

東海第二発電所 地下構造評価について

平成28年10月21日
日本原子力発電株式会社

目 次

1. 地下構造評価の方針	.....	3
2. 解放基盤表面の設定について	.....	5
3. 地震観測記録による地下構造評価		
3.1 地震観測状況	.....	9
3.2 解放基盤表面における検討	.....	11
3.3 浅部地下構造の検討	.....	17
4. 地球物理学的調査による地下構造評価		
4.1 地球物理学的調査について	.....	22
4.2 解析による検討		
4.2.1 広域地盤モデルによる深部地下構造の検討	.....	42
4.2.2 敷地の詳細モデルによる地震動への影響について	.....	63
5. 敷地の地盤モデル		
5.1 地盤モデルの設定について	.....	81
5.2 地盤モデルによる振動特性の検討	.....	89
6. 参考文献	.....	92

1. 地下構造評価の方針

1. 地下構造評価の方針

東海第二発電所の地下構造が水平成層かつ均質であることを確認するため、地震観測記録と地球物理学的調査を組合せ、地震基盤の位置や形状、地震波速度構造等の調査・解析を実施した。

● 地震観測記録による地下構造評価

解放基盤表面における検討

- ・地震観測記録の到来方向による検討により、解放基盤表面より深部の地下構造が水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認

浅部地下構造の検討

- ・解放基盤表面以浅の地震観測記録を用いて、敷地地盤の地下構造が水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認

● 地球物理学的調査による地下構造評価

地球物理学的調査 敷地周辺

- ・屈折法地震探査
- ・微動アレイ探査
- ・重力異常分布(文献)

敷地内

- ・単点微動測定
- ・微動アレイ探査

3次元地下構造モデル

作 成

確 認

解析による検討

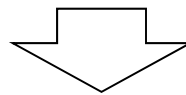
- ・2次元FEMモデル
→ 東西断面, 南北断面
- ・敷地の西側及び南側に見られる深い基盤形状による影響を検討
- ・敷地地盤の地下構造は水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認

なお、東海第二発電所の地震動評価においては、地震観測記録を用いた経験的グリーン関数法を用いている。

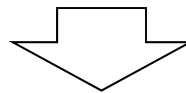
2. 解放基盤表面の設定について

「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」
(原子力規制委員会, 平成26年7月9日改正)

基準地震動を策定するために、基盤面上の表層及び構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう上記の「基盤」とは、おおむねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものとする。



- 東海第二発電所の基礎地盤の特徴
 - ・ 新第三系鮮新統の砂質泥岩である久米層が広く分布する。
 - ・ 久米層の速度構造はおおむね水平である。
 - ・ E.L.-370m程度で $V_s=700\text{m/s}$ 以上となる。
 - ・ 久米層は新鮮であり、著しい風化は見られない。



解放基盤表面の位置はE.L.-370mとする。

2. 解放基盤表面の設定について 久米層の速度構造 – PS検層結果

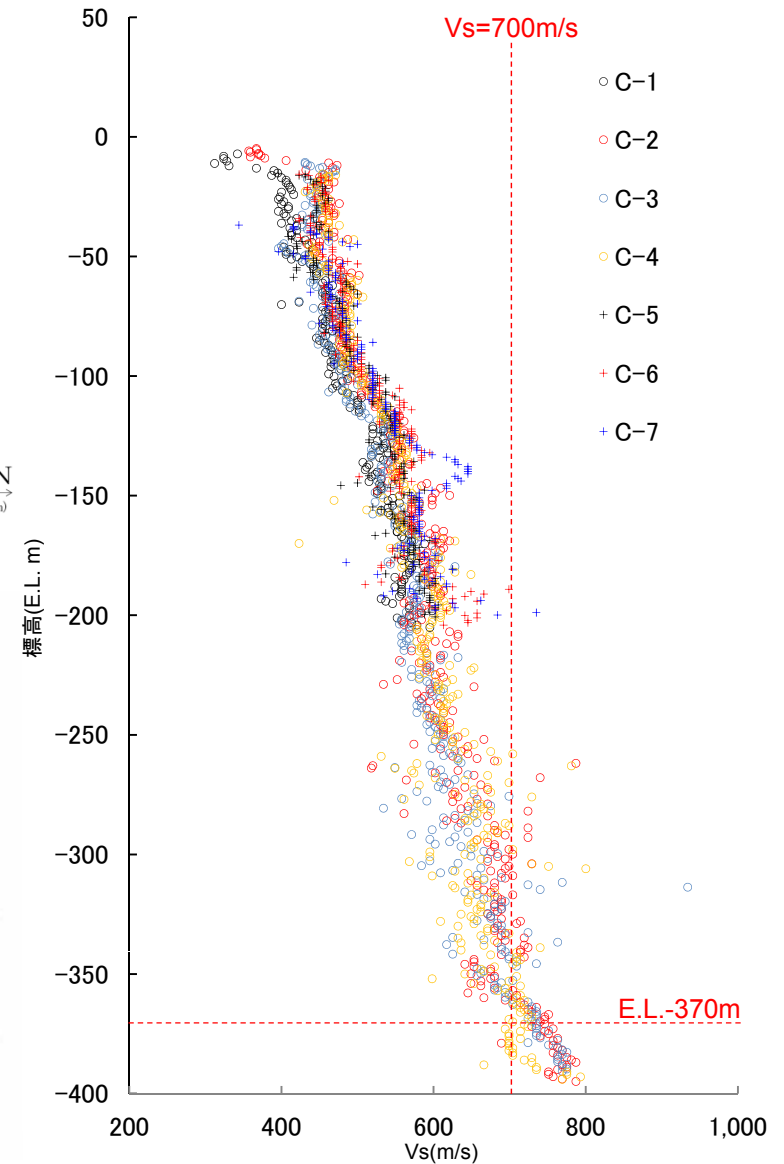
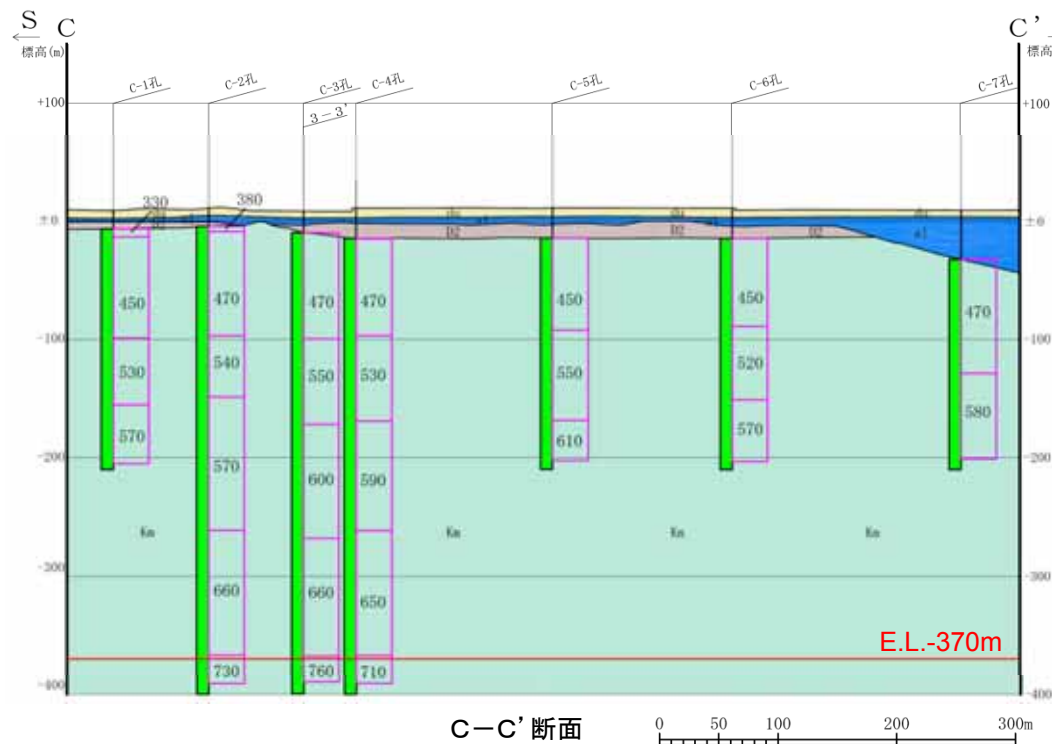
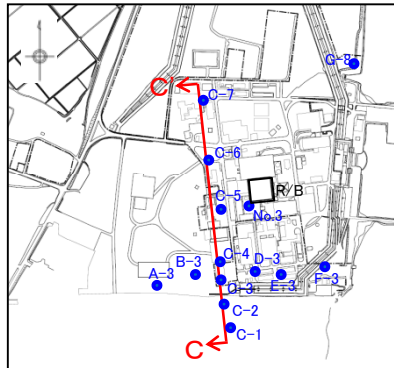
- 敷地内で実施したサスペンションPS検層結果を併せて右に示す。E.L.-370m以深におけるS波速度はおおむね700m/s以上である。

PS検層
(板たたき法)
によるS波速度
(m/s)



久米層の風化区分

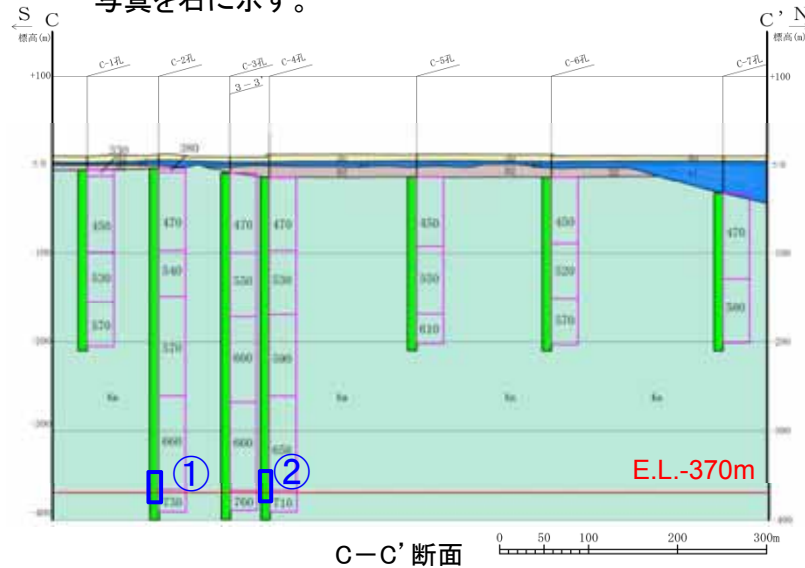
凡例	風化区分	判定基準
■	風化	風化により褐色化しているもの
■	弱風化	所々風化により褐色化しているもの
■	新鮮	風化が認められないもの



サスペンションPS検層によるS波速度と標高の関係

2. 解放基盤表面の設定について 久米層の性状

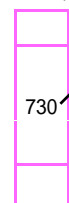
- C-C'断面において久米層は全ての深度で新鮮であり、著しい風化は認められない。
- C-2孔及びC-4孔のE.L.-370m付近のボーリングコア写真を右に示す。



地質凡例	
	砂丘砂層
	沖積層
	段丘堆積物
	段丘堆積物
	久米層
	地層境界

久米層の風化区分		
凡例	風化区分	判定基準
	風化	風化により褐色化しているもの
	弱風化	所々風化により褐色化しているもの
	新鮮	風化が認められないもの

PS検層
(板たたき法)
によるS波速度
(m/s)



※その他のボーリングコア写真は「敷地の地質・地質構造について(ボーリングコア写真・地質柱状図集)」に掲載

3. 地震観測記録による地下構造評価

3.1 地震観測状況

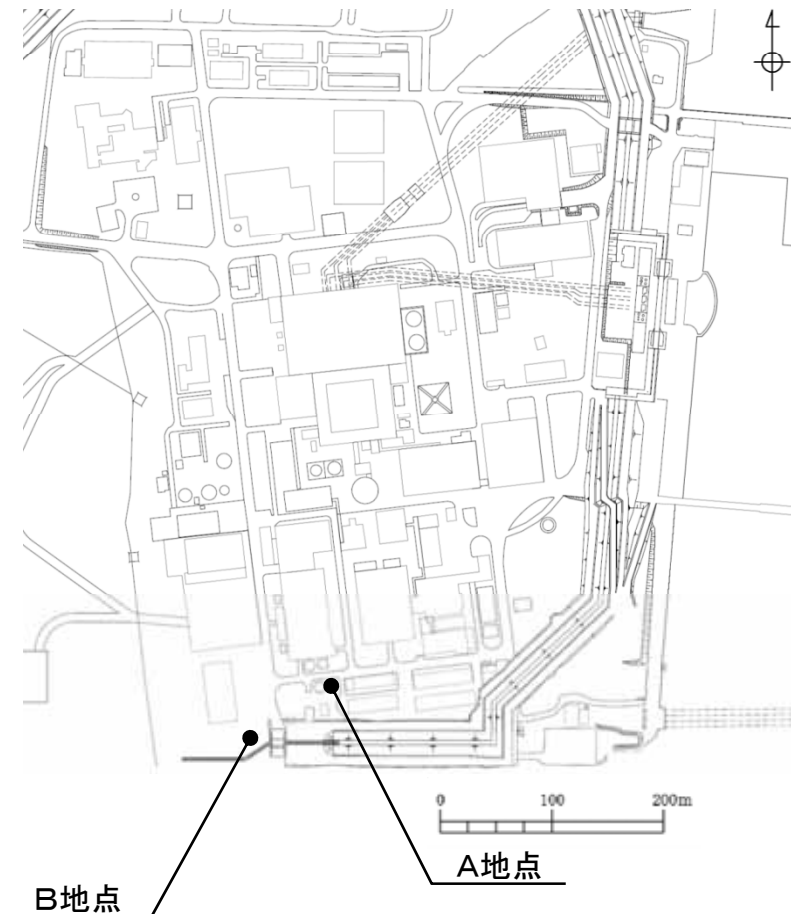
東海第二発電所の地表・地中地震計について

東海第二発電所では、敷地地盤において以下のとおり、地震観測を実施している。

地震観測点位置(深さ方向)

●:地震計
設置位置

	標高	地震観測点位置		
	E.L.	A地点	B地点	地 層
地 表	+8m (G.L.)	●		第四系
原子炉建屋 人工岩盤下端相当	-15m			新第三系
	-17m	●		
	-192m	●		
解放基盤表面相当	-372m	●		先新第三系
地震基盤相当	約-700m			
	-992m		●	
※ G.L. = E.L.8.0m	観測開始	1996年3月	2012年8月	



地震観測点位置(平面)

3. 地震観測記録による地下構造評価

3.2 解放基盤表面における検討

検討の目的・評価方法

● 検討の目的

東海第二発電所の解放基盤表面(E.L.-370m)に相当する深さで観測した地震記録と敷地周辺で観測した地震記録を震央の方位ごとに分類し、地震波の到来方向による地震動特性の差異を比較することにより、両観測点周辺の地下構造が地震動に及ぼす影響について確認する。

● 評価方法

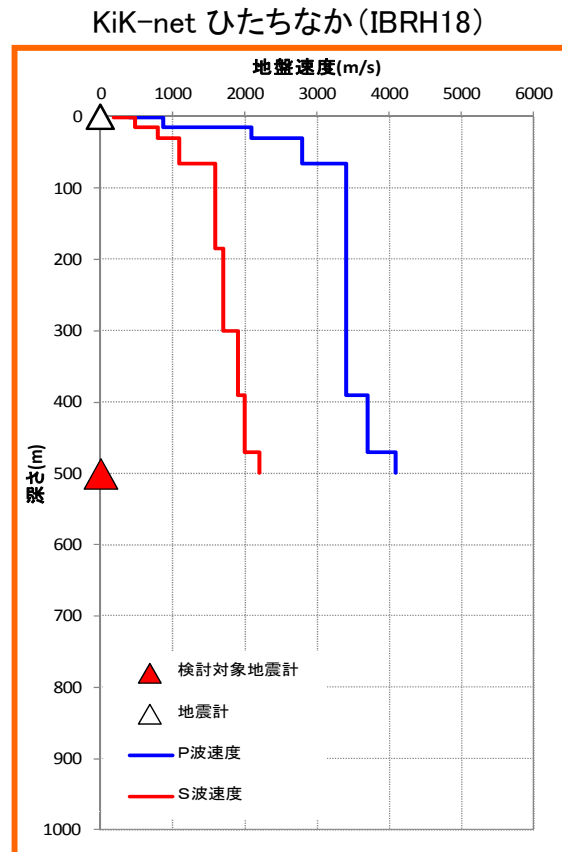
東海第二発電所の解放基盤表面相当の深さで得られた2004年3月から2013年9月までの地震観測記録のうち、KiK-netひたちなか(IBRH18)観測点で同時に観測されたマグニチュード4.0以上、震源距離200km以内の191地震を対象に、加速度応答スペクトル比(東海第二発電所／KiK-netひたちなか)を算定した。

KiK-netひたちなか観測点は、東海第二発電所の周辺に位置するため、同一の地震におけるスペクトル比を算定することにより、震源特性及び伝播経路特性による影響を除去することが可能であり、応答スペクトル比は、東海第二発電所敷地周辺の地下構造による影響を表すことができる。

$$R_{TKI2/IBRH18}(T) = \frac{S_{TKI2}(T) \cdot X_{TKI2}}{S_{IBRH18}(T) \cdot X_{IBRH18}}$$

$R_{TKI2/IBRH18}(T)$	: 応答スペクトル比
$S_{TKI2}(T)$	: 東海第二発電所観測記録の加速度応答スペクトル
$S_{IBRH18}(T)$	: KiK-netひたちなか観測記録の加速度応答スペクトル
X_{TKI2}	: 東海第二発電所から震源までの距離
X_{IBRH18}	: KiK-netひたちなかから震源までの距離

3.2 解放基盤表面における検討 地震観測点の地盤状況と地震計設置位置

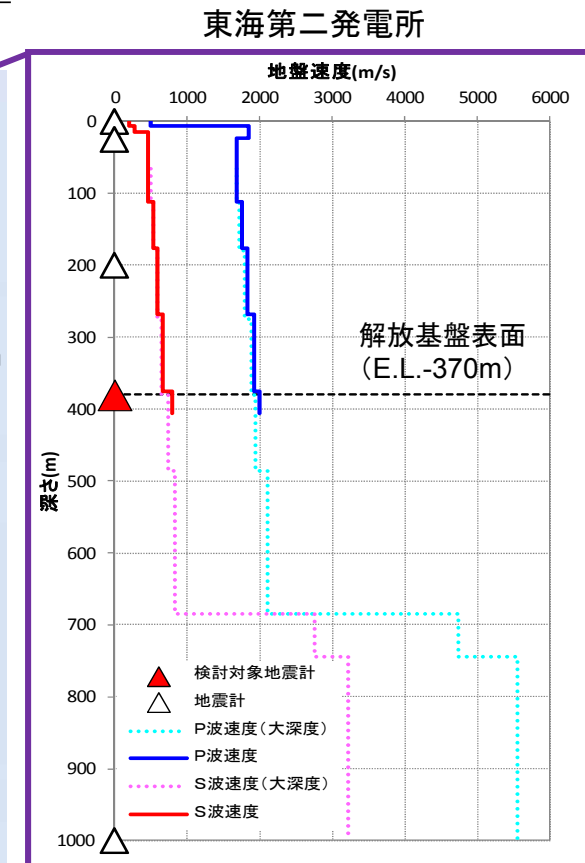


観測開始 2003年5月

〔上記地盤速度構造図は、防災科学技術研究所 強震観測網 (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>) を基に作成



