

柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に 取得された地震観測データの分析に関する補足説明

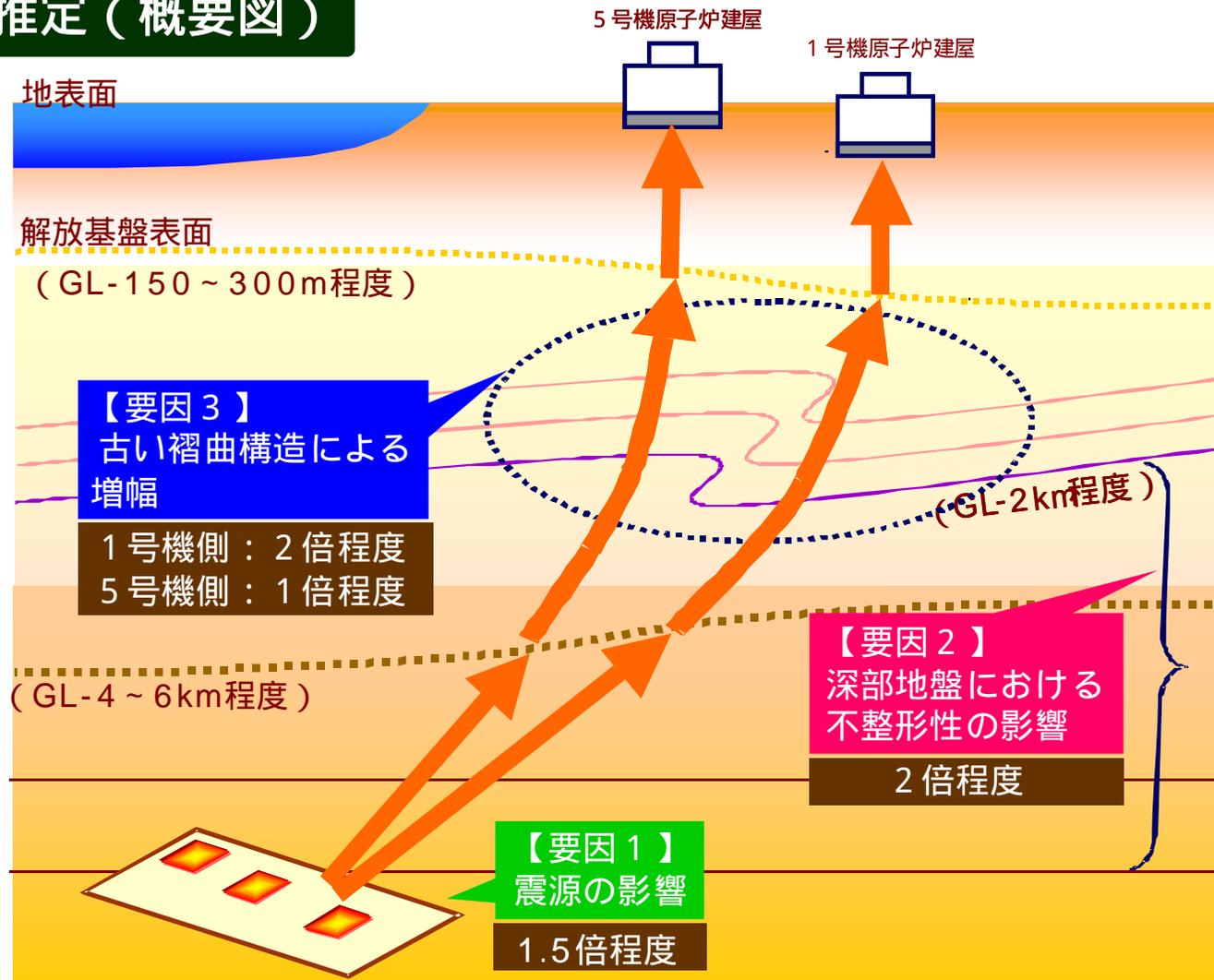
平成20年6月6日
東京電力株式会社



東京電力

第9回合同WGにおけるご報告の概要

要因の推定（概要図）



倍数は、耐専スペクトル¹との比率

¹耐専スペクトル：Noda et al.(2002)に基づく応答スペクトル手法

本日のご説明内容

- (1) 観測記録に基づく検討
- (2) 「古い褶曲構造での増幅（要因3）」の解析検討
- (3) 「深部地盤における不整形性の影響（要因2）」の解析検討
- (4) 中越沖地震の知見を踏まえた基準地震動への反映事項

(1) 観測記録に基づく検討

観測記録に基づく検討

(検討対象地震)

敷地内の観測記録の検討

解放基盤での地震動を推定し，耐専スペクトル¹（内陸補正^{*2}なし）を用いて比較を行い，地震動の大きさを検討する。

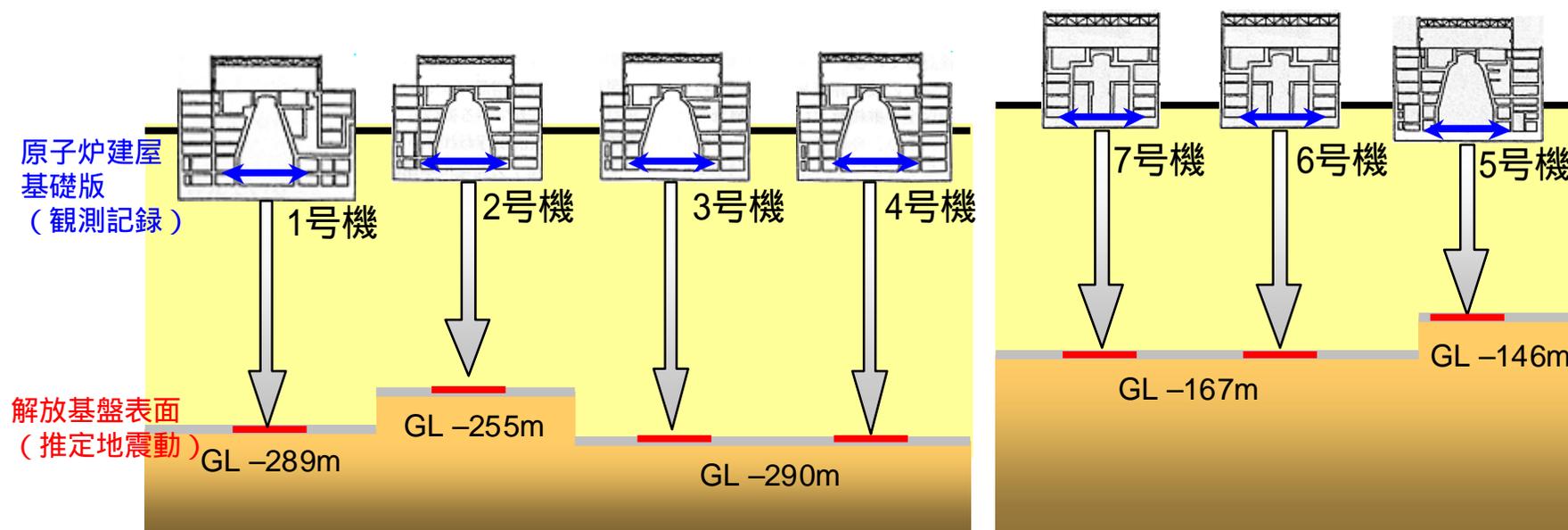
新潟県中越沖地震
海域を震源とする
その他の地震
陸域の地震

¹耐専スペクトル：Noda et al.(2002)に基づく応答スペクトル手法

²内陸補正：内陸地震を対象とした補正

観測記録に基づく検討

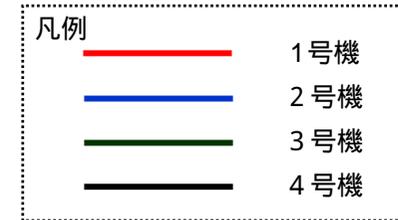
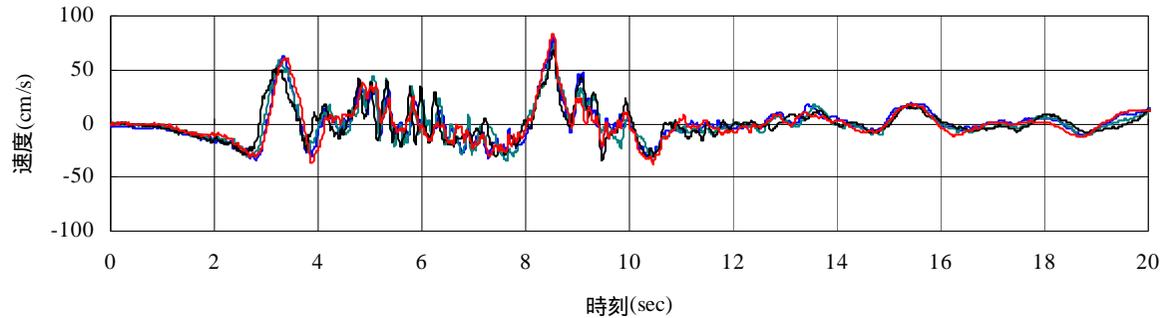
解放基盤表面における地震動の推定



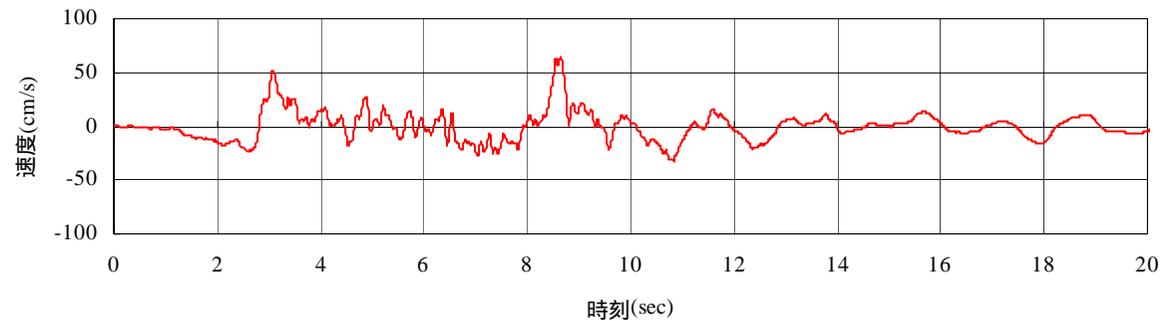
各号機毎，得られた原子炉建屋基礎版上の観測記録をもとに，解放基盤表面における地震動の推定を行った。

観測記録に基づく検討

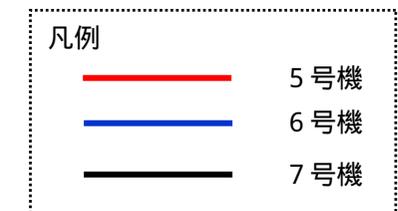
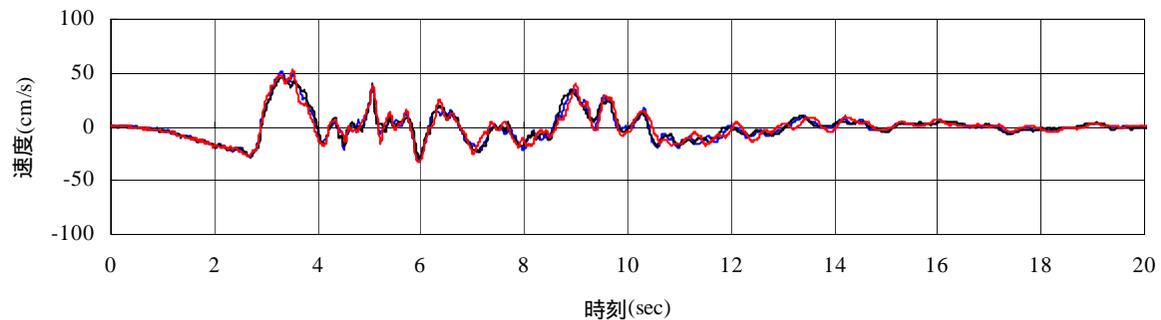
推定された速度波形の比較 (NS方向)



1 ~ 4号機



サービスホール

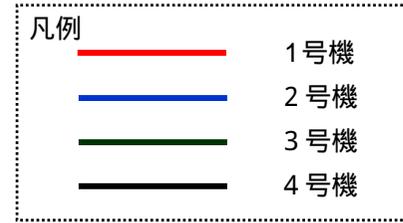
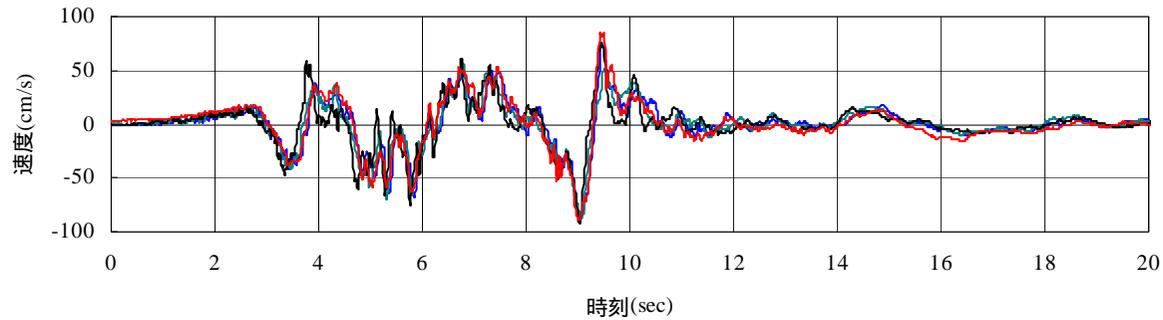


5 ~ 7号機

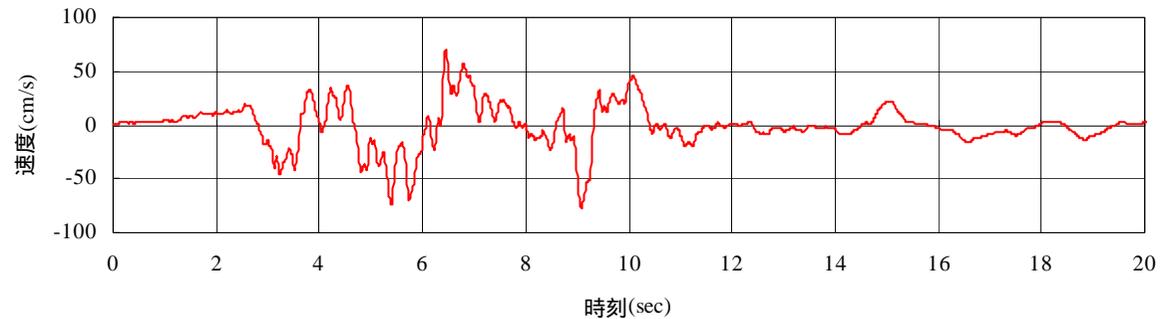
推定された速度波形を重ね描くと，1 ~ 4号機，5 ~ 7号機で傾向が一致し，それぞれグルーピングすることが出来る

観測記録に基づく検討

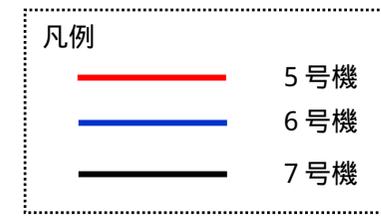
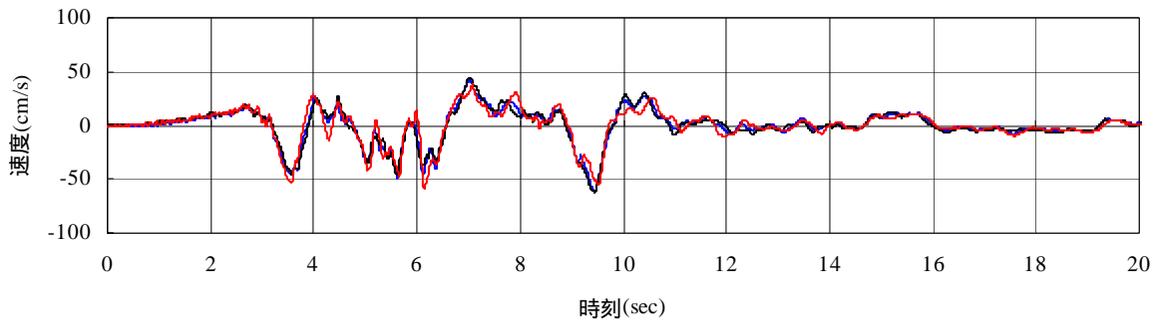
推定された速度波形の比較 (EW方向)



1 ~ 4号機



サービスホール



5 ~ 7号機

推定された速度波形を重ね描くと、1 ~ 4号機、5 ~ 7号機で傾向が一致し、それぞれグルーピングすることが出来る

観測記録に基づく検討

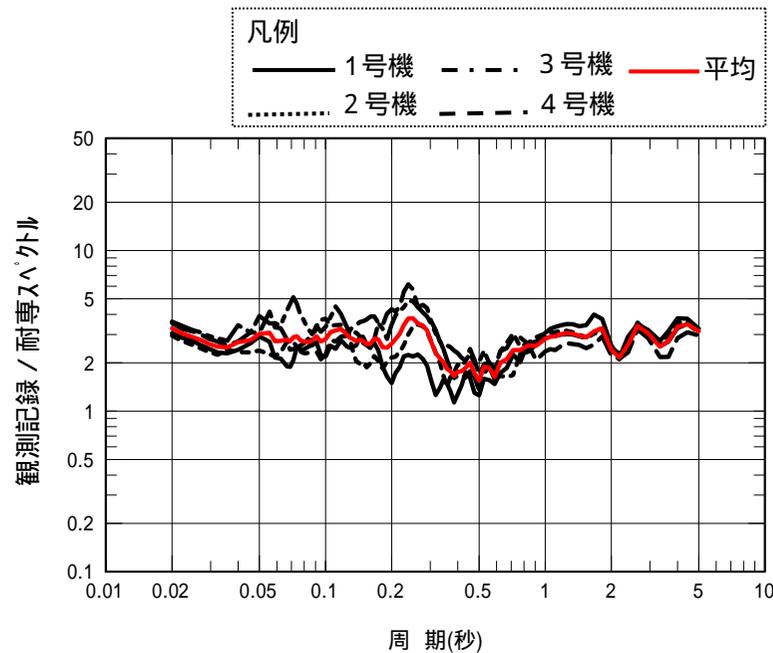
敷地内の観測記録に基づく検討・中越沖地震

耐専スペクトルとの比率（解放基盤表面における推定波 / 耐専スペクトル<内陸補正なし>）

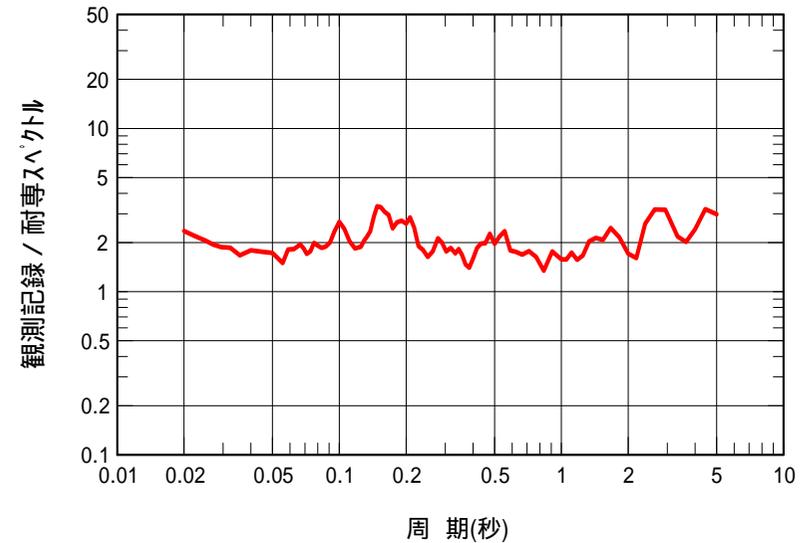
< NS方向 >

それぞれの地点で耐専スペクトル
（補正なし）との比率が1を上回る

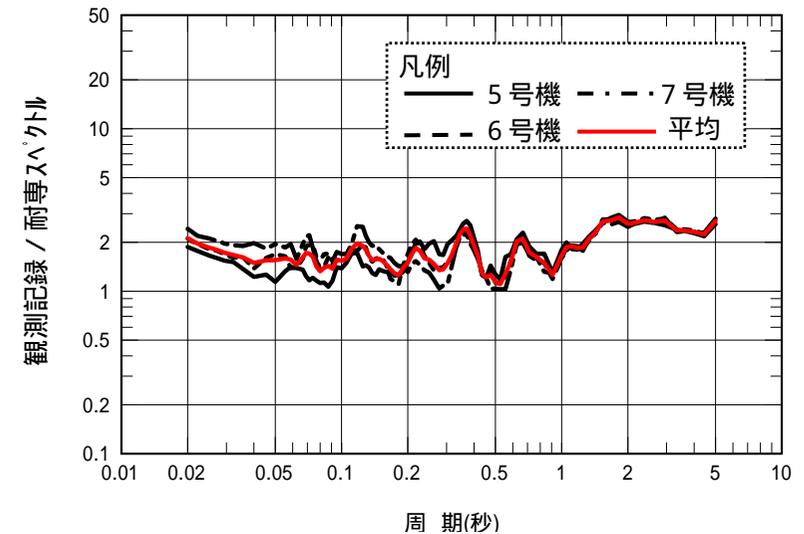
1～4号機と5～7号機において
耐専スペクトルとの比率に違いがある



1号機～4号機（NS方向）



サービスホール（NS方向）



5号機～7号機（NS方向）

差あり

観測記録に基づく検討

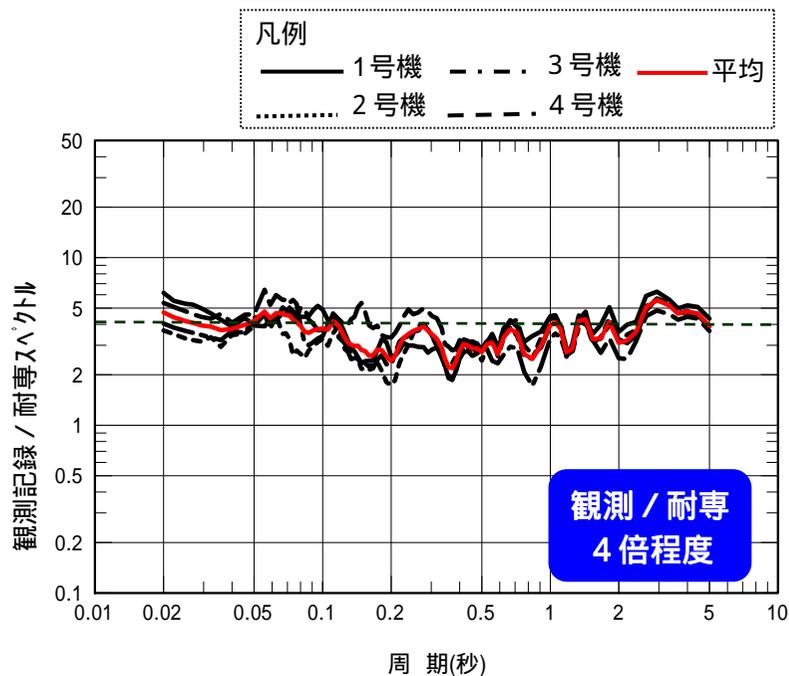
敷地内の観測記録に基づく検討・中越沖地震

耐専スペクトルとの比率（解放基盤表面における推定波 / 耐専スペクトル<内陸補正なし>）

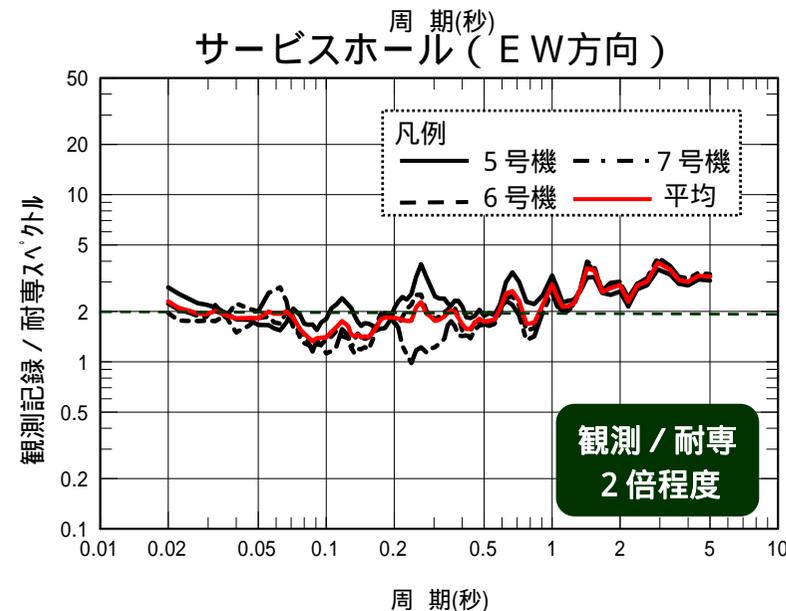
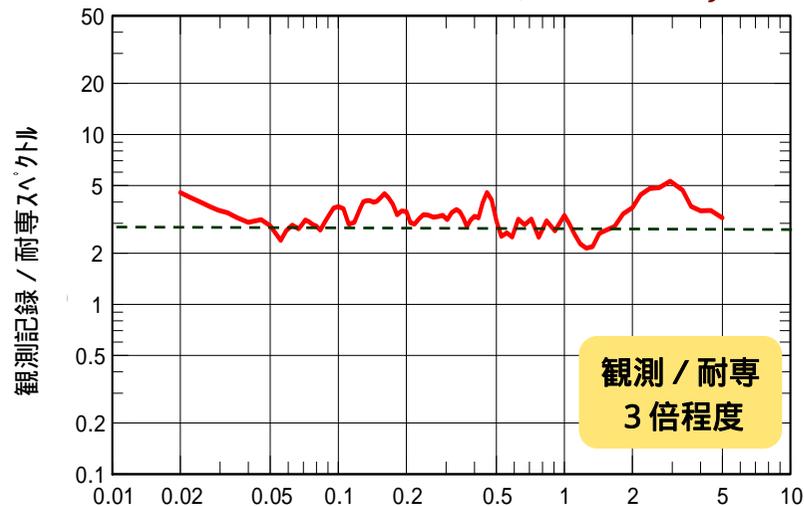
< E W方向 >

