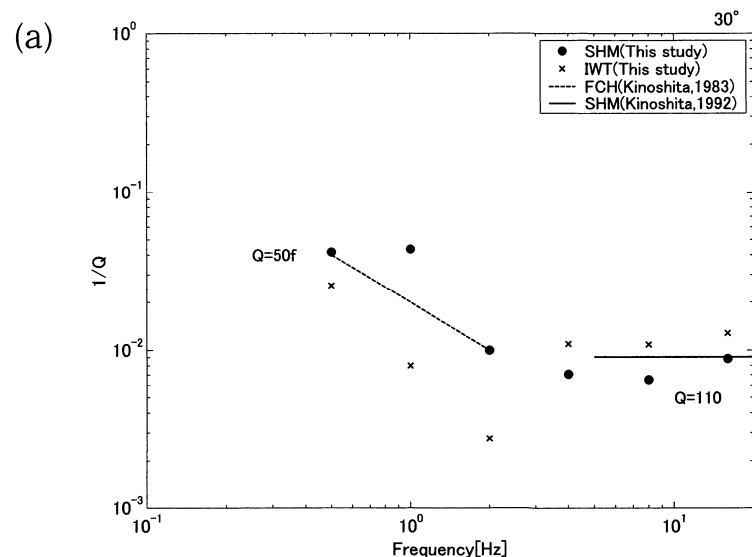
図は福島・翠川(1994)より抜粋, 凡例の説明は当社で記載

減衰定数のモデルに関する知見： 木下・大池(2002)

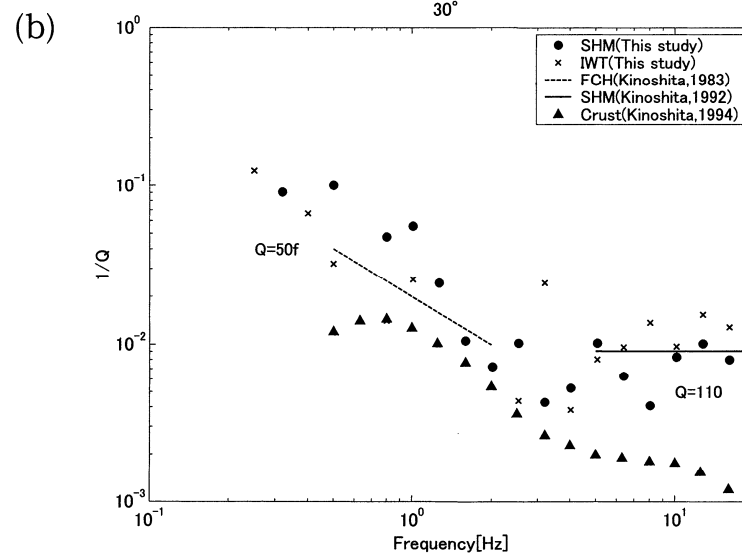
■ 概要

- ・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

u003Cp></p>
</div>

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

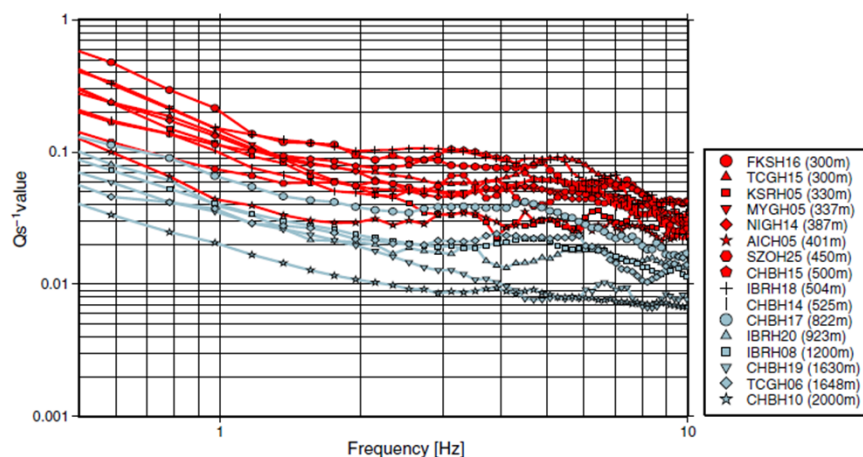
21

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

■ 概要

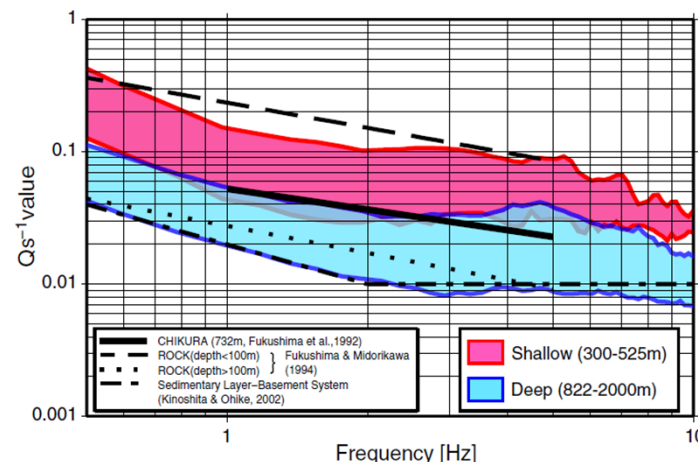
- ・ボアホール記録のSH波を用いて Q^{-1} 値(減衰定数)を推定する方法として、デコンボリューションを用いた方法を提案し、KiK-netひたちなか(IBRH18)観測点を含む16箇所のKiK-net地中観測点を対象に、 Q^{-1} 値の推定を行っている。
- ・その結果、0.5~10Hzで安定して Q^{-1} 値が得られ、約2~3 Hzまでの振動数で減少するが、それより高い振動数ではほぼ一定となることを示した。
- ・このような Q^{-1} 値の折れ曲がり(減衰定数の下限)は、岩盤の減衰定数には下限が存在することを示した木下・大池(2002)の結果と共通するとされている。