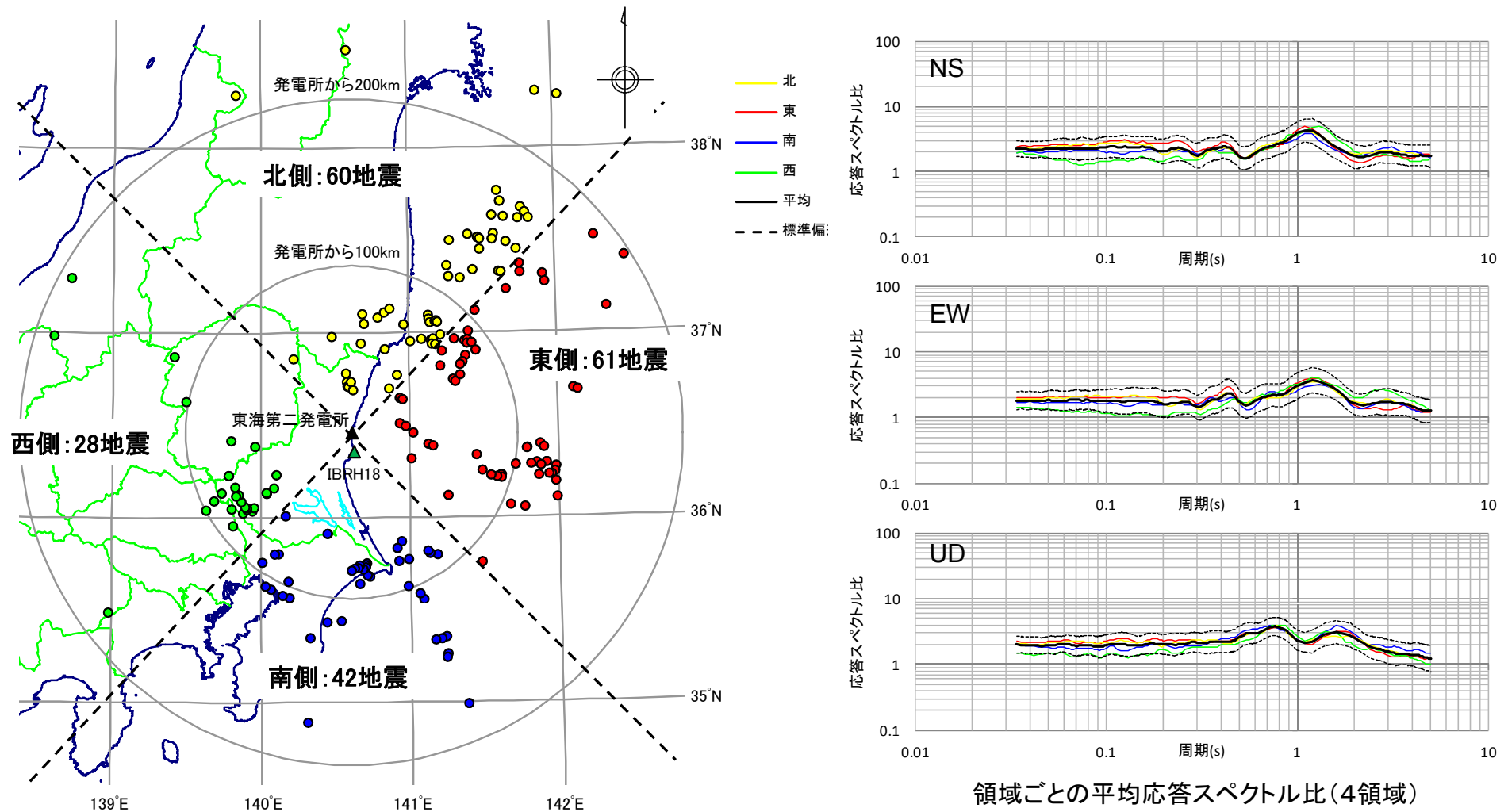
この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の20万分1地勢図、数値地図200000(地図画像)及び数値地図25000(地図画像)を複製したものである。
(承認番号 平28情復 第124号)
本図面を第三者がさらに複製する場合は、国土地理院長の承認を得なければならない。



観測開始 1996年3月
(E.L.-992mの地震計は2012年8月)

地震波の到来方向による検討（4領域）

- 地震観測記録に地下構造による影響がないか地震波の到来方向ごとに比較検討した結果、応答スペクトル比は到来方向による大きな違いは見られず、ばらつきは小さいことから、地下構造が水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認した。



● 9領域に分割した検討

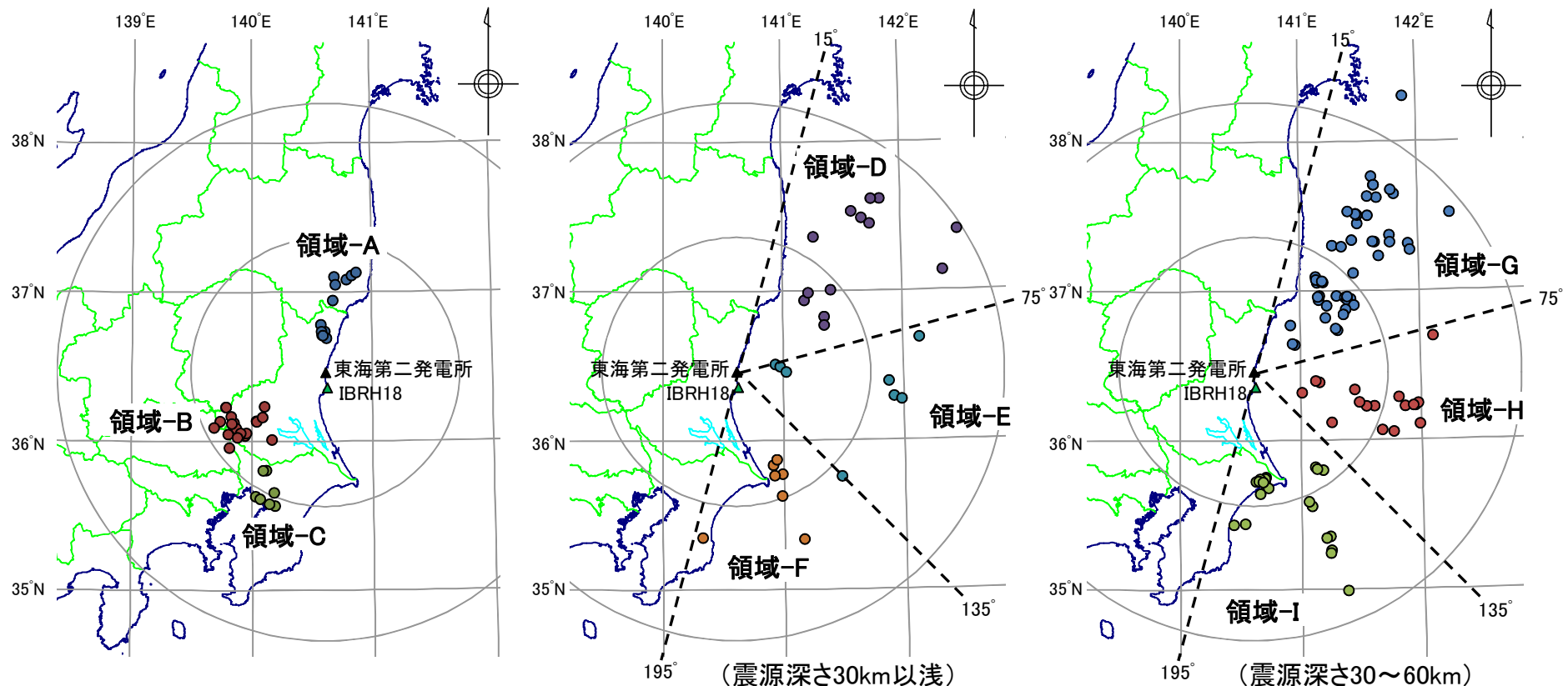
地震発生領域や地震発生様式等の共通性に着目し、以下の9領域に区分し、地震波の到来方向による影響を検討する。

領域-A: 福島県浜通り、茨城県北部の深さ30km以浅

領域-B: 茨城県南部の深さ40～80km

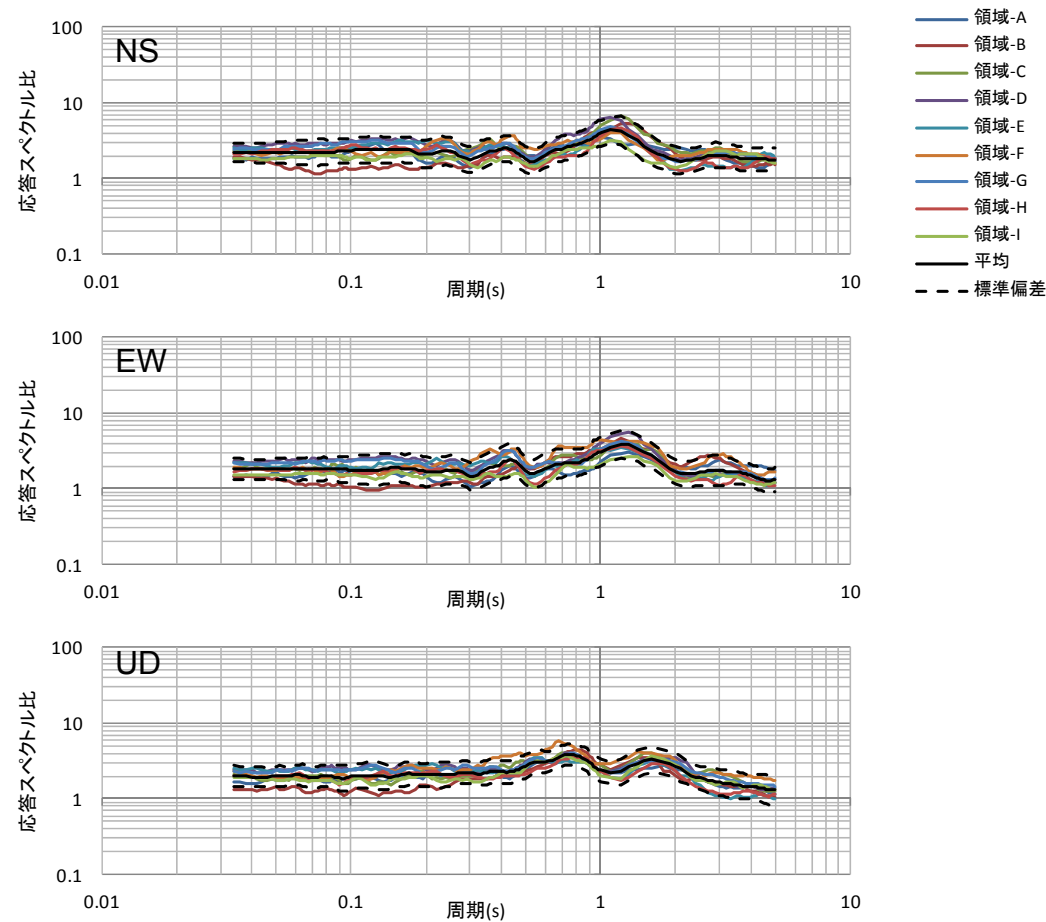
領域-C: 首都直下の深さ40～80km

領域-D～I: 太平洋プレートの走向に対し北方から時計回りに60度ごとに3分割した領域
そのうち、領域-D～Fは深さ30km以浅、
領域-G～Iは深さ30～60km



地震波の到来方向による検討（9領域）

- 地震発生領域を9領域に区分し、地震観測記録の応答スペクトル比を比較した結果、応答スペクトル比は領域によって大きく変化することはない、ばらつきは小さい。その傾向は、先に実施した4領域に区分した結果と同様であり、敷地地盤の地下構造が水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認した。



領域ごとの平均応答スペクトル比(9領域)

3. 地震観測記録による地下構造評価

3.3 浅部地下構造の検討

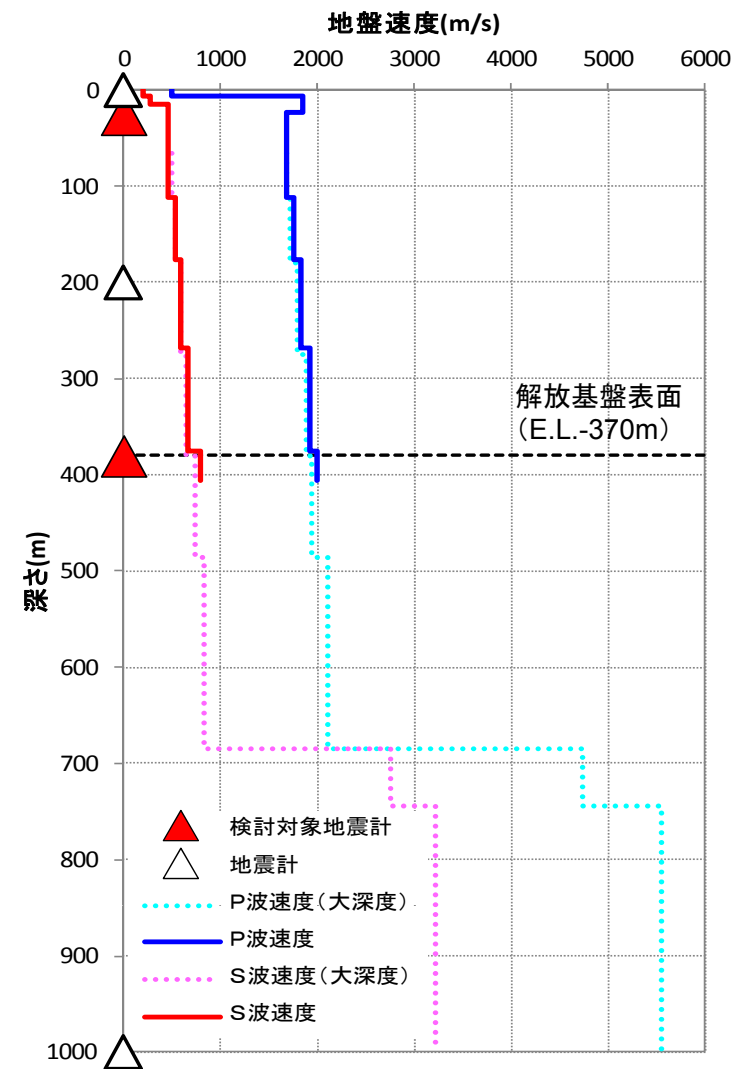
検討の目的・評価方法

● 検討の目的

解放基盤表面より浅部の地盤が水平成層構造であることを地震観測記録を用いて検討するため、東海第二発電所敷地内の鉛直アレイ地震計で得られた地震観測記録を、地震波の到来方向ごとに深度の異なる地震観測記録の応答スペクトル比で比較検討した。

● 評価方法

東海第二発電所の解放基盤表面以浅で得られた1996年8月から2013年9月までの地震観測記録のうち、マグニチュード5.0以上、震源距離200km以内の305地震を対象に、加速度応答スペクトル比(E.L.-17m/E.L.-372m)を算定した。

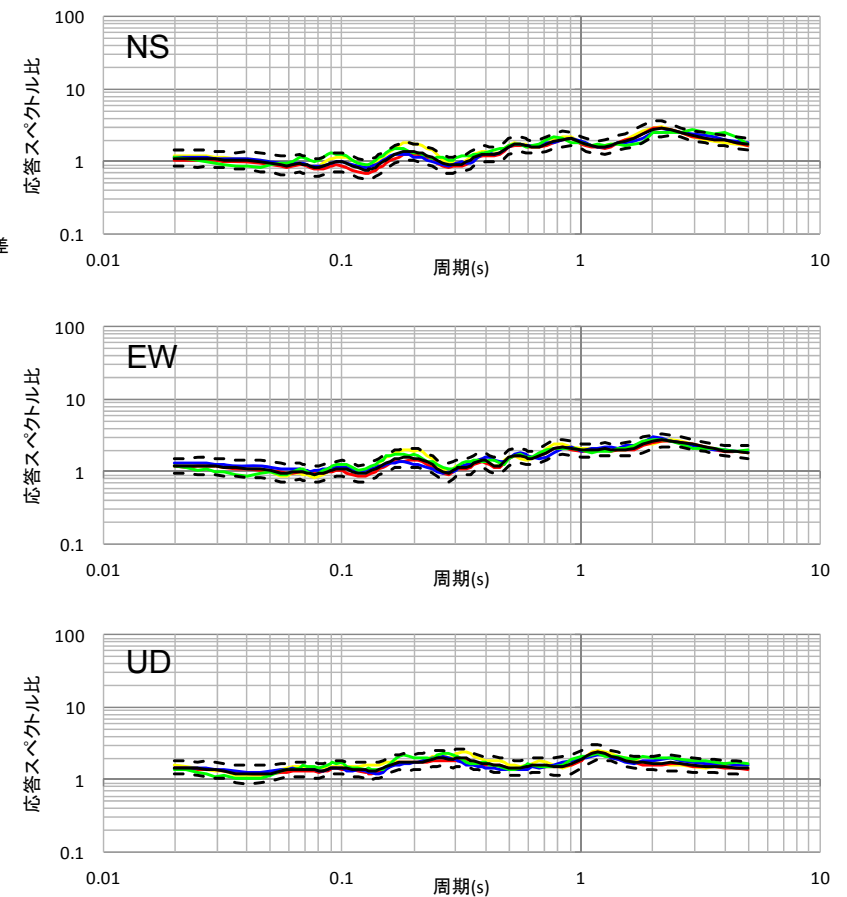
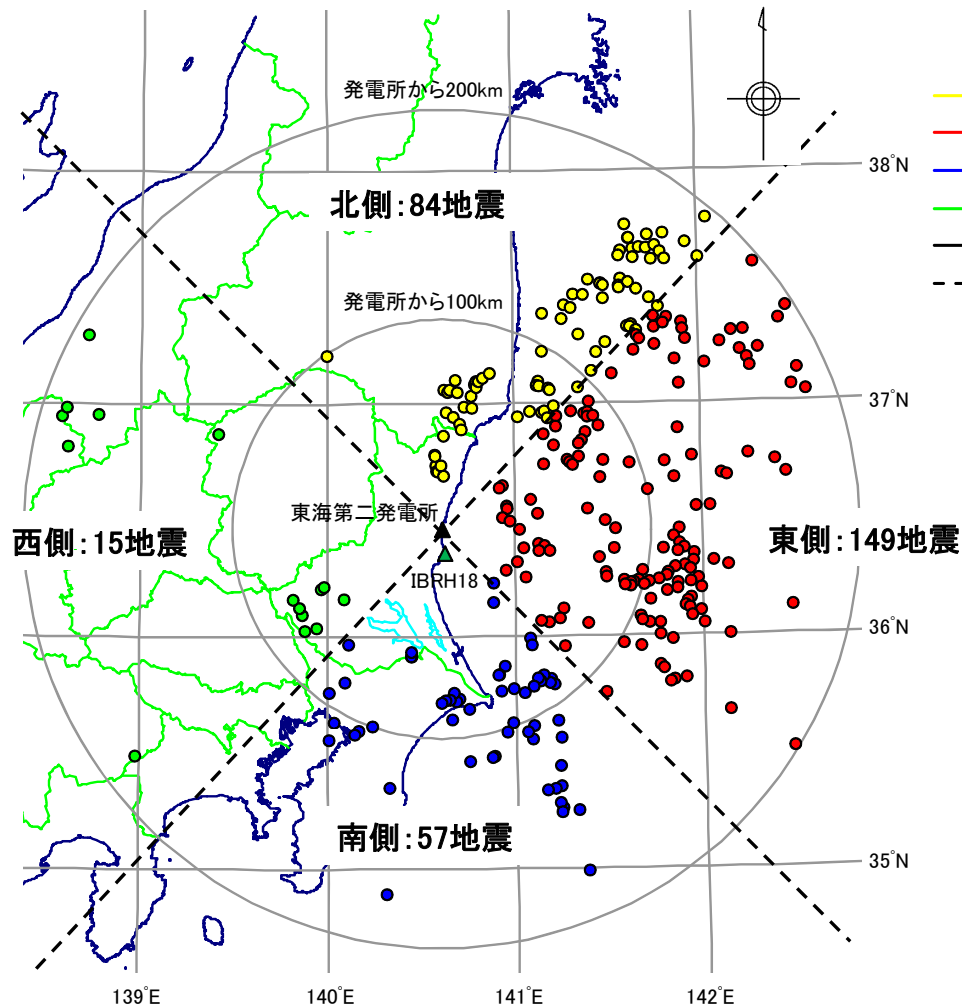