それぞれの地点で耐専スペクトル
（補正なし）との比率が1を上回る

1～4号機と5～7号機において
耐専スペクトルとの比率に違いがある

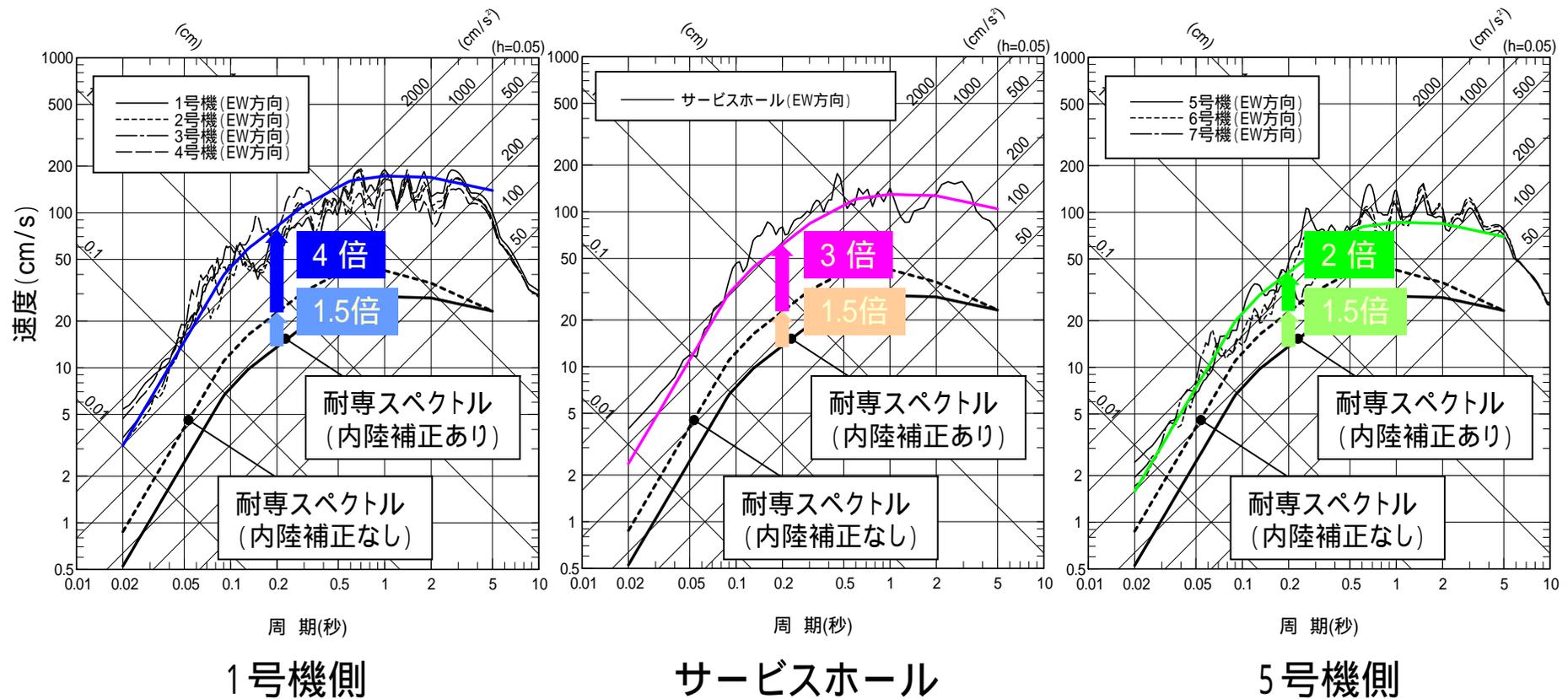


1号機～4号機（EW方向）



5号機～7号機（EW方向）

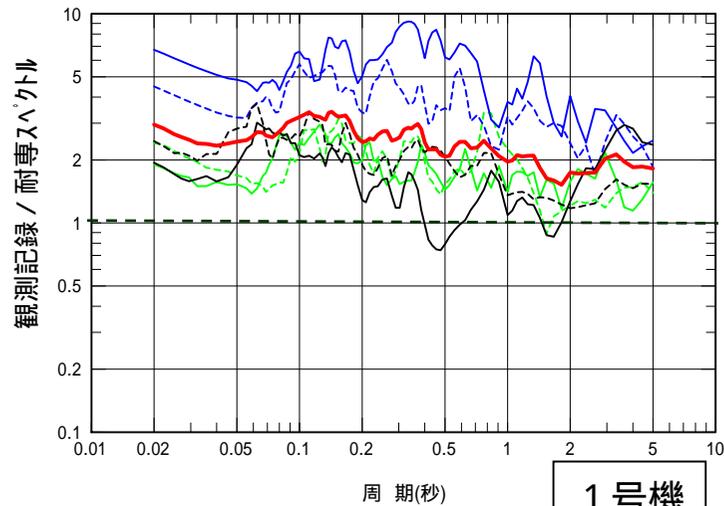
推定波の応答スペクトル (EW方向)



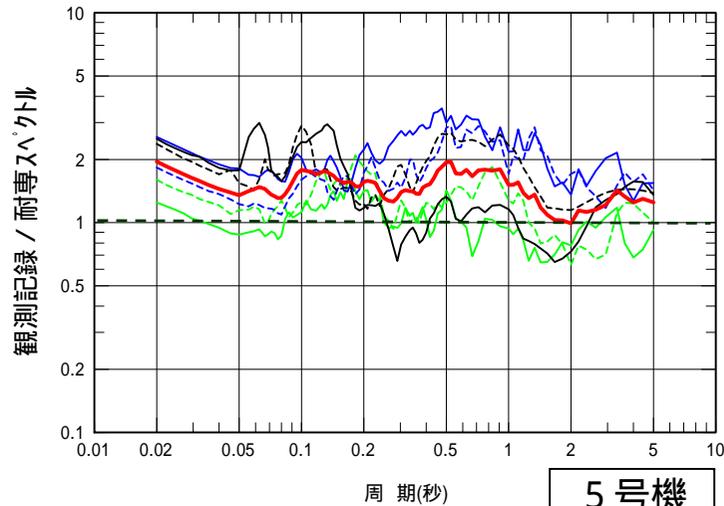
観測記録に基づく検討 敷地内の観測記録に基づく検討・海域を震源とする地震



検討に用いた地震の震央分布



1号機

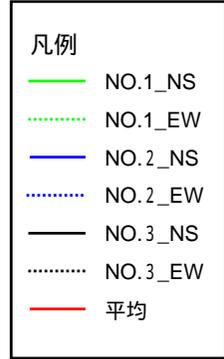


5号機

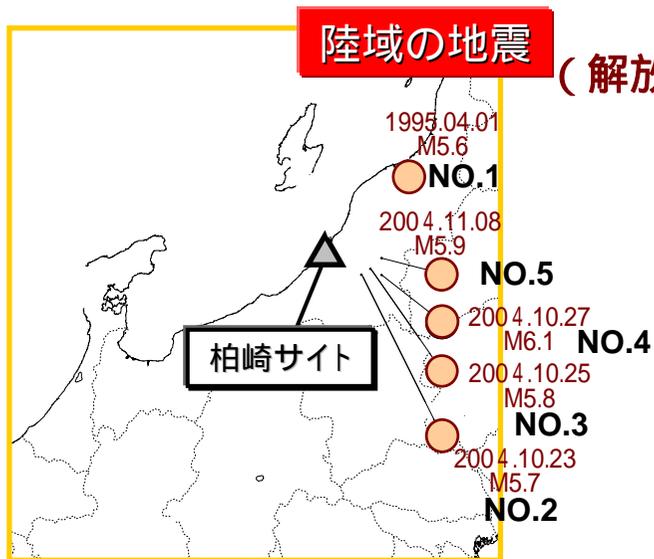
耐専スペクトルとの比率

(解放基盤表面における推定波 / 耐専スペクトル<内陸補正なし>)

1号機平均, 5号機平均ともに,
比率が1を上回る



観測記録に基づく検討 敷地内の観測記録に基づく検討・陸域を震源とする地震

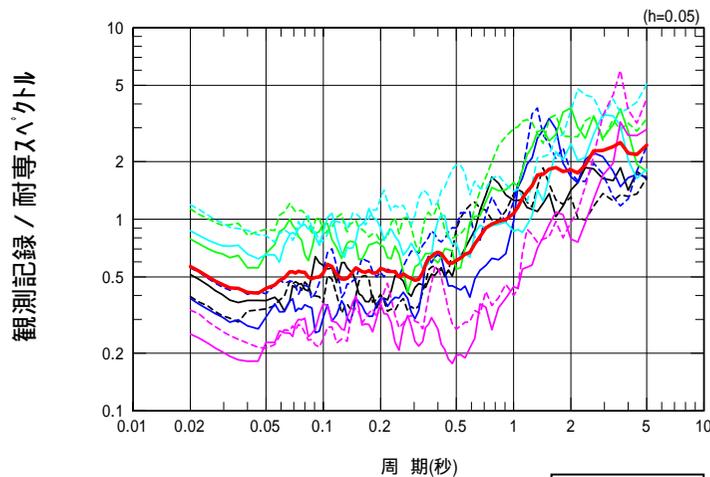
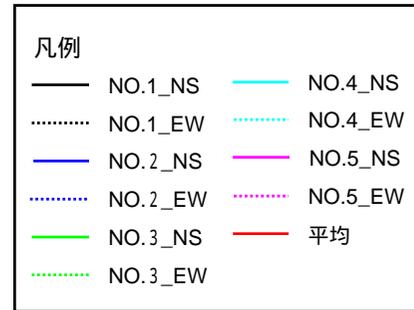


検討に用いた地震の震央分布

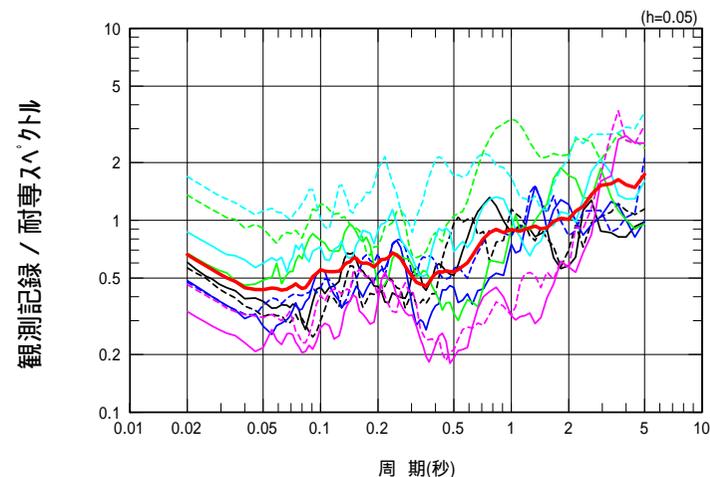
耐専スペクトルとの比率

(解放基盤表面における推定波 / 耐専スペクトル < 内陸補正なし >)

1号機平均, 5号機平均ともに,
耐専スペクトルとの比率が,
1秒より短い周期帯で1を下回る



1号機

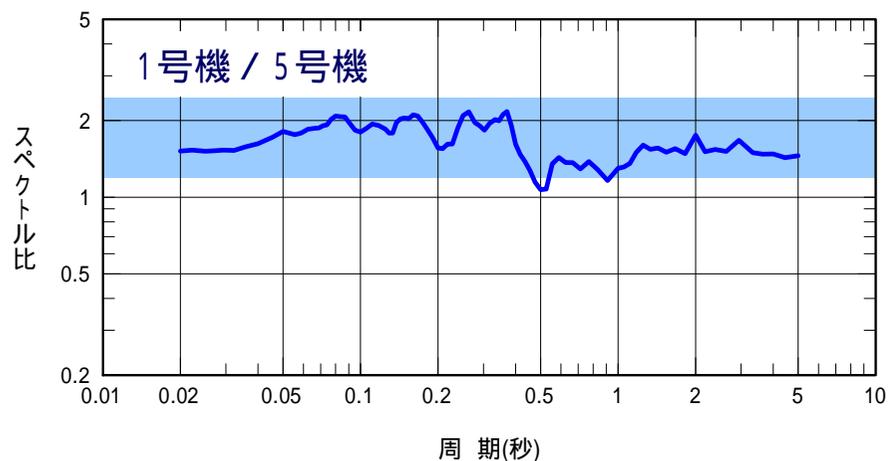


5号機

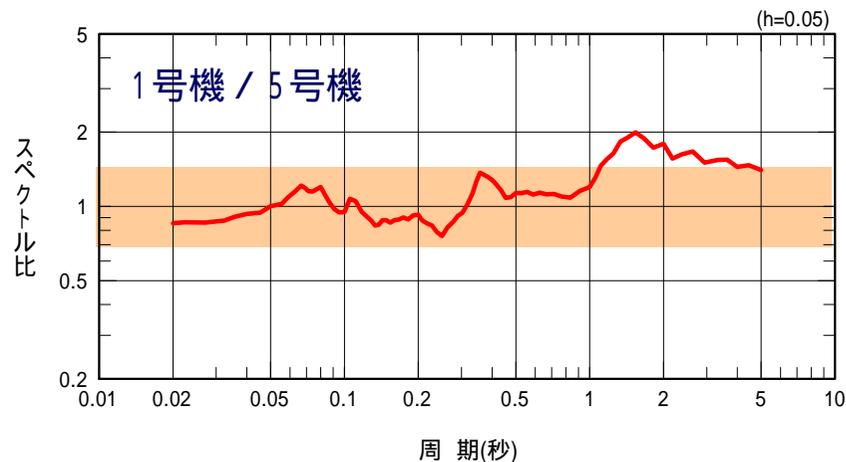
海域および陸域を震源とする地震では、
スペクトル比（1号機 / 5号機）の傾向が異なる

海域を震源とする地震における比較

陸域を震源とする地震における比較



1号機平均 / 5号機平均
= 2倍程度



1号機平均 5号機平均

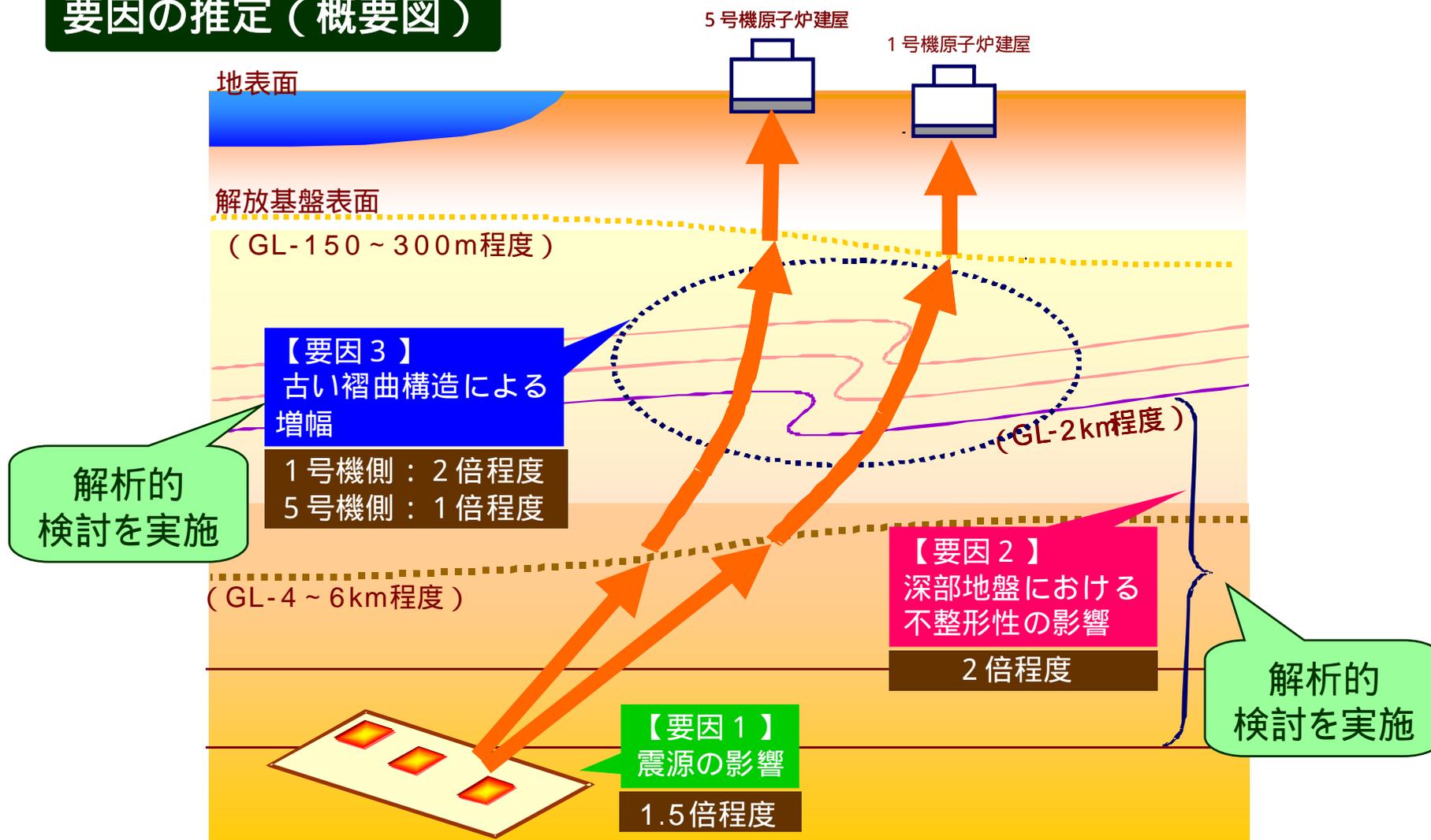
観測記録に基づく検討のまとめ

- 中越沖地震における敷地内の解放基盤表面における推定波は，NS方向とEW方向ともに，耐専スペクトル^{*1}（内陸補正^{*2}なし）と比較して大きい
- 中越沖地震における敷地内の解放基盤表面における推定波は，耐専スペクトル^{*1}（内陸補正^{*2}なし）と比較すると，1～4号機側で4倍程度，サービスホールで3倍程度，5～7号機側で2倍程度の差がある
- 海域および陸域を震源とする地震では，敷地内の地震動の増幅率の傾向は異なる
- 1号機と5号機を比較すると，海域を震源とする地震では，2：1程度であるのに対し，陸域を震源とする地震では，ほとんど差がみられない