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

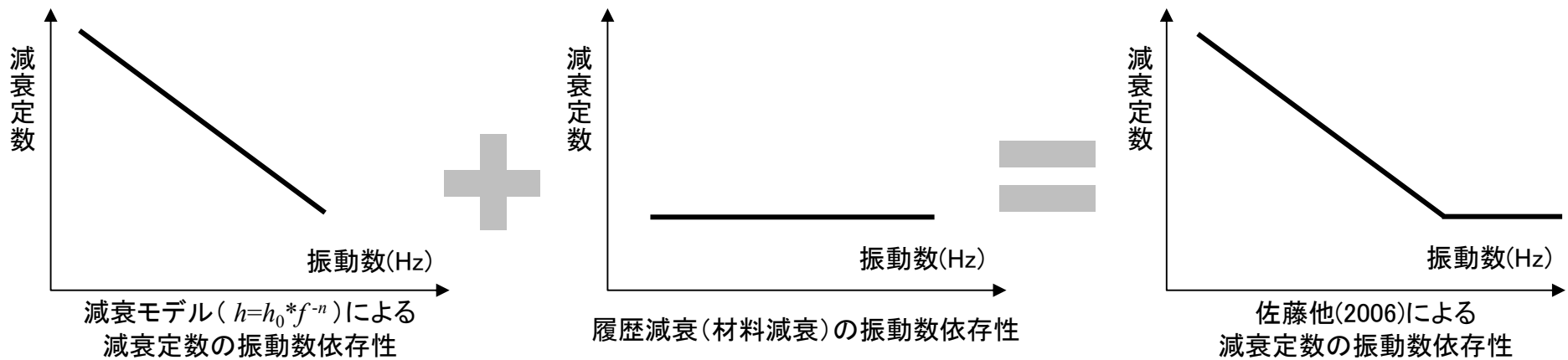
減衰モデルの考え方

■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。



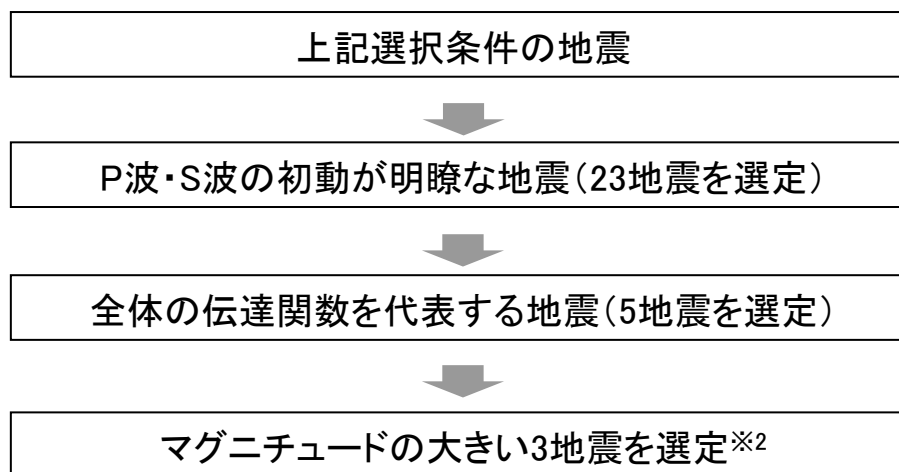
逆解析に用いる減衰モデルのイメージ図

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



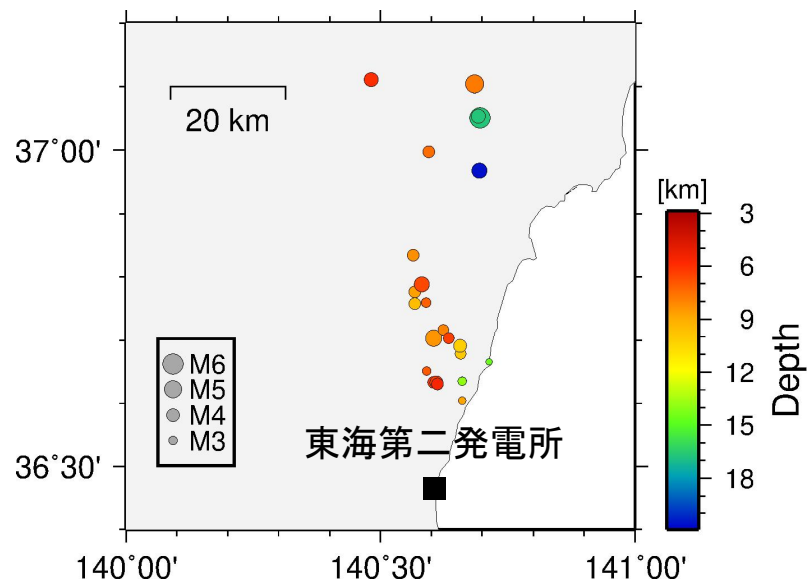
地盤同定解析に用いる地震の選定フロー

※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

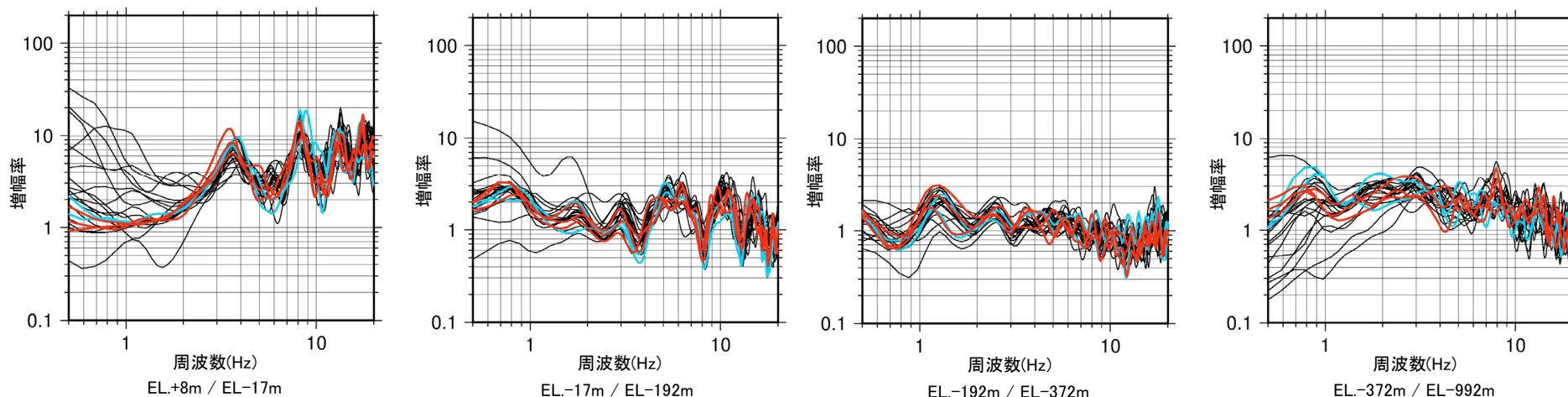
■P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数を比較して、全体の伝達関数を代表する地震を5地震選定し、このうちマグニチュードが大きい3地震を地盤同定解析に用いる地震に選定する。

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

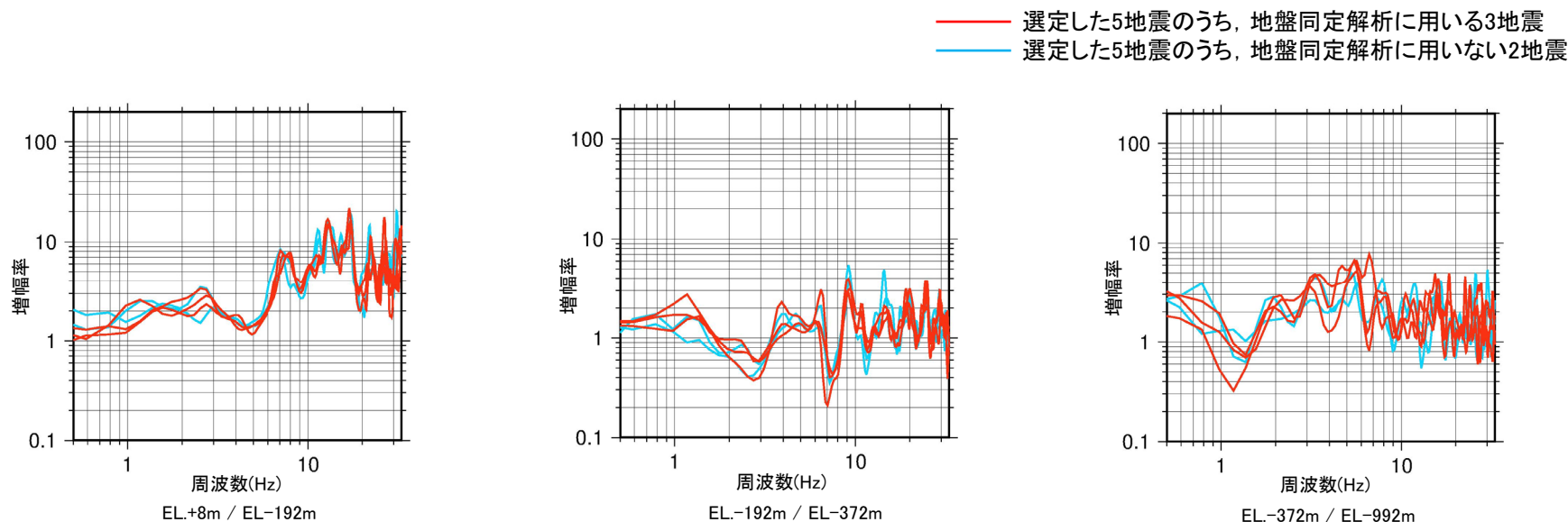
伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。

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E.L.-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

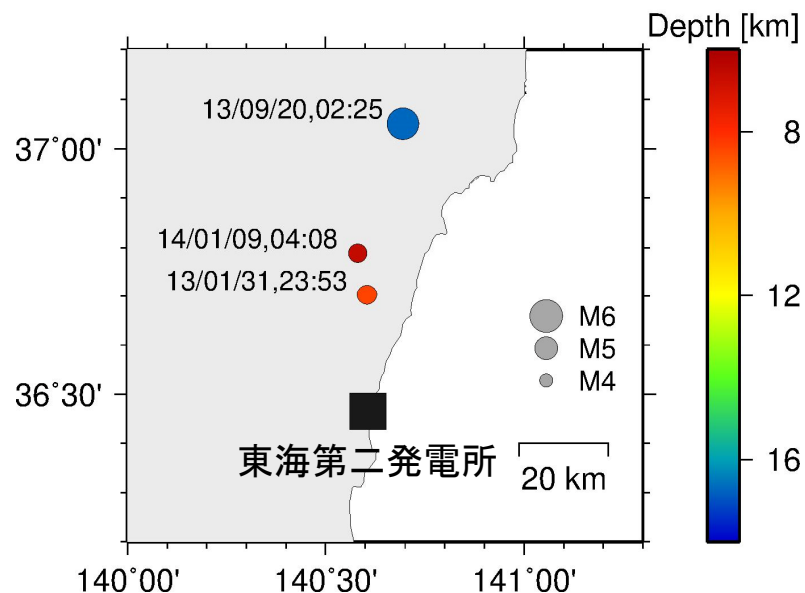
■前頁までの検討により、地盤同定解析に用いる3地震の伝達関数について、以下のとおり整理する。

- ・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地震の震央分布図

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

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(E.L.8m)からE.L.-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 E.L.-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 E.L.-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 E.L.-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(E.L.8m)からE.L.-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

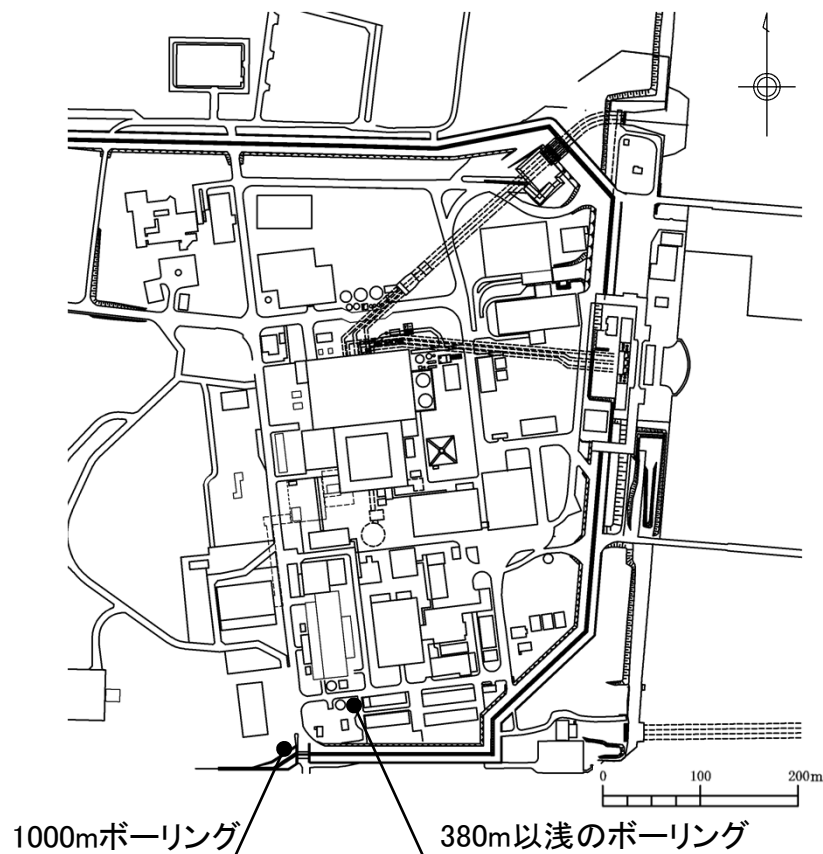
固定パラメータ						探索範囲					
E.L. (m)	層厚 (m)	地層	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	Q=(Vs/n)(f/f0) ^α			Q=(Vp/n)(f/f0) ^α		
						水平			鉛直		
						n	α	f0	n	α	f0
● 8.0	2.5	第四系	① 130	280	1.71	⑥ 1-50	0.0-1.5	1.0-20.0	1-200	0.0-1.5	1.0-33.3
5.5	4.5		151	403	1.66						
1.0	8.0		308	1589	1.82						
-7.0	8.0		478	1509	1.69						
● -15.0	2.0	第四系 下部更新統 ~ 新第三系 鮮新統	477	1753	1.74	10-80	0.0-1.5	1.0-20.0	10-320	0.0-1.5	1.0-33.3
● -17.0	89.0		557	1742	1.78						
● -106.0	62.0		669	2067	1.82						
● -168.0	24.0		756	2256	1.85						
● -192.0	68.0	先第三系	790	2000	1.85	② 790	③ 2000	④ 2205	⑤ 2200	4800	2.65
▽ 解放基盤表面	2.0		790	2000	1.89						
● -372.0	2.0		835	2124	2.00						
● -476.0	104.0		904	2205	2.07						
● -566.0	90.0	先第三系	947	2256	2.78	10-100	0.0-1.5	1.0-20.0	10-400	0.0-1.5	1.0-33.3
▽ 地震基盤相当面	24.0		2800	5300	2.78						
● -679.0	55.0		2800	5300	2.78						
● -734.0	258.0										
● -992.0	-										