地盤速度と地震計設置深度

※ G.L. = E.L.8.0m

地震波の到来方向による検討（4領域）

- 解放基盤表面より浅部の地盤が水平成層であることを地震観測記録を用いて検討するため、地震波の到来方向ごとに深度の異なる地震観測記録の応答スペクトル比を比較検討した。その結果、応答スペクトル比は、到来方向による大きな違いは見られず、ばらつきは小さいことから、地下構造が水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認した。



領域ごとの平均応答スペクトル比(4領域)

● 9領域に分割した検討

地震発生領域や地震発生様式等の共通性に着目し、以下の9領域に区分し、地震波の到来方向による影響を検討する。

領域-A: 福島県浜通り、茨城県北部の深さ30km以浅

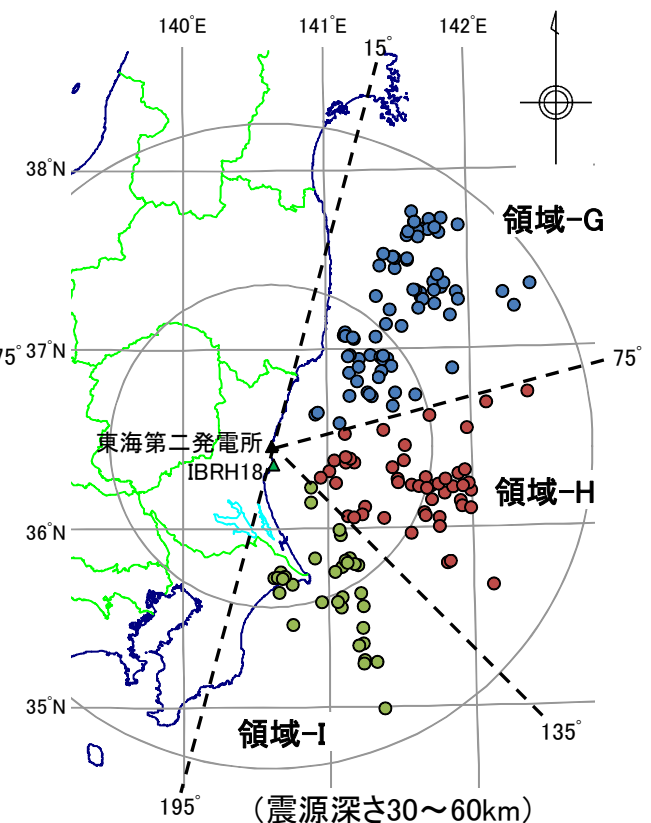
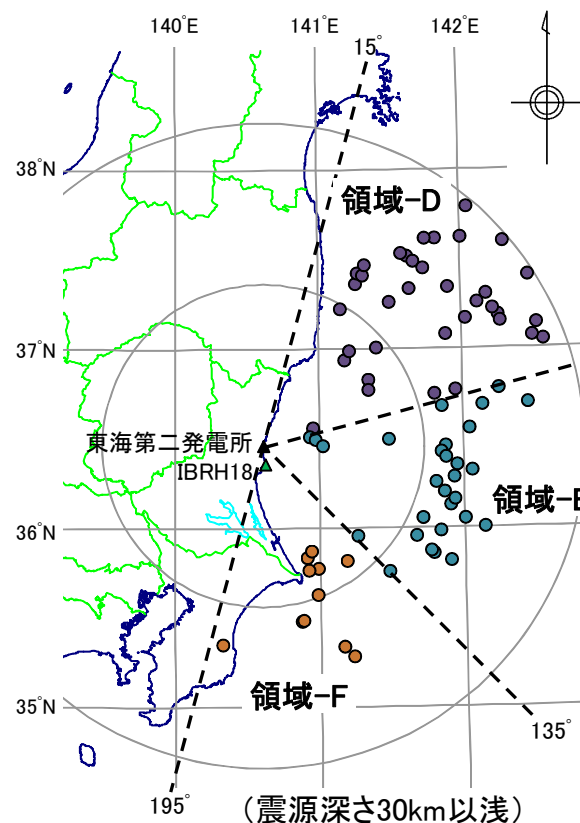
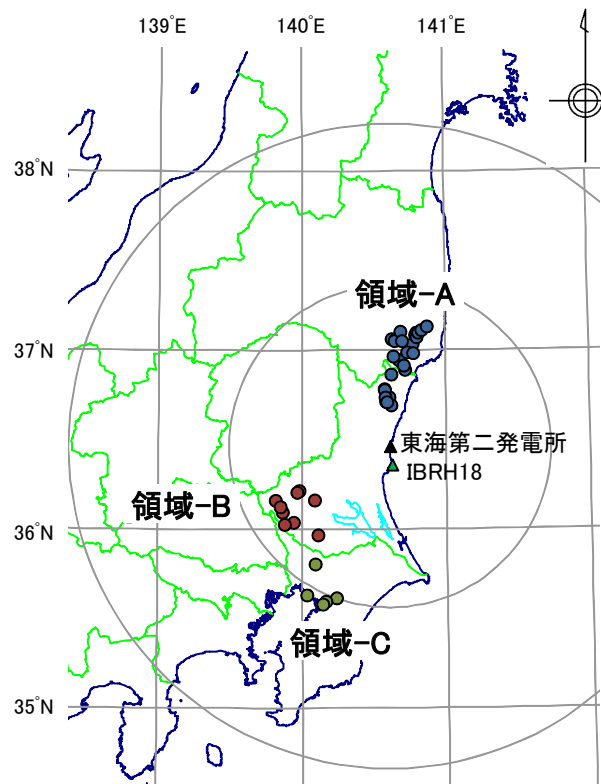
領域-B: 茨城県南部の深さ40～80km

領域-C: 首都直下の深さ40～80km

領域-D～I: 太平洋プレートの走向に対し北方から時計回りに60度ごとに3分割した領域

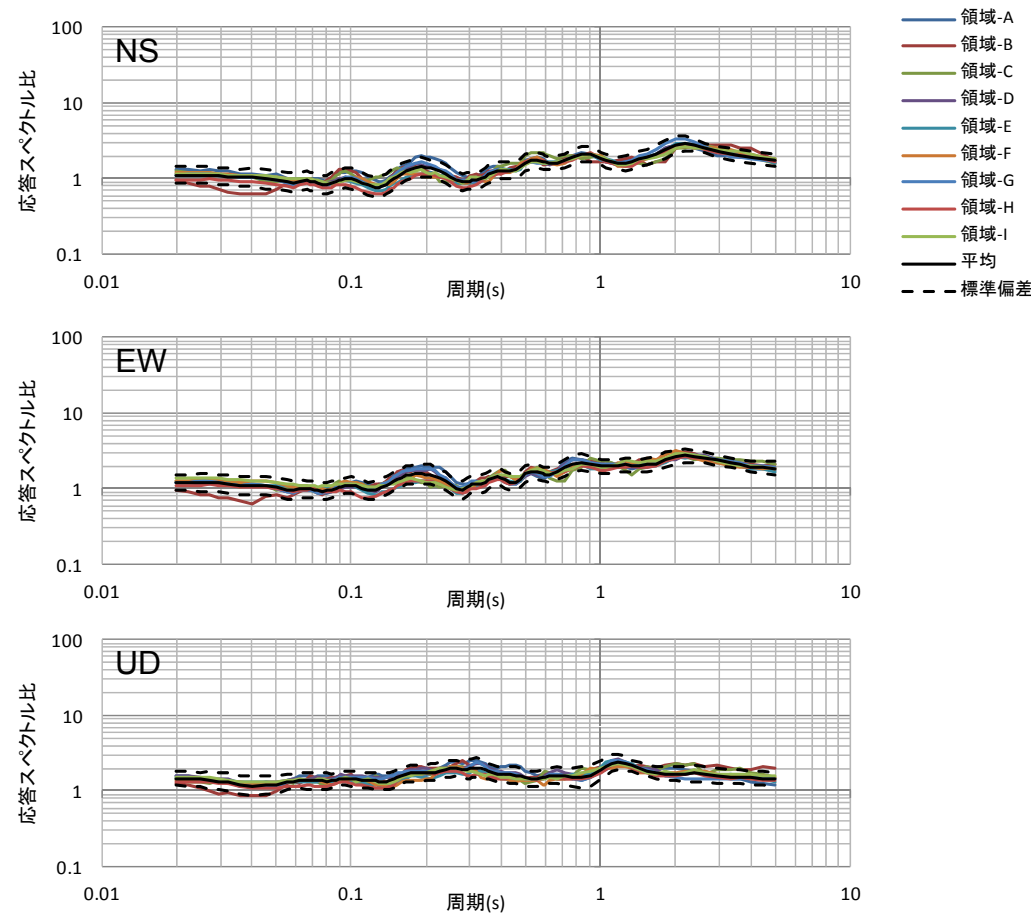
そのうち、領域-D～Fは深さ30km以浅、

領域-G～Iは深さ30～60km



地震波の到来方向による検討（9領域）

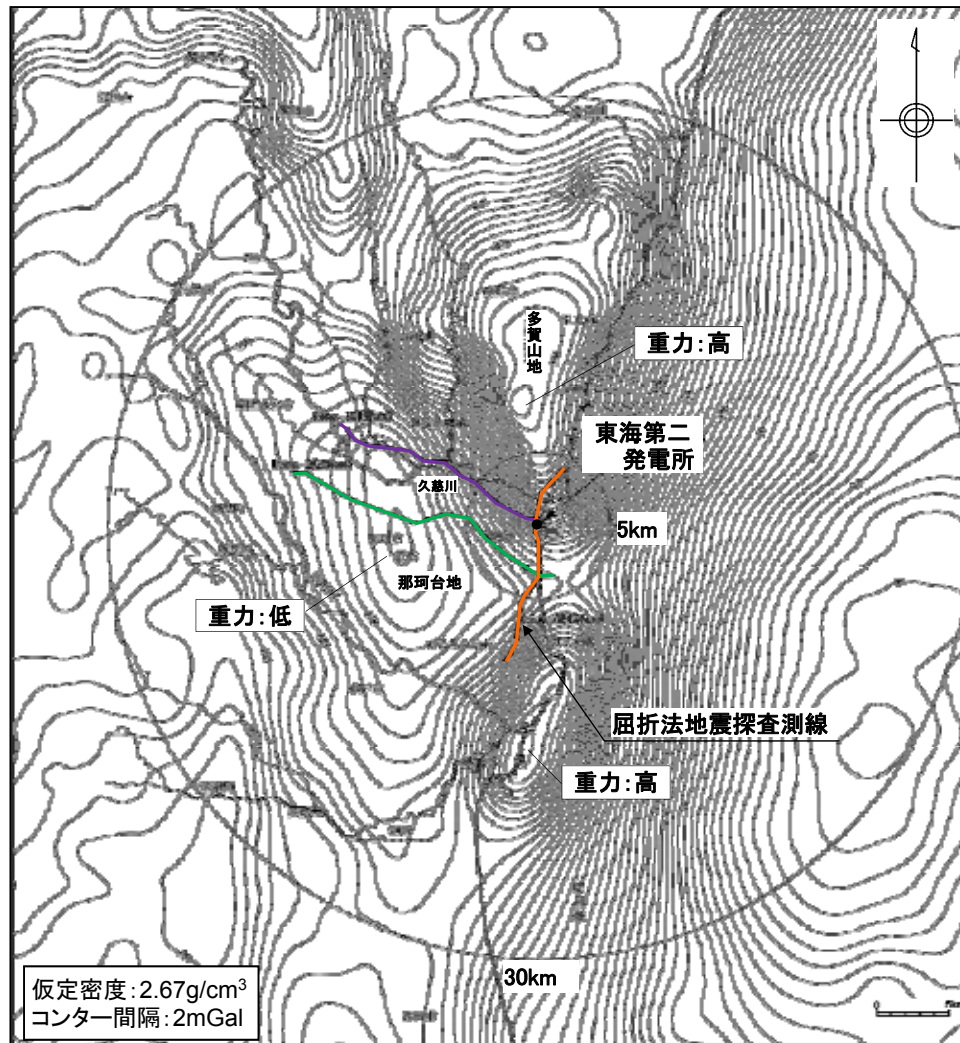
- 地震発生領域を9領域に区分し、地震観測記録の応答スペクトル比を比較した結果、応答スペクトル比は領域によって大きく変化することはない、ばらつきも小さい。その傾向は、先に実施した4領域に区分した結果と同様であり、敷地地盤の地下構造が水平成層かつ均質とみなして評価できることを確認した。



領域ごとの平均応答スペクトル比(9領域)

4. 地球物理学的調査による地下構造評価

4.1 地球物理学的調査について



敷地北方の多賀山地南西縁付近には、NNW－SSE方向に線状の重力の急勾配構造が認められており、この急勾配構造は敷地付近を通過し、南方まで延長している。



上記の重力異常域と地下深部構造の関係を把握するとともに、敷地周辺地盤の速度構造を得るために、屈折法地震探査及び微動アレイ探査を実施した。

屈折法地震探査測線 凡例

- : Line-A(17km)
- : Line-1 (19km)
- : Line-2 (23km)

地質調査総合センター編「日本重力データベース DVD版」(2013)に加筆

- 敷地西方の那珂台地には低重力域の中心があり、敷地との間に重力の急勾配構造が認められる。重力異常域と地下深部構造の関係を把握するために、地球物理学的調査を実施し、敷地周辺の3次元地下構造を把握する。

○ 地震探査

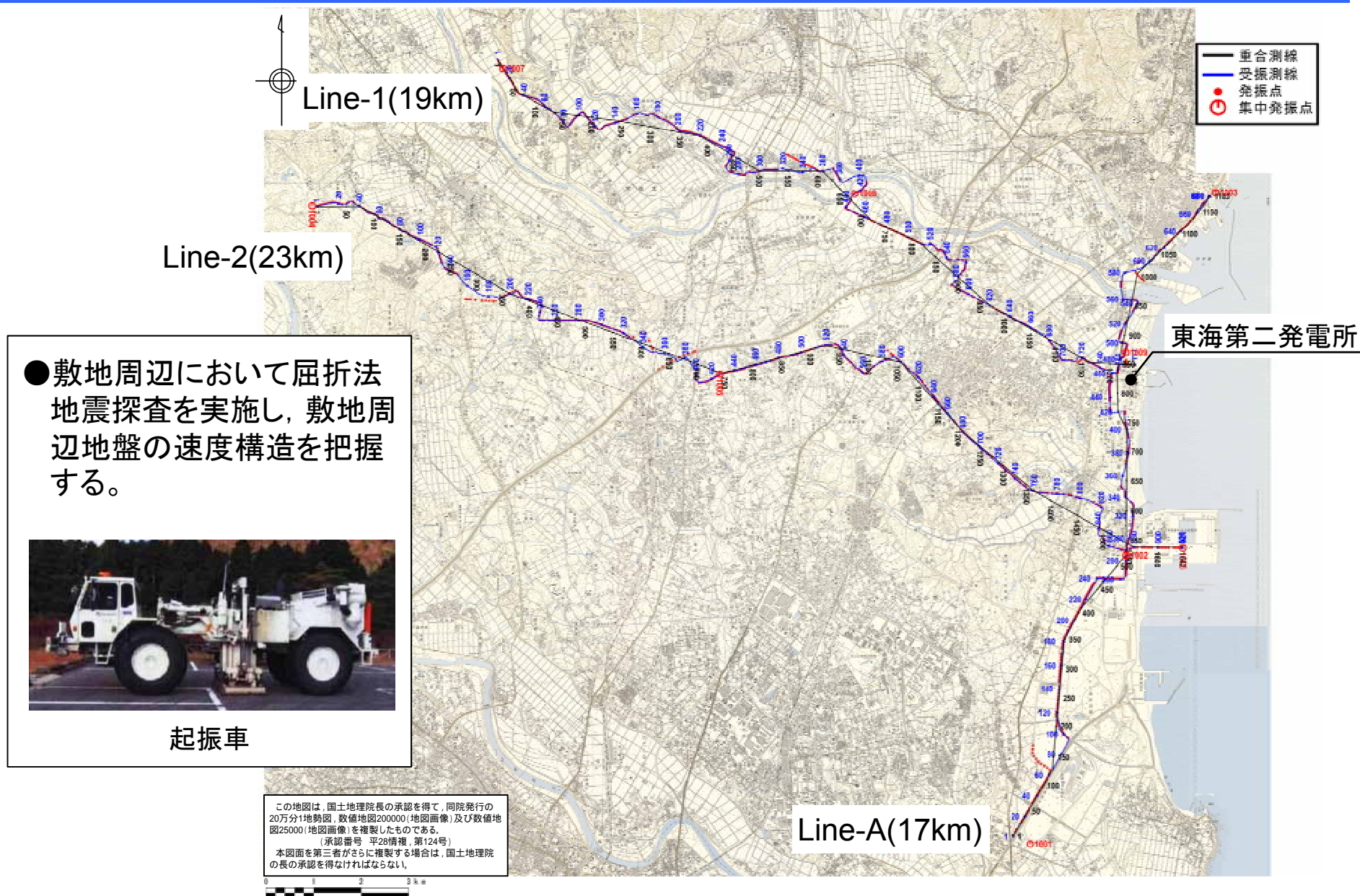
- ・ 敷地周辺において屈折法地震探査を実施し、敷地周辺地盤の速度構造を把握する。
- ・ 日立市～ひたちなか市（Line-A:探査距離 17km）
発電所～常陸太田市（Line-1:探査距離 19km）
ひたちなか市～那珂市（Line-2:探査距離 23km）

○ 微動探査

- ・ 敷地周辺において微動アレイ探査を実施し、敷地周辺地盤の速度構造を把握する。
- ・ アレイサイズ(底辺長)4km 1箇所
アレイサイズ(底辺長)2km 10箇所