¹耐専スペクトル：Noda et al.(2002)に基づく応答スペクトル手法

²内陸補正：内陸地震を対象とした補正

要因の推定（概要図）



倍数は、耐専スペクトル¹との比率

¹耐専スペクトル：Noda et al.(2002)に基づく応答スペクトル手法

(2) 「古い褶曲構造での増幅 (要因 3)」の解析検討

「古い褶曲構造での増幅（要因3）」の解析検討の概要

■ 2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析の検討

● 2次元不整形地盤のモデル化

敷地内の地質調査結果および既往の地質調査資料 を用いて
地盤をモデル化（バランス断面法による確認）

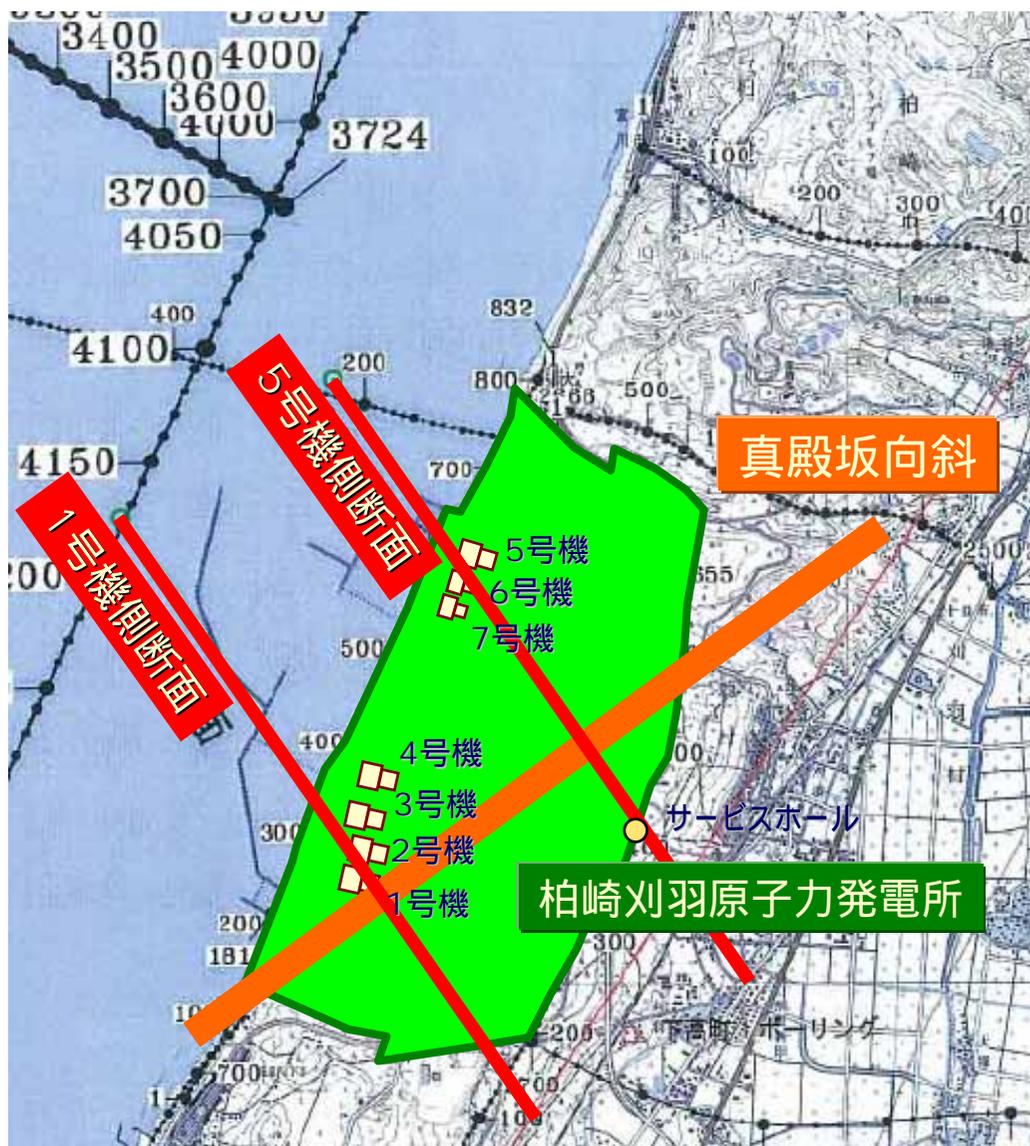
● 地盤応答解析

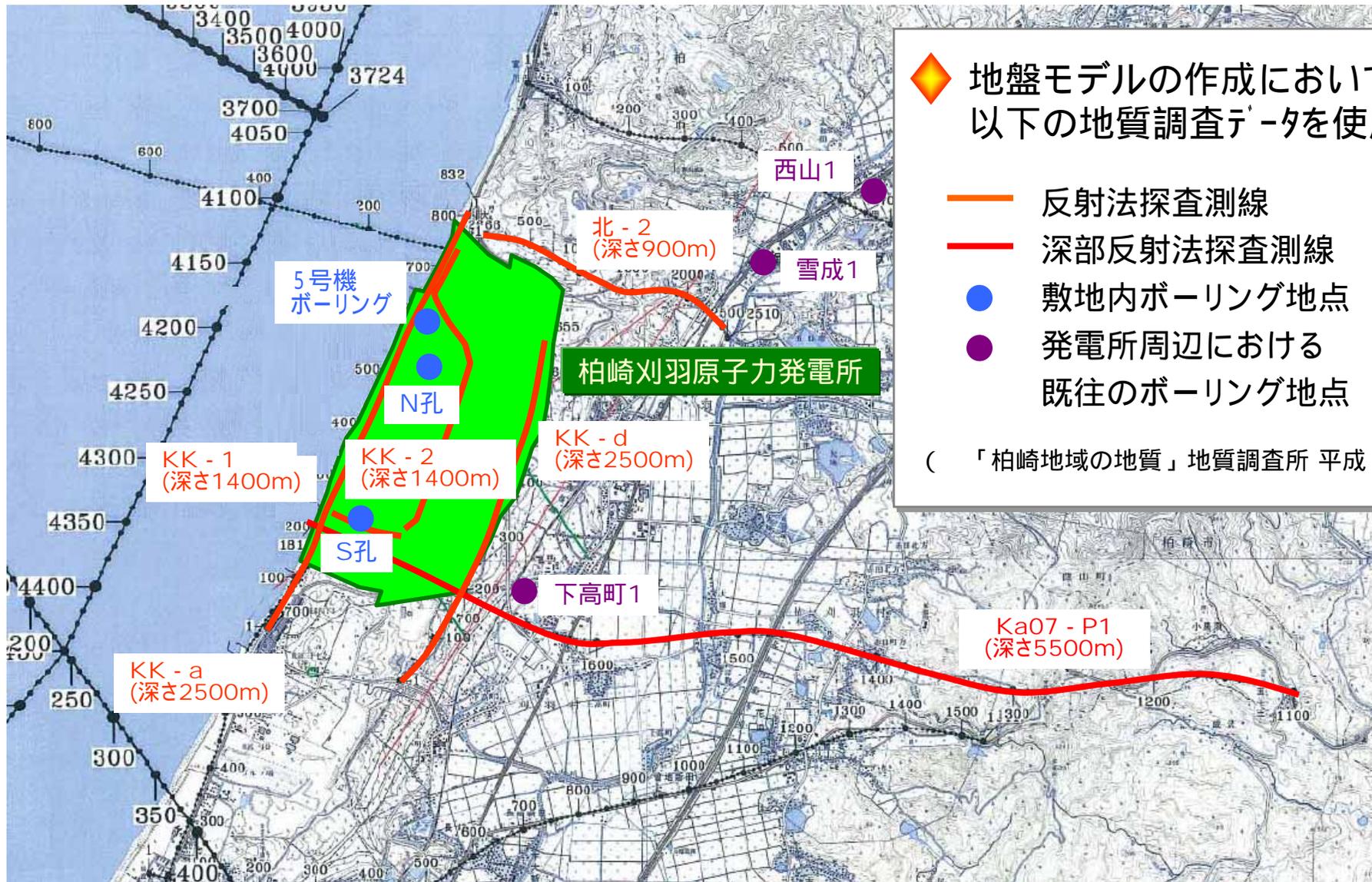
各アスペリティの方位角および入射角を考慮した応答特性の検討

5号機解放基盤表面における推定波をコントロール波とした1号機
解放基盤表面における推定波およびサービスホール解放基盤表面に
おける推定波のシミュレーション解析

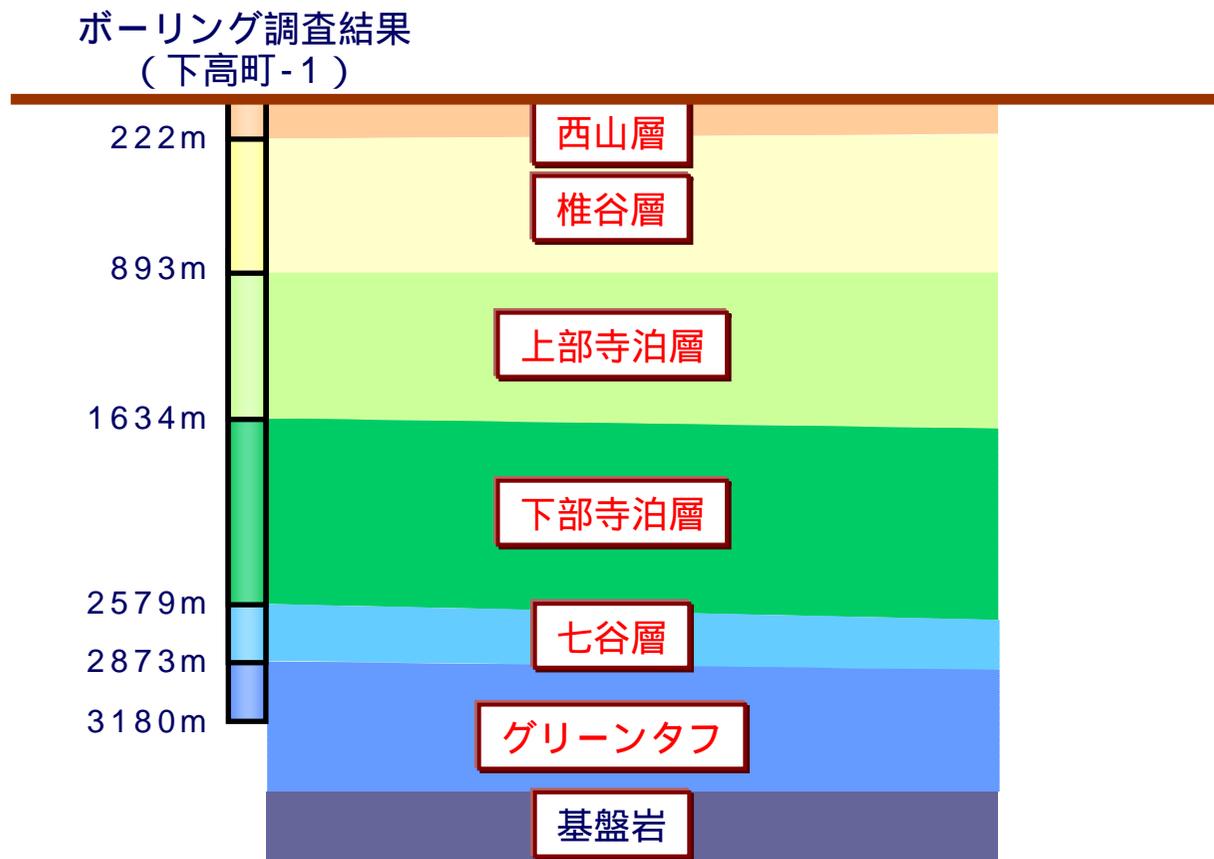
（ 「柏崎地域の地質」地質調査所 平成7年 ）

- ◆ 1号機側・5号機側にモデル化の断面を設定
- ◆ モデル化の断面は真殿坂向斜の向斜軸に直交する方向に設定

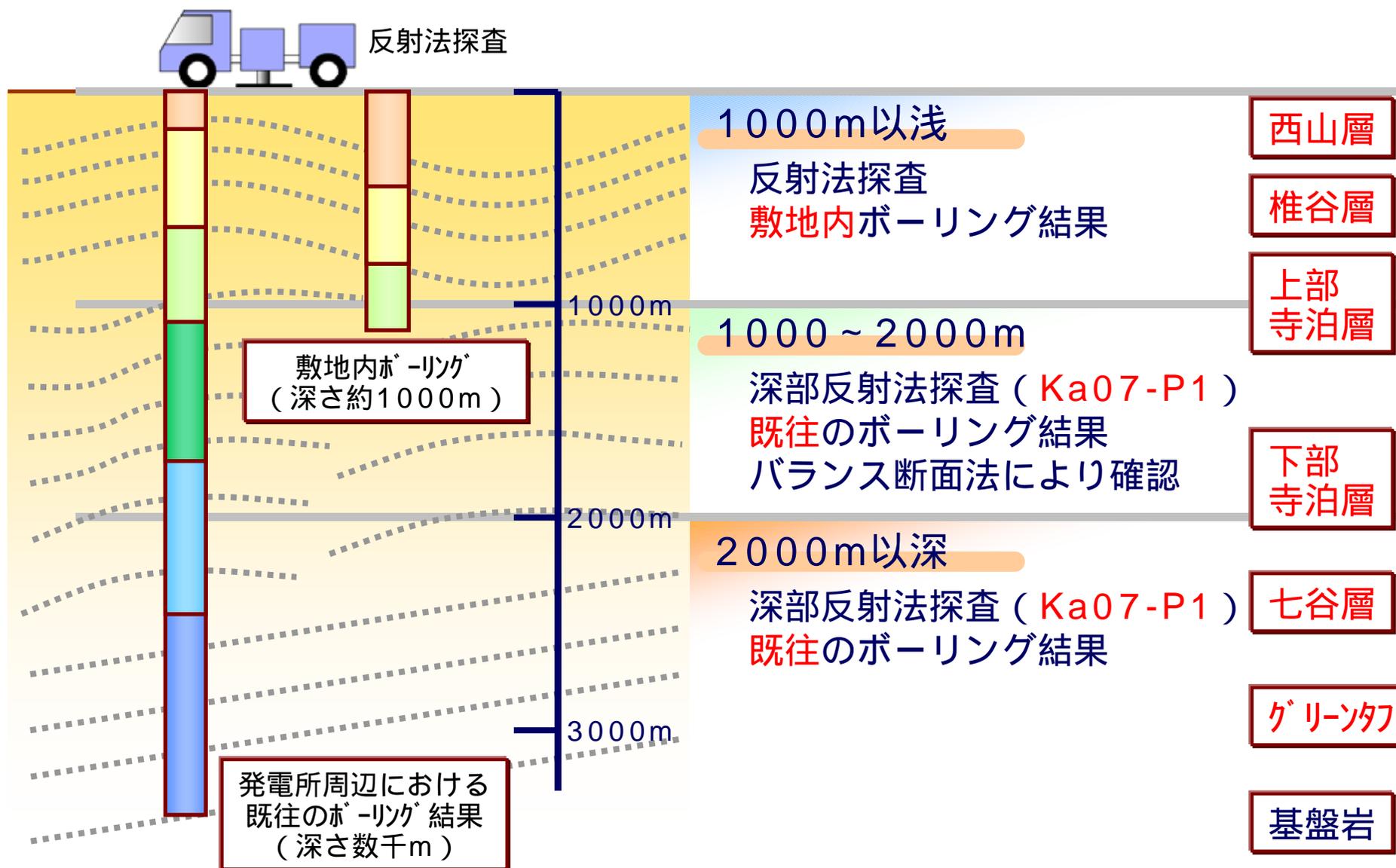




- ◆ 敷地周辺で実施された既往のボーリング調査結果 より地層種別を設定



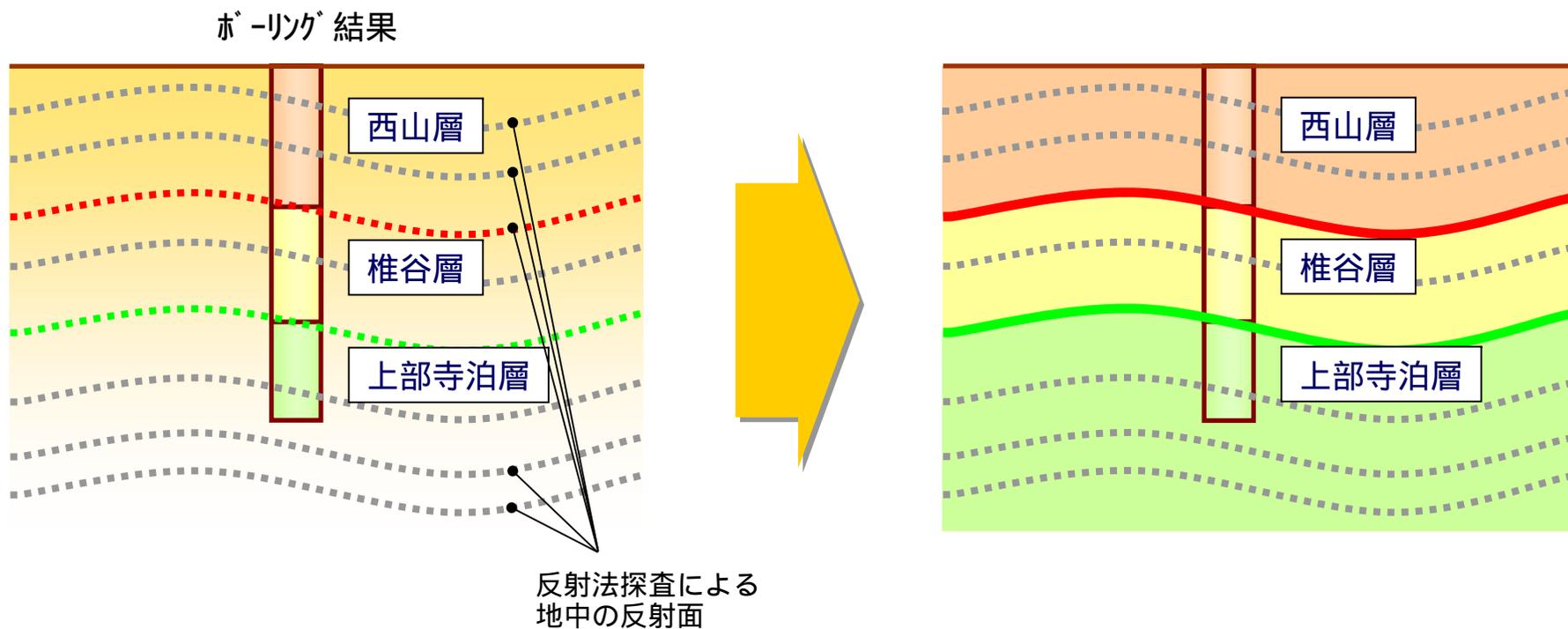
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化に使用した情報



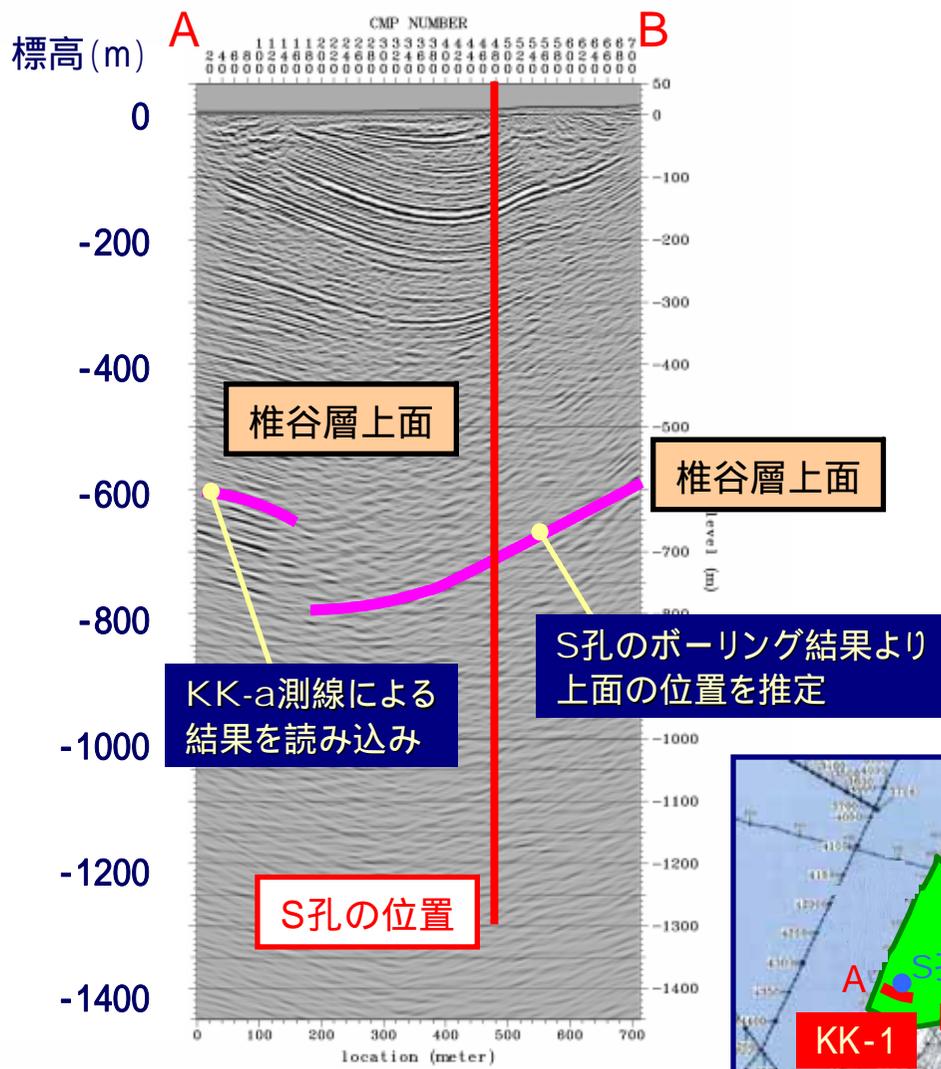
(「柏崎地域の地質」地質調査所 平成7年)

1000m以浅のモデル化

- ◆ 西山層・椎谷層・上部寺泊層の上面を決定
- ◆ 敷地内ボーリング結果（約1000m）より層境界を設定
- ◆ 反射法探査の反射断面に基づき地質構造を設定



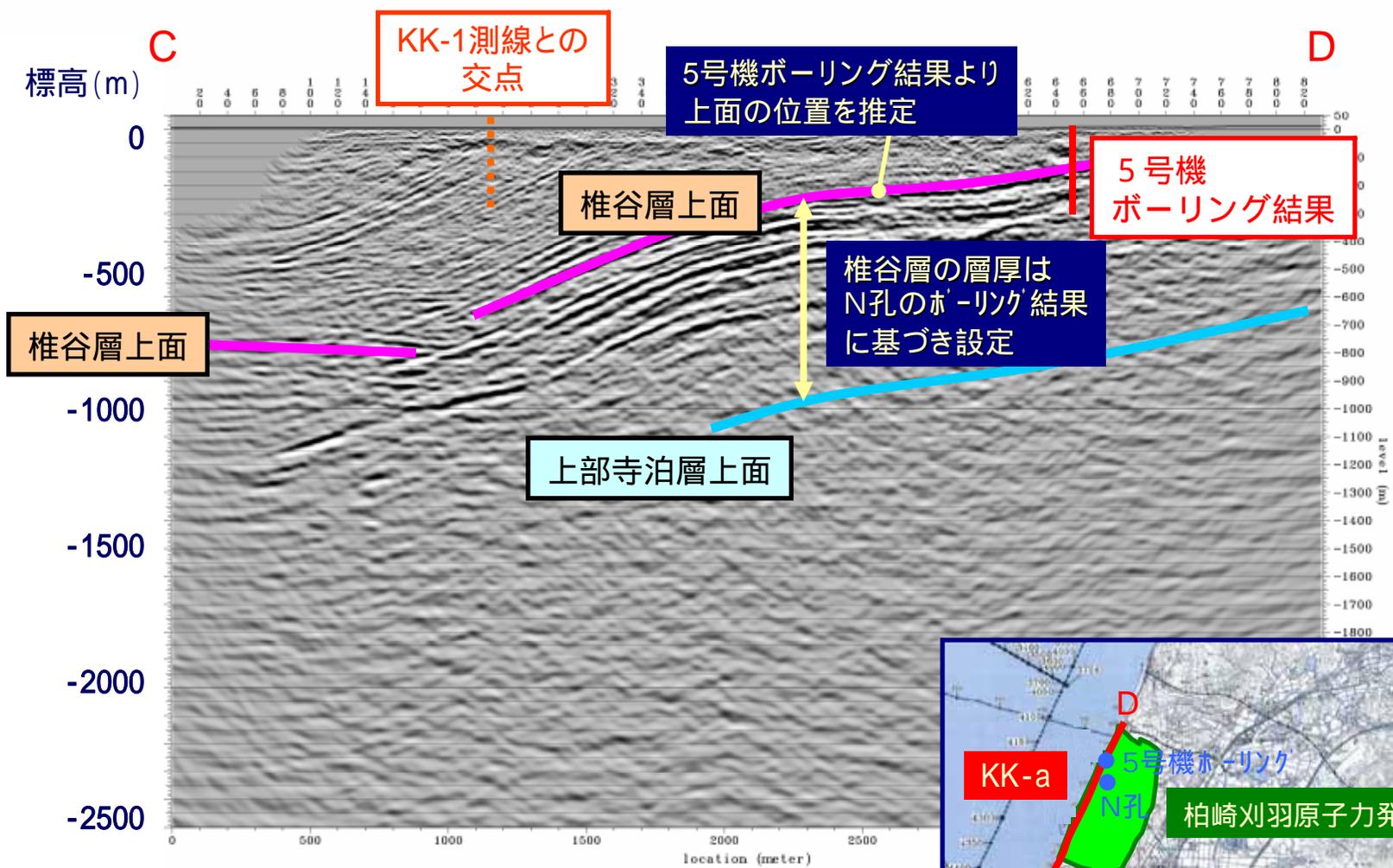
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化の方法