●: 地震計位置

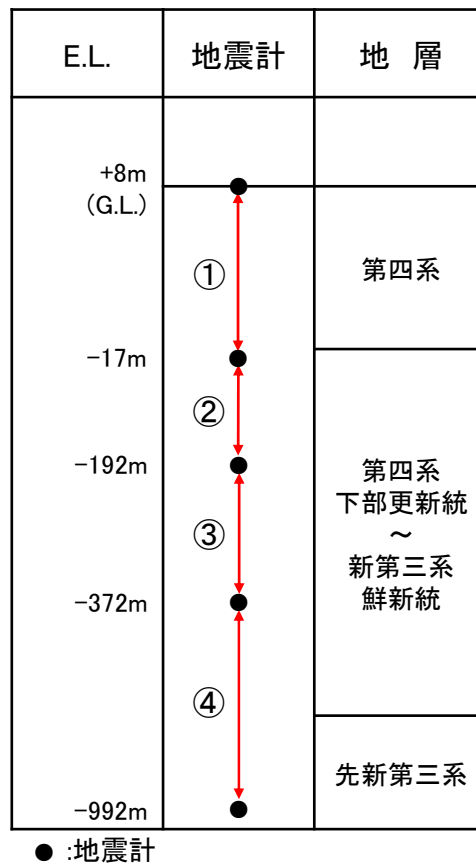
網掛け: 第409回審査会合の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討に用いた値と異なる箇所

解析条件及び探索範囲(2/2)

- 地震計間の伝達関数には、①E.L.+8m/E.L.-17m、②E.L.-17m/E.L.-192m、③E.L.-192m/E.L.-372m、④E.L.-372m/E.L.-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

No.	地震	入射角	
		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

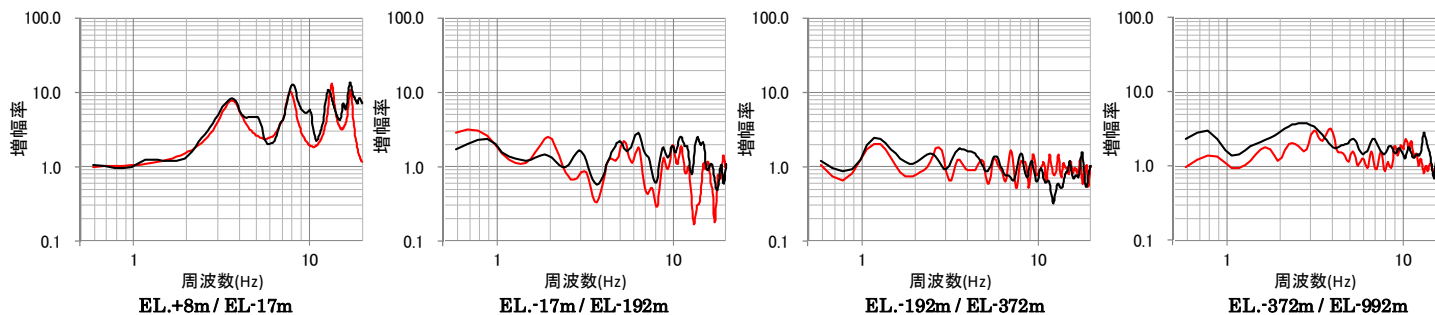
※震源と観測点の位置関係及びE.L.-992mの地震計のUD方向-Transverse方向のオービットに基づき設定。

観測伝達関数と理論伝達関数の比較 (Transverse方向)

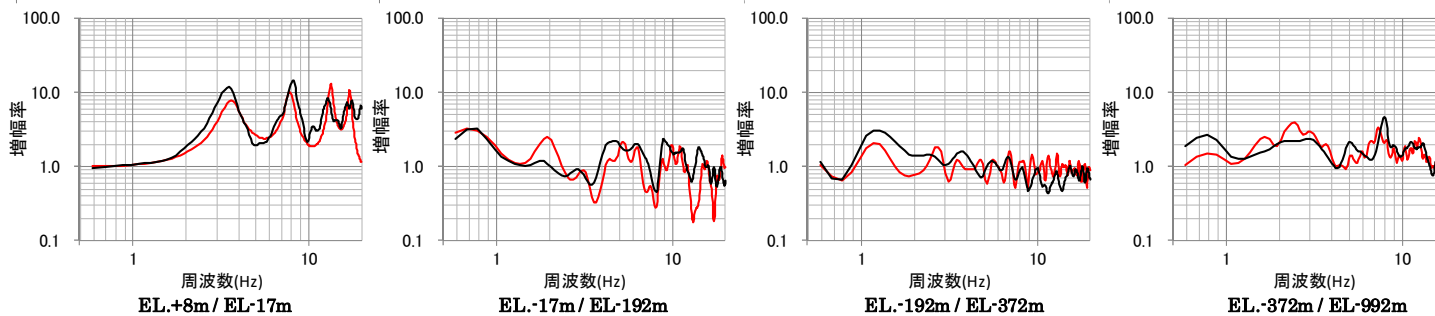
■ 観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数を下記に示す。同定結果は観測記録を再現している。

— 同定結果
— 観測記録

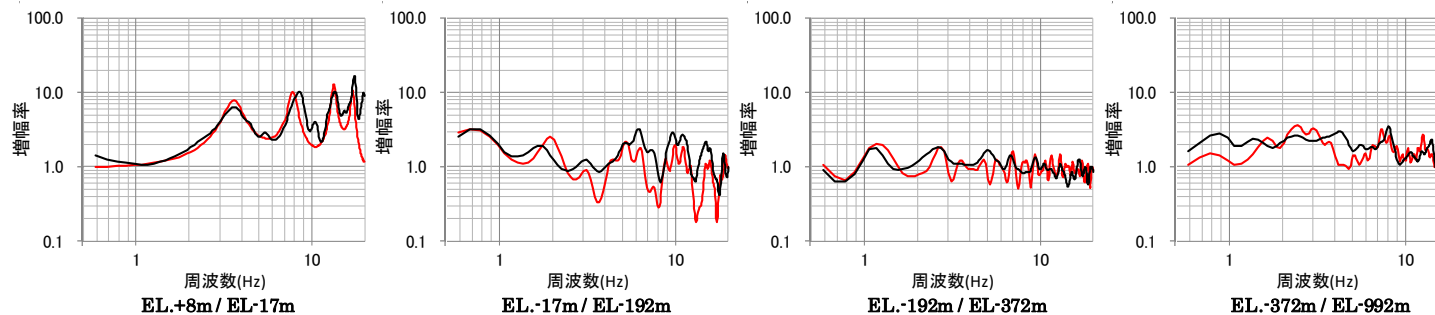
2013年1月31日
入射角: 55.63°



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

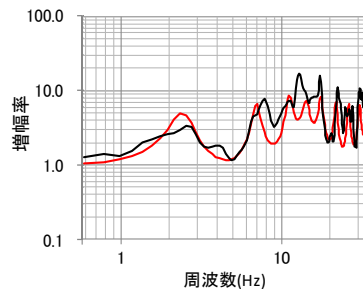
備考

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。

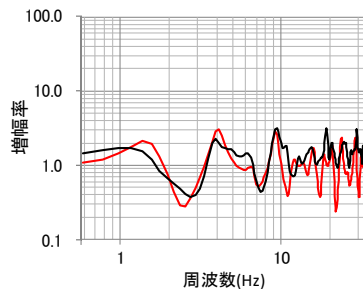
観測伝達関数と理論伝達関数の比較(UD方向)