4.1 地球物理学的調査について 屈折法地震探査測線

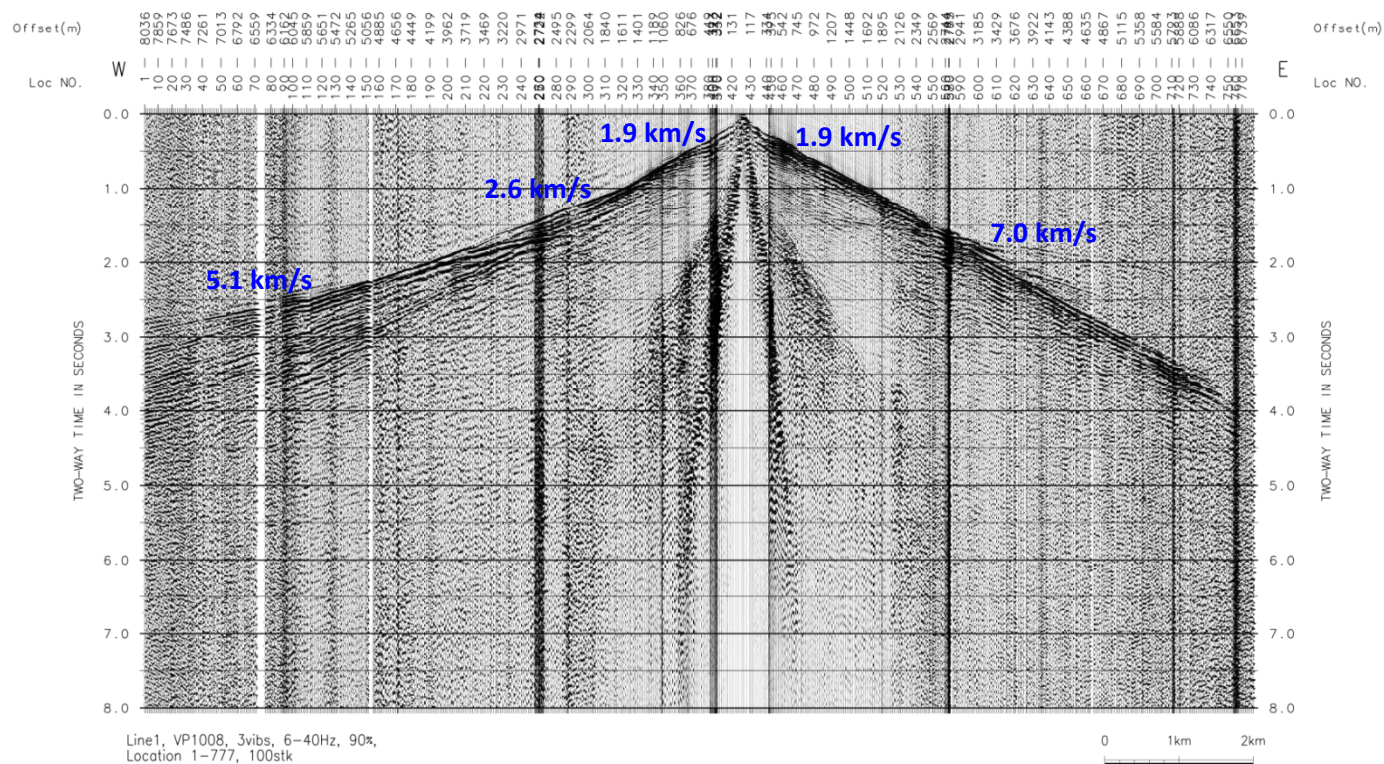
第338回審査会合
資料4 再掲



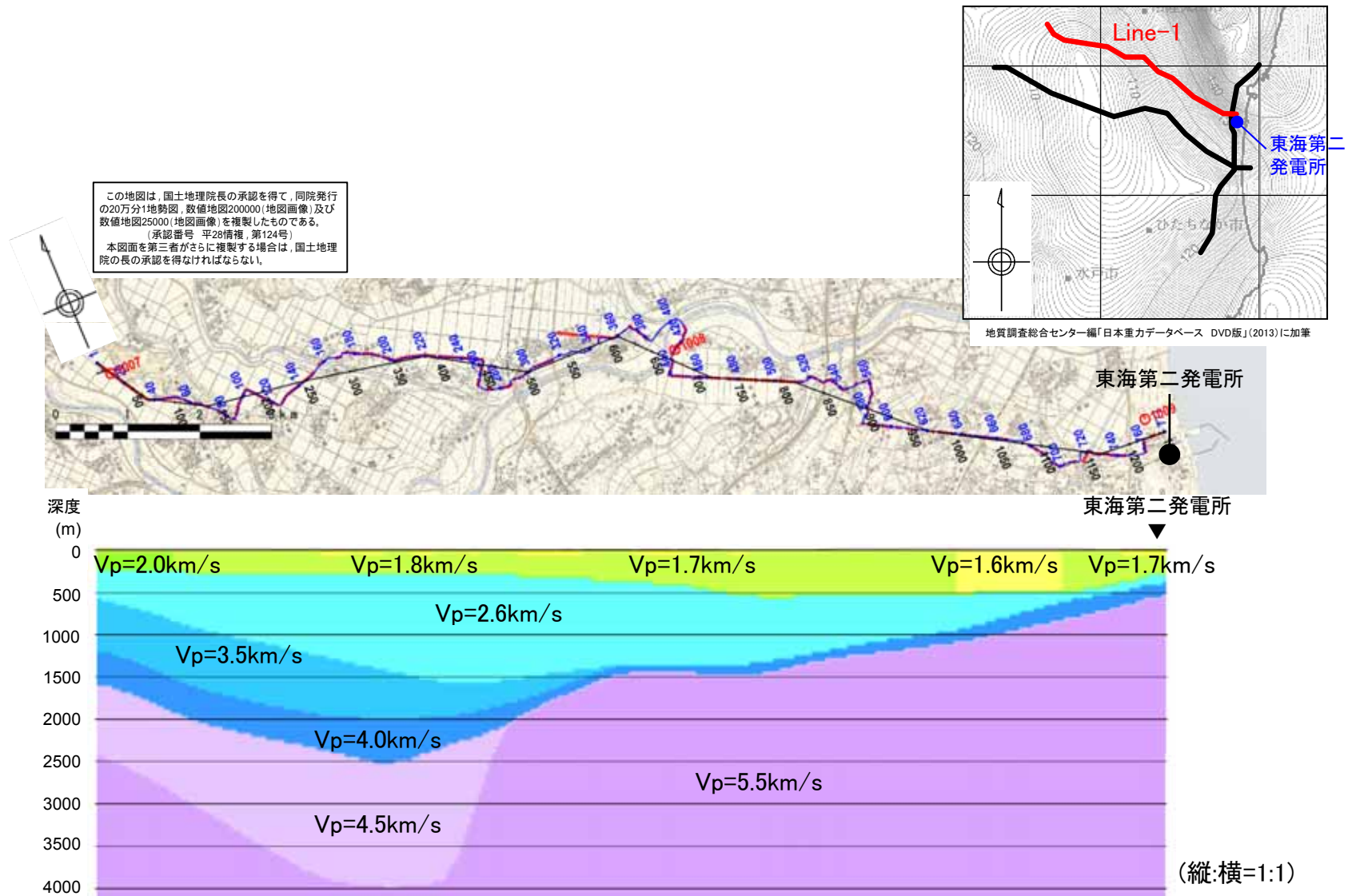
この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の20万分1地勢図、数値地図200000(地図画像)及び数値地図25000(地図画像)を複製したものである。
(承認番号 平28情複, 第124号)
本図面を第三者がさらに複製する場合は、国土地理院の長の承認を得なければならない。



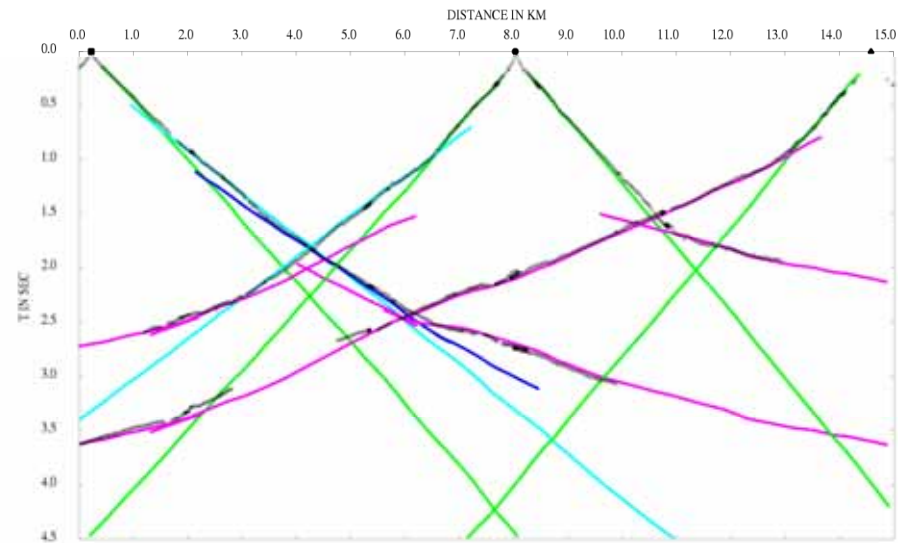
東海第二発電所



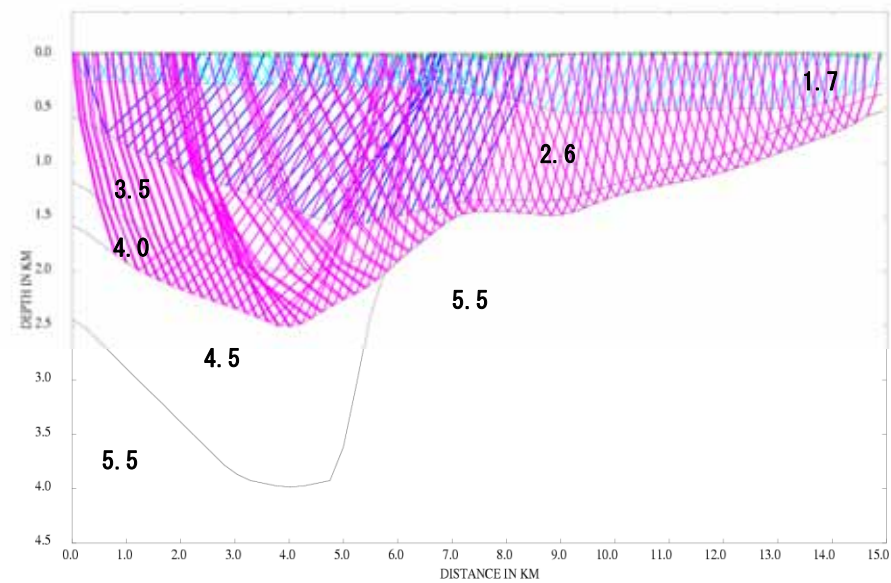
発振記録



屈折法地震探査によるP波速度構造



走時曲線(黒丸:読み取り走時 カラー:計算走時)



波線と速度区分(数字はP波速度:km/s)