【KK-1測線】



2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化の方法



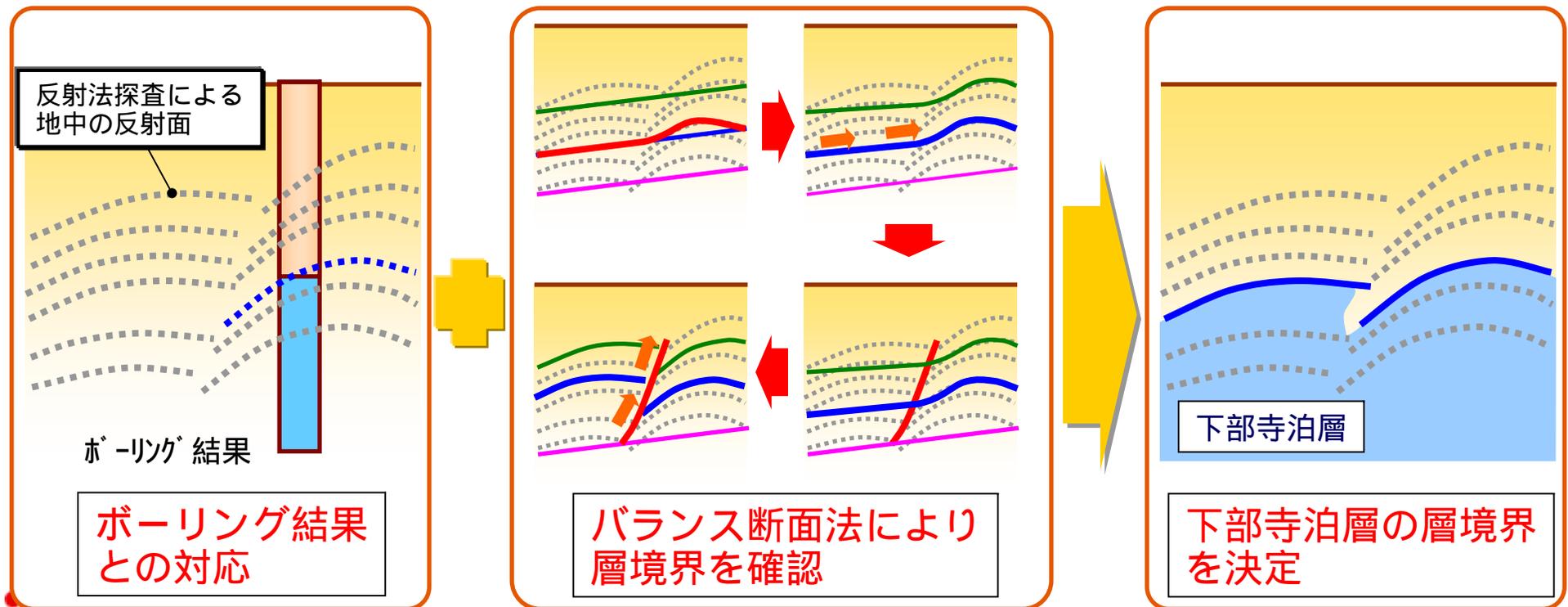
【KK-a測線】

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化の方法

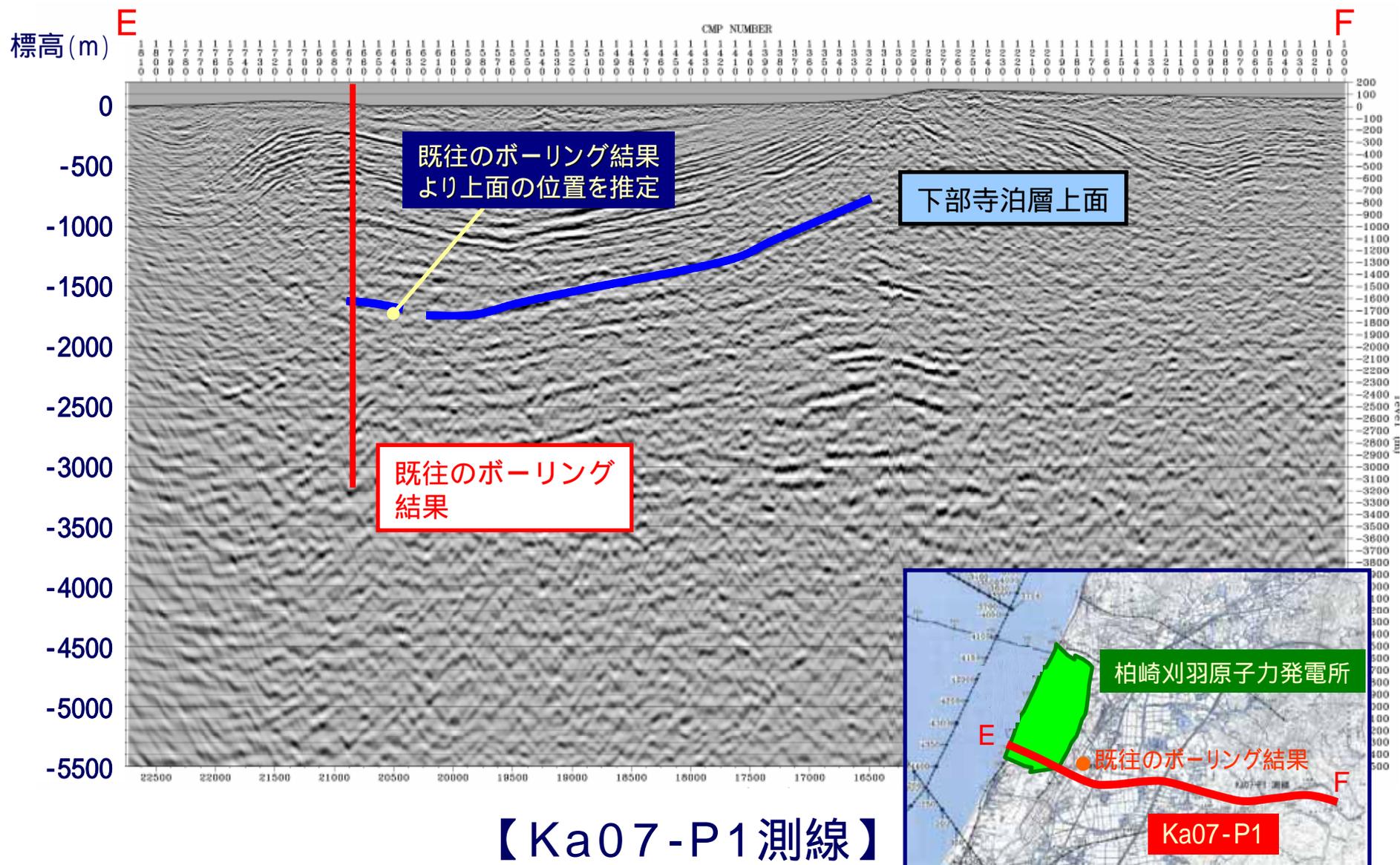
1000～2000mのモデル化

- ◆ 下部寺泊層の上面を決定
- ◆ 既往のボーリング結果（数千m）により層境界を設定
- ◆ 深部反射法探査の反射断面に基づき地質構造を設定
- ◆ バランス断面法により地質構造の妥当性を確認

（「柏崎地域の地質」地質調査所 平成7年）



2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化の方法



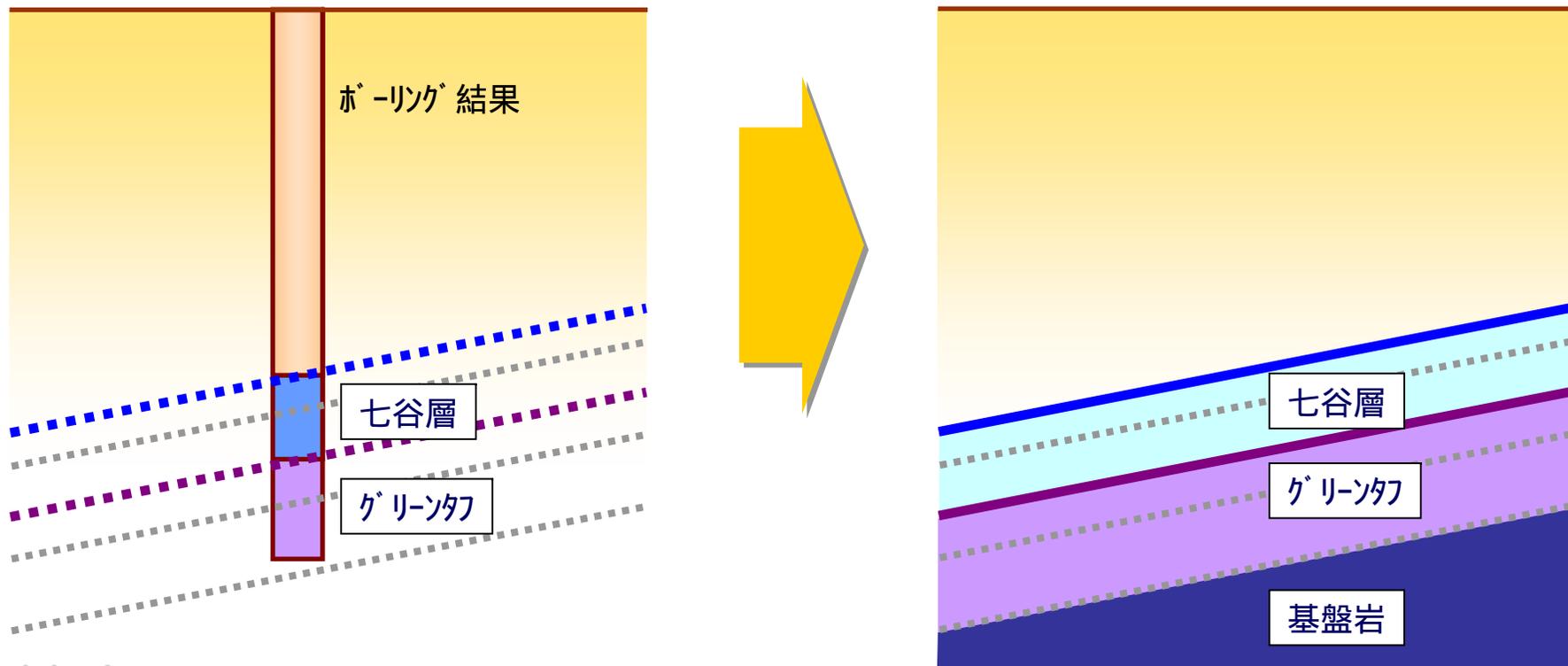
(「柏崎地域の地質」地質調査所 平成7年)

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化の方法

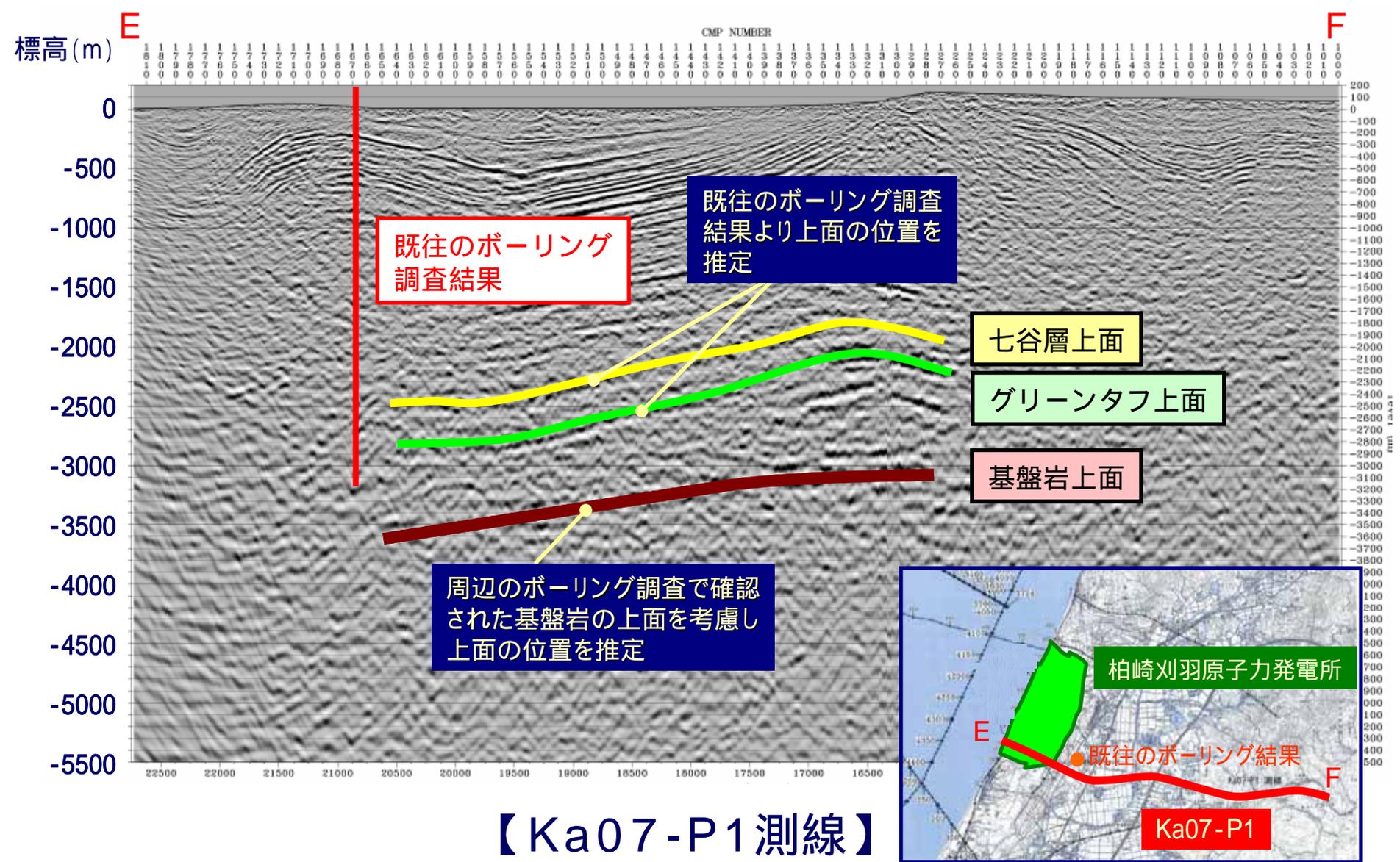
2000m以深のモデル化

(「柏崎地域の地質」地質調査所 平成7年)

- ◆ 七谷層・グリーンタフ・基盤岩の上面を決定
- ◆ 緩やかに傾斜した平行成層地盤と仮定
- ◆ 既往のボーリング結果（数千m）により層境界を設定
- ◆ 深部反射法探査による反射断面により地質構造を設定

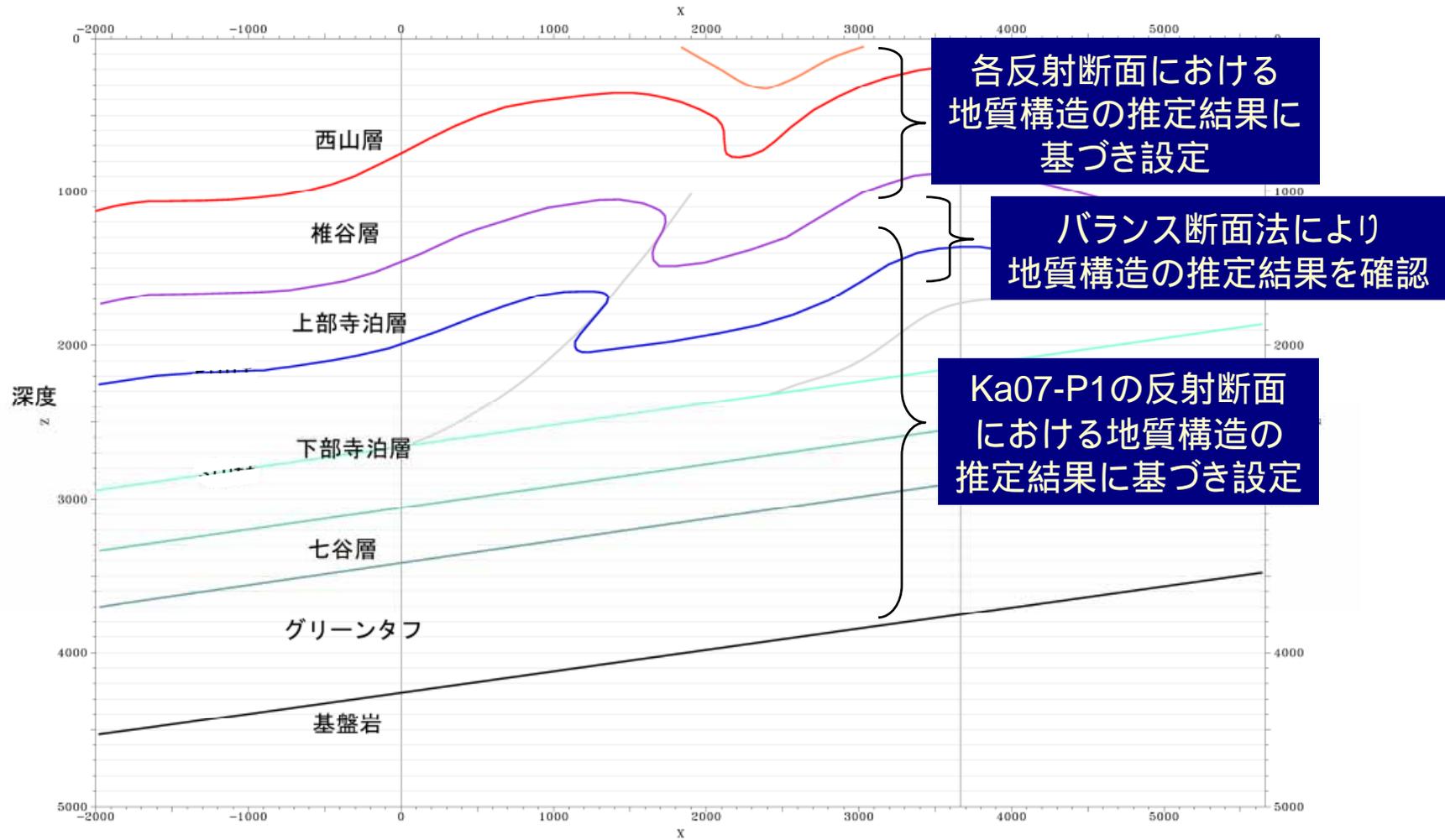


2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 モデル化の方法

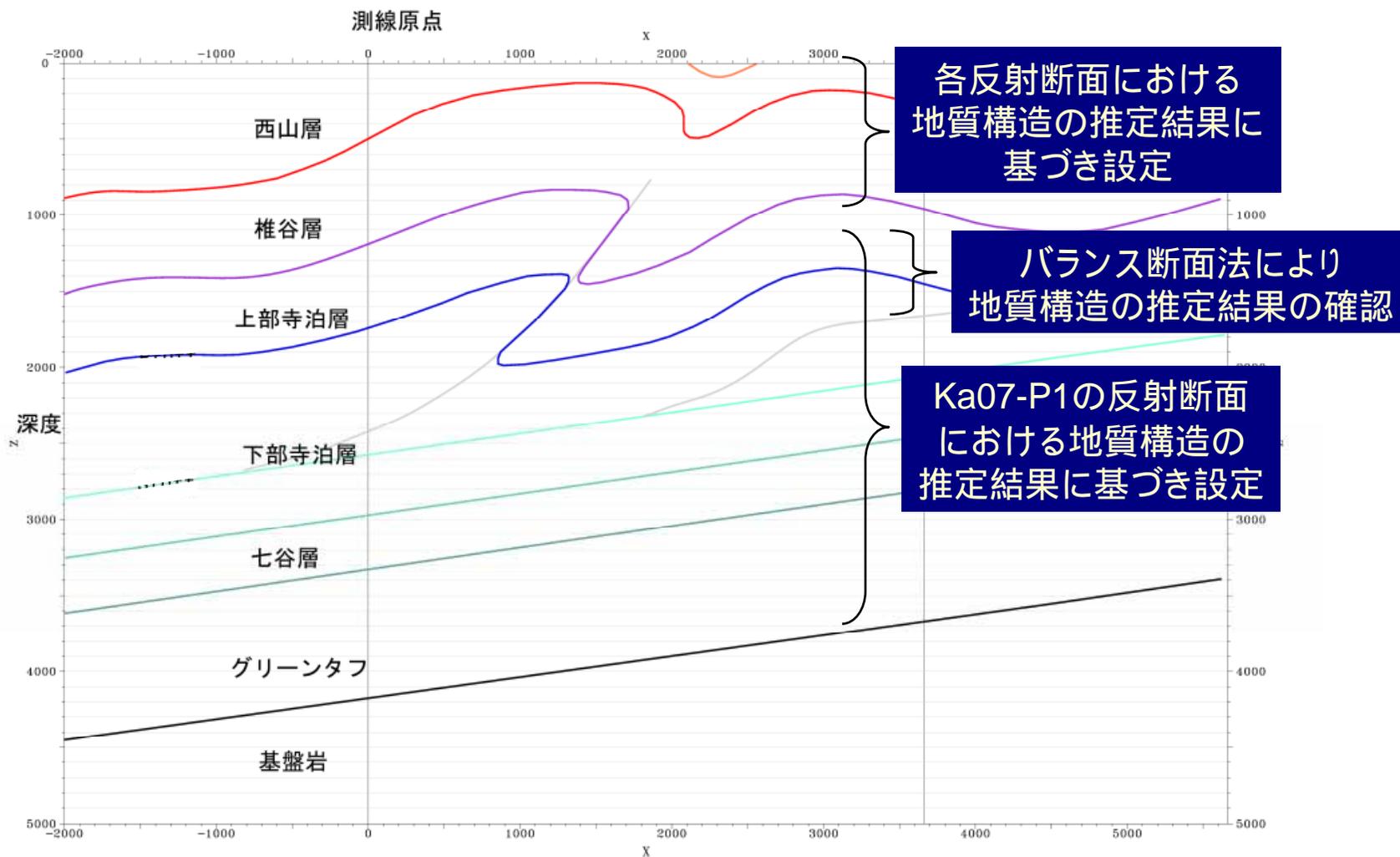


(「柏崎地域の地質」地質調査所 平成7年)