■ 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。

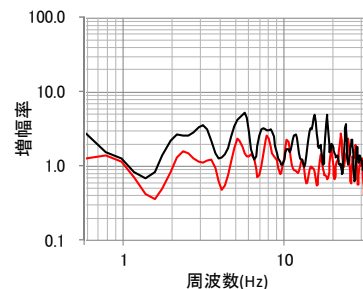
2013年1月31日
入射角: 60.74°



EL.+8m / EL.-192m



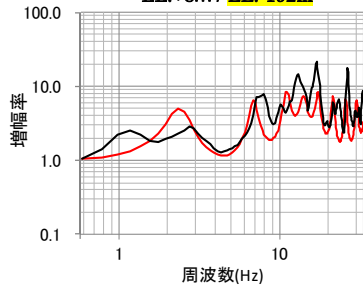
EL.-192m / EL.-372m



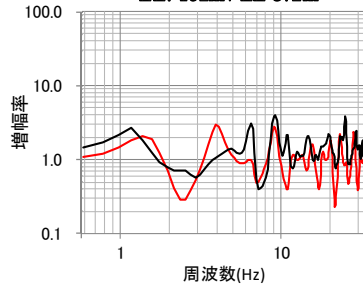
EL.-372m / EL.-992m

— 同定結果
— 観測記録

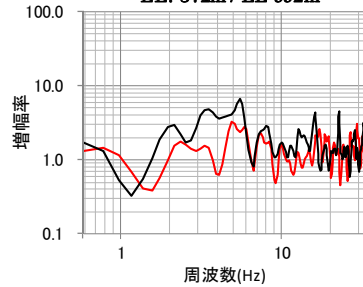
2013年9月20日
入射角: 45.27°



EL.+8m / EL.-192m

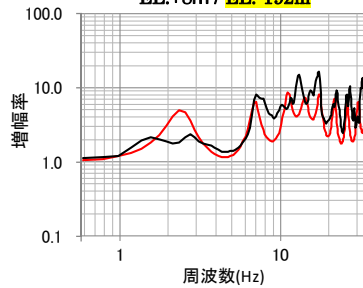


EL.-192m / EL.-372m

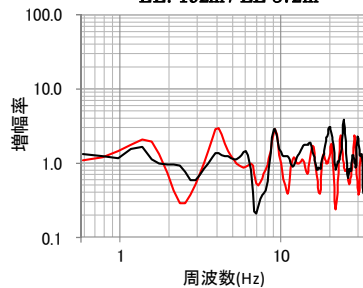


EL.-372m / EL.-992m

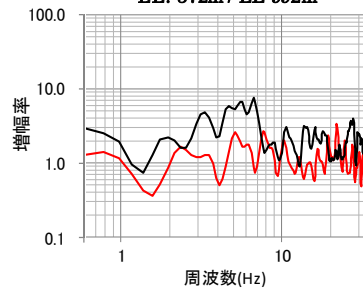
2014年1月9日
入射角: 55.99°



EL.+8m / EL.-192m



EL.-192m / EL.-372m



EL.-372m / EL.-992m

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E.L.-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))																
E.L. (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	$0.921f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$)	$1.170f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$)									
	5.5											0.019 ($f > 18.74$)	0.079 ($f > 19.45$)									
	4.5											$0.793f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$)	$0.813f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$)									
	1.0											0.017 ($f > 18.74$)	0.055 ($f > 19.45$)									
	8.0											$0.389f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$)	$0.206f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$)									
-7.0	8.0	478	1509	1.82							0.008 ($f > 18.74$)	0.014 ($f > 19.45$)										
-15.0	8.0	478	1509	1.82							$0.250f^{-1.32}$ ($f \leq 18.74$)	$0.217f^{-0.91}$ ($f \leq 19.45$)										
	2.0	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	$0.102f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.301f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)									
●	-17.0											89.0				0.014 ($f > 6.78$)	0.008 ($f > 31.74$)					
	-106.0											62.0	557	1742	1.74						$0.087f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.303f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)
	-168.0											24.0				0.012 ($f > 6.78$)	0.008 ($f > 31.74$)					
●	-192.0											68.0	669	2067	1.78						$0.072f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.256f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)
	-260.0	108.0	756	2256	1.82						0.010 ($f > 6.78$)	0.007 ($f > 31.74$)										
▽解放基盤表面	-368.0	2.0	790	2000	1.85							$0.064f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.234f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)									
	-370.0	2.0	790	2000	1.85							0.009 ($f > 6.78$)	0.006 ($f > 31.74$)									
	-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							0.008 ($f > 6.78$)	0.007 ($f > 31.74$)									
	-476.0	90.0	835	2124	1.89							$0.061f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.264f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)									
	-566.0	89.0	904	2205	2.00							0.008 ($f > 6.78$)	0.007 ($f > 31.74$)									
▽地震基盤相当面	-655.0	24.0	947	2256	2.07							$0.058f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.249f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)									
	-679.0	55.0	2200	4800	2.65							0.008 ($f > 6.78$)	0.007 ($f > 31.74$)									
	-734.0	258.0	2800	5300	2.78							$0.054f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.240f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)									
	-734.0	258.0	2800	5300	2.78							0.007 ($f > 6.78$)	0.006 ($f > 31.74$)									
●: 地震計位置	-992.0	-	2800	5300	2.78	53	0.21	1.31	20	0.23	16.46	$0.051f^{-1.05}$ ($f \leq 6.78$)	$0.234f^{-1.05}$ ($f \leq 31.74$)									
	-992.0	-	2800	5300	2.78							0.007 ($f > 6.78$)	0.006 ($f > 31.74$)									
	-992.0	-	2800	5300	2.78							$0.013f^{-0.21}$ ($f \leq 1.31$)	$0.004f^{-0.23}$ ($f \leq 16.46$)									
	-992.0	-	2800	5300	2.78							0.012 ($f > 1.31$)	0.002 ($f > 16.46$)									
	-992.0	-	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 ($f > 16.46$)									

(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E.L.-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。 		
<ul style="list-style-type: none"> E.L.-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E.L.-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
<ul style="list-style-type: none"> 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
<ul style="list-style-type: none"> 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。		
<ul style="list-style-type: none"> 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。 		
<ul style="list-style-type: none"> Q値の同定範囲は、地表(E.L.+8m)～大深度地震計設置位置(E.L.-992m)とした。 		
<ul style="list-style-type: none"> 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

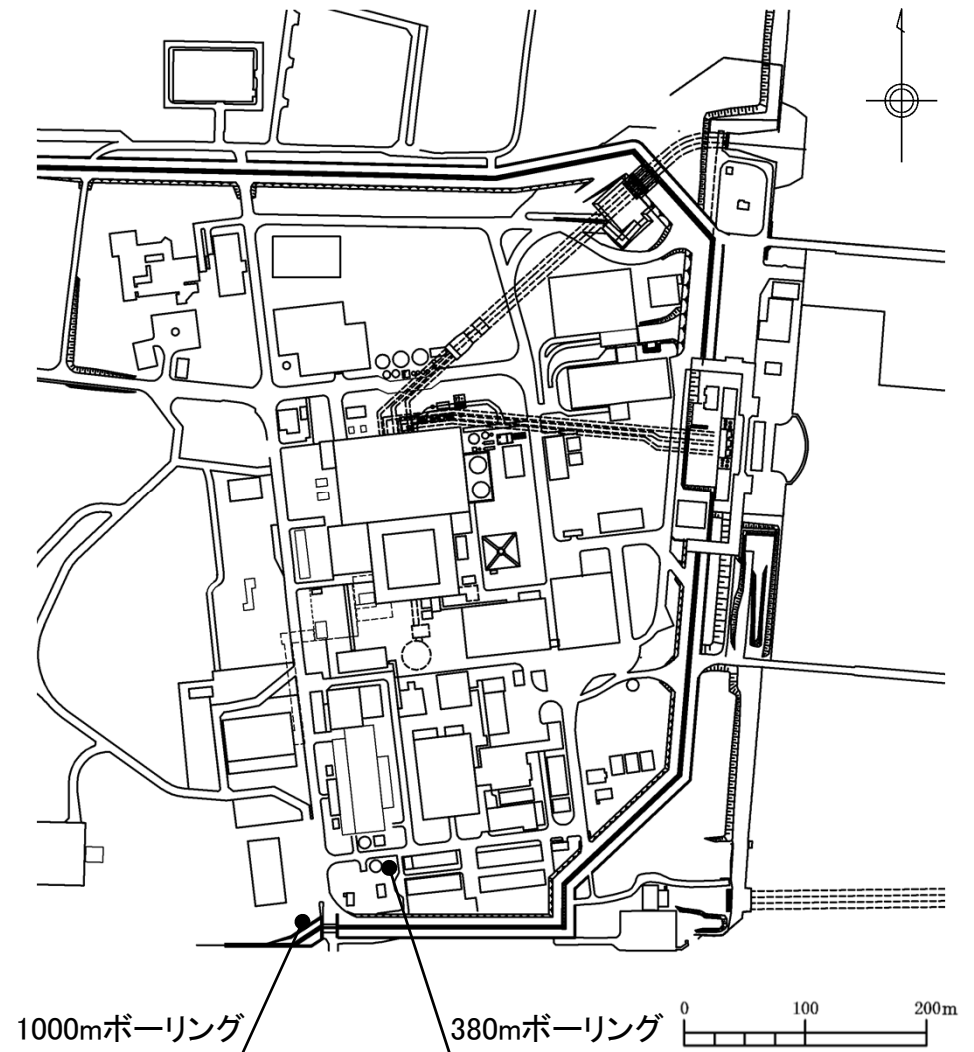
No.	コメント内容	回答概要
2	減衰定数の同定に関し、今回、減衰定数の下限を考慮することに至った考え方を説明すること。	上表④のとおり、今回、減衰定数の下限を考慮することに至った考え方を説明した。
3	同定解析の際、3つの地震による観測記録を用いているが、その妥当性については他の地震の記録でも検証すること。	上表⑤～⑦のとおり、同定解析に用いる3つの地震以外の地震の記録でも検証した。

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>

- 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 既許可審査時の地盤モデルと今回設定した地盤モデル
- ③ 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)

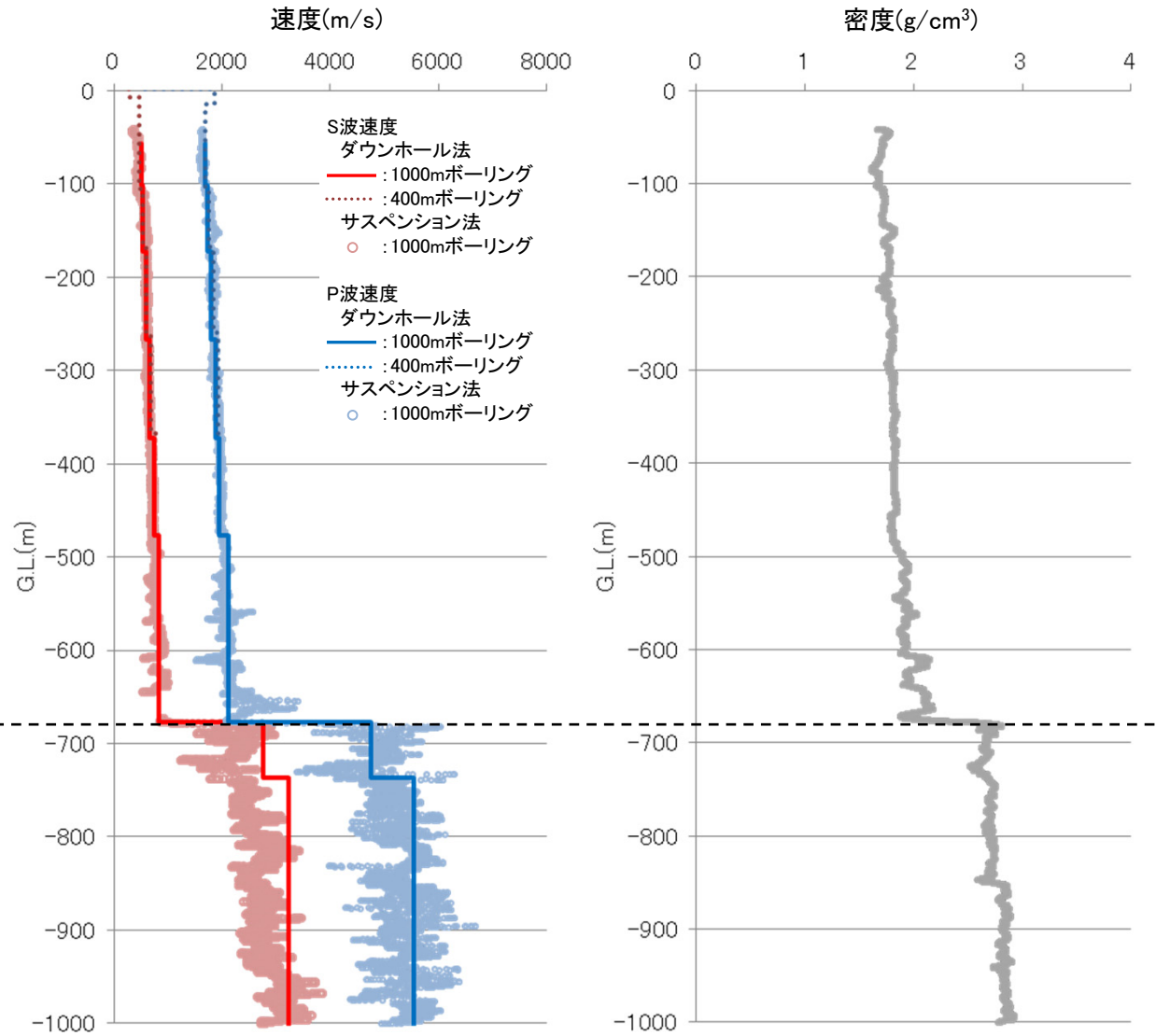
- ・第338回審査会合において、東海第二発電所で実施した1000mボーリングによる調査結果に基づく地盤モデルについて説明した。
- ・その後、1000mボーリング孔に設置している地震計による地震観測記録の中から、ノイズや機器の不具合等による影響のないデータを選定し、解放基盤表面以深の地盤モデルについて再検討を実施した。