4.1 地球物理学的調査について 微動アレイ探査位置

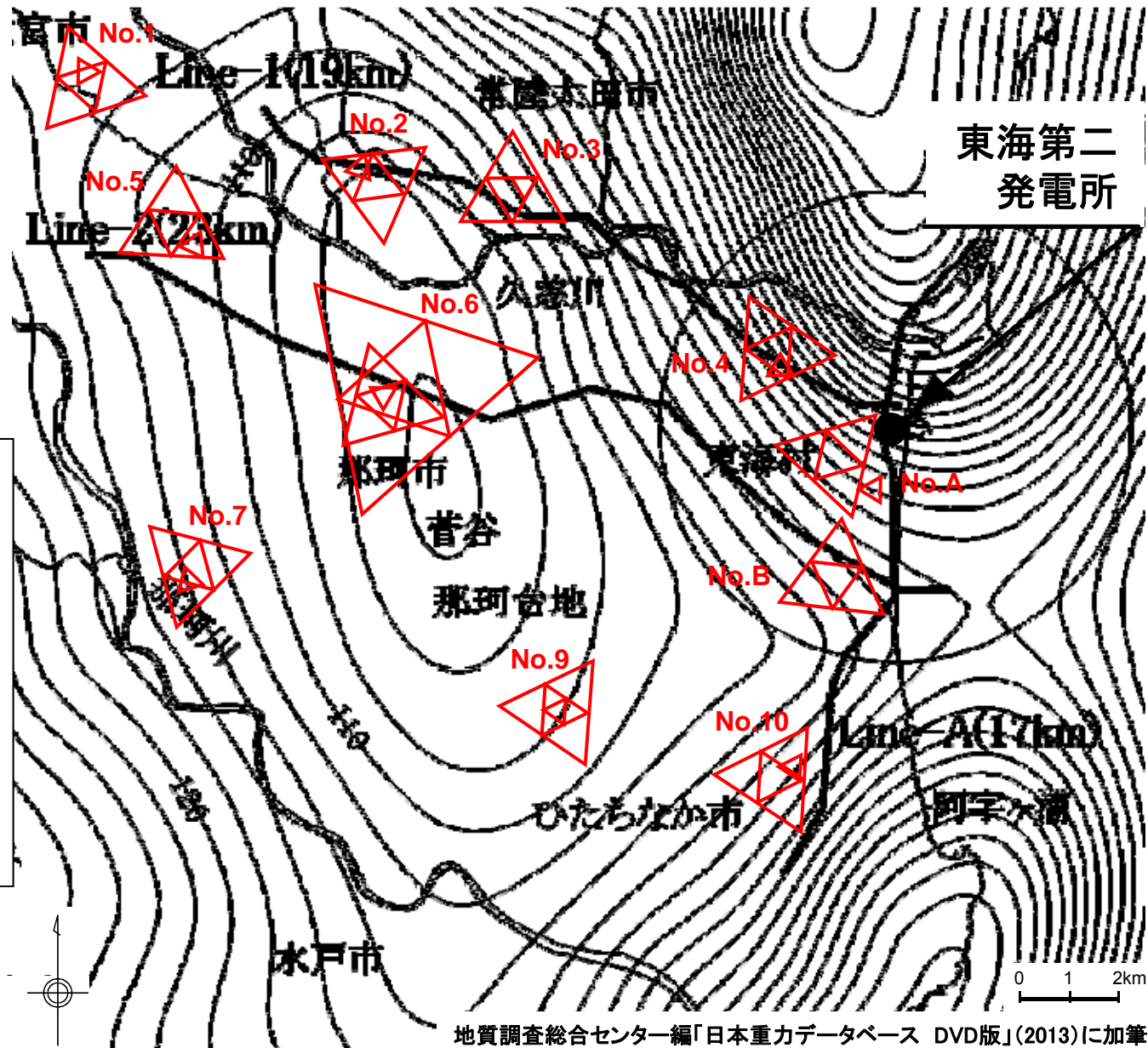
第338回審査会合
資料4 再掲

- 敷地周辺において微動アレイ探査を実施し、敷地周辺のS波速度構造を把握する。

微動探査に用いた微動計



- 弾性波探査測線
(屈折法地震探査)
- △ 微動アレイ探査位置

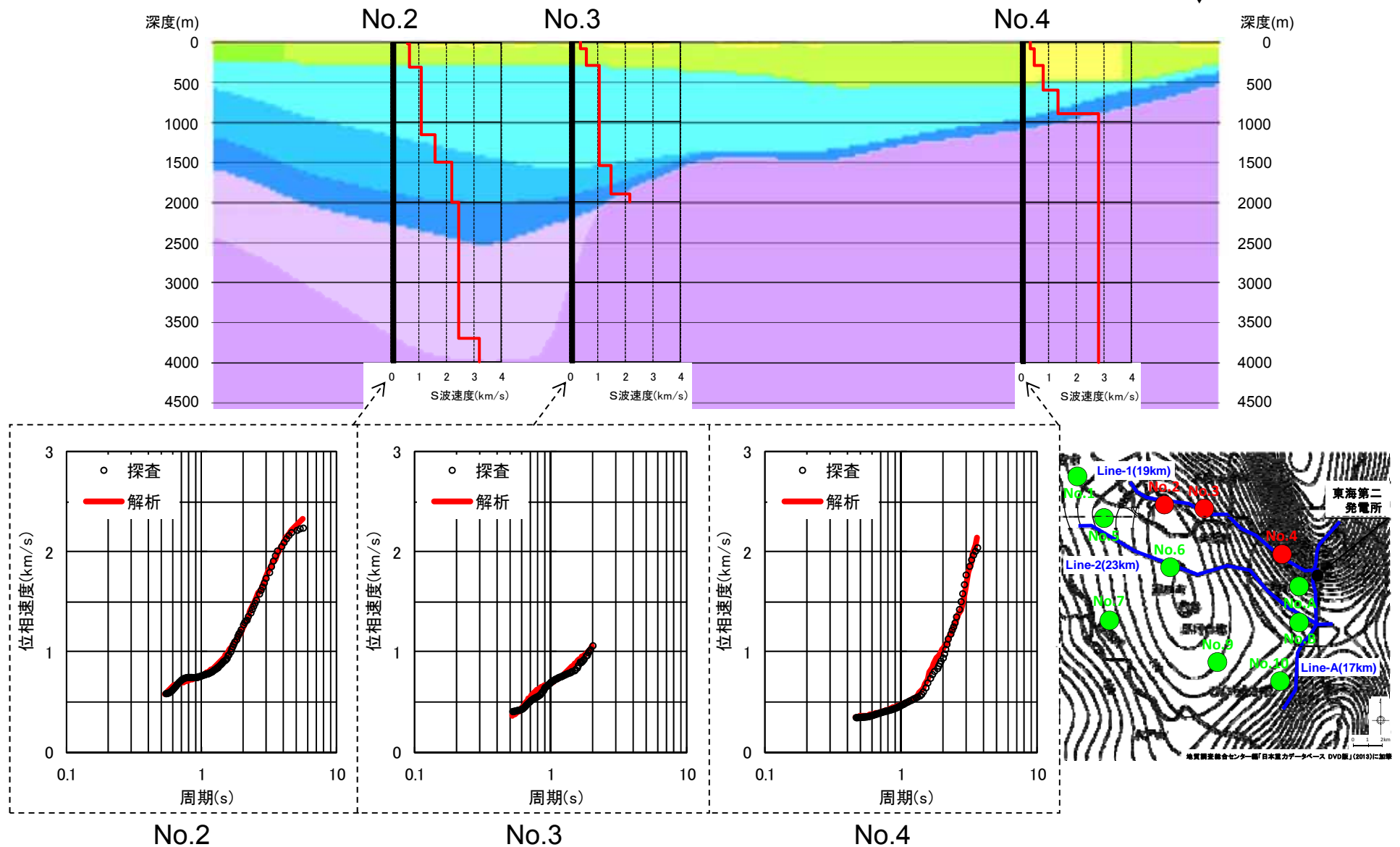


地質調査総合センター編「日本重力データベース DVD版」(2013)に加筆

4.1 地球物理学の調査について 微動アレイ探査結果

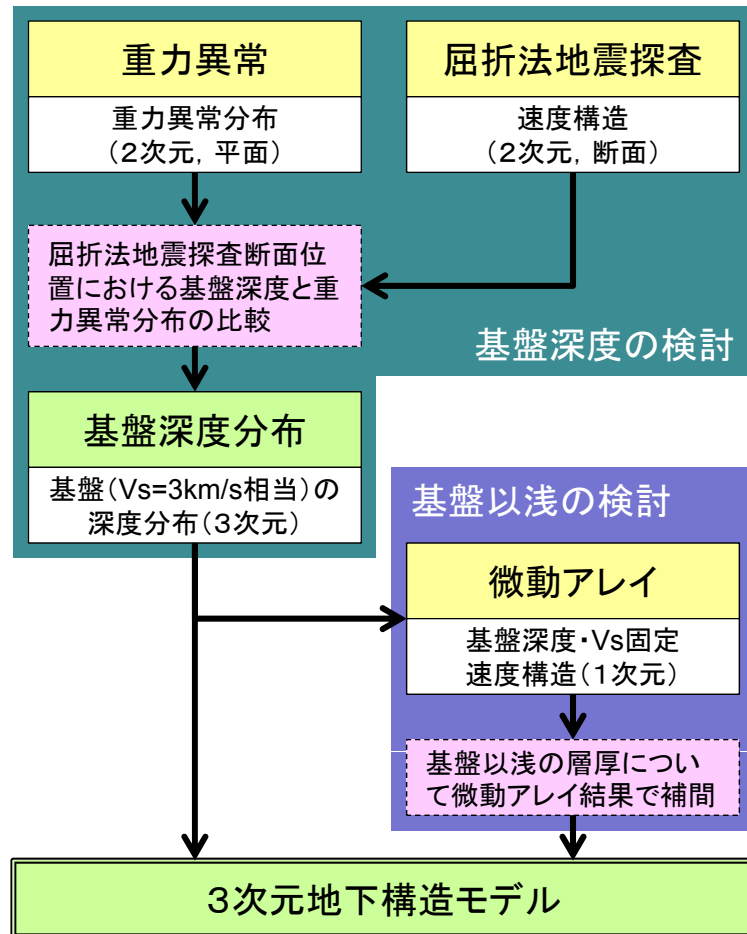
第338回審査会合
資料4 再掲

東海第二発電所

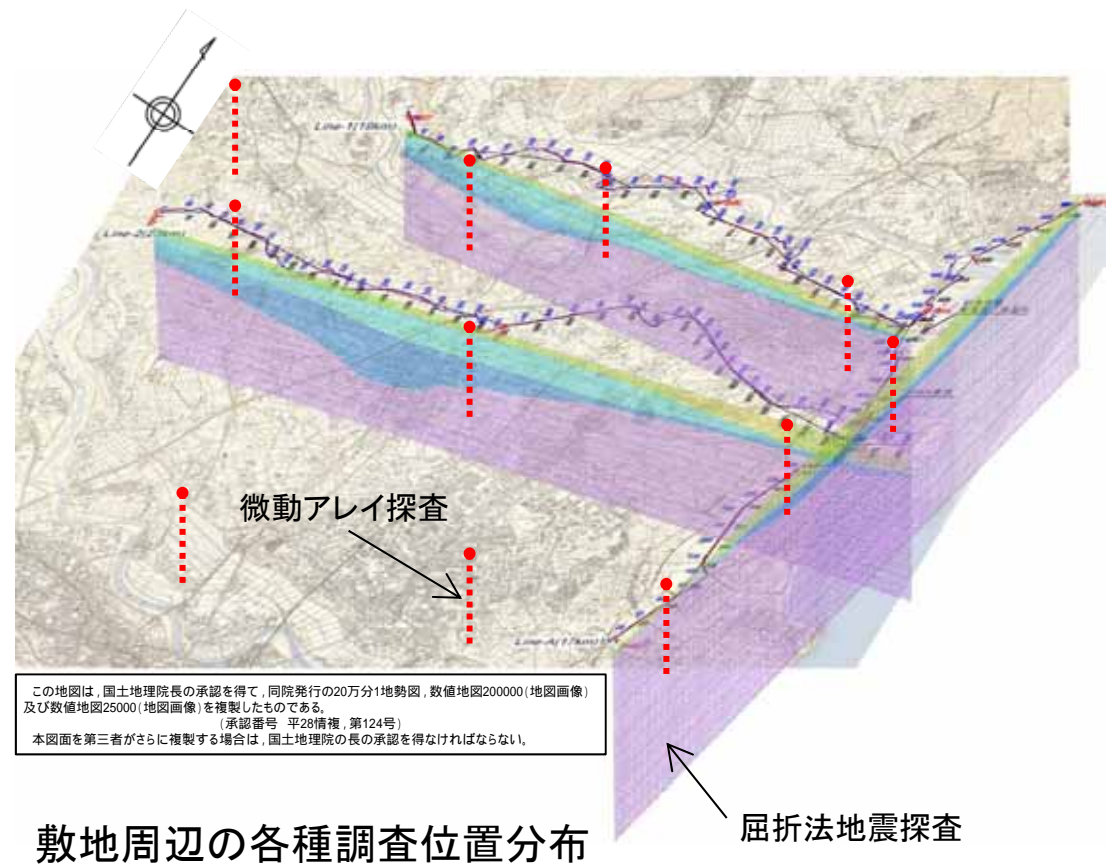


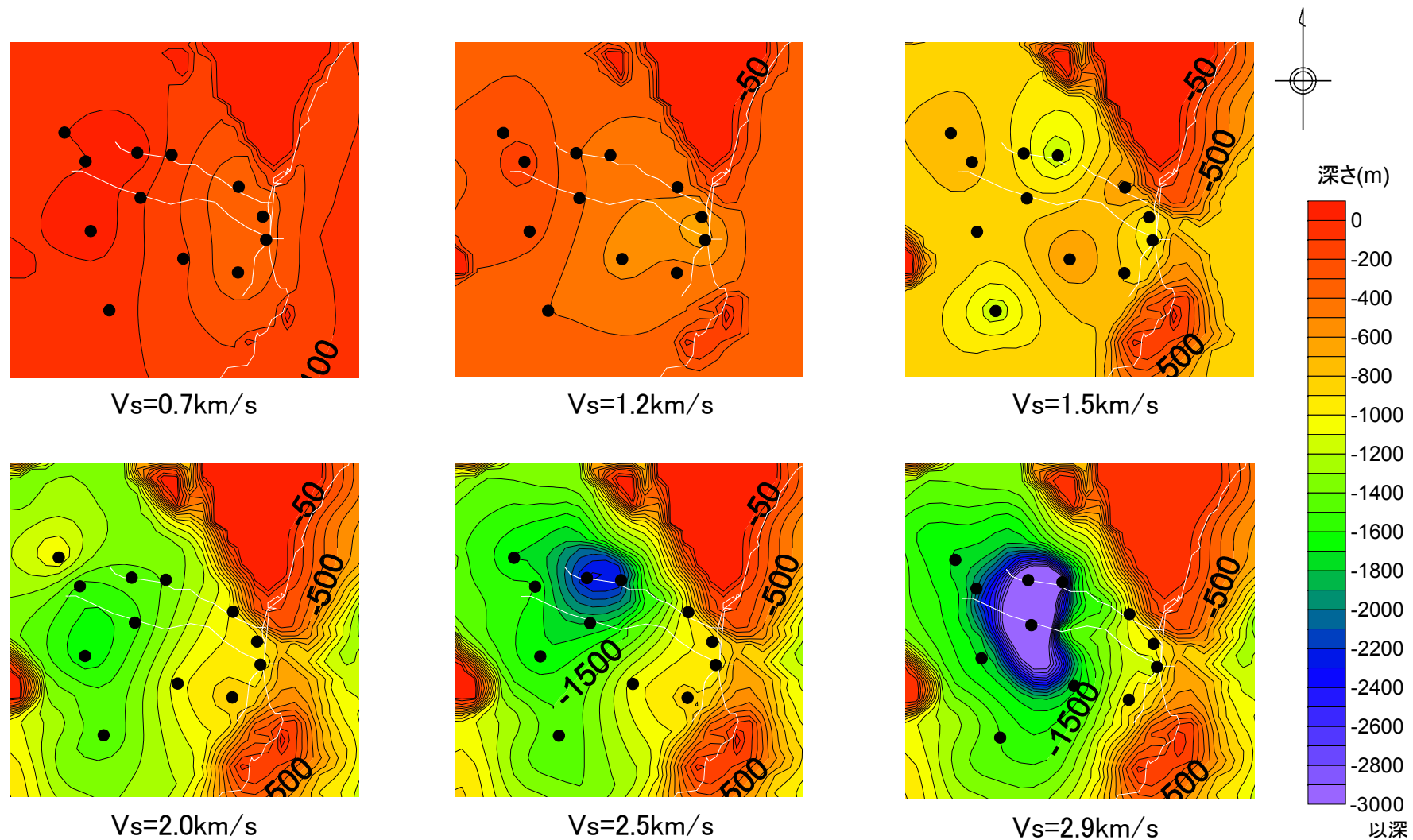
3次元地下構造の把握 (1/3)

- 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, 3次元の地下構造を把握する。



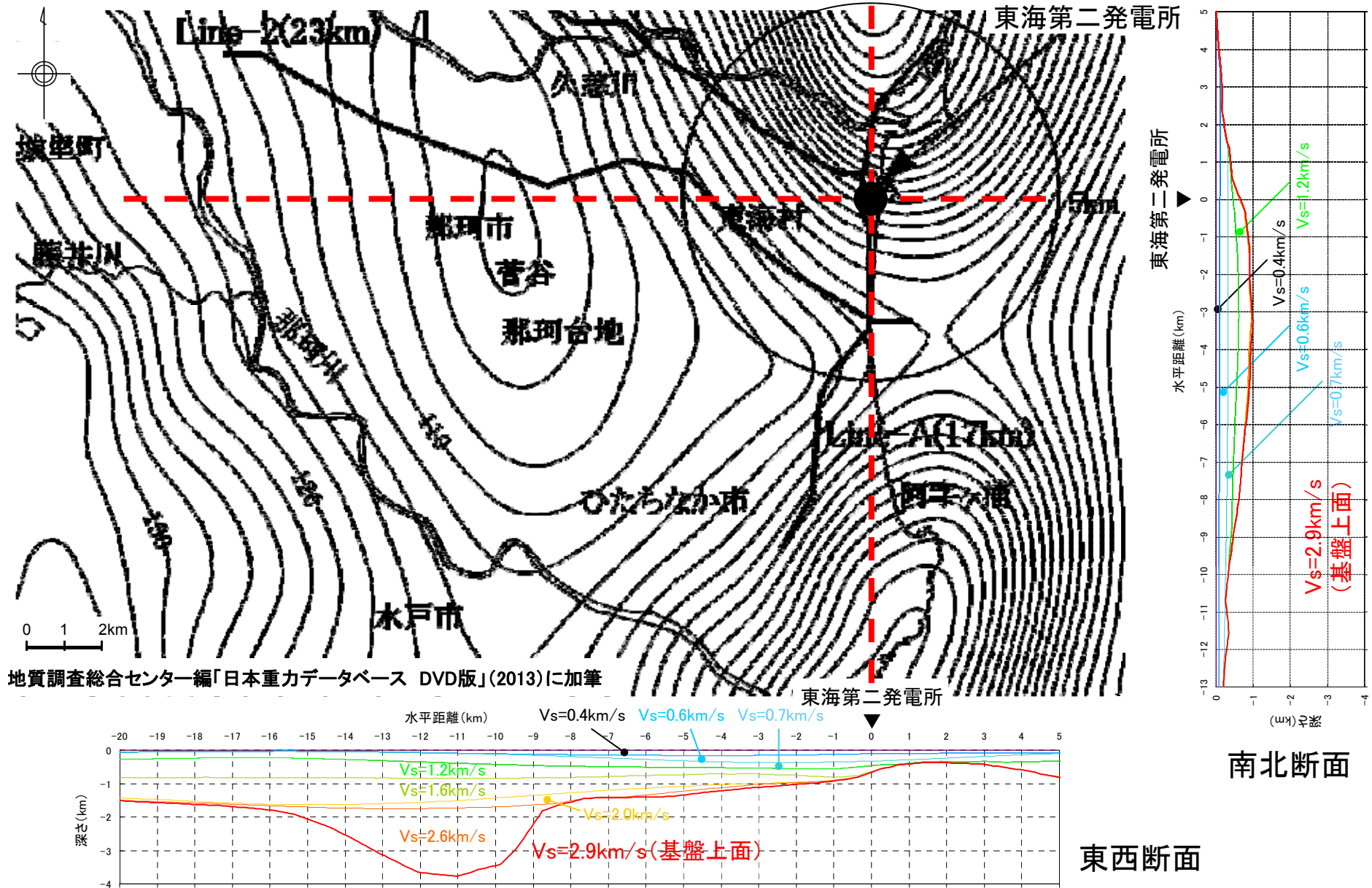
3次元地下構造モデル作成手順





S波速度層の上面深度分布図

3次元地下構造の把握 (3/3)



- 敷地で実施した地球物理学的調査を用いて、3次元地下構造モデルを確認する。

○ 単点微動測定

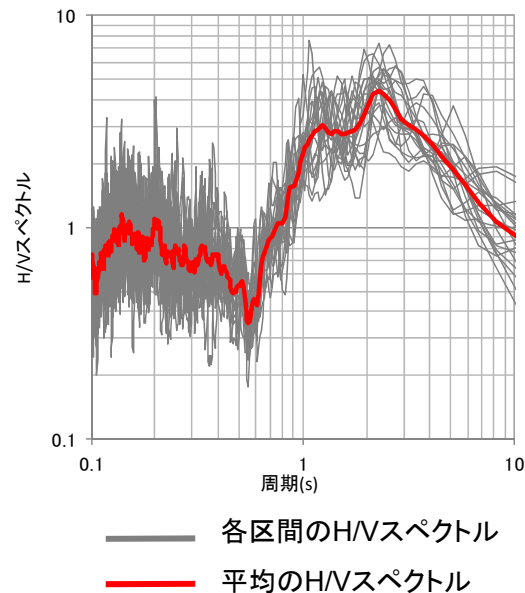
- ・敷地における基盤の広がりを把握する。
- ・約50m格子間隔で100地点の単点微動測定を実施

○ 微動アレイ探査

- ・敷地のS波速度構造を確認する。
- ・アレイサイズ(底辺長) 約470m, 約235m, 約115m, 約35m

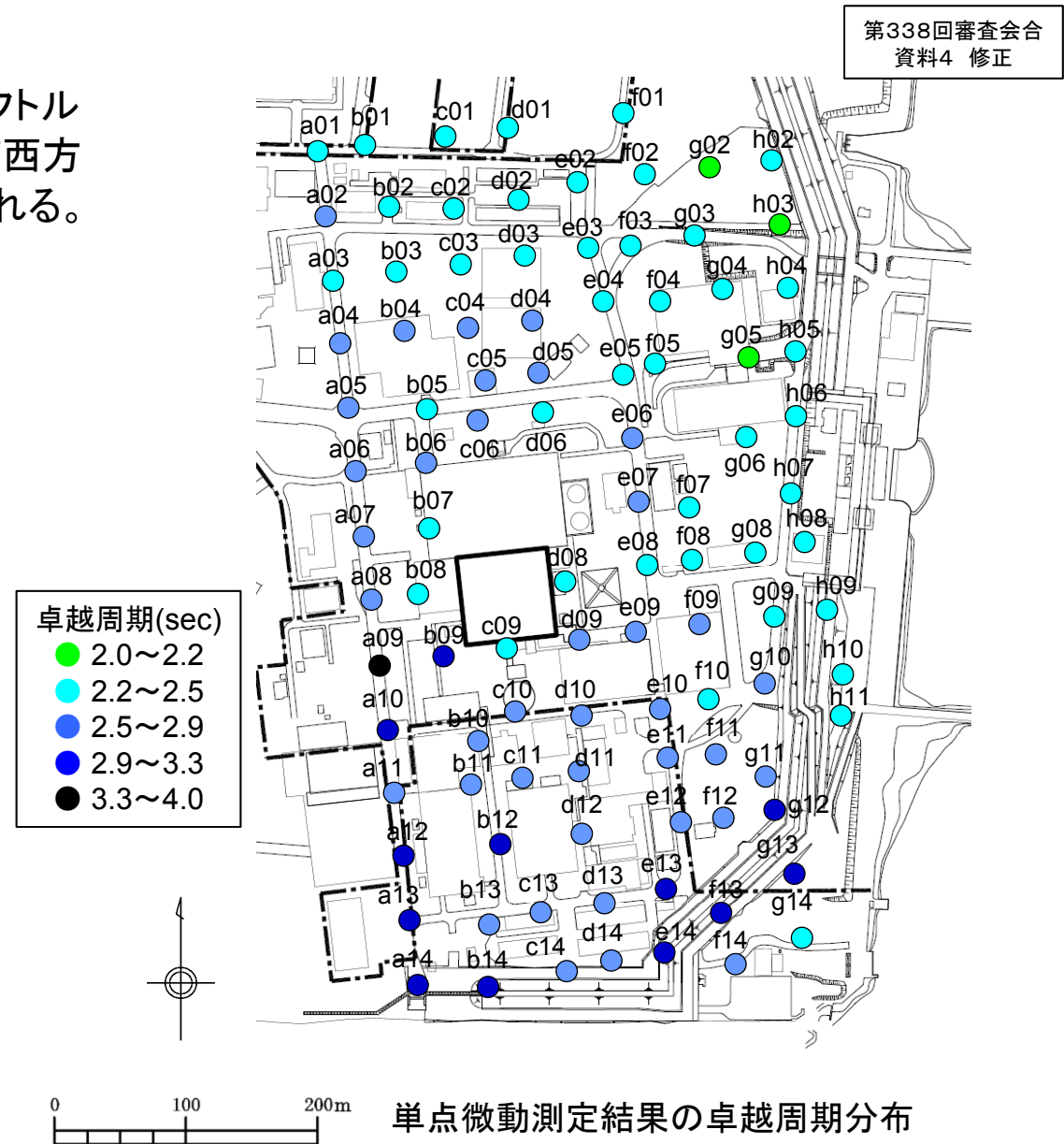
3次元地下構造モデルの確認 (2/7) - 単点微動測定位置 -

- 敷地内における基盤の広がり把握するため、敷地内の100点(約50m格子間隔)で単点微動測定を実施
- H/Vスペクトルの算定方法
 - ・微動測定時間は、1地点につき30分間
 - ・振幅の2乗平均値の小さな順に、40.96秒×20区間のサンプルデータを作成
 - ・区間ごとにフーリエ変換を実施し、水平両成分を相乗平均したH/Vスペクトルを計算
 - ・対象周期は0.1～10秒