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 1号機側断面

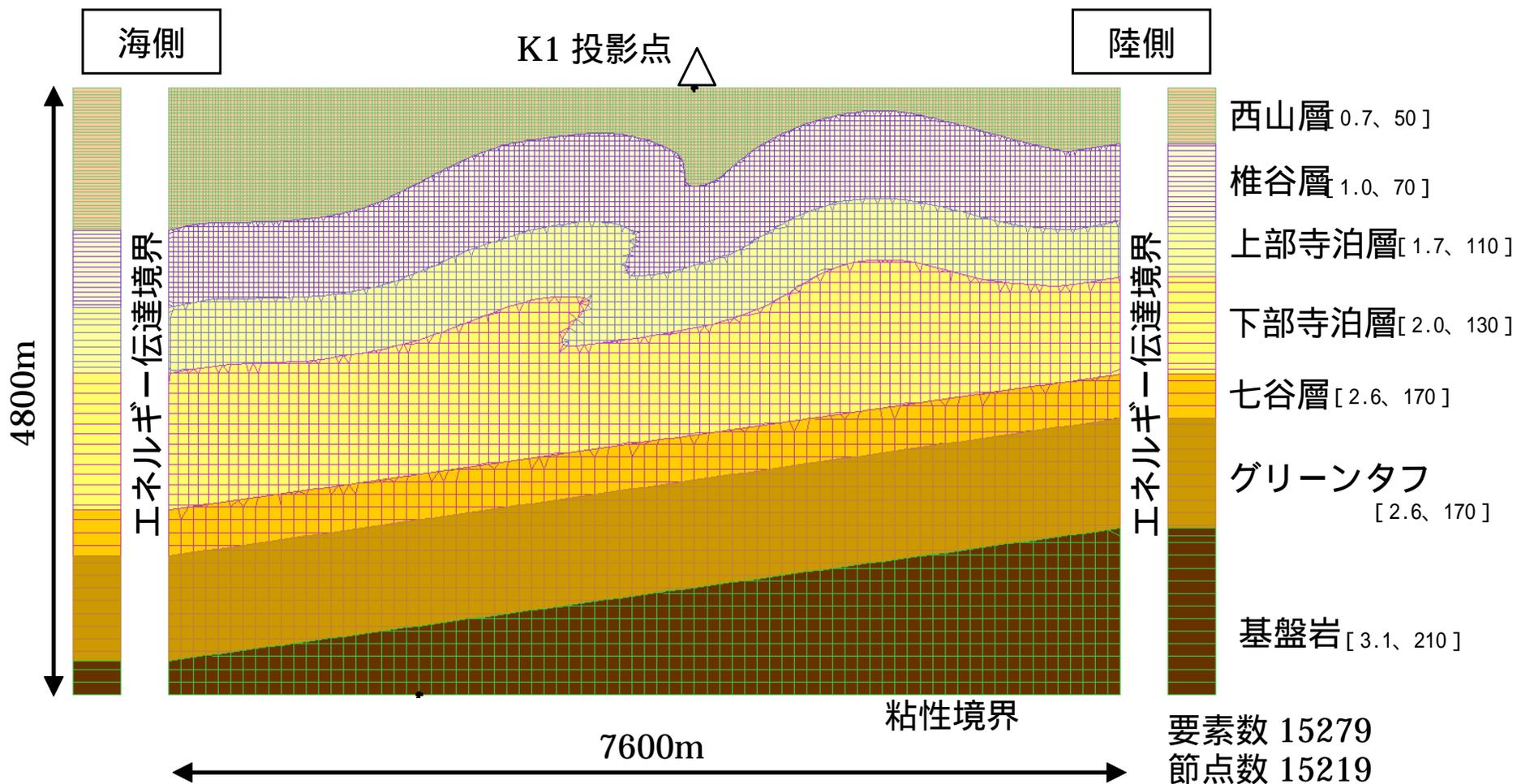


2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 5号機側断面



2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 地盤モデル

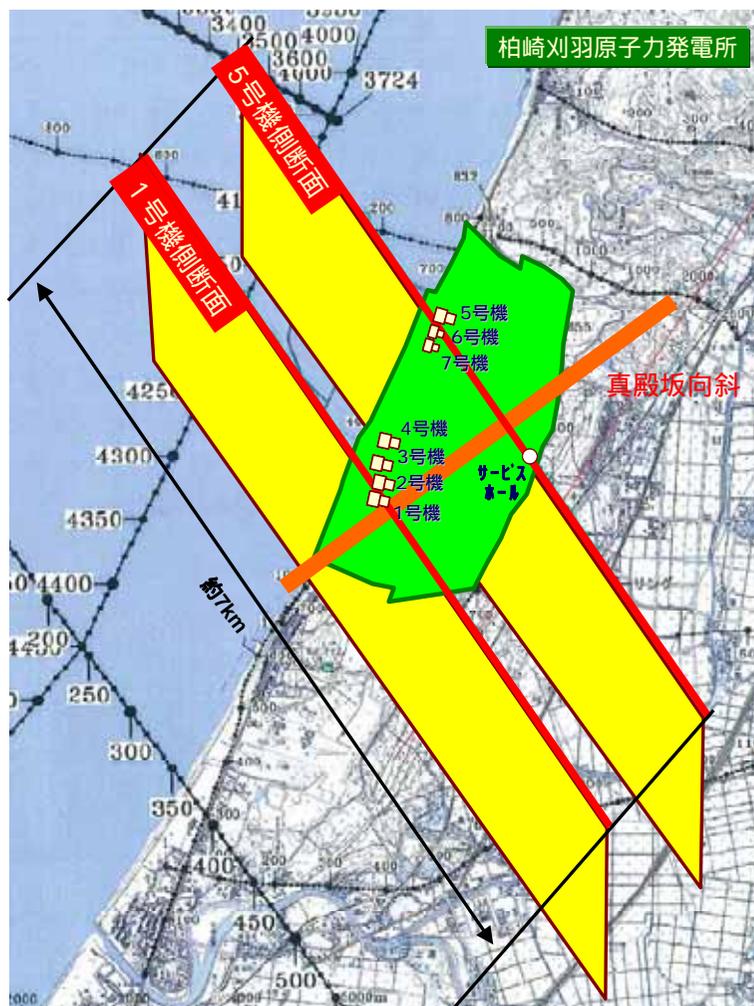
FEMメッシュモデル



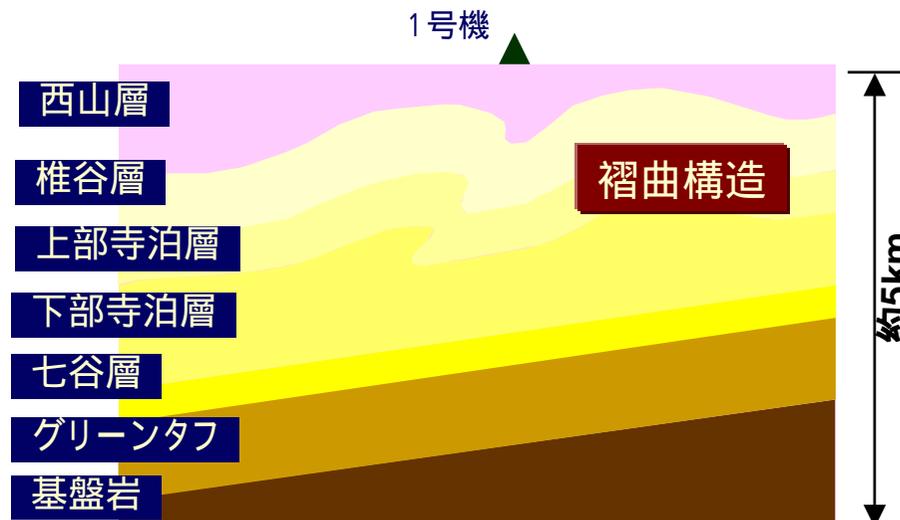
1号機側断面

凡例：[Vs(km/s)、Q値]
対象振動数：0 ~ 5 Hz
地表面が解放基盤表面に相当

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 地盤モデル



地盤モデルのイメージ図



1号機側断面

約7km

5号機

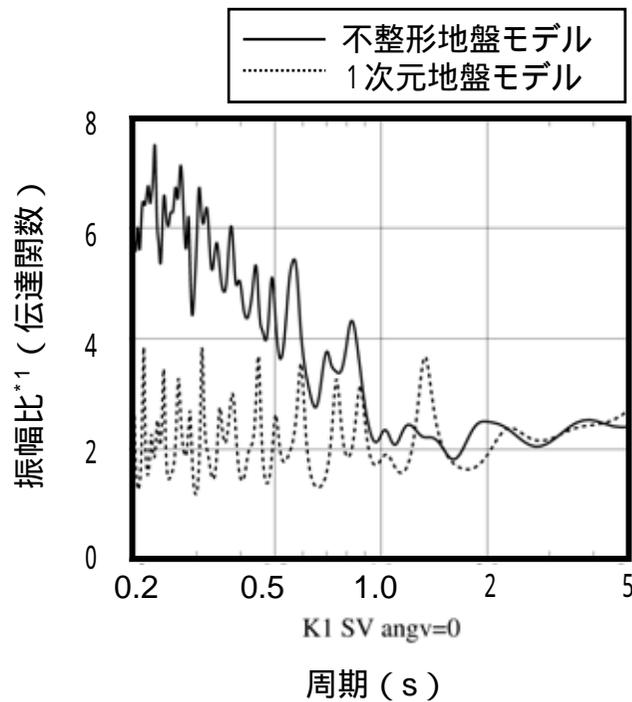
サービスホール



5号機側断面

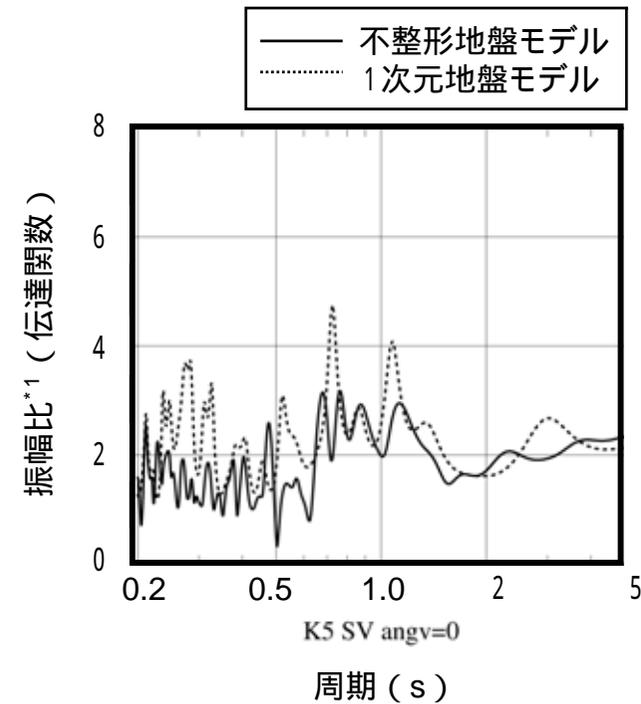
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 基本特性の検討(1)

SV波鉛直入射時の面内応答解析により，地盤不整形の影響を検討



1次元地盤モデル < 不整形地盤モデル

1号機地点



1次元地盤モデル < 不整形地盤モデル

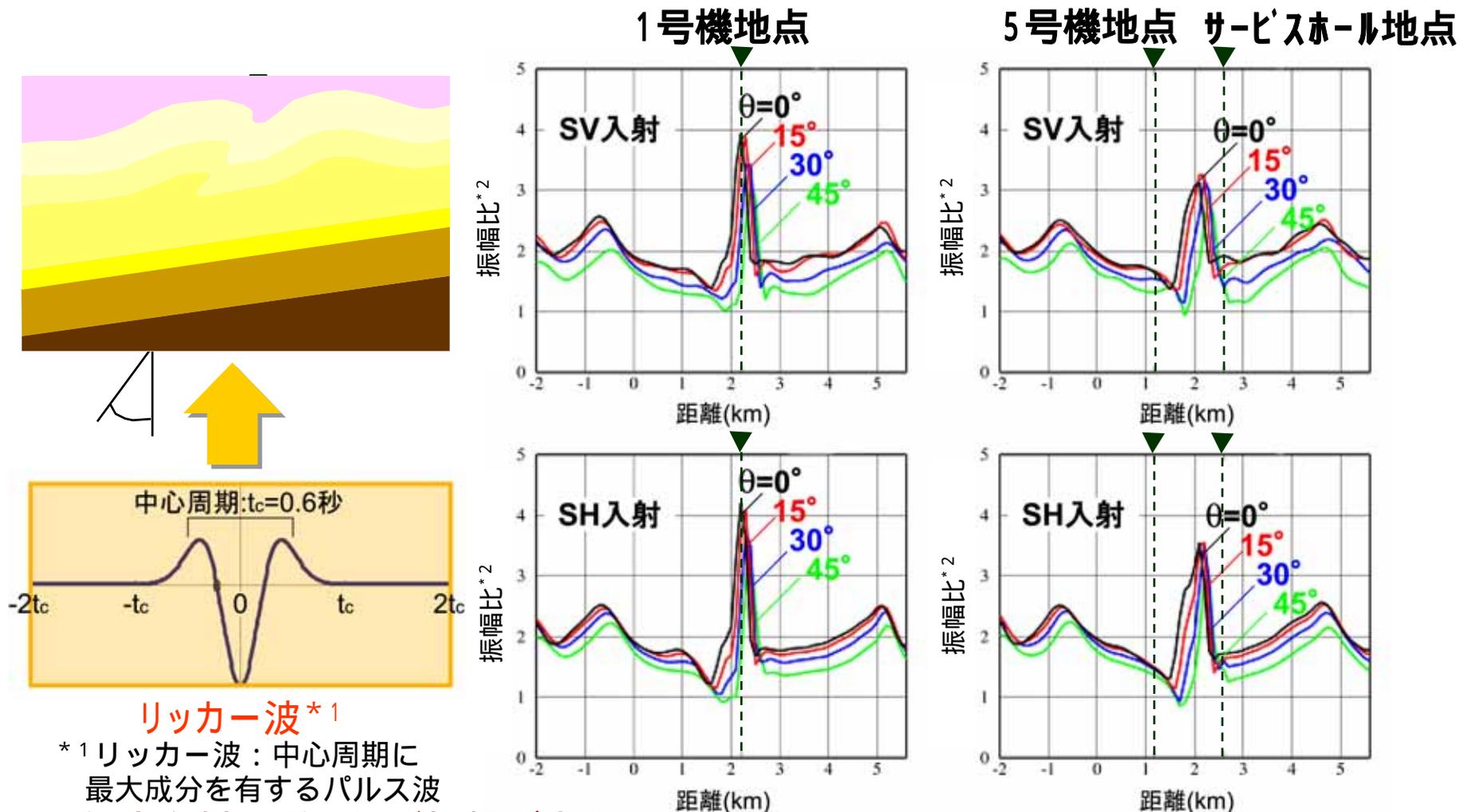
5号機地点

1号機地点は不整形の影響が大きい

* 1 振幅比：地盤モデルの上端 / 地盤モデルの下端

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 基本特性の検討(2)

中心周期0.6秒リックカー波*1を入射し，解放基盤表面の最大応答を検討（ θ ：入射角）



リックカー波*1

*1リックカー波：中心周期に最大成分を有するパルス波

・鉛直入射に近いほど振幅が大きい

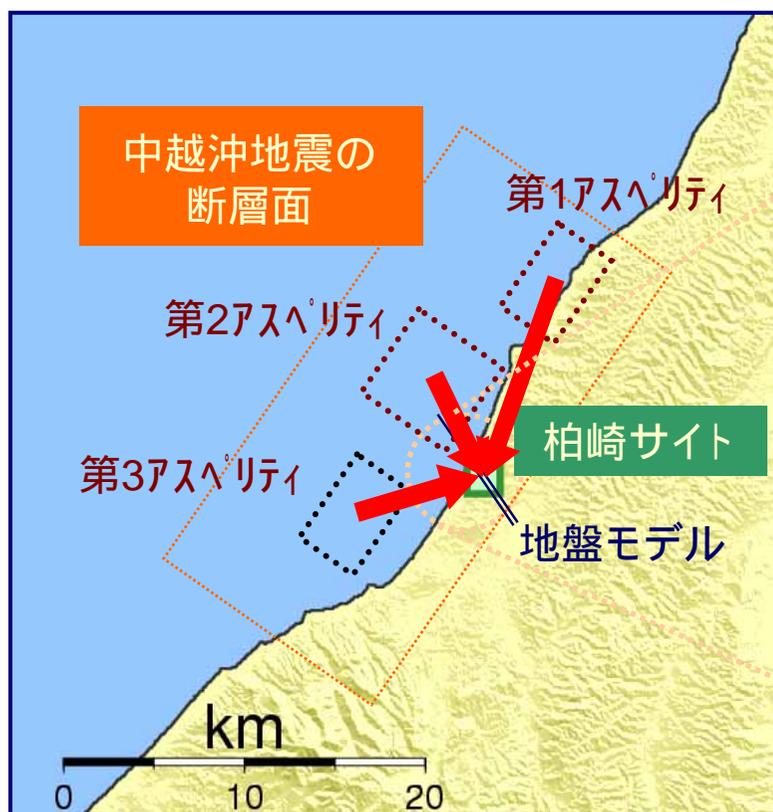
*2振幅比：地盤モデルの上端 / 地盤モデルの下端

・1号機地点はピーク位置に対応，5号機・サービスホール地点はずれている

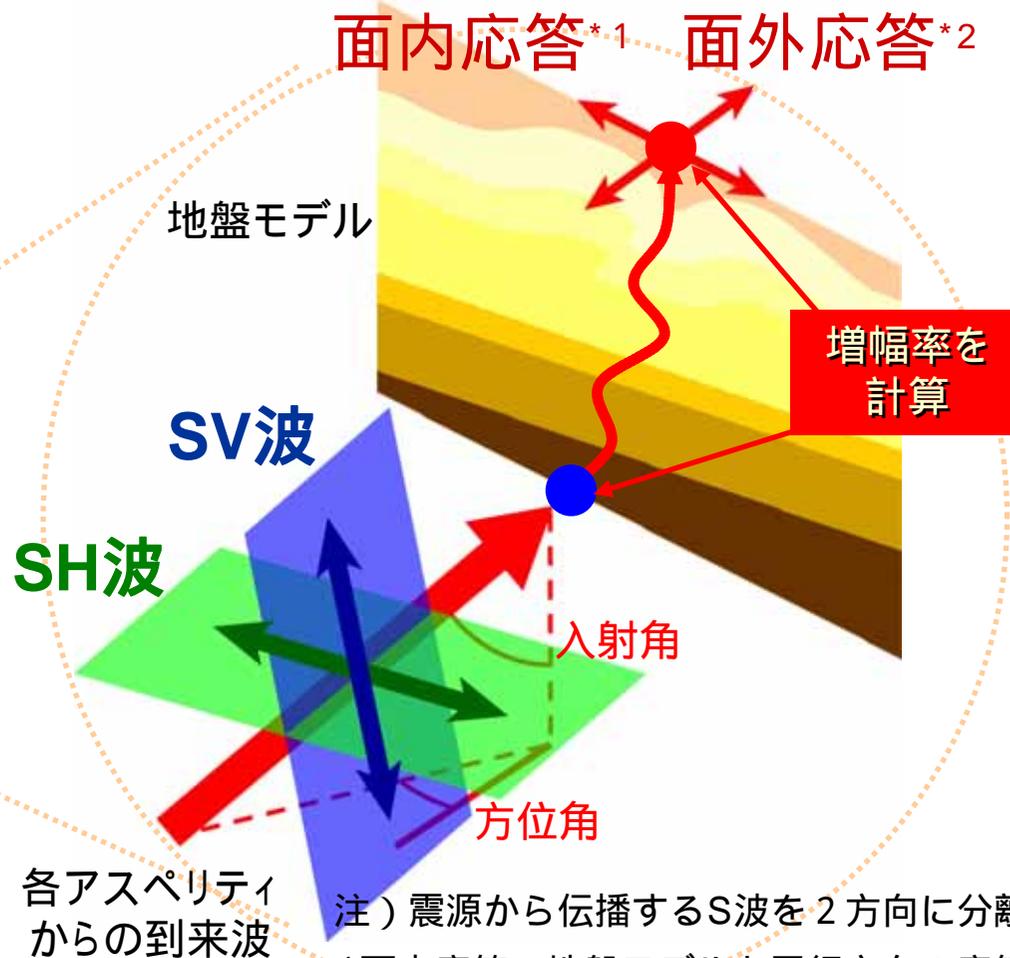
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 周波数応答解析(1)

入力地震動の入射角・方位角について

中越沖地震の各アスペリティ位置から到来する地震波を想定し、
斜め入射角及び方位入射角を設定



注) アスペリティの位置は当社検討モデルによる



注) 震源から伝播するS波を2方向に分離

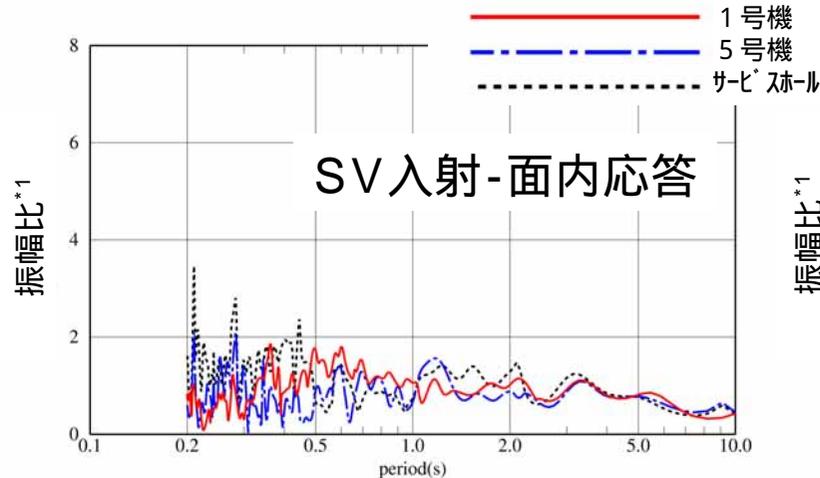
1 面内応答: 地盤モデルと平行方向の応答

2 面外応答: 地盤モデルと直交方向の応答

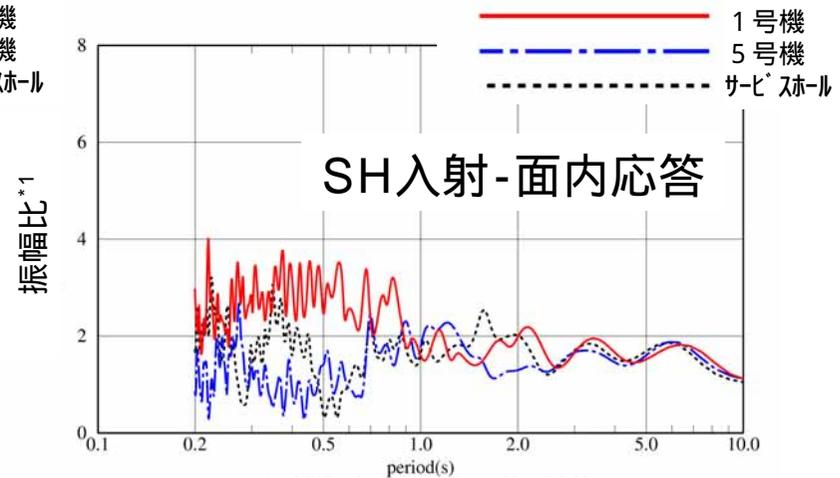
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 周波数応答解析(2)

第1アスペリティ方向からのS波入射

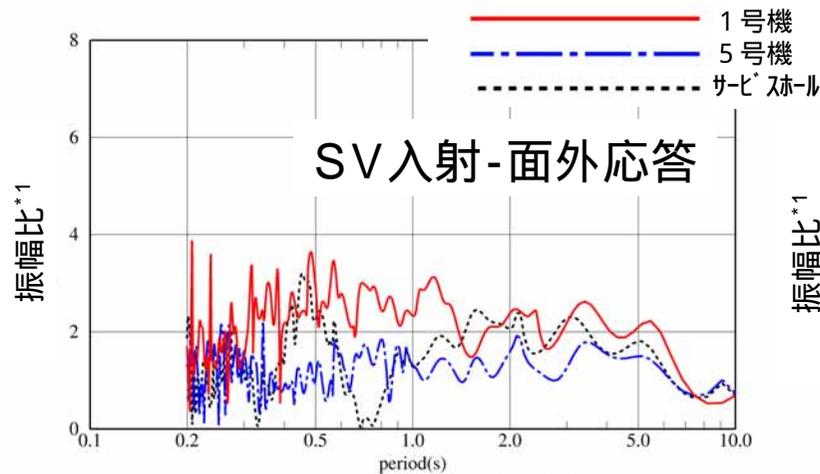
1号機と5号機で大きな差はみられない



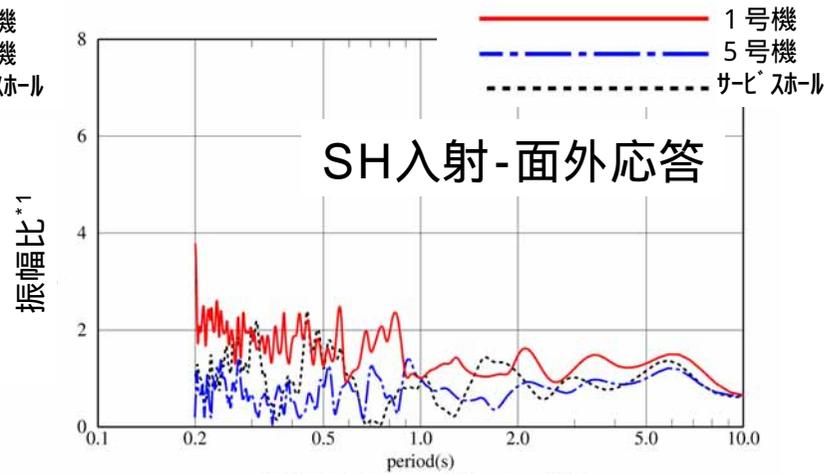
(a) SV UX angv=+46 angh=+150



(a) SH UX angv=+46 angh=+150



(b) SV UY angv=+46 angh=+150



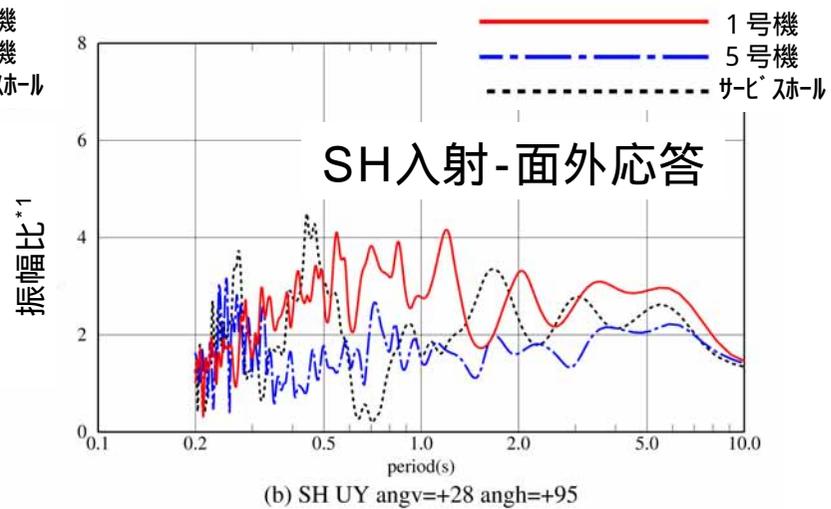
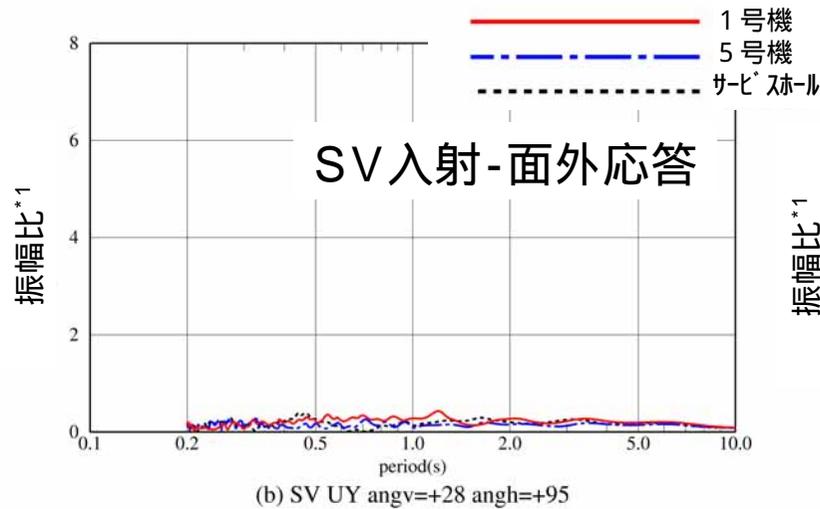
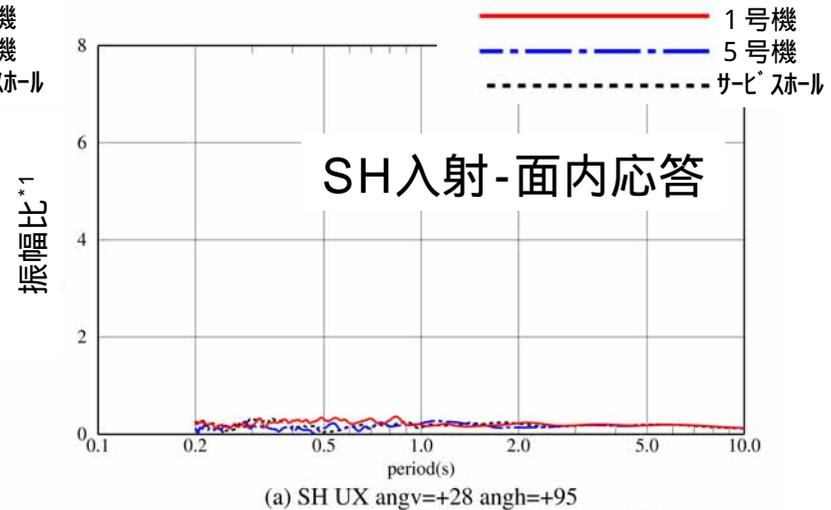
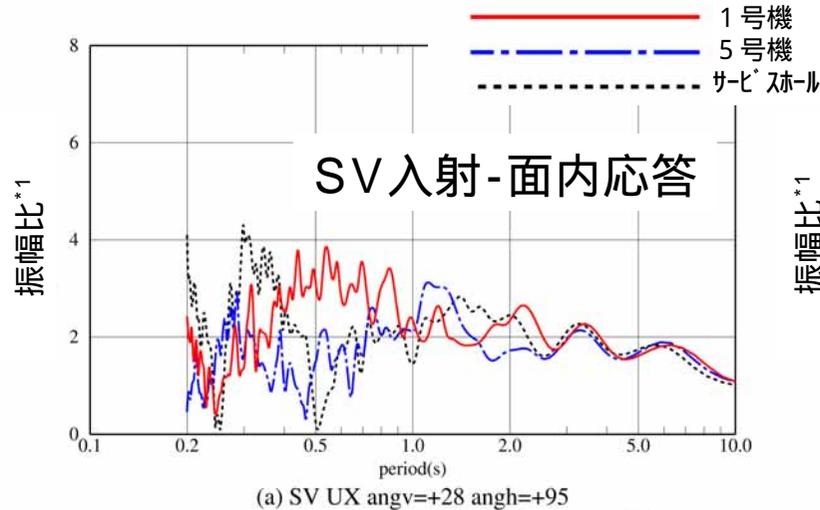
(b) SH UY angv=+46 angh=+150