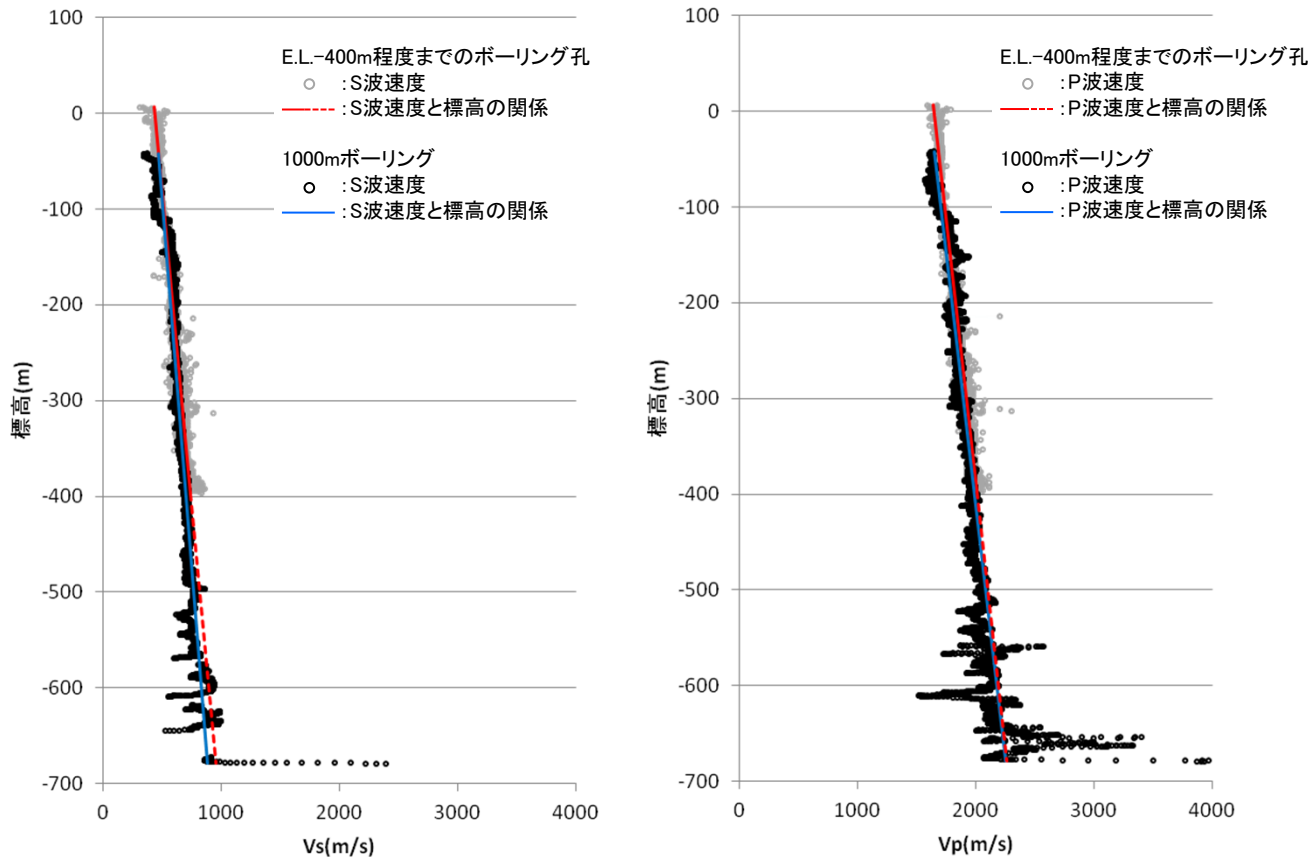
地盤モデルの検討に用いた
ボーリング位置(平面)

【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	先新第三系
-685	2750	4740	0.0725	0.0397	
-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。



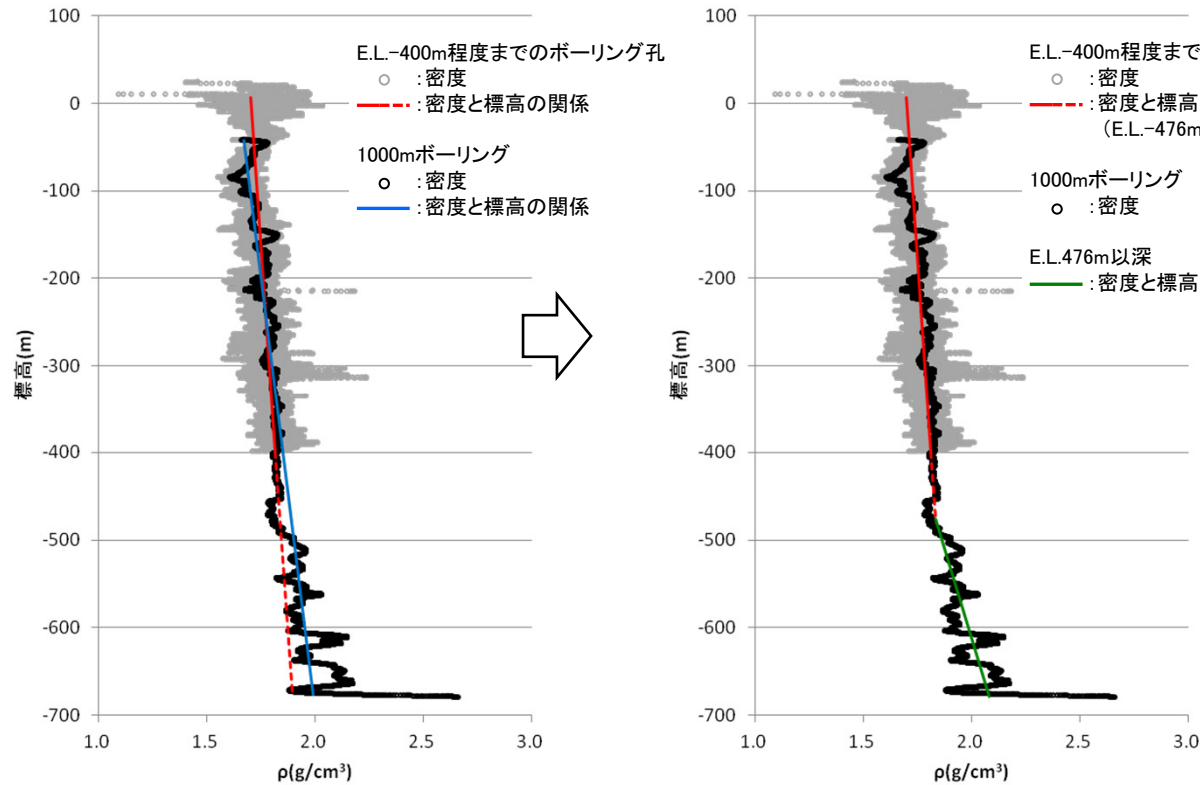
久米層における
地盤速度と標高の関係

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

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

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E.L.-500m程度まで整合的であるが、E.L.-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、E.L.-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、E.L.-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

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

(E.L.-476m 以浅)

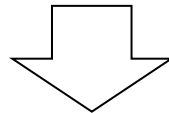
$$\rho = 1.253 - 1.220 \times 10^{-3} \cdot Z$$

(E.L.-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 E.L.-372m以浅の地盤モデルは、地表(E.L.8m)からE.L.-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 E.L.-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 E.L.-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 E.L.-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 E.L.-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 E.L.-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

E.L. (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								
-106.0	62.0							557	1742
-168.0	24.0							669	2067
▼ -192.0	68.0	新第三系	1.78	669	2067	0.072f ^{-0.931}	0.203f ^{-0.93}		
-260.0	108.0							756	2256
-368.0	2.0							790	2000
▽ -370.0	2.0							1.85	790
▼ -372.0	② 104.0	先新第三系	③ 1.85	790	2000	⑤ 0.072f ^{-0.931}	0.203f ^{-0.93}		
-476.0	90.0		1.89	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	2.65	2750	4740	⑦ 0.010	0.010		
-734.0	258.0		2.78	3220	5550				
▼ -992.0	-		2.78	3220	5550				

▼:地震計位置 ▽:解放基盤表面 △:地震基盤

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(6/11)