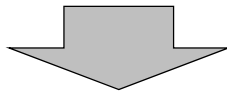
3次元地下構造モデルの確認 (3/7) —単点微動測定結果(卓越周期分布)—

- 単点微動測定より得られたH/Vスペクトルの卓越周期分布は、北東方向から南西方向に卓越周期が長くなる傾向が見られる。

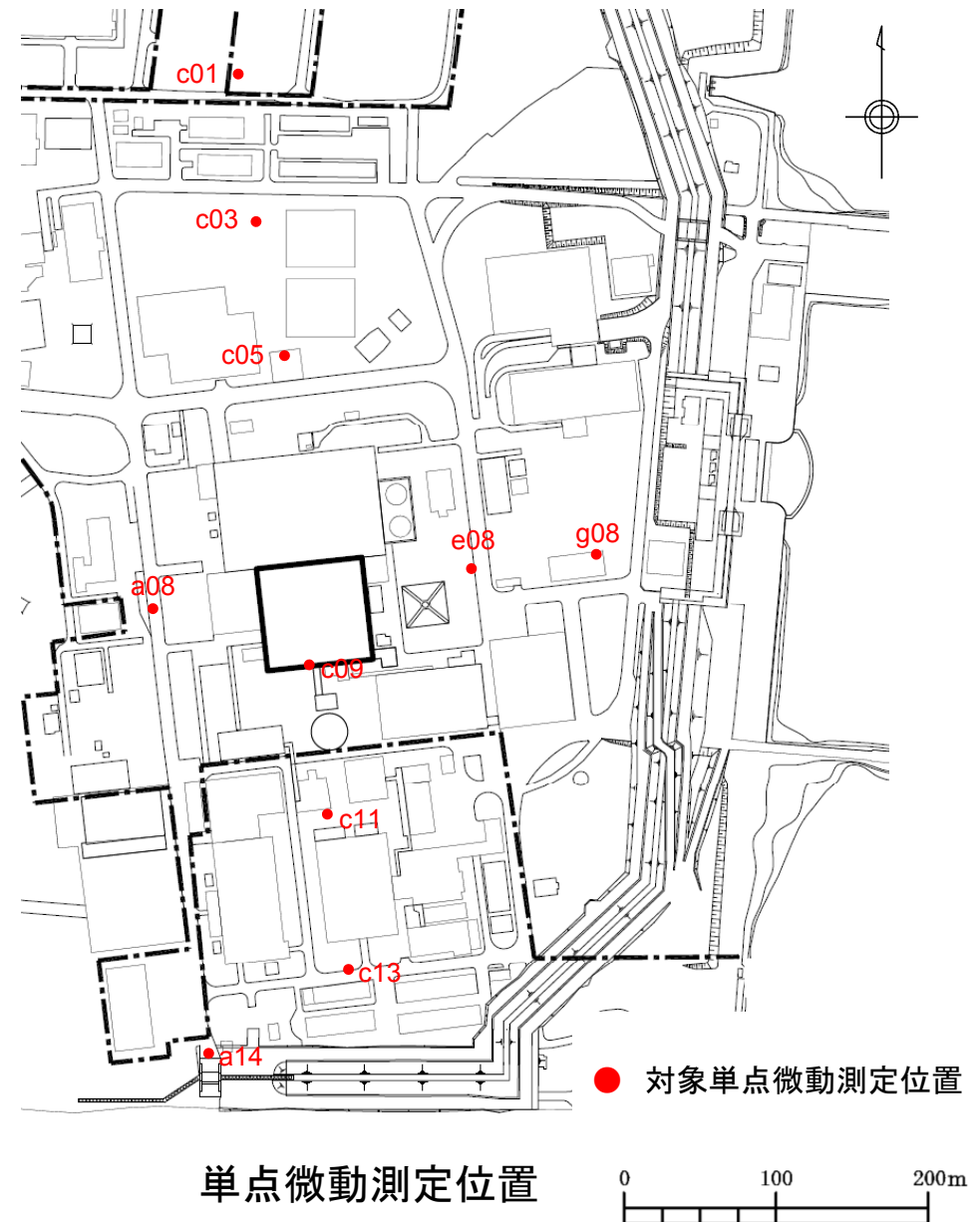


3次元地下構造モデルの確認 (4/7) —地盤モデルの検証(1/3)—

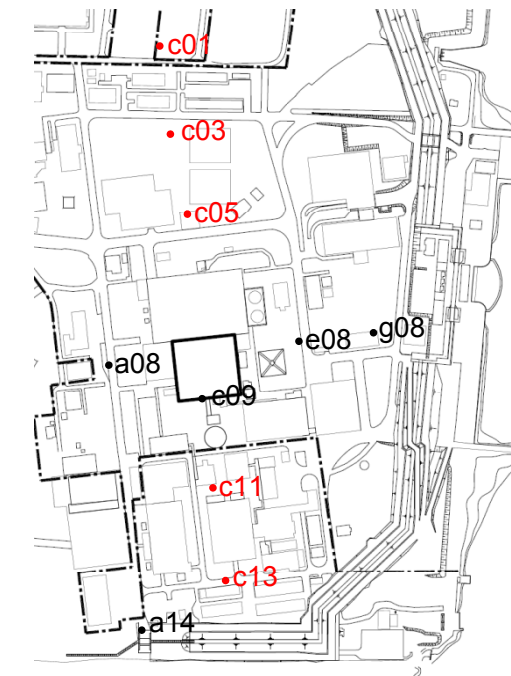
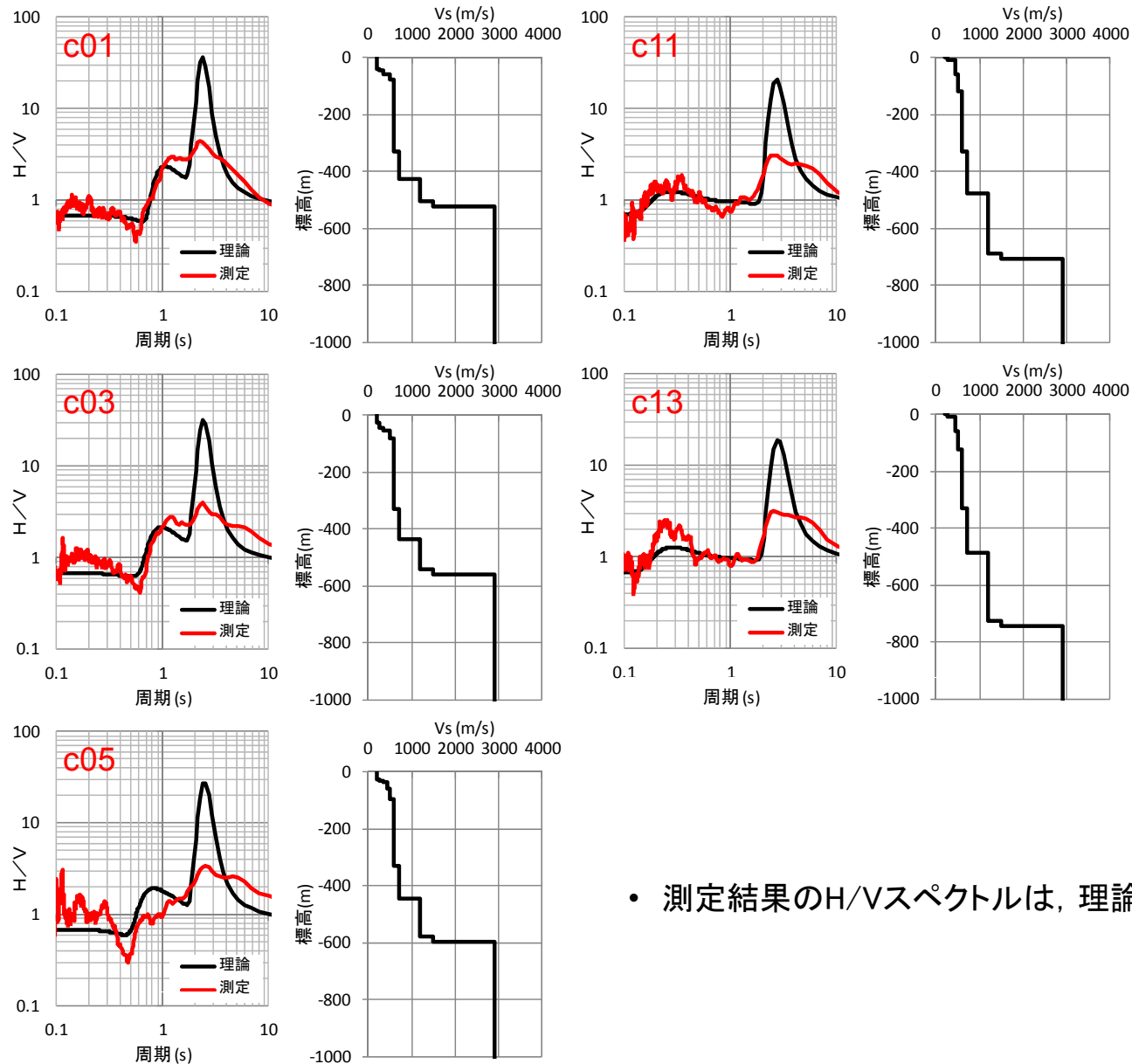
- 3次元地盤モデルを確認するため、地盤モデルに基づき算定した表面波(レイリー波)の理論H/Vスペクトルと、単点微動測定より得られたH/Vスペクトルの比較を行った。
- 表面波は表層に大きく影響されるため、レイリー波の理論H/Vスペクトルを算定する際の地盤モデルのうち第四紀層については、地質断面図を参考に層厚と地盤速度を設定した。



- 地盤モデルに基づき算定したレイリー波の理論H/Vスペクトルと、単点微動測定より得られたH/Vスペクトルは調和的である。
- 周期3～4秒付近に見られるH/Vスペクトルのピークは、深さ500m前後に見られる地盤速度の境界によるものである。

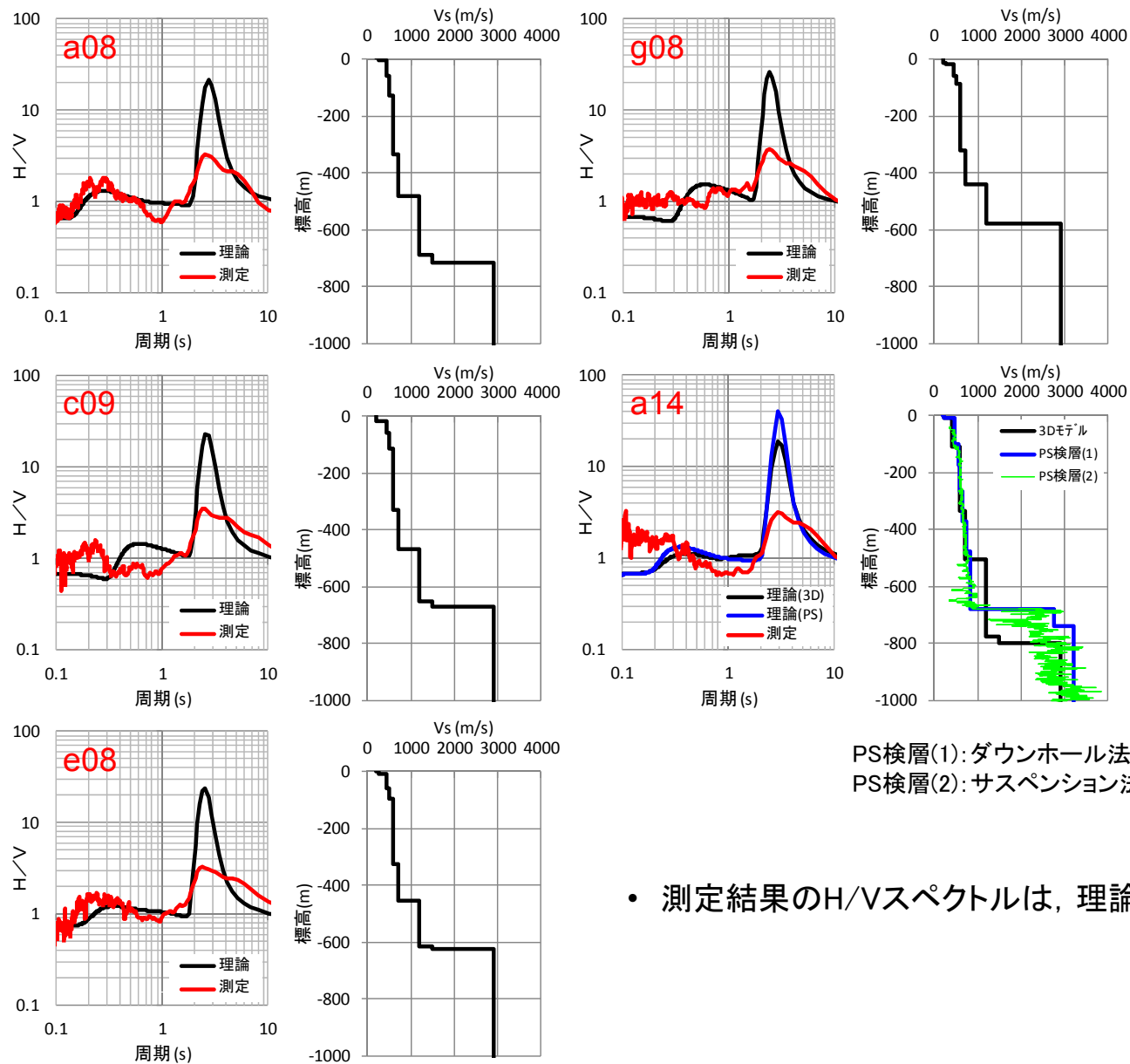


単点微動測定位置

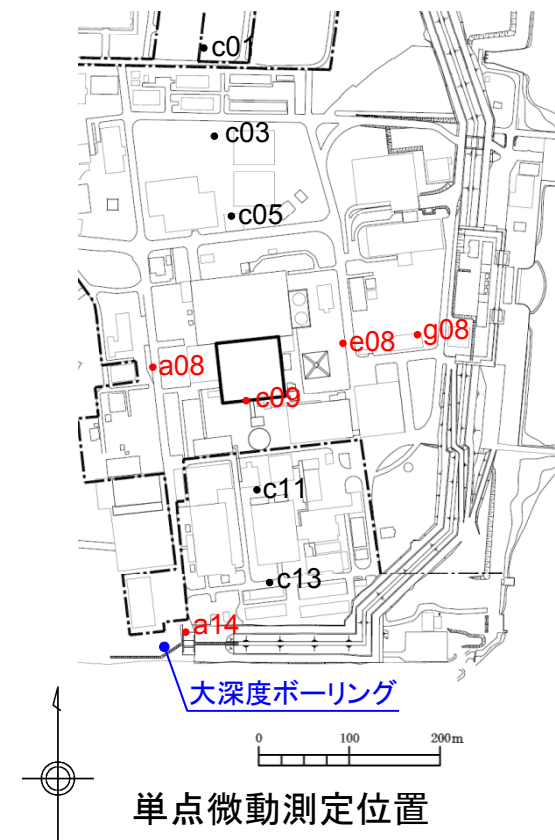


単点微動測定位置

- 測定結果のH/Vスペクトルは、理論H/Vスペクトルと調和的である。



PS検層(1): ダウンホール法
PS検層(2): サスペンション法



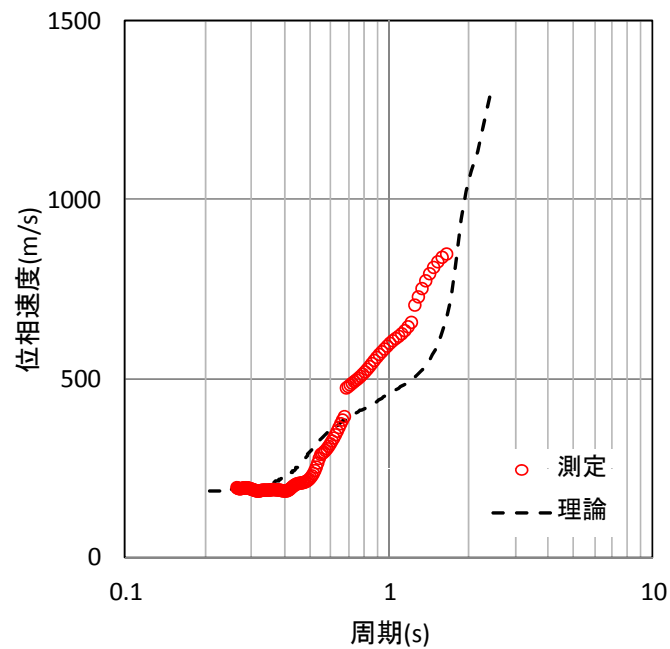
- 測定結果のH/Vスペクトルは、理論H/Vスペクトルと調和的である。

3次元地下構造モデルの確認 (7/7) - 微動アレイ探査 -

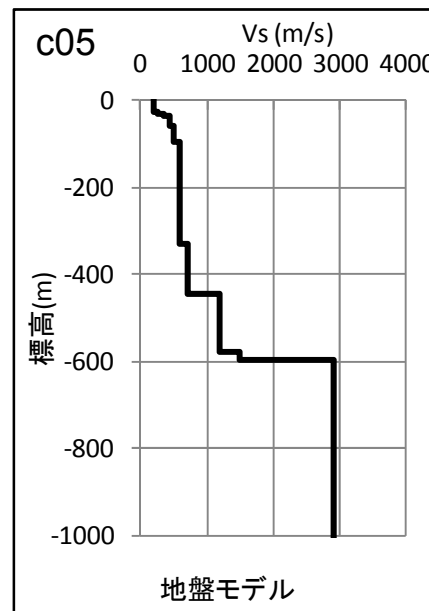
- 敷地における微動アレイ探査結果と地盤モデルより求めた理論分散曲線は整合している。

微動計の仕様	
センサー形式	サーボ型加速度計
チャンネル数	3ch(水平2成分, 上下1成分)
周波数帯域	DC~200Hz
感度	2.0V/G

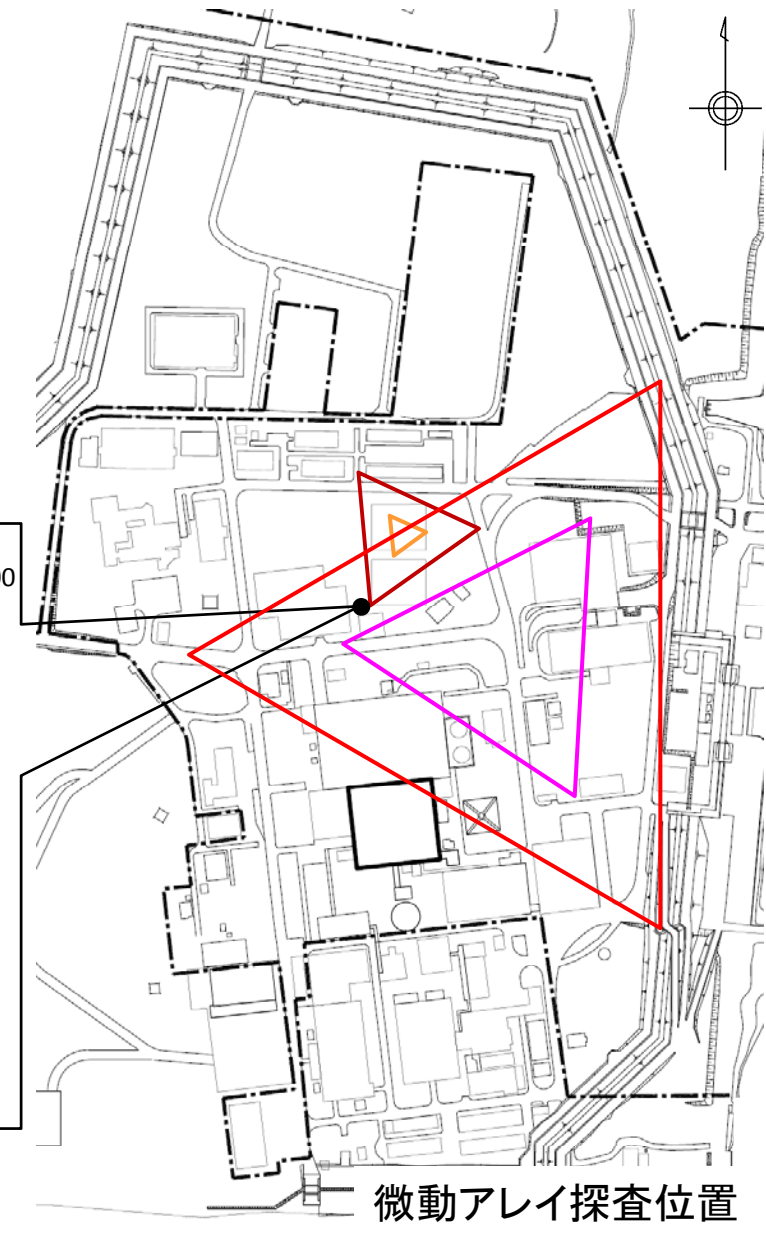
アレイサイズ (底辺長)
約470m
約235m
約115m
約35m



微動アレイ探査結果



地盤モデル



微動アレイ探査位置

- 地球物理学的調査により、以下の結果が得られた。
 - ・ 屈折法地震探査結果より、重力異常分布に見られる敷地の西側の低重力域における基盤($V_s=3\text{km/s}$ 相当)の最深部は深さ4km程度であることが明らかとなった。
 - ・ 屈折法地震探査により、探査測線に沿った2次元の地下構造(P波速度)を把握した。
 - ・ 微動アレイ探査により、探査地点における深さ方向(1次元)の地下構造(S波速度)を把握した。
 - ・ 屈折法地震探査及び微動アレイ探査により得られた速度構造データを統合し、3次元の地下構造を把握した。
 - ・ 敷地で実施した単点微動測定及び微動アレイ探査の結果と3次元地下構造モデルは整合していることを確認した。