(入射角：46°、方位角：150°) *1 振幅比：地盤モデルの上端 / 地盤モデルの下端

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 周波数応答解析(3)

第2アスペリティ方向からのS波入射

1号機と5号機で大きな差はみられない

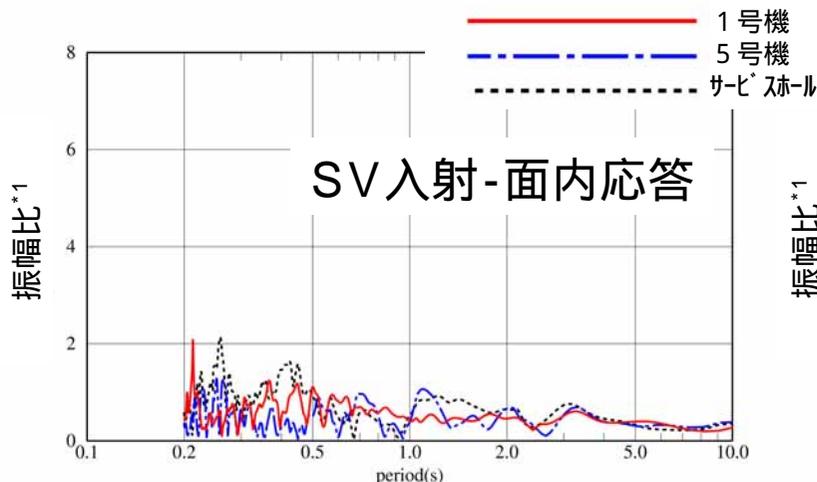


(入射角: 28°、方位角: 95°) *1 振幅比: 地盤モデルの上端 / 地盤モデルの下端

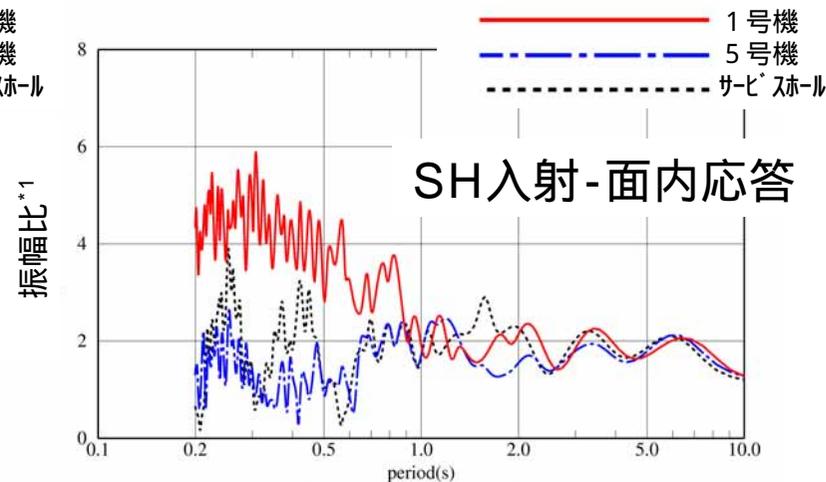
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 周波数応答解析(4)

第3アスペリティ方向からのS波入射

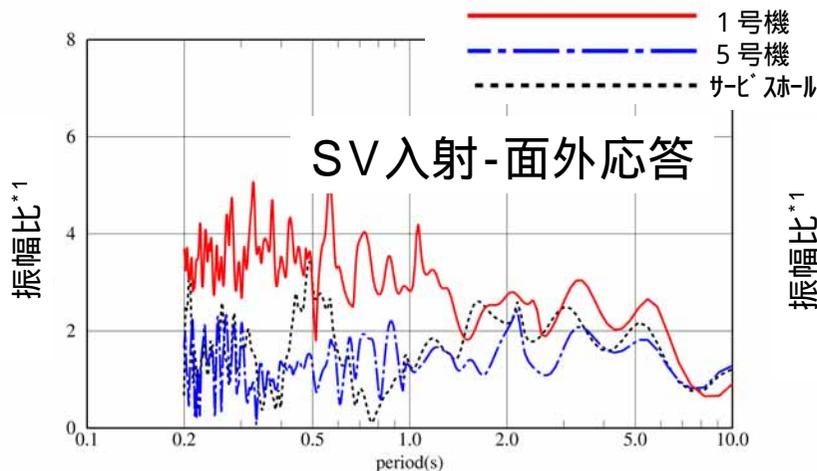
1号機と5号機で有意な差がある



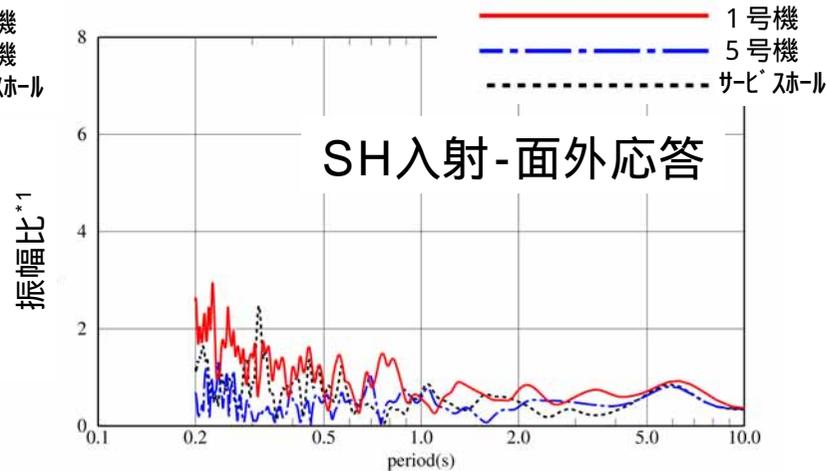
(a) SV UX angv=+45 angh=+15



(a) SH UX angv=+45 angh=+15



(b) SV UY angv=+45 angh=+15

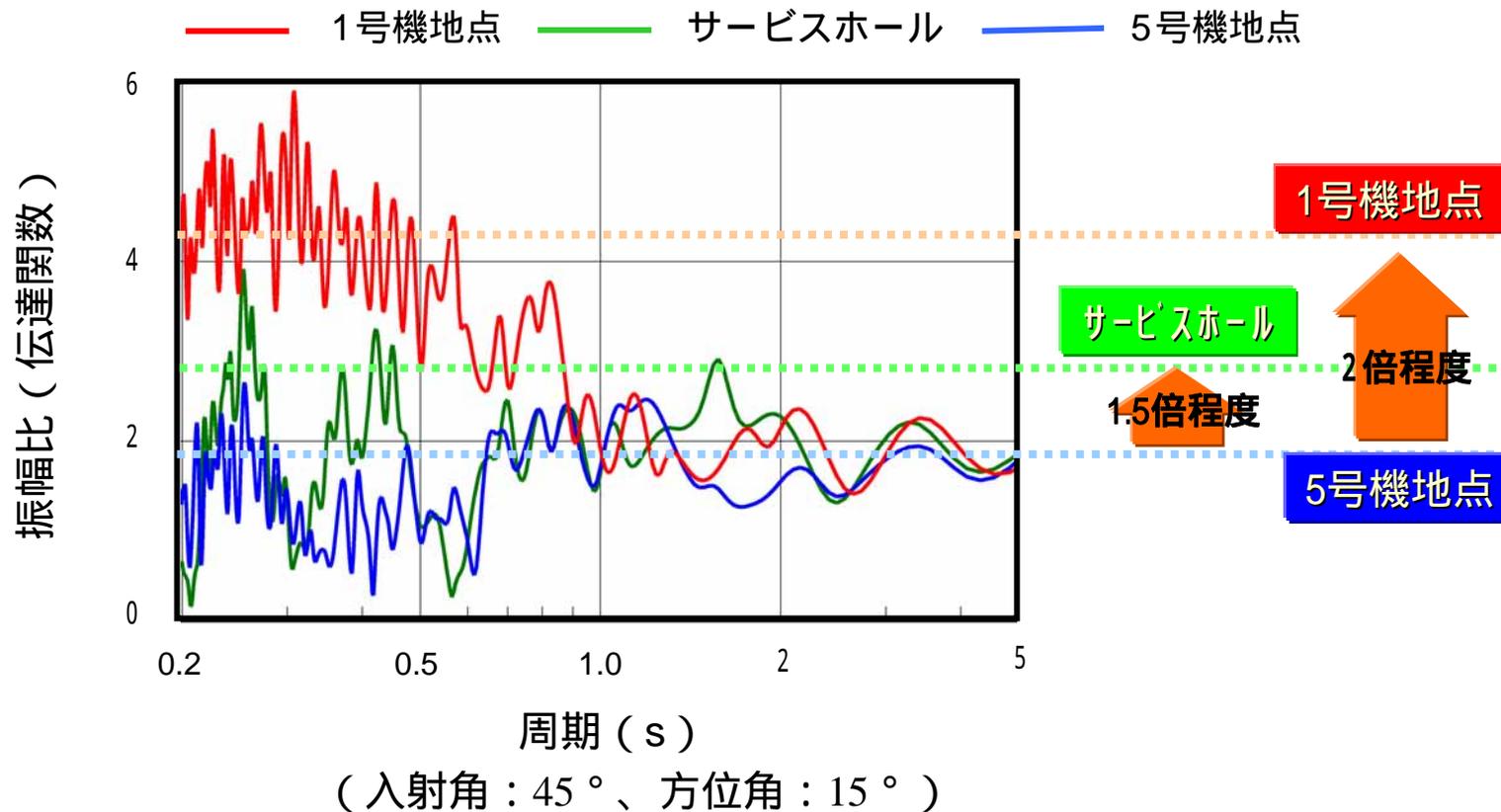


(b) SH UY angv=+45 angh=+15

(入射角：45°、方位角：15°) *1 振幅比：地盤モデルの上端 / 地盤モデルの下端

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 周波数応答解析(5)

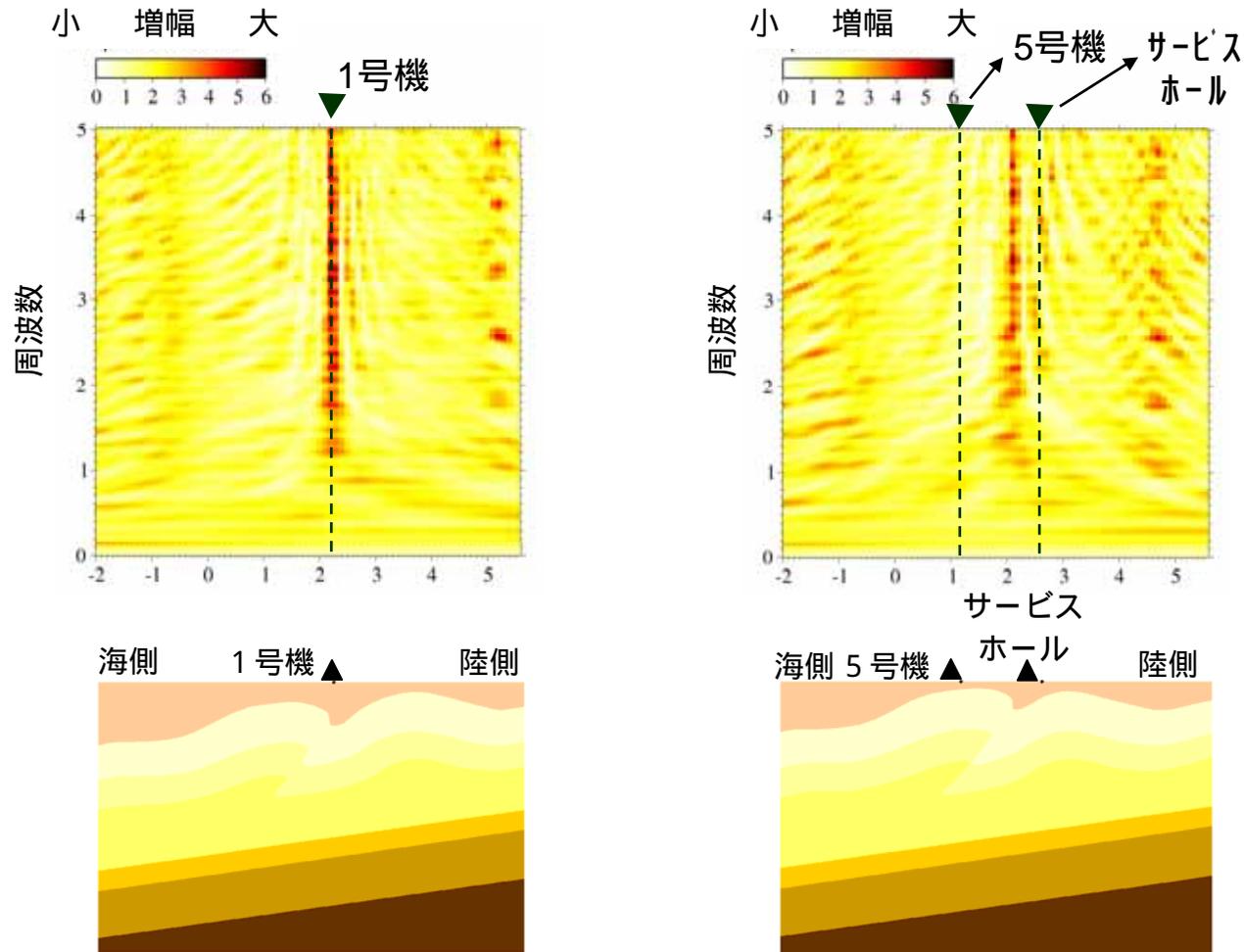
第3アスペリティから入射する地震動の地盤増幅特性



地盤モデル底部から入力した地震波がモデル上端に到達したときの増幅率

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 周波数応答解析(6)

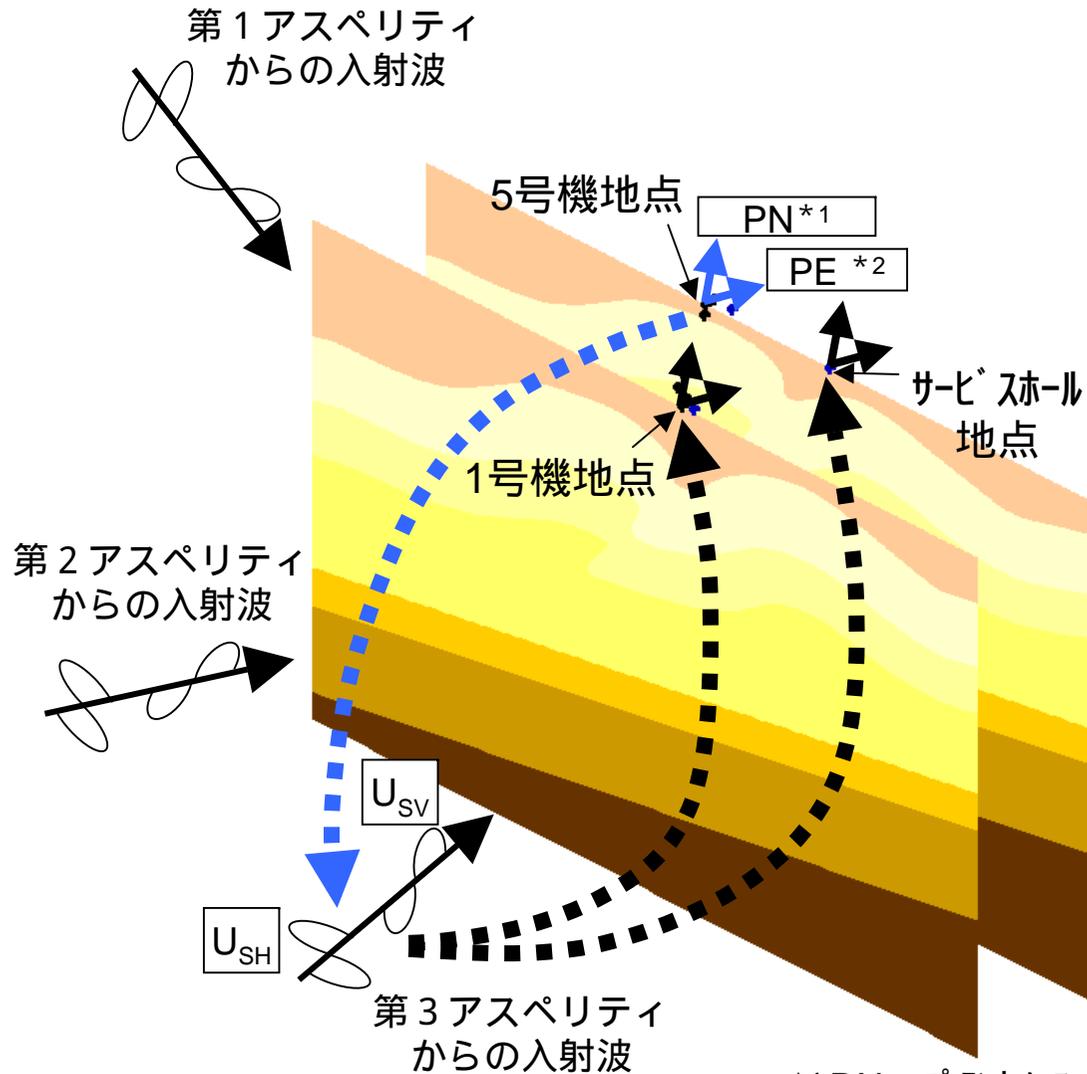
第3アスペリティ入射時の地盤増幅の空間分布 (SH入射-面内応答)



1号機付近では全周期帯にわたり増幅している

2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - シミュレーション解析(1)

解析方法



*1 PN : プラントノース
*2 PE : プラントイースト

入射波の算定

$$\begin{matrix} \text{既知} & & \text{既知} & & \text{入射波を逆算} \\ \left\{ \begin{matrix} U_{PN5} \\ U_{PE5} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} S_{NV5} & S_{NH5} \\ S_{EV5} & S_{EH5} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} U_{SV3} \\ U_{SH3} \end{matrix} \right\} \end{matrix}$$

5号機地点の
推定波 FEMによる
 伝達関数

1号機地点の地盤応答の算定

$$\left\{ \begin{matrix} U_{PN1} \\ U_{PE1} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} S_{NV1} & S_{NH1} \\ S_{EV1} & S_{EH1} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} U_{SV3} \\ U_{SH3} \end{matrix} \right\}$$

1号機地点
の地盤応答 FEMによる 入射波
 伝達関数

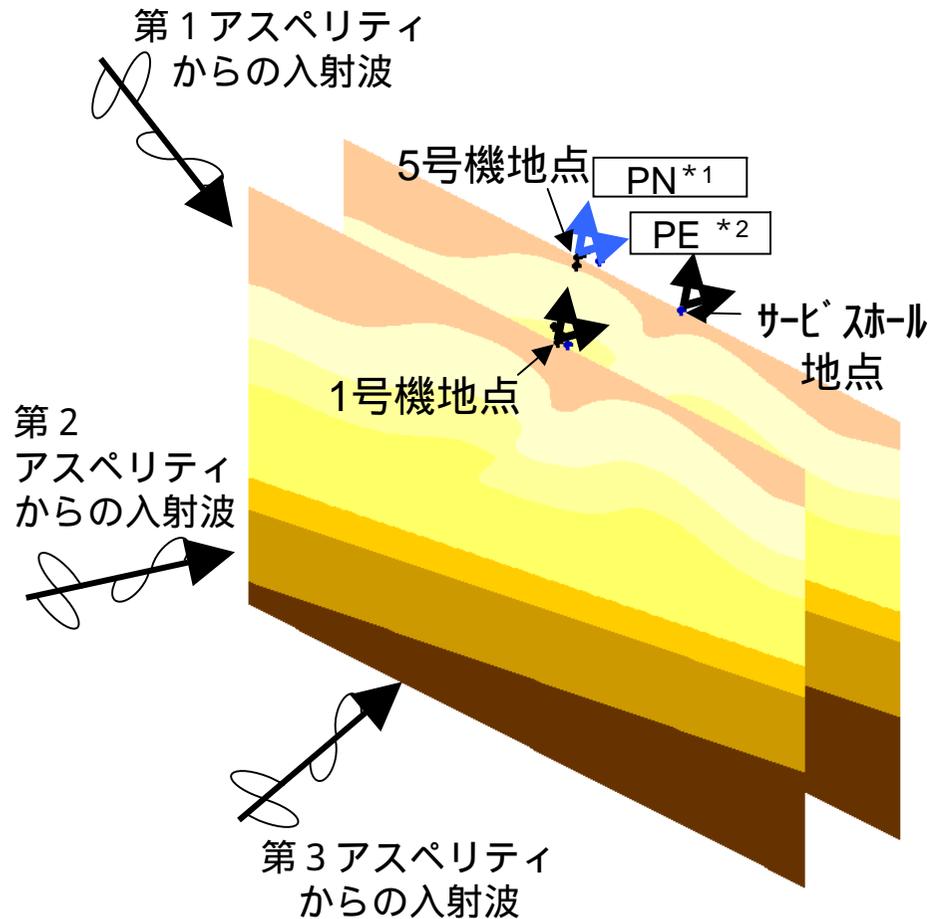
サビースホル地点の地盤応答の算定

$$\left\{ \begin{matrix} U_{PNS} \\ U_{PES} \end{matrix} \right\} = \begin{bmatrix} S_{NVS} & S_{NHS} \\ S_{EVS} & S_{EHS} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} U_{SV3} \\ U_{SH3} \end{matrix} \right\}$$