補足説明資料①

第409回審査会合
資料1 再掲

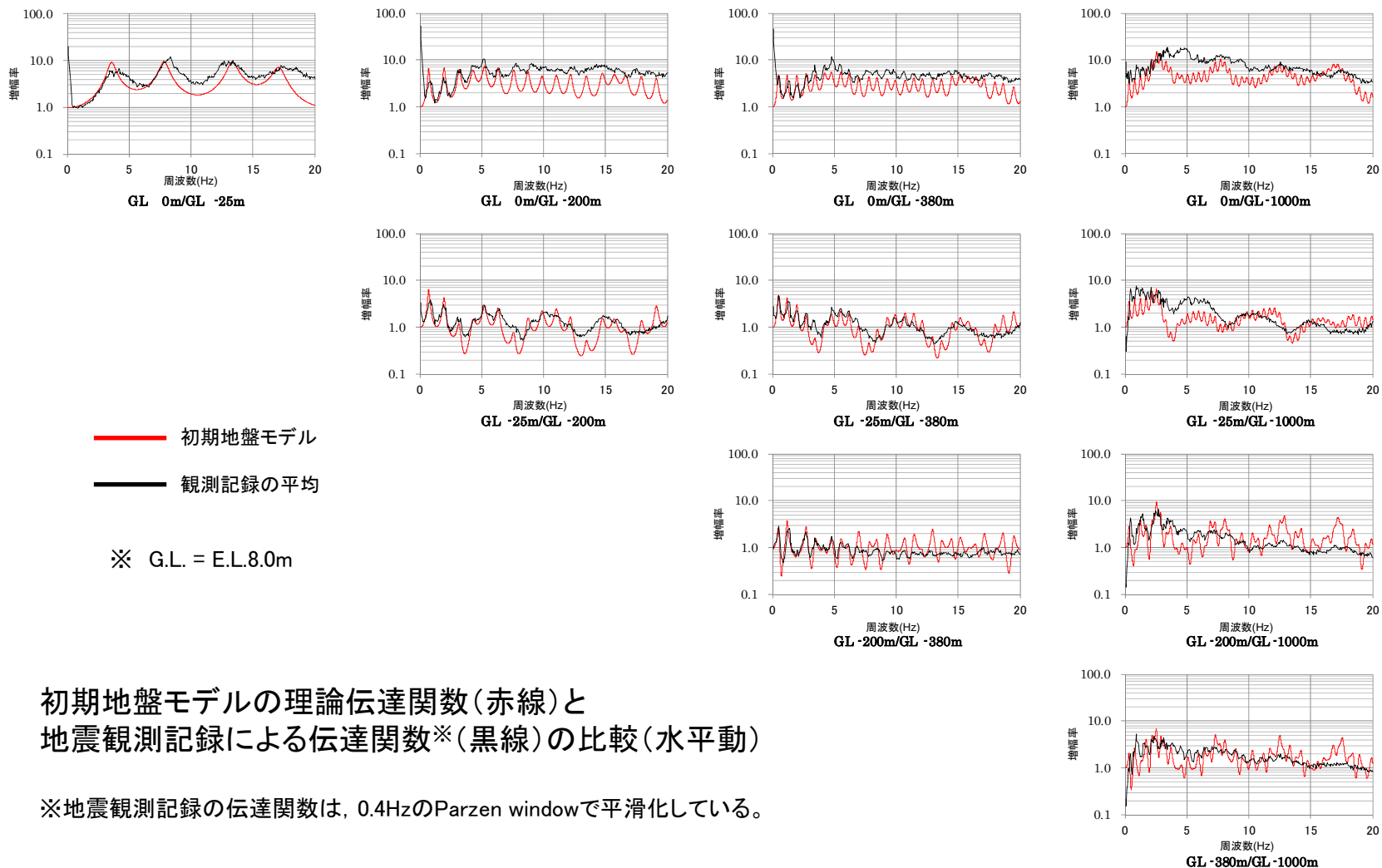
- ・検討対象期間 : 2012年8月～2013年1月
- ・検討対象地震数 : 134地震

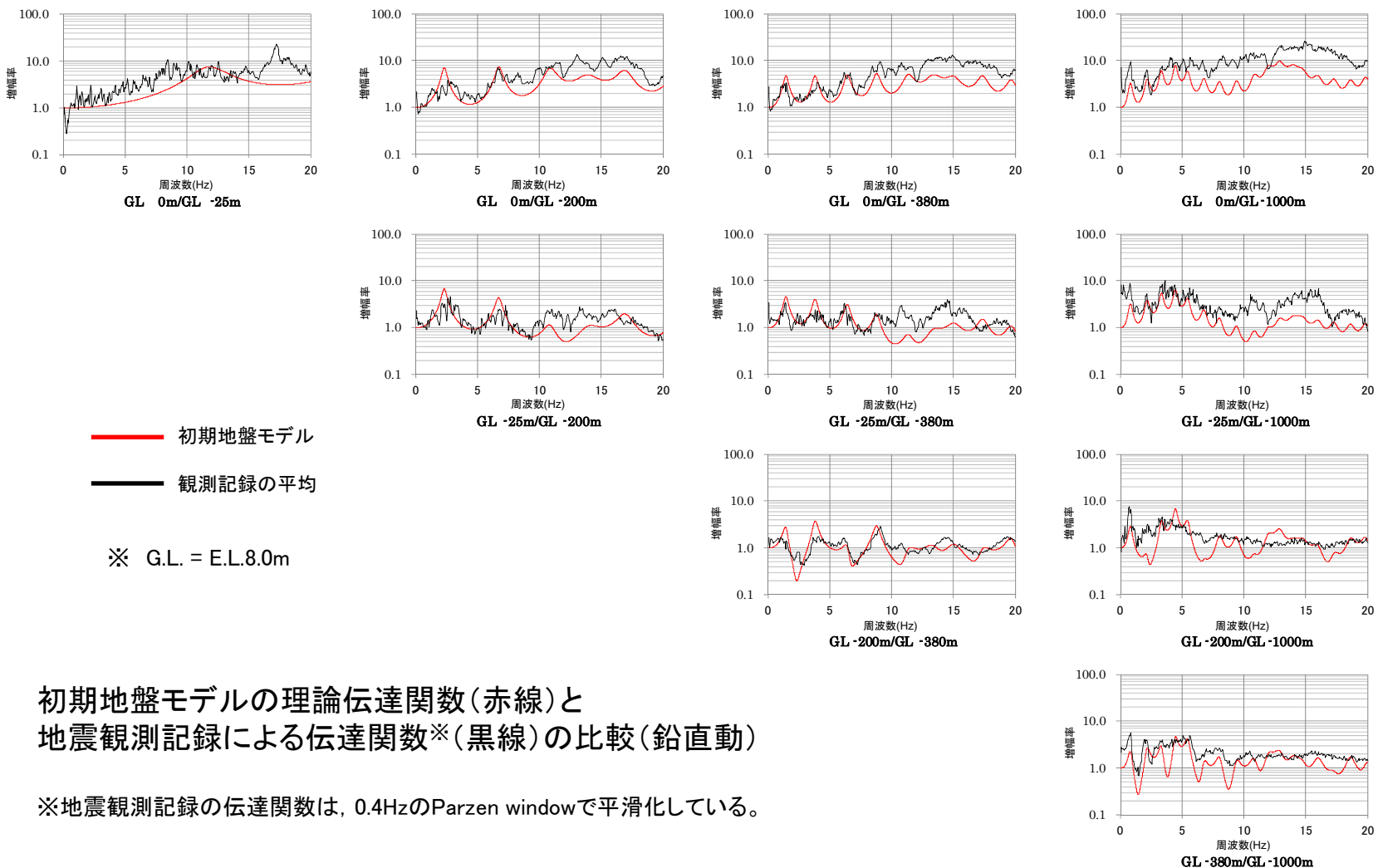
No.	発震日時		震央位置		震源深さ (km)	マグニ チュード	震央距離 (km)
			緯度(度)	経度(度)			
1	2012/08/04	22:08	36.852	140.573	7.3	3.7	43
2	2012/08/05	06:45	36.229	141.139	47.3	3.8	55
3	2012/08/07	03:39	36.411	141.027	45.1	3.3	38
4	2012/08/08	08:54	36.889	141.380	33.2	4.4	84
5	2012/08/10	05:38	36.780	141.270	36.8	4.3	69
6	2012/08/10	07:18	36.759	140.590	7.2	3.2	33
7	2012/08/11	19:30	37.131	141.182	60.0	4.4	90
8	2012/08/12	03:21	36.496	140.642	10.0	2.0	5
9	2012/08/12	18:56	37.083	140.548	4.0	3.8	69
10	2012/08/14	03:41	36.225	141.052	41.0	3.6	48
11	2012/08/14	07:54	36.746	141.087	28.5	3.7	53
12	2012/08/15	01:15	37.053	140.772	9.2	3.6	67
13	2012/08/17	01:53	36.772	140.573	9.4	3.6	34
14	2012/08/17	15:15	37.354	141.866	40.7	4.6	149
15	2012/08/17	20:37	36.655	140.988	88.7	4.3	40
16	2012/08/20	08:26	36.748	140.599	6.2	3.4	31
17	2012/08/20	20:42	35.917	140.442	57.2	5.2	63
18	2012/08/20	21:02	35.938	140.820	26.1	3.6	62
19	2012/08/21	01:42	36.906	141.449	45.7	5.1	90
20	2012/08/25	07:43	36.424	141.083	44.8	3.9	43
21	2012/08/25	08:51	36.294	141.023	44.3	3.6	42
22	2012/08/26	03:36	36.968	141.083	90.0	5.2	70
23	2012/08/28	20:44	36.950	141.350	40.3	4.2	85
24	2012/08/28	22:55	36.396	141.875	27.0	5.0	114
25	2012/08/29	19:19	36.643	141.060	45.2	3.7	45
26	2012/08/30	04:17	36.121	139.850	48.6	4.1	78
27	2012/08/31	03:06	36.846	140.579	8.4	3.4	42
28	2012/08/31	23:26	36.897	140.663	7.3	4.4	48
29	2012/09/01	00:31	37.185	141.381	29.3	4.6	106
30	2012/09/02	11:14	36.620	141.316	46.1	3.7	66
31	2012/09/02	13:33	36.519	140.696	54.2	3.9	10
32	2012/09/03	07:17	36.639	140.929	49.6	3.8	35
33	2012/09/03	18:30	36.939	140.108	96.5	3.6	69
34	2012/09/05	01:26	36.700	140.644	6.0	3.3	26
35	2012/09/06	03:20	36.700	140.606	9.8	3.8	26
36	2012/09/07	14:36	36.415	141.035	45.8	3.5	39
37	2012/09/07	15:17	36.661	141.133	29.8	4.3	52
38	2012/09/11	02:58	36.572	140.592	18.9	2.7	12
39	2012/09/11	08:17	36.776	141.264	32.7	4.4	68
40	2012/09/11	20:12	37.621	141.900	30.2	4.7	172
41	2012/10/24	01:30	36.654	140.609	4.9	3.1	21
42	2012/10/24	16:05	36.534	140.848	51.5	4.5	23
43	2012/10/24	16:26	36.742	141.277	25.6	3.6	67
44	2012/10/24	16:56	36.543	140.847	51.3	4.0	23
45	2012/10/24	23:30	36.311	140.870	36.4	3.4	29