4. 地球物理学的調査による地下構造評価

4.2 解析による検討

4.2.1 広域地盤モデルによる深部地下構造の検討

解析内容

- 敷地の西側及び南側に見られる深い基盤形状を考慮した2次元不整形モデルによる評価結果と、発電所直下の地下構造をモデル化した成層モデルによる評価結果を比較し、基盤形状が解放基盤表面における地震動へ及ぼす影響について検討する。

○ 2次元不整形モデル

- ・解析モデルの物性値を右表に示す。なお、減衰は一律 $Q=100$ とする。
- ・メッシュサイズは、鉛直方向に5Hz程度を透過する要素サイズとして、深さ1500m以浅は幅50m×高さ25m、深さ1500m以深は幅50m×高さ50mとする。
- ・解析モデルの高さは、解放基盤表面に相当する深さから-4000mまでの3620mでモデル化する。
- ・解析は周波数応答解析を用いて、モデル底面は粘性境界、左右はエネルギー伝達境界を設定する。

地下構造モデルの物性値

S波速度 $V_s(\text{km/s})$	密度(※) $\rho(\text{g/cm}^3)$	発電所直下	
		上端深度 (m)	層厚 (m)
0.70	1.99	-380	83
1.20	2.16	-463	176
1.50	2.26	-639	20
2.00	2.39	—	—
2.50	2.51	—	—
2.90	2.58	-659	3341

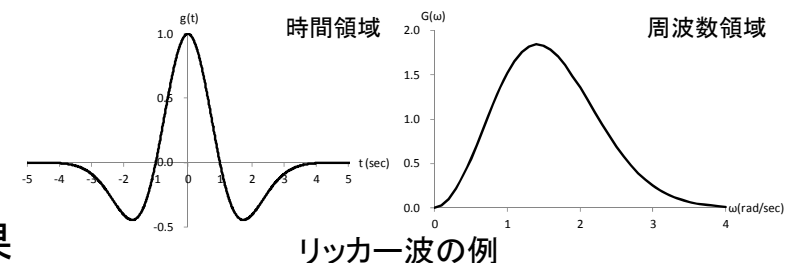
○ 成層モデル

- ・2次元不整形モデルにおける発電所直下の地下構造を抽出し、成層モデルとして用いる。

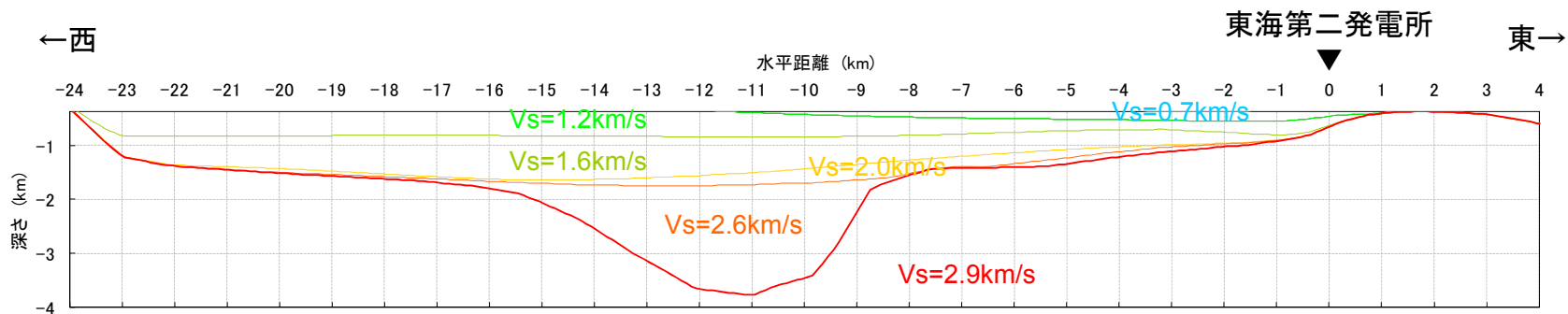
○ 入力波

- ・リッカー波の平面波を入力波とし、中心周期を0.3, 0.5, 1.0, 2.0秒、入射角を0度(鉛直)及び東西南北の各方位から20度、40度と設定する。なお、本資料では、中心周期1.0秒の入射角0度(鉛直)及び各方位から40度の結果を示す。

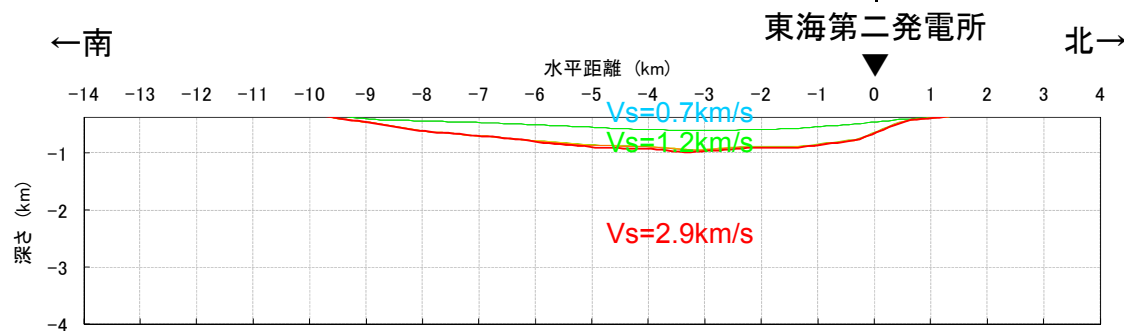
※ Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C.L. Drake (1970): Seismic Refraction, in "The Sea, Vol.4", edited by A.E. Maxwell, Wiley Interscience, New York, 53-84.



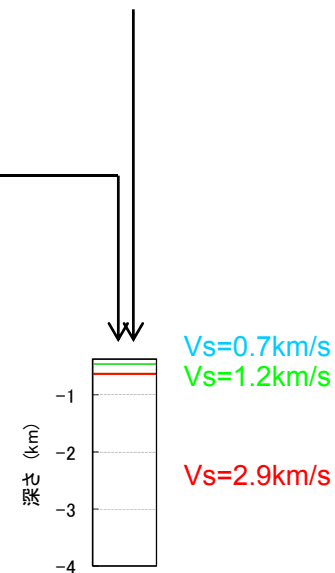
大崎順彦 (1996): 建築振動理論, 彰国社, p157-158



2次元不整形モデル(EW断面)



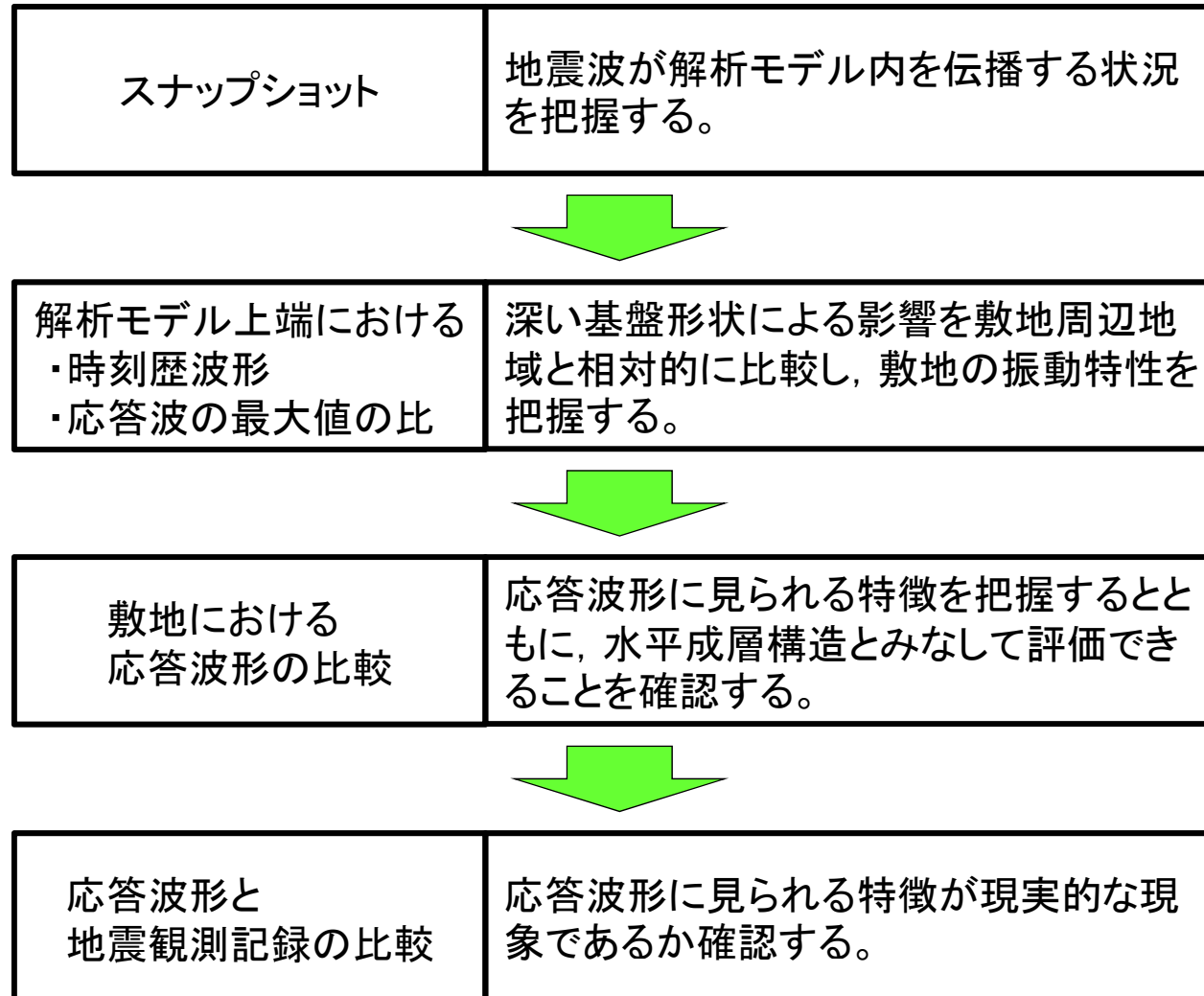
2次元不整形モデル(NS断面)



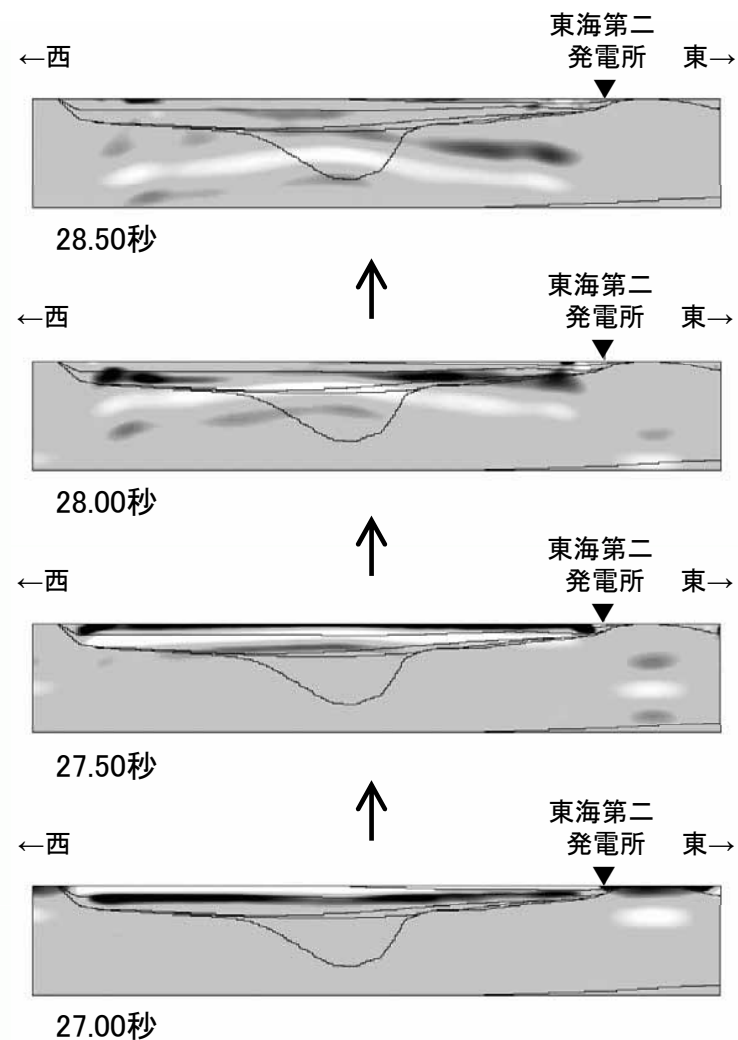
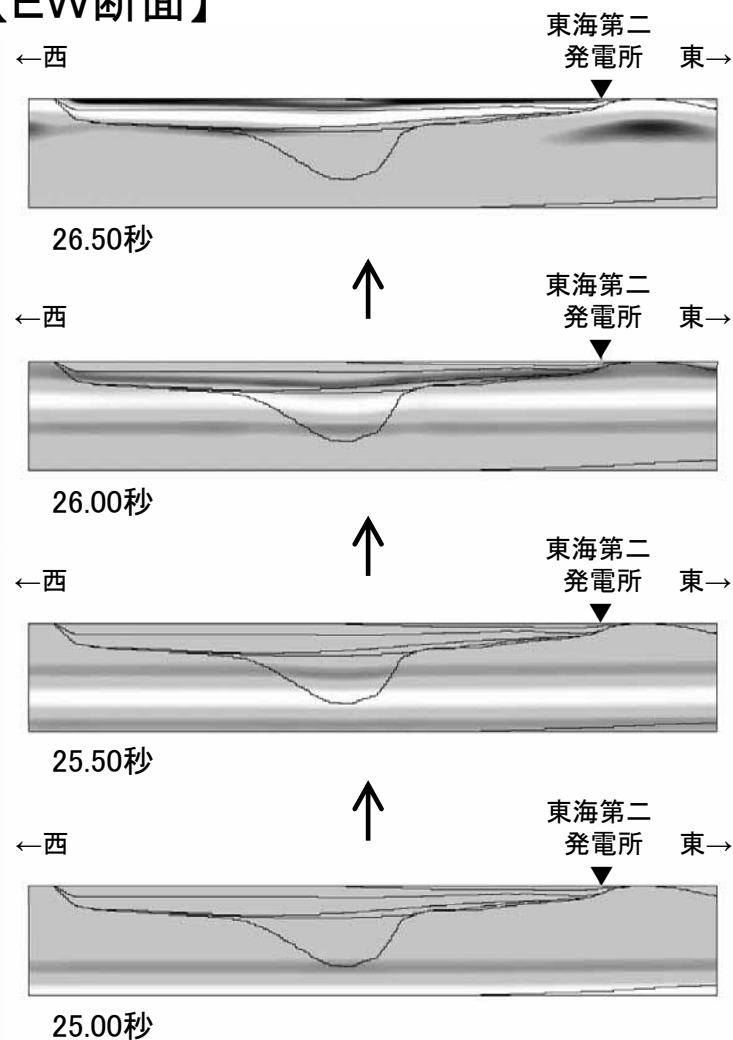
成層モデル

解析結果

- 以下のとおり、二次元不整形モデルによる解析結果を示す。



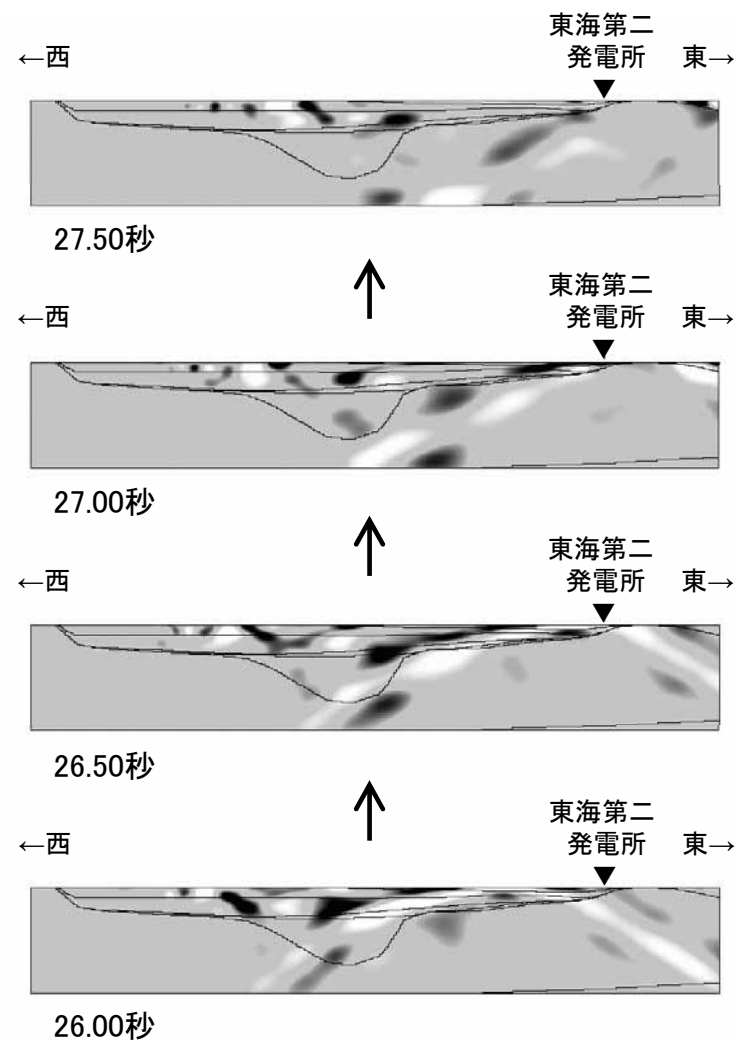
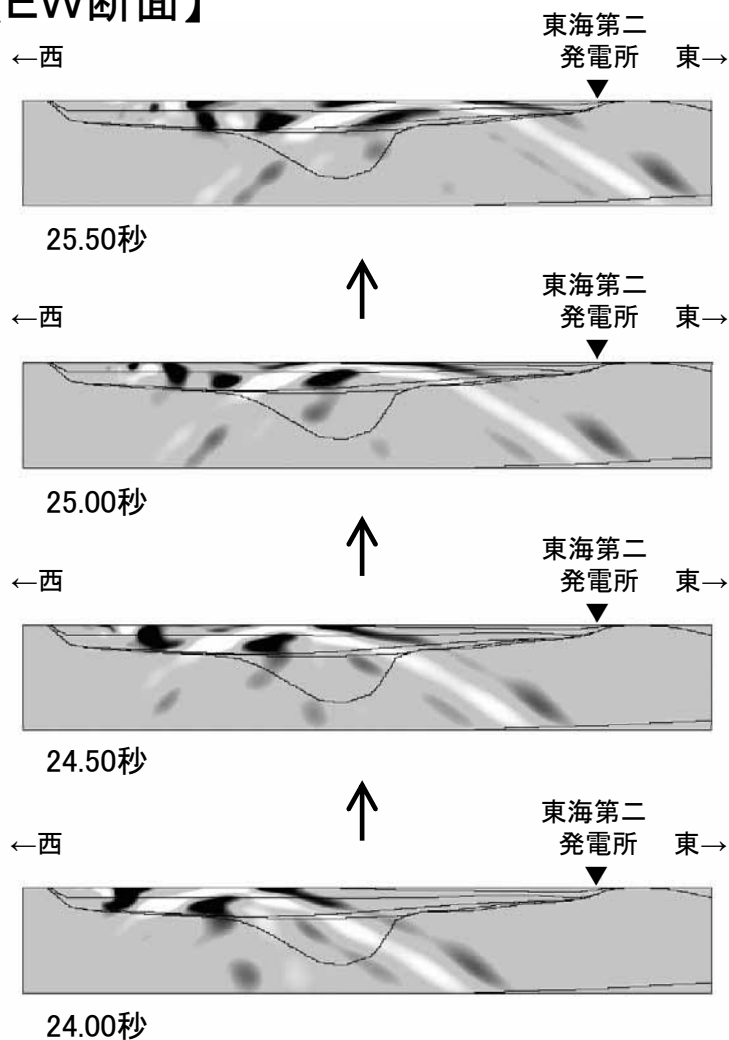
【EW断面】