サビースホル地点
の地盤応答 FEMによる 入射波
 伝達関数

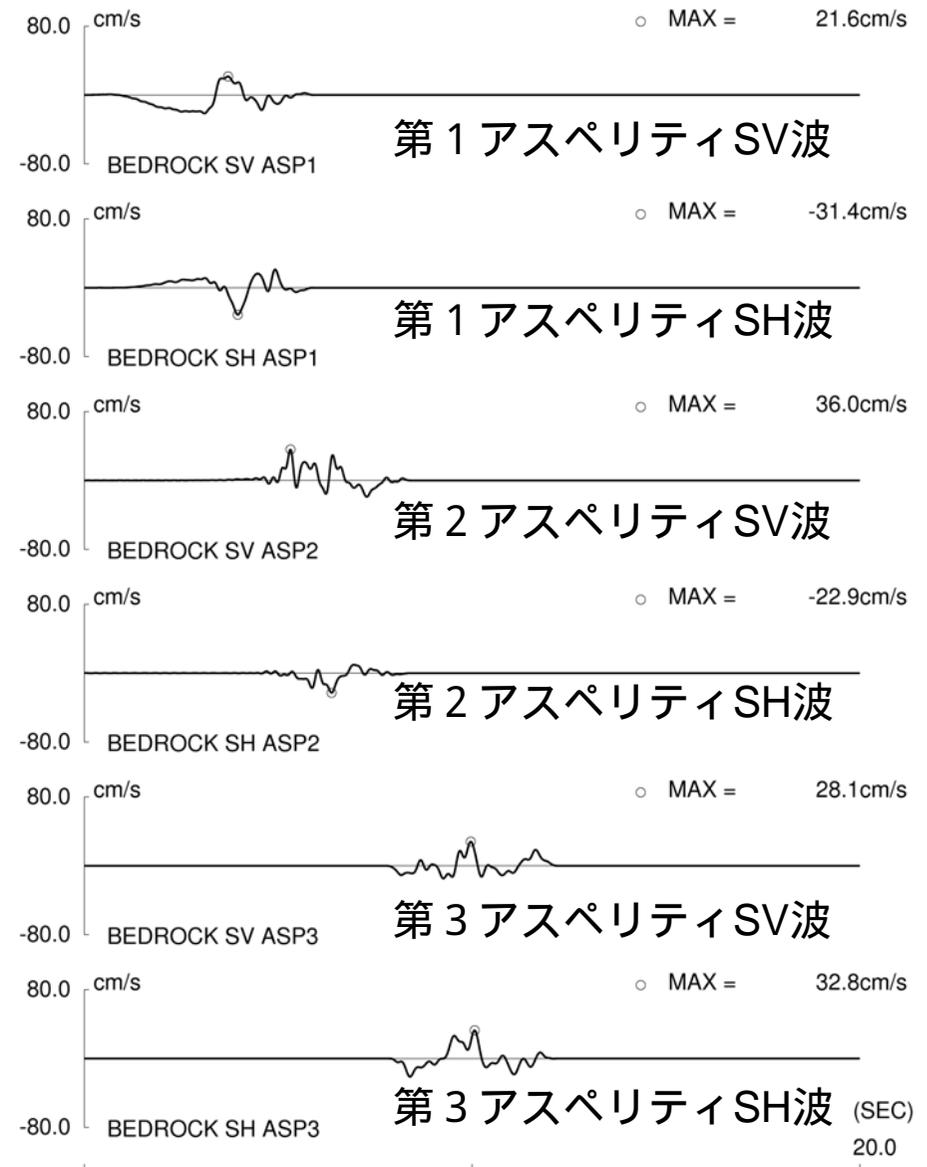
2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - シミュレーション解析(2)

地震基盤波（速度波形）の推定



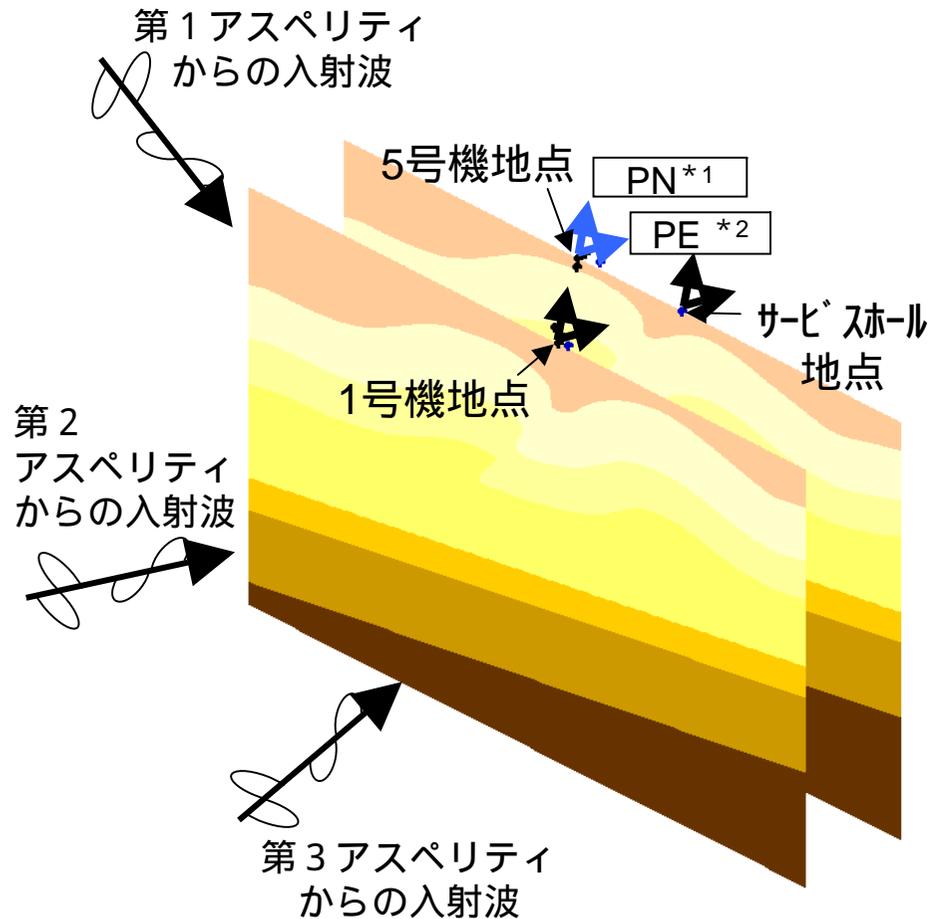
*1PN：プラントノース

*2PE：プラントイースト

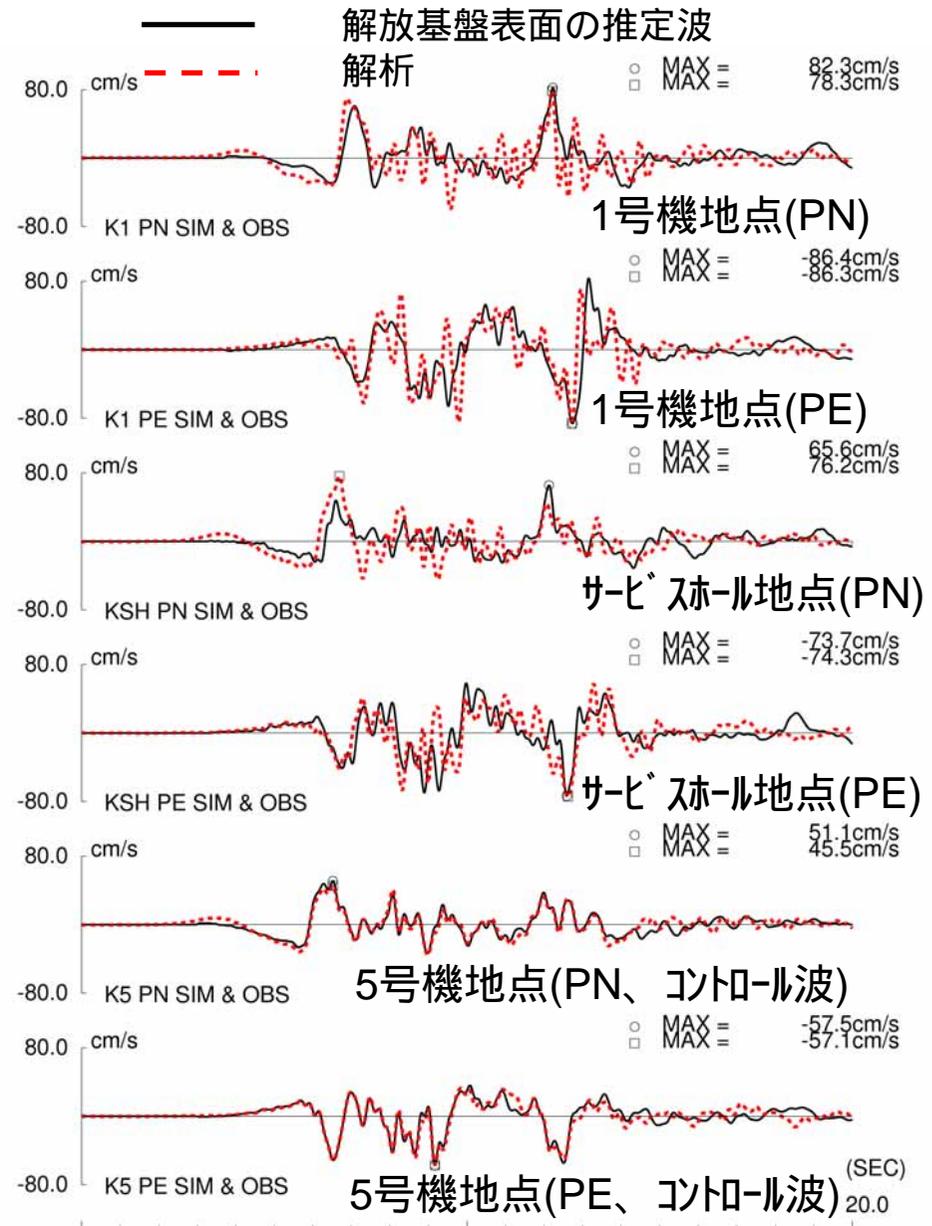


2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - シミュレーション解析(3)

シミュレーション結果 (速度波形)



*1PN : プラントノース
*2PE : プラントイースト

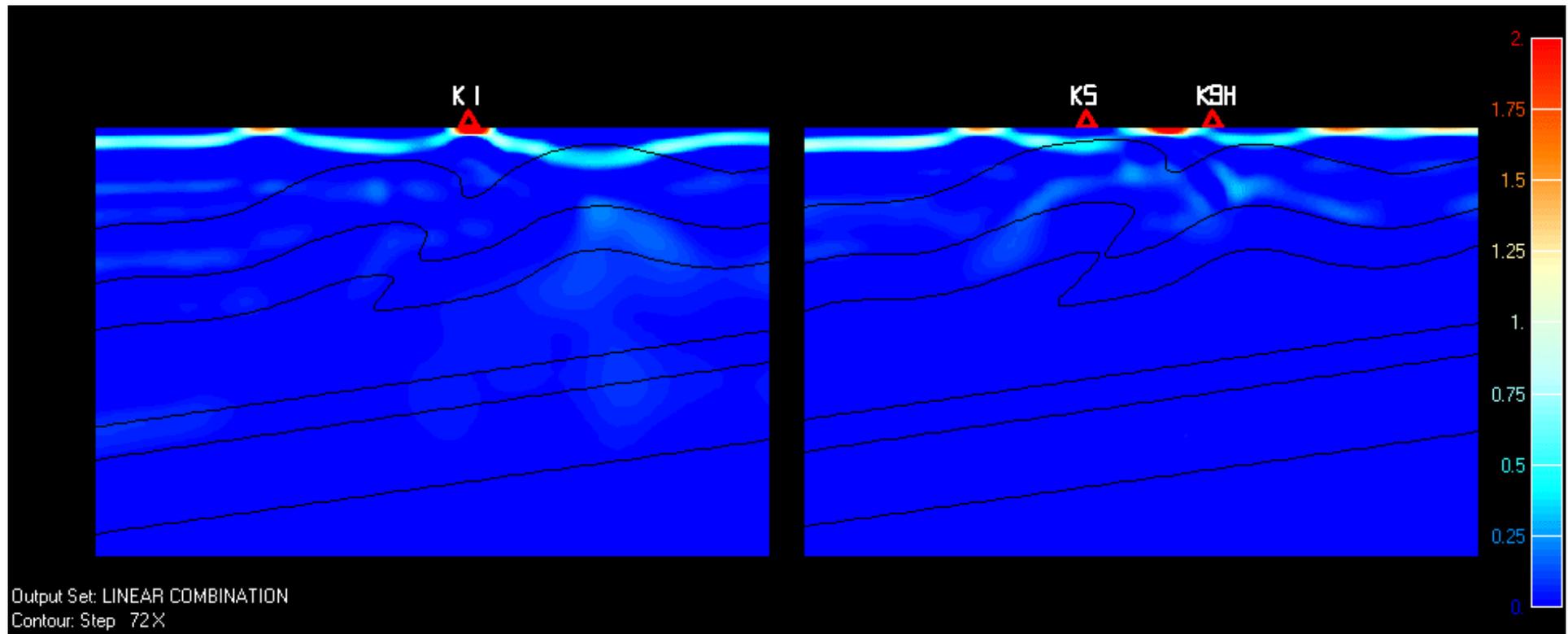


2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 地震基盤からの波動伝播(1)

第3アスペリティからの入射による地盤応答：SV波（0.6秒リッカー波）入射

1号機側断面

5号機側断面

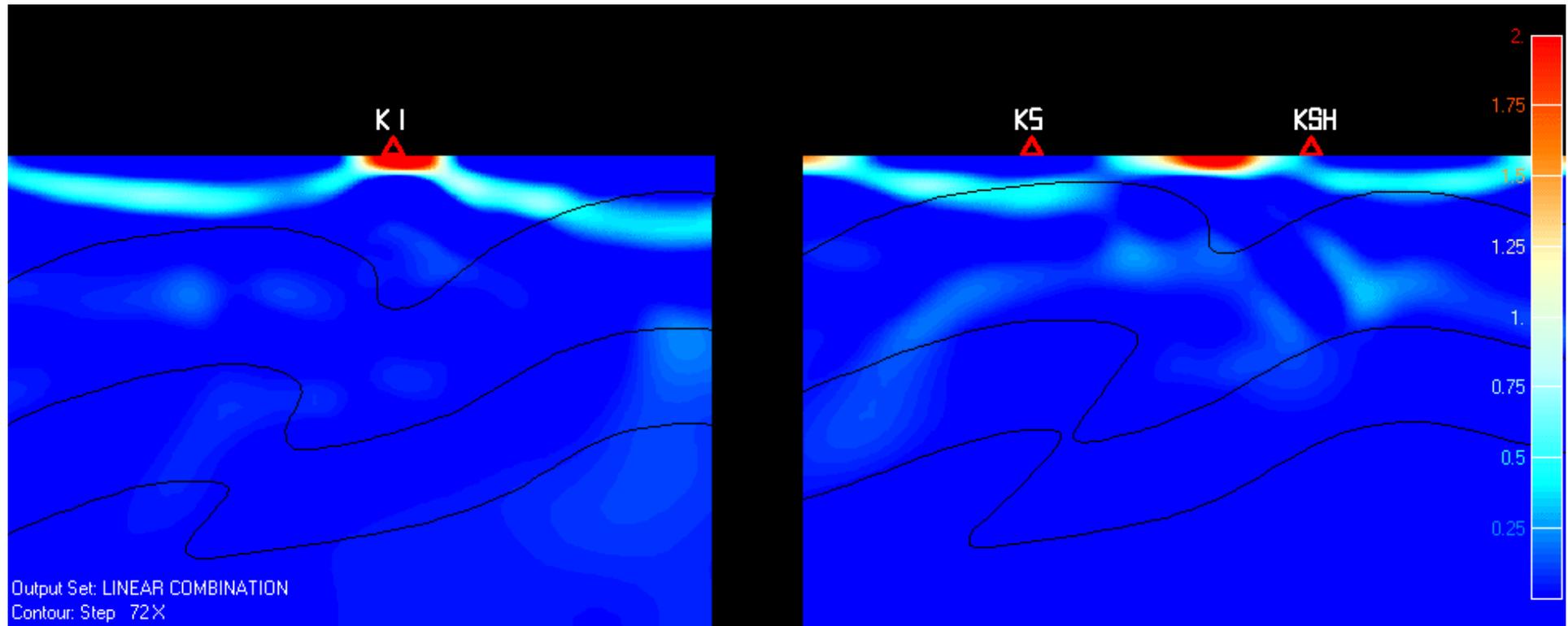


2次元不整形地盤モデルによる地震応答解析 - 地震基盤からの波動伝播(2)

サイト近傍のズームアップ

1号機側断面

5号機側断面



「要因3：古い褶曲構造での増幅」の解析検討（まとめ）

2次元不整形地盤モデルによる地盤応答解析検討 まとめ

- 5号機地点は1次元地盤の増幅特性と差異が少ないが，1号機地点は地盤の不整形性の影響が大きい
- 椎谷層や寺泊層などの褶曲構造の影響で，アスペリティ3からの地震波が局所的に集中する傾向が認められた
- 1号機は上記の地震波が集中する場所に位置しており，5号機に比べ地震動が大きい傾向が解析的に確認された
- 解放基盤波のシミュレーションにより，解析手法の妥当性を検討した

敷地近傍の地盤をモデル化し（水平7km×深さ5km），中越沖地震の地震動特性を検討した。その結果，古い褶曲構造での増幅があることを評価した。

(3) 「深部地盤における不整形性の影響（要因 2）」の解析検討

「深部地盤における不整形性の影響（要因2）」の解析検討の概要

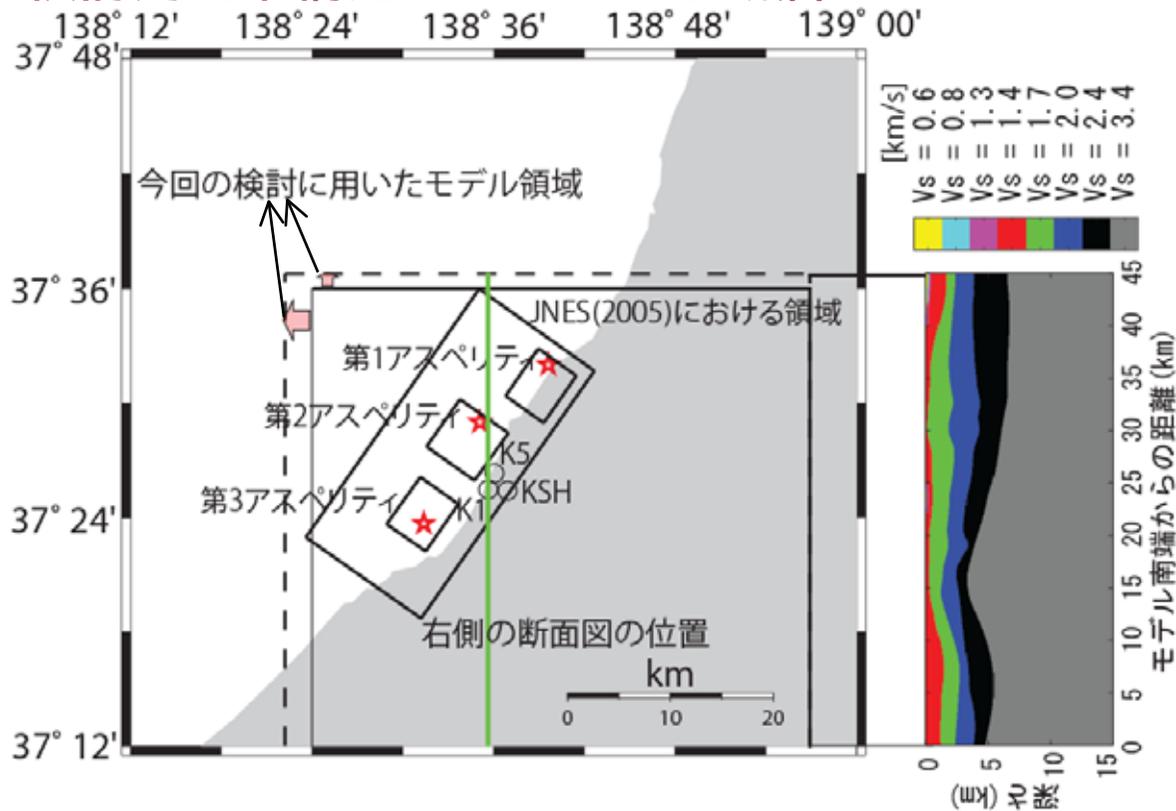
■ 震源から敷地までの伝播経路(特に深部地盤)における第3アスペリティによる地震動の増幅特性の検討

● 3次元地下構造モデルを用いた3次元有限差分法シミュレーション (Pitarka *et al.*, 1999)による理論地震動計算

- ◆ 基盤の3次元不整形が考慮された地下構造モデル
(JNES(2005)及び一部領域を拡大)
- ◆ 震源インバージョン手法で求められた断層モデル
(当社検討モデルを使用)

深部地盤における不整形性の影響の検討 – 計算モデル

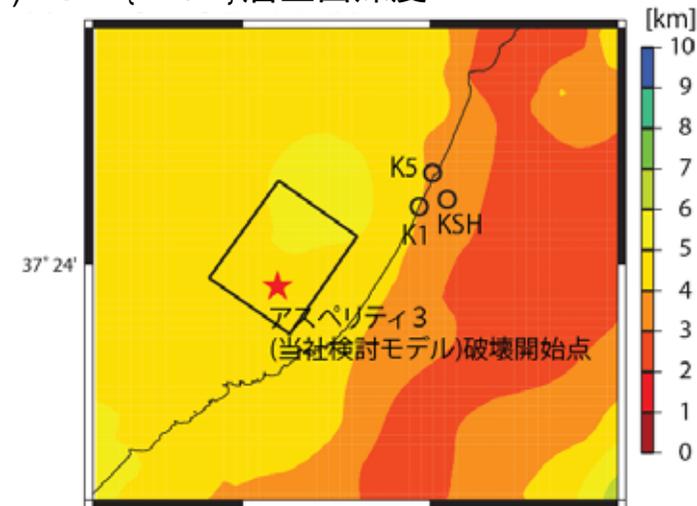
検討用地下構造モデルおよび断層モデル



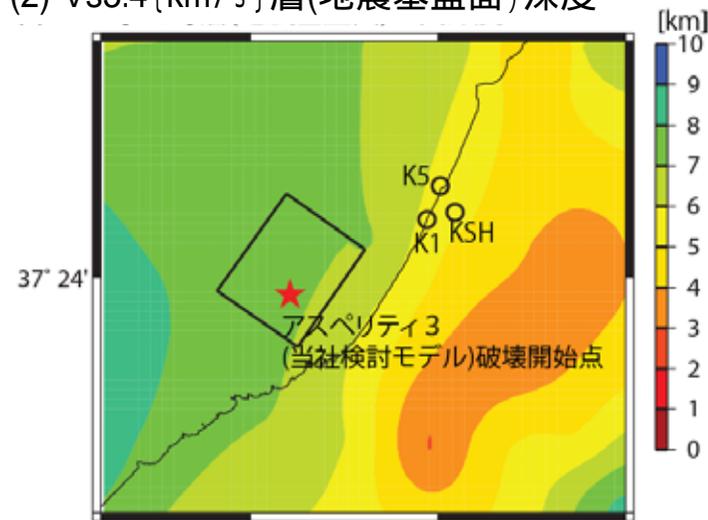
モデル領域と断層モデル(当社検討モデルとの位置関係)

* 本検討では第3アスペリティのみを対象としている

(1) Vs2.4{km/s}層上面深度



(2) Vs3.4{km/s}層(地震基盤面)深度



地下構造モデル
(深部速度層のコンターマップ)

3次元地下構造モデルによる解析検討- 差分法計算概要

■ 計算領域

- 50km (東西方向) × 45km (南北方向) × 18.5km (深さ方向)

■ 格子数

- グリッド間隔50 m(計算対象周期：0.5秒以上)
- 1000 × 900 × 375グリッド

■ 速度構造モデル：JNES(2005)

- 変更点
 - ◆ 地震発生層におけるS波速度：3.4 km/s
 - ◆ モデル領域を北西に拡張
- 減衰構造： $Q_s = V_s / 10$ (Reference 周波数：1Hz)