No.	発震日時		震央位置		震源深さ (km)	マグニ チュード	震央距離 (km)
			緯度(度)	経度(度)			
46	2012/10/25	09:51	36.645	140.894	25.9	3.5	33
47	2012/10/27	13:12	37.022	141.130	50.8	4.1	77
48	2012/10/28	18:44	36.539	140.875	50.4	4.3	25
49	2012/10/30	14:50	36.884	141.350	32.2	4.0	81
50	2012/10/30	19:10	36.133	141.256	40.6	3.8	69
51	2012/10/30	19:13	36.157	141.255	38.1	4.0	68
52	2012/10/31	15:50	36.040	139.925	44.2	4.4	77
53	2012/11/03	07:34	37.617	141.749	29.4	5.0	163
54	2012/11/05	05:49	36.330	140.952	38.5	4.3	34
55	2012/11/06	06:59	36.644	141.126	47.6	4.1	51
56	2012/11/07	00:01	35.759	140.989	13.4	4.3	86
57	2012/11/07	00:03	35.766	140.984	13.5	4.1	85
58	2012/11/07	01:44	36.341	140.930	36.6	2.9	32
59	2012/11/07	15:39	36.620	140.983	47.0	3.1	38
60	2012/11/08	08:54	37.007	140.698	10.8	4.2	61
61	2012/11/08	17:59	36.675	140.621	7.0	3.1	23
62	2012/11/09	12:51	36.877	141.380	32.5	5.5	83
63	2012/11/09	13:06	36.870	141.355	35.3	4.2	81
64	2012/11/09	13:49	36.877	141.355	30.9	4.1	81
65	2012/11/09	22:22	37.343	141.351	49.0	4.1	118
66	2012/11/10	21:35	36.889	141.377	32.5	4.4	83
67	2012/11/12	00:12	36.635	140.660	13.9	3.0	19
68	2012/11/14	02:16	36.389	140.796	16.2	2.5	19
69	2012/11/14	02:58	36.662	141.117	16.4	4.2	51
70	2012/11/14	04:34	36.842	141.338	33.0	3.8	78
71	2012/11/15	02:19	36.421	141.005	17.0	4.5	36
72	2012/11/15	18:19	36.488	140.594	61.7	2.8	3
73	2012/11/15	23:54	36.867	141.366	34.5	4.1	81
74	2012/11/16	17:25	35.357	141.230	30.2	5.5	135
75	2012/11/17	14:40	36.428	140.654	52.7	3.7	6
76	2012/11/23	05:13	36.591	140.984	47.2	3.1	37
77	2012/11/24	00:51	36.067	139.878	45.5	4.4	79
78	2012/11/24	17:59	35.638	140.018	72.2	4.8	106
79	2012/11/27	06:12	36.164	141.012	43.9	3.6	50
80	2012/11/27	11:18	36.455	140.767	16.6	3.0	14
81	2012/11/28	00:11	36.741	141.043	42.2	3.8	50
82	2012/11/28	05:17	36.617	141.051	28.5	3.9	43
83	2012/11/30	02:10	36.560	140.839	13.2	3.6	23
84	2012/12/03	13:53	36.591	141.181	27.3	3.0	53
85	2012/12/03	13:57	36.342	140.727	90.9	4.3	18
86	2012/12/03	14:17	36.588	141.186	29.4	4.3	54
87	2012/12/03	19:38	36.890	141.364	30.2	3.9	82
88	2012/12/06	13:00	36.506	140.612	55.0	2.8	5
89	2012/12/06	16:18	37.081	141.226	36.9	4.0	88
90	2012/12/06	19:17	36.431	140.692	52.4	4.3	9

No.	発震日時		震央位置		震源深さ (km)	マグニ チュード	震央距離 (km)
			緯度(度)	経度(度)			
91	2012/12/07	10:03	36.704	141.245	32.6	3.9	63
92	2012/12/07	18:02	35.835	140.976	15.8	4.2	78
93	2012/12/07	18:23	36.706	141.244	33.2	4.0	63
94	2012/12/07	19:40	36.701	141.232	31.6	4.2	62
95	2012/12/10	19:34	36.450	140.579	61.0	2.7	3
96	2012/12/11	13:11	36.233	140.382	64.7	3.0	33
97	2012/12/12	09:19	36.983	141.428	31.8	4.7	93
98	2012/12/12	18:23	36.702	140.621	5.8	3.6	26
99	2012/12/13	01:02	36.629	140.958	49.0	4.0	36
100	2012/12/15	13:27	37.297	141.349	59.0	5.3	114
101	2012/12/15	14:46	36.822	141.209	32.3	5.0	67
102	2012/12/15	17:24	36.267	140.914	44.6	2.9	35
103	2012/12/17	04:55	36.440	141.116	44.8	2.8	46
104	2012/12/18	03:46	36.850	141.346	29.1	4.9	79
105	2012/12/19	11:35	36.334	141.787	53.9	4.6	107
106	2012/12/20	05:16	36.169	140.327	73.6	4.2	41
107	2012/12/21	00:31	37.113	141.106	52.6	4.1	85
108	2012/12/25	06:54	36.913	141.416	30.9	4.2	88
109	2012/12/28	16:30	36.453	140.604	55.5	4.1	1
110	2012/12/29	16:19	37.068	141.183	51.0	5.0	84
111	2012/12/30	08:05	36.963	141.393	35.0	5.1	89
112	2012/12/30	11:33	36.755	141.299	75.9	3.8	70
113	2013/01/03	04:56	37.104	140.605	10.4	3.8	71
114	2013/01/04	13:42	35.748	140.688	49.7	4.5	80
115	2013/01/04	22:52	36.9	141.295	75.4	4.4	78
116	2013/01/08	13:47	36.139	140.958	35.6	3.6	48
117	2013/01/10	21:48	37.514	141.472	48.4	5.0	140
118	2013/01/12	12:05	36.678	140.623	6.6	3.4	24
119	2013/01/13	02:54	36.651	140.591	7.0	3.1	21
120	2013/01/13	22:14	36.888	140.656	8.2	3.8	47
121	2013/01/14	15:53	37.184	141.538	47.0	4.9	115
122	2013/01/15	09:08	36.604	140.66	8.8	2.9	16
123	2013/01/17	06:41	36.251	140.869	45.0	2.9	34
124	2013/01/18	13:04	37.086	140.672	8.4	3.9	69
125	2013/01/19	22:19	36.706	141.24	34.5	4.1	63
126	2013/01/21	11:29	36.868	140.56	7.9	3.9	45
127	2013/01/21	23:19	35.984	141.174	21.6	4.0	74
128	2013/01/22	04:46	35.874	140.937	16.0	5.1	72
129	2013/01/26	09:14	36.307	139.788	111.5	4.0	76
130	2013/01/26	17:47	36.468	140.738	51.8	3.4	12
131	2013/01/28	03:41	36.571	140.56	73.7	4.8	12
132	2013/01/30	01:31	36.38	140.87	41.5	3.0	26
133	2013/01/31	19:57	36.552	141.107	46.0	4.0	46
134	2013/01/31	23:53	36.703	140.604	8.4	4.7	26

- ・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

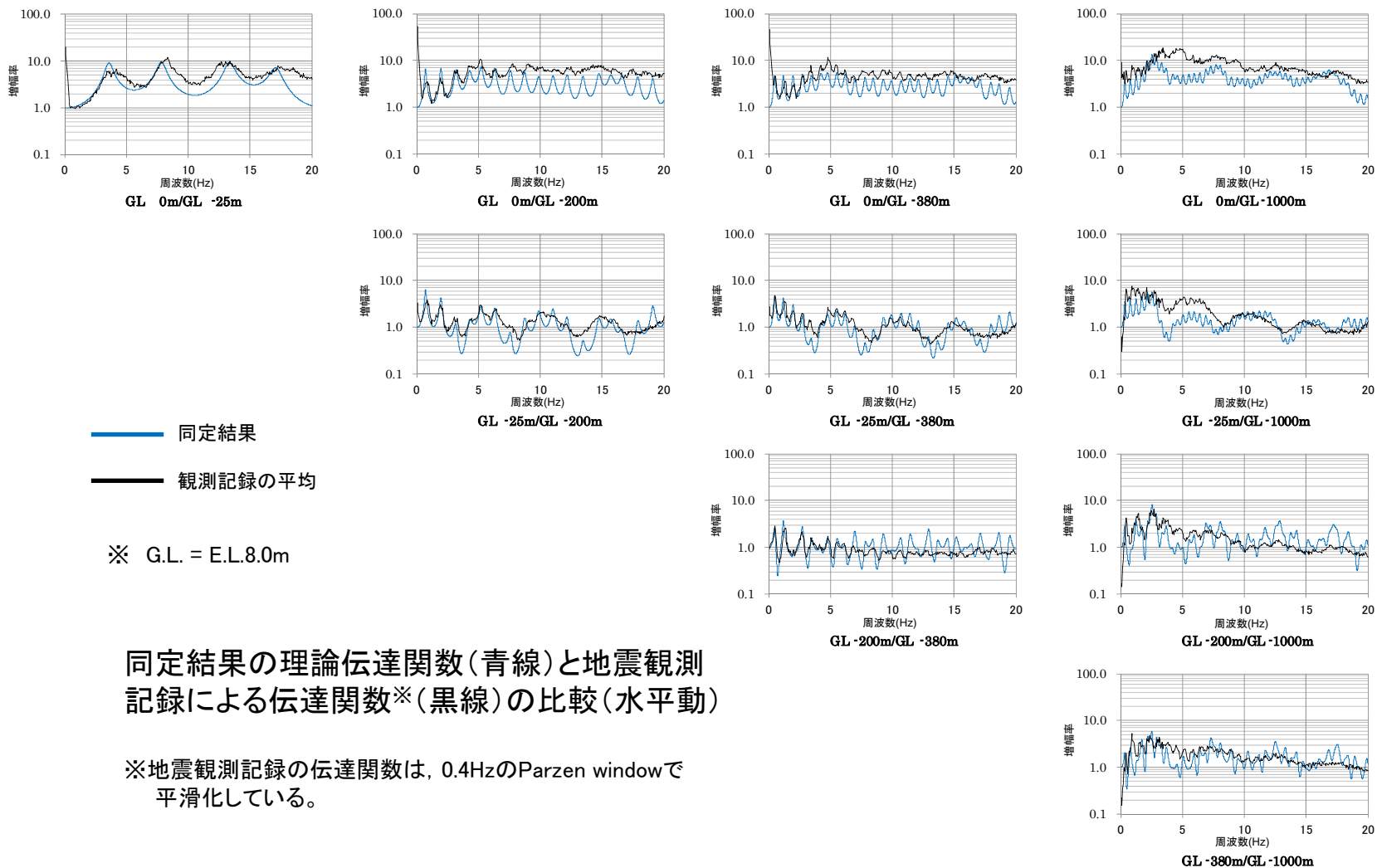
- 地震観測記録から求めた伝達関数に、一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により、地盤モデルを同定した。
- 減衰定数の初期値は0.01(1%)と仮定した。
- 解析手法は遺伝的アルゴリズムを用い、乱数の初期値を変えた5通りの計算結果の平均値を採用した。
- 解析パラメータについては、山中・石田(1995)を参考に設定した。
- 得られた結果を以下に示す。
 水平成分 $h(f)=0.022$
 鉛直成分 $h(f)=0.001 \times f^{-1.000}$