■ シミュレーションに用いた震源モデル

- 当社検討モデル(第3アスペリティを対象)
- すべり速度時間関数：中村・宮武(2000)による

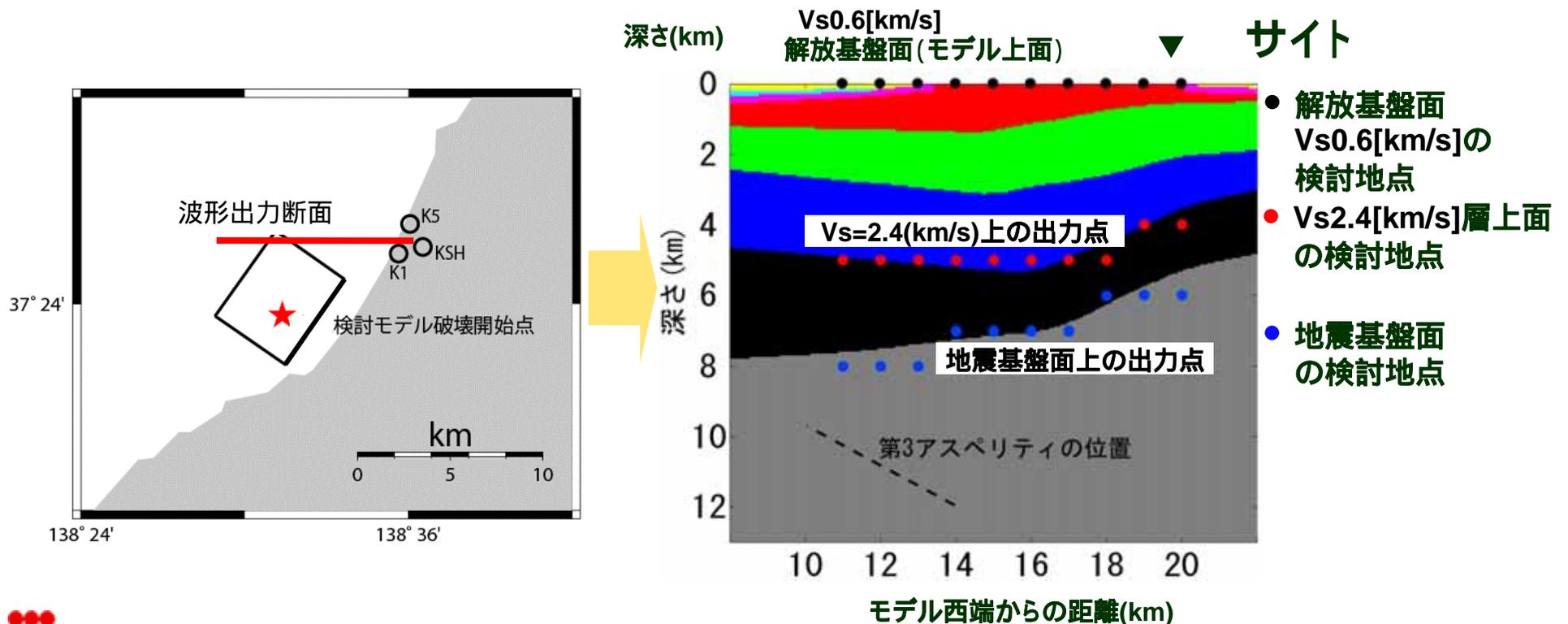
3次元地下構造モデルによる解析検討 - 検討内容

検討内容

- ・ (解放基盤面 / 地震基盤面($V_s 3.4$ [km/s]層)) および ($V_s 2.4$ [km/s]層上面 / 地震基盤面) の増幅
- ・ 耐専スペクトルを用いた増幅率との比較

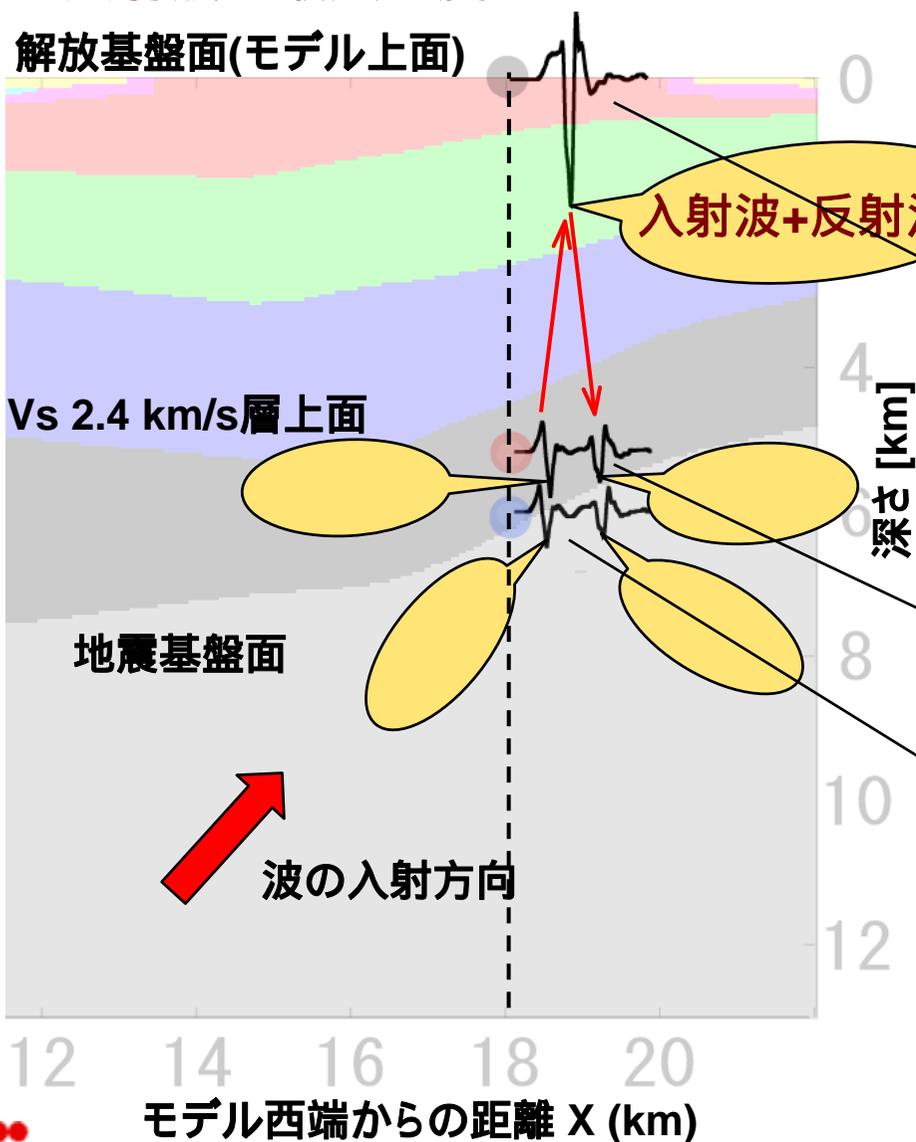
検討断面

- ・ 地震波の到来方向に近い、発電所を東端とする東西断面



3次元地下構造モデルによる解析検討 (モデル西端から18km地点の例)

入射波の最大速度



計算波(入射波+反射波)の最大値
入射波によって決定される
解放基盤面での計算波の最大値
入射波+反射波の重なりあい
によって大きくなる

解放基盤面
での計算波

● 最大値: 26.7 [cm/s]

Vs 2.4 [km/s]層
上面での計算波

● 最大値: 11.2 [cm/s]

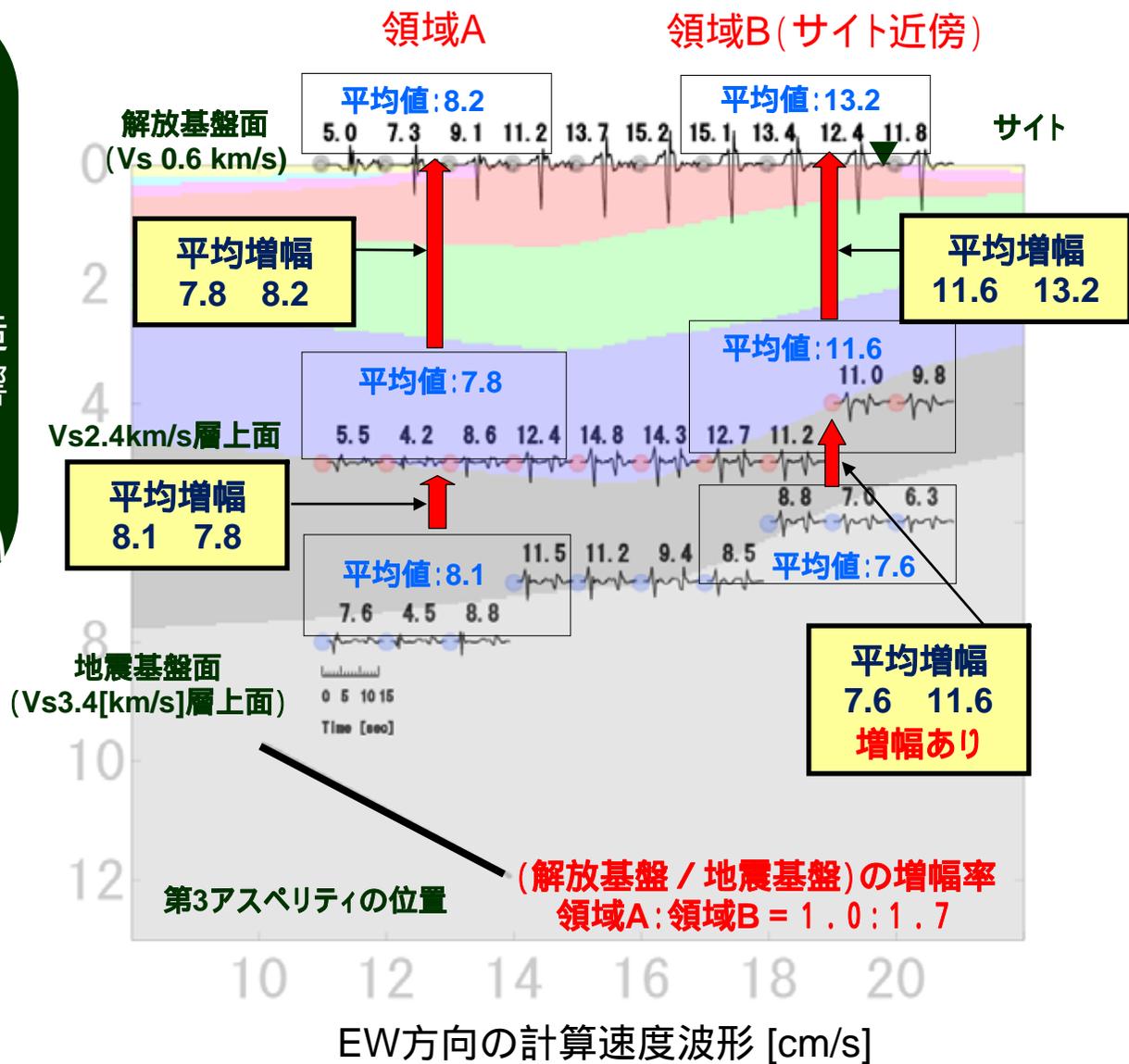
地震基盤面
での計算波

● 最大値: 8.8 [cm/s]

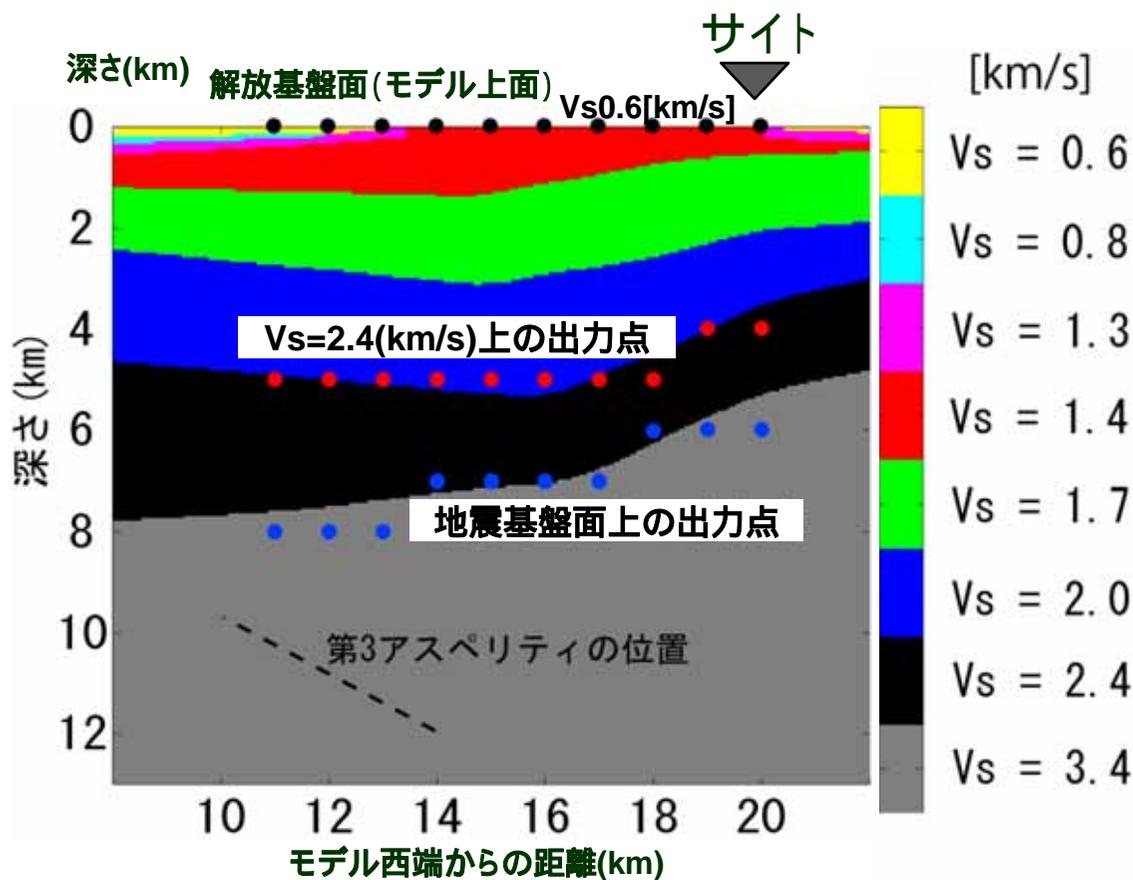
3次元地下構造モデルによる解析検討- 最大速度の増幅率(1)

領域A,Bに関し入射波の最大速度の増幅を評価。領域Aの増幅率に比較し領域B（サイト近傍）の増幅率が大きい。増幅率の相違は地下構造の水平方向の変化が影響していると考えられる。（領域Bの方が地下構造の水平方向の変化が大きい）

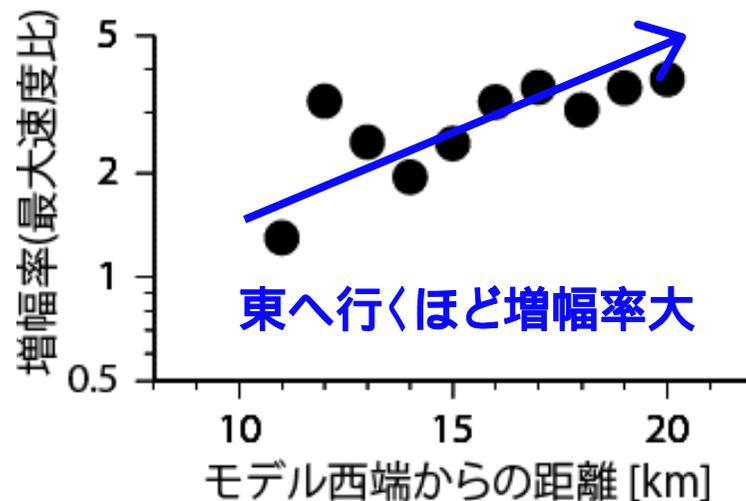
注* 解放基盤面では自由表面の効果があるため、波形の最大振幅を1/2にして入射波の最大振幅を求めている。



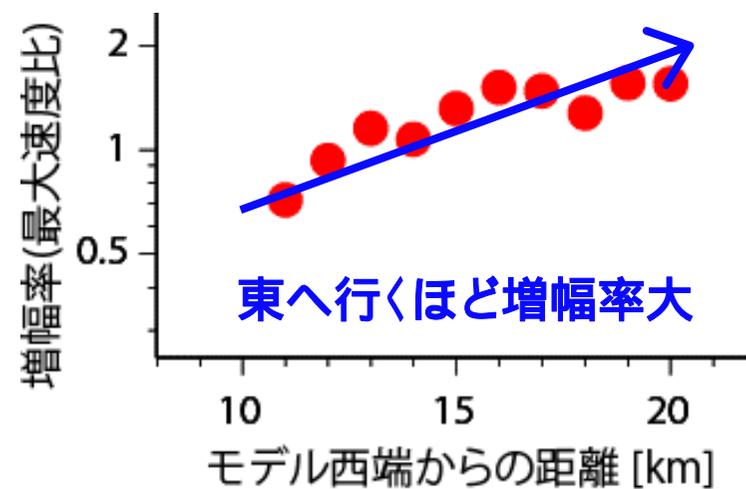
3次元地下構造モデルによる解析検討- 最大速度の増幅率(2)



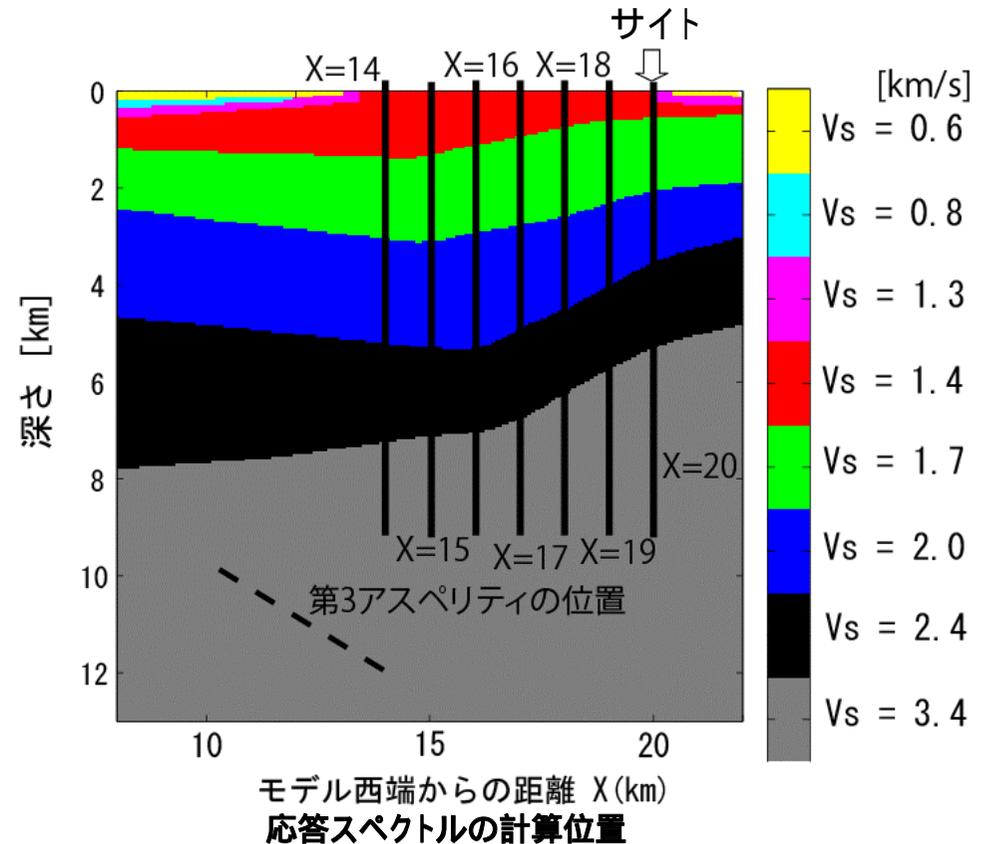
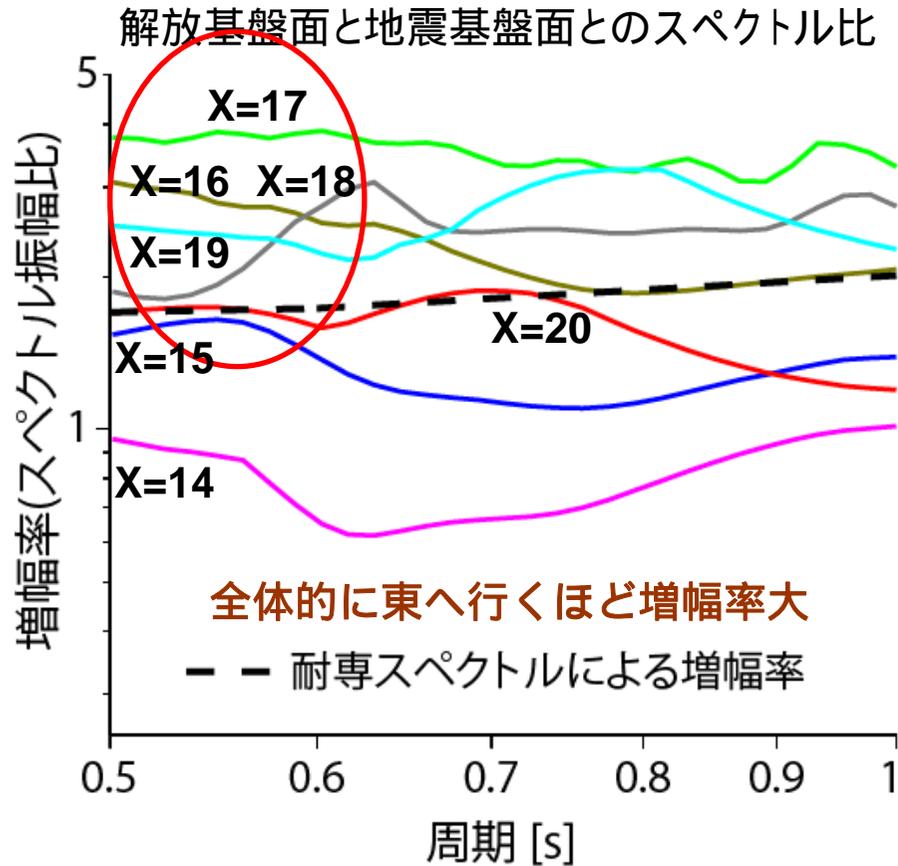
(1) 解放基盤面/地震基盤面での最大速度値の比



(2) Vs 2.4 km/s 層上面/地震基盤面での最大速度値の比



3次元地下構造モデルによる解析検討- 応答スペクトルの増幅率



* 耐専スペクトルにおける増幅率は
 解放基盤面: $V_s = 700$ [m/s]
 地震基盤面: $V_{sb} = 2200$ [m/s]
 として以下の式より増幅率Aを算定
 $A(T) = (V_s / V_{sb})^{- (T)}$
 (T):各周期における補正係数

応答スペクトル比についても各周期でサイト近傍程、値が大きくなる傾向が認められる。

「深部地盤における不整形性の影響（要因2）」の検討の概要（まとめ）

3次元地下構造モデルによる解析検討 まとめ

- 柏崎刈羽原子力発電所を東端とする東西断面で、深部地盤による地震動の増幅特性を検討した。
- （解放基盤相当面[Vs 0.6 km/s]） / （地震基盤面[Vs 3.4 km/s]）、（Vs 2.4 km/s相当面 / (地震基盤面[Vs 3.4 km/s])）における最大速度比は、いずれも海域から発電所に向かって増加する傾向を示している。
- （解放基盤相当面[Vs 0.6 km/s]） / （地震基盤面）の応答スペクトル比に関しても海域から発電所に向かって増加する傾向を示している。

(4) 中越沖地震の知見を踏まえた基準地震動への反映事項

中越沖地震で得た知見の反映事項

【要因1】震源の影響

中越沖地震の短周期レベルは、平均的な地震と比較して大きい

【要因2】深部地盤における不整形性の影響

海域の地震による地震動特性は、陸域の地震のそれと異なる

【要因3】古い褶曲構造での増幅

海域の地震において、荒浜側（1～4号機）の地震動レベルは大湊側（5～7号機）と比較して大きい

【反映事項】敷地における観測記録に基づき、基準地震動 S_s を策定

海域の活断層と陸域の活断層に分類して評価を実施

海域の活断層による地震については、荒浜側（1～4号機）と大湊側（5～7号機）でそれぞれ基準地震動を策定

Noda et al. (2002) による応答スペクトルにおいて、海域の地震と陸域の地震に分類して、それぞれ観測記録に基づく補正係数を考慮

断層モデルによる地震動評価では、短周期レベルとして標準的な値の1.5倍を考慮するとともに、経験的グリーン関数法では、海域と陸域の地震動特性を反映した適切な要素地震を採用