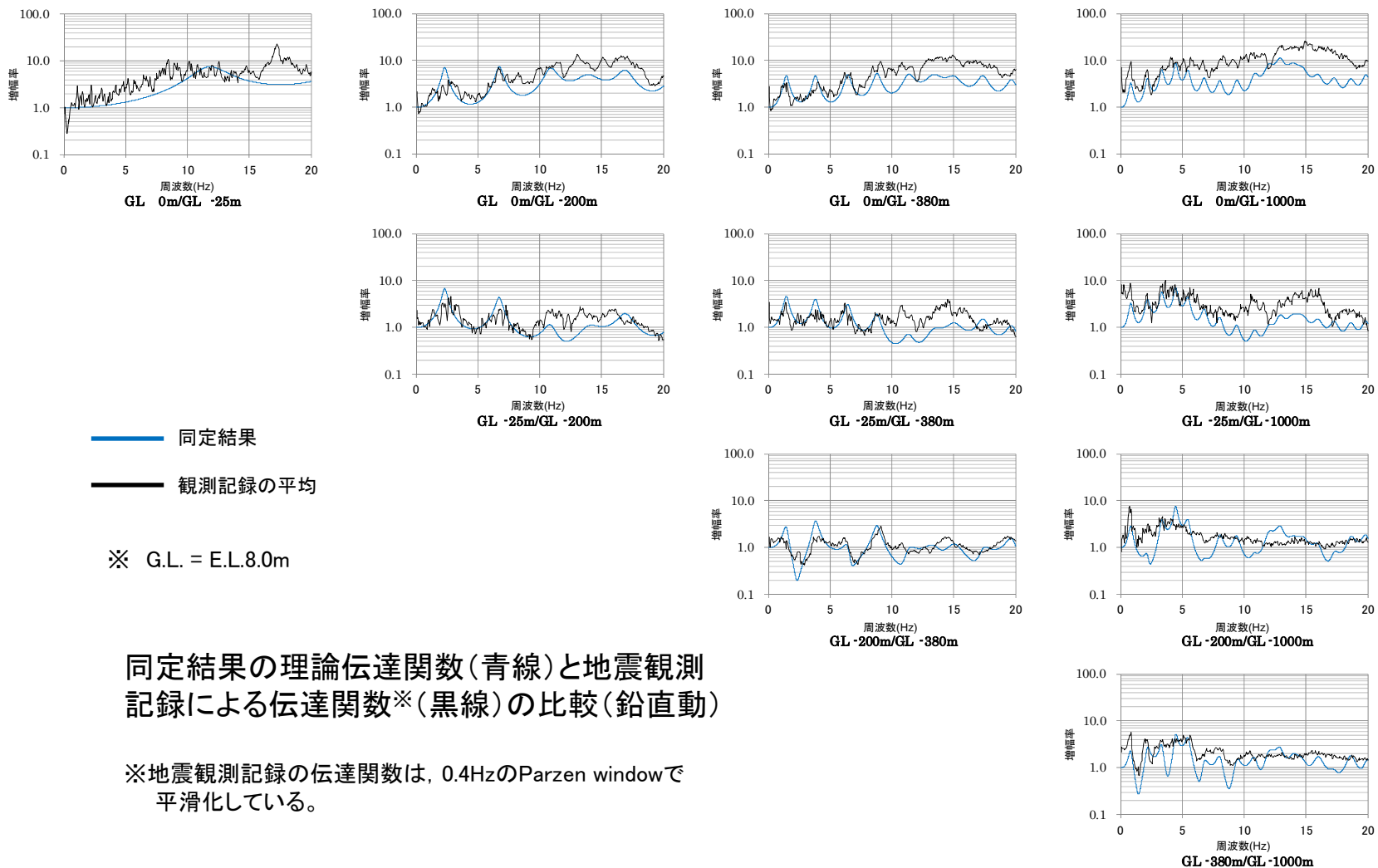
同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果

E.L. (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
						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		477	1753							
▼ -17.0	89.0	新第三系	557	1742							
-106.0	62.0		669	2067							
-168.0	24.0		756	2256							
▼ -192.0	68.0		790	2000							
-260.0	108.0		790	2000	1.85	0.072f ^{-0.931}	0.203f ^{-0.93}	-	-	-	
▽ -368.0	2.0	835	2124								
▼ -372.0	2.0	904	2205								
-476.0	104.0	947	2256								
-566.0	89.0	2750	4740	2.65							-
△ -679.0	55.0	先新第三系	3220		5550						
-734.0	258.0		3220		5550						
▼ -992.0	-		3220	5550	2.78						

▼:地震計位置 ▽:解放基盤表面 △:地震基盤

h₀:0.001~1.000
α:0.000~1.000: 同定対象





既許可審査時の地盤モデルと今回設定した地盤モデル

補足説明資料②

新規

- 「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。
- 既許可審査時における地盤モデルは、上記SGF法に用いる地盤モデルの他、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がある。

SGF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

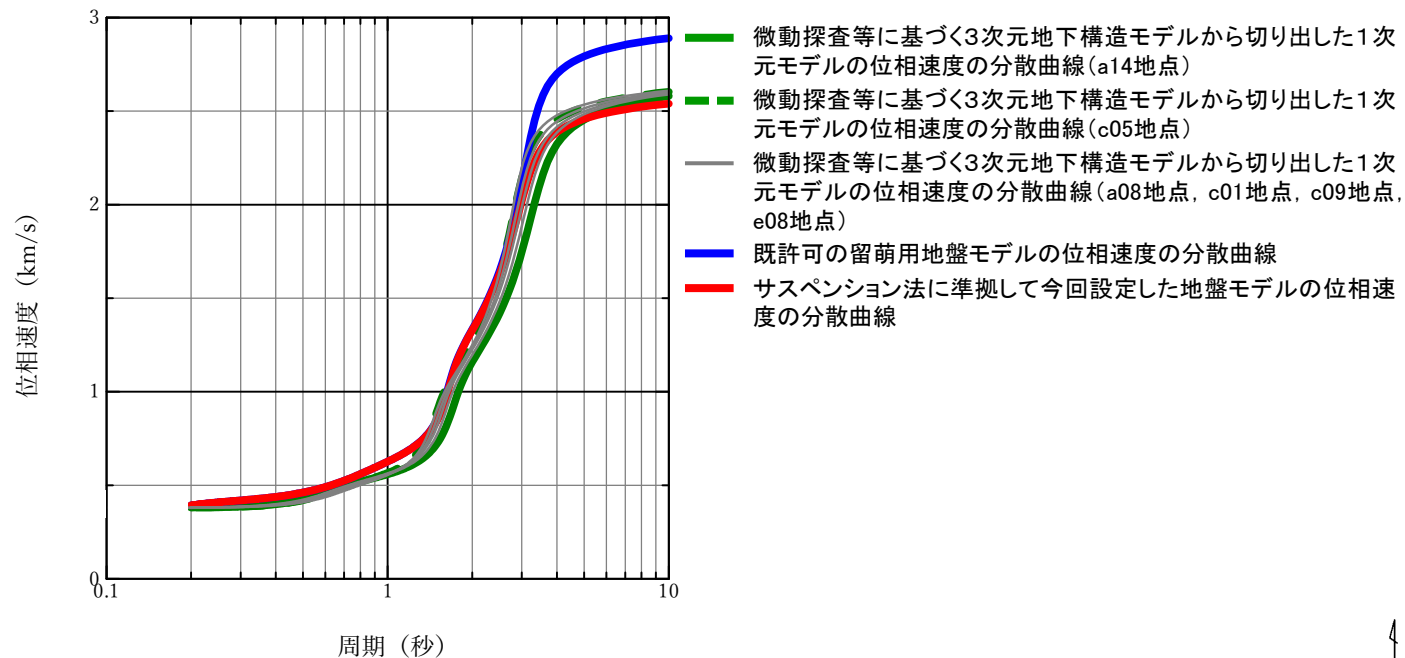
	上端標高 (m)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	
					水平	鉛直
解放基盤 表面	-370.0	790	2000	1.85	0.02	0.01
	-477.0	840	2110	1.96		
地震基盤 相当面	-677.0	2750	4740	2.63	Q=110 ^{0.69}	

	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
:SGF用地盤モデルと異なる物性値	-370.0	790	2000	1.85	0.072f ^{0.93}	0.203f ^{-0.93}
	-476.0	835	2124	1.89		
	-566.0	904	2205	2.00		
	-655.0	947	2256	2.07		
	-679.0	2750	4740	2.65		

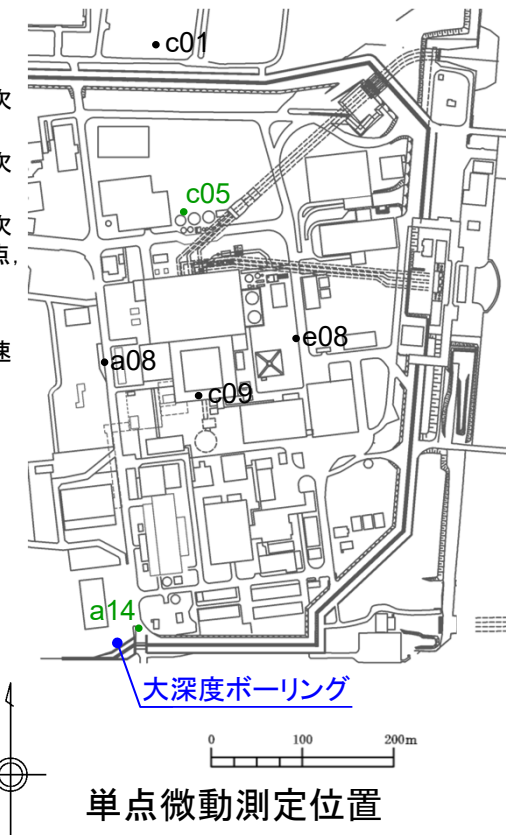
	上端標高 (m)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰定数	
					水平	鉛直
:留萌用地盤モデルと異なる物性値	-370.0	790	2000	1.85	0.061f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78)	0.264f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74)
	-476.0	835	2124	1.89	0.058f ^{-1.05} (f≤6.78) 0.008 (f>6.78)	0.249f ^{-1.05} (f≤31.74) 0.007 (f>31.74)
	-566.0	904	2205	2.00	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	2200	4800	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)

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。