解析結果(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角0度)

黒は+側, 白は-側
縦横比=1:1

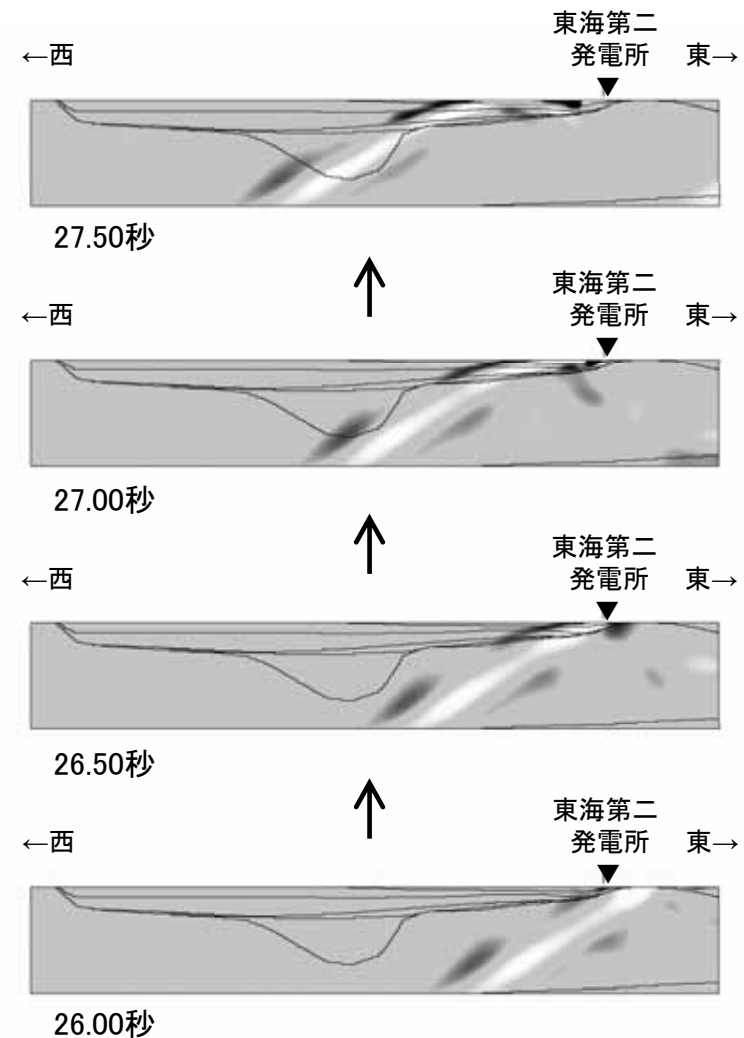
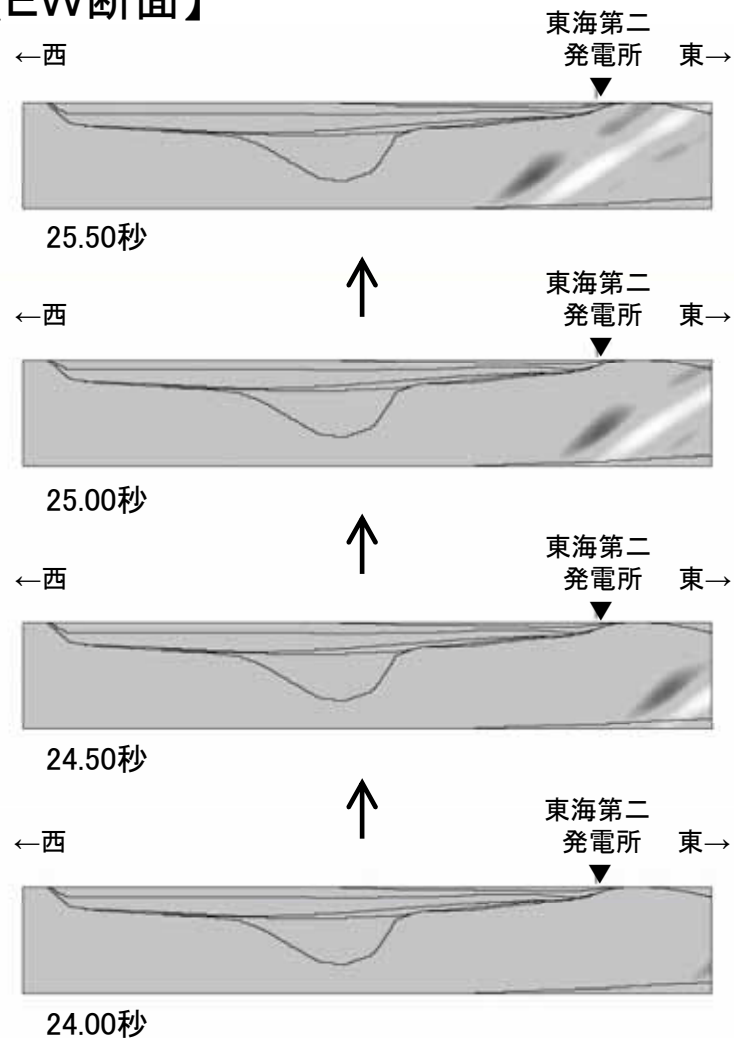
【EW断面】



解析結果(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:西から40度)

黒は+側, 白は-側
縦横比=1:1

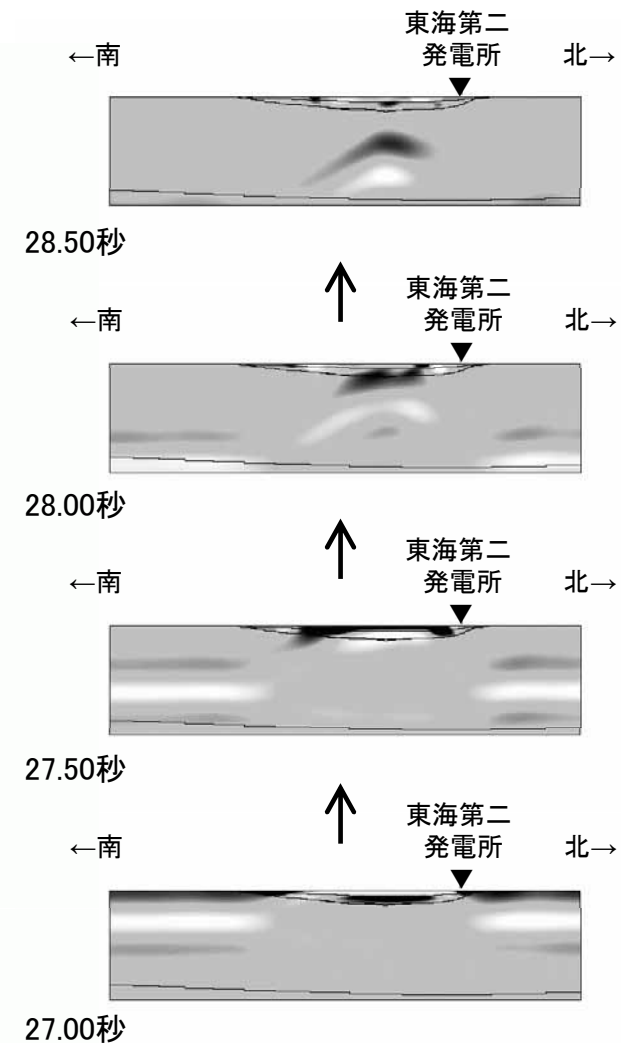
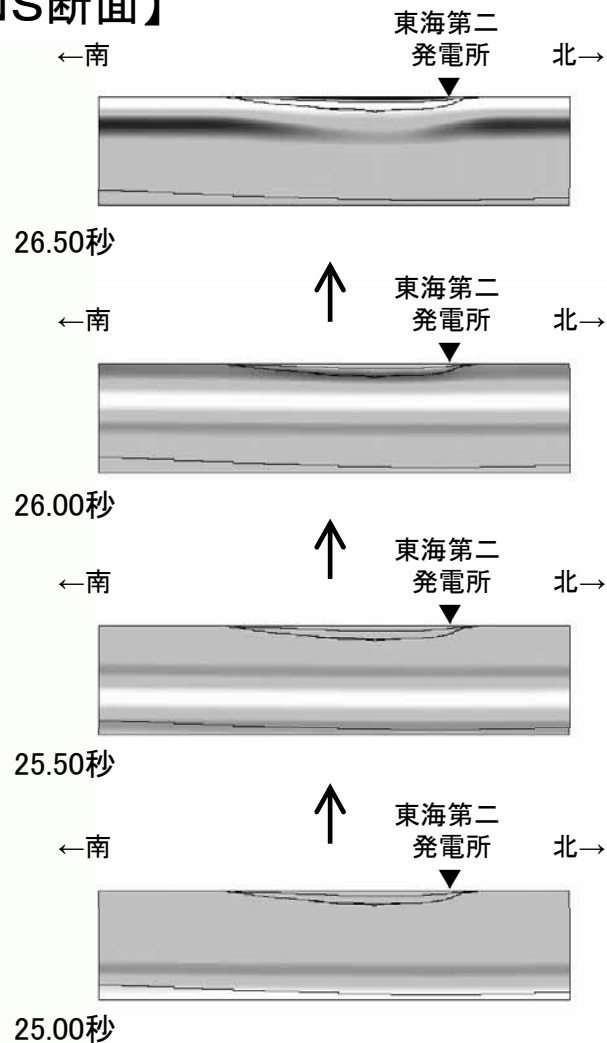
【EW断面】



解析結果(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:東から40度)

黒は+側, 白は-側
縦横比=1:1

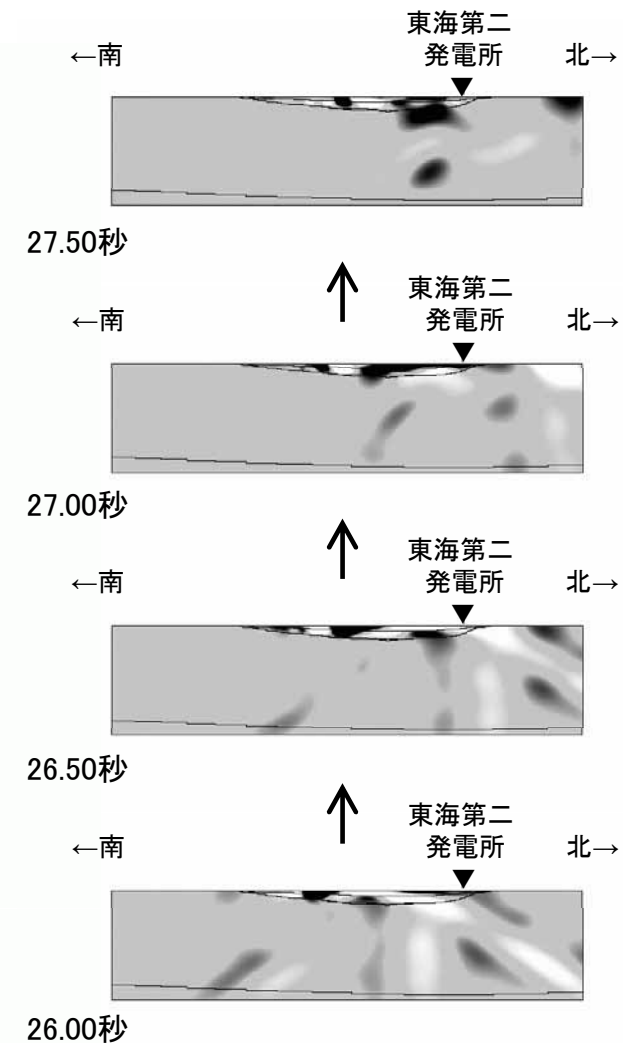
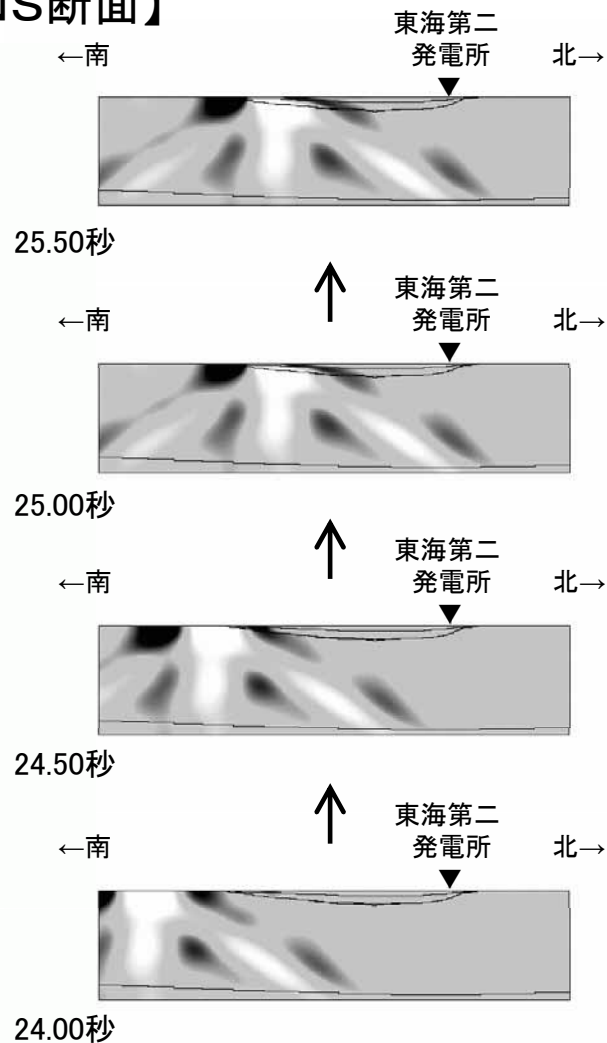
【NS断面】



解析結果(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角0度)

黒は+側, 白は-側
縦横比=1:1

【NS断面】

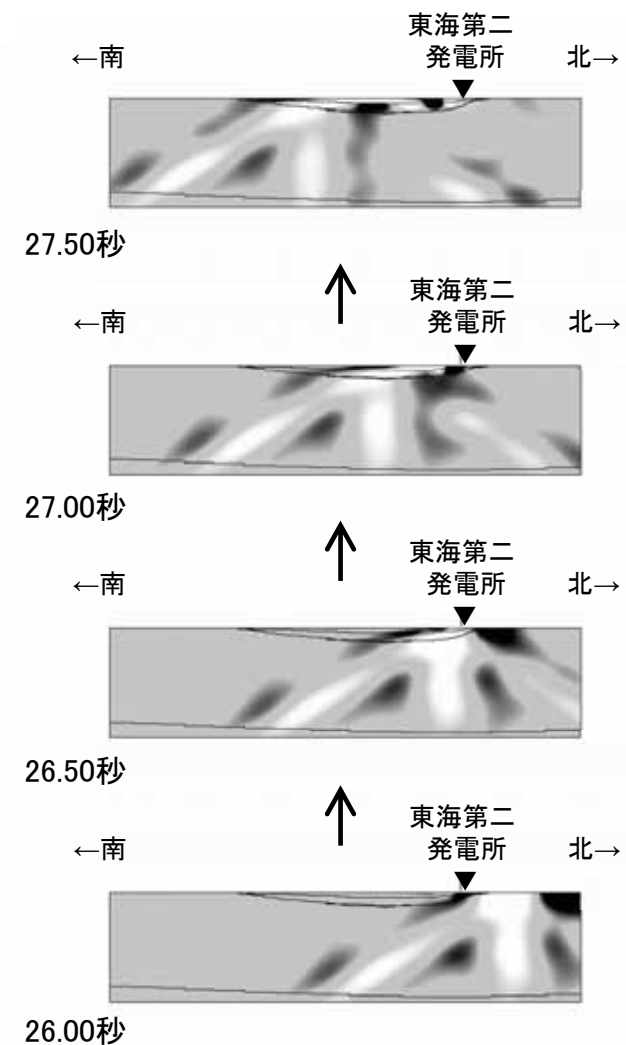
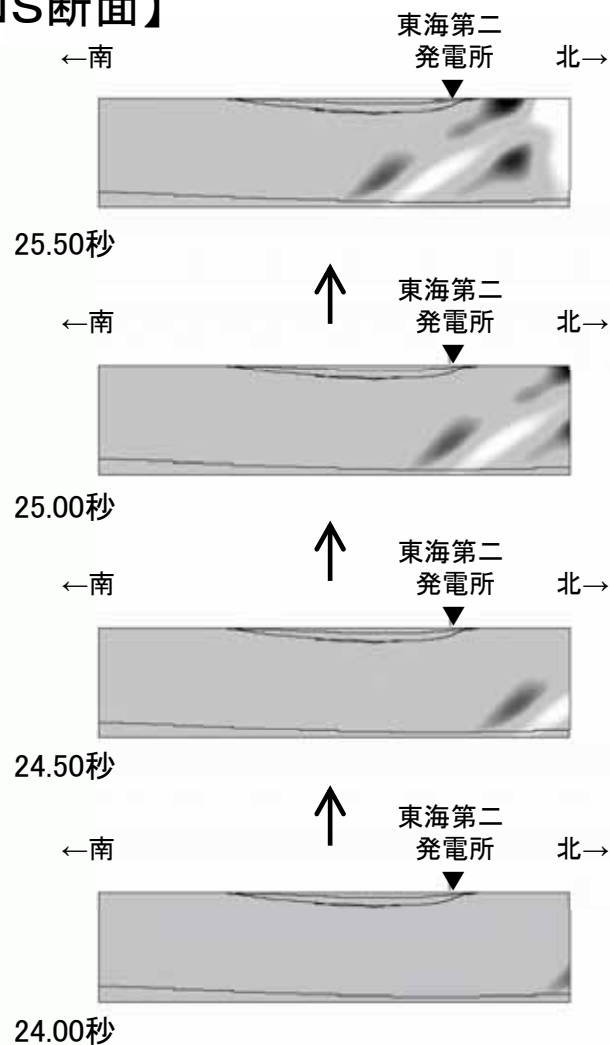


解析結果(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:南から40度)

黒は+側, 白は-側
縦横比=1:1

解析結果 —スナップショット— (6/6)

【NS断面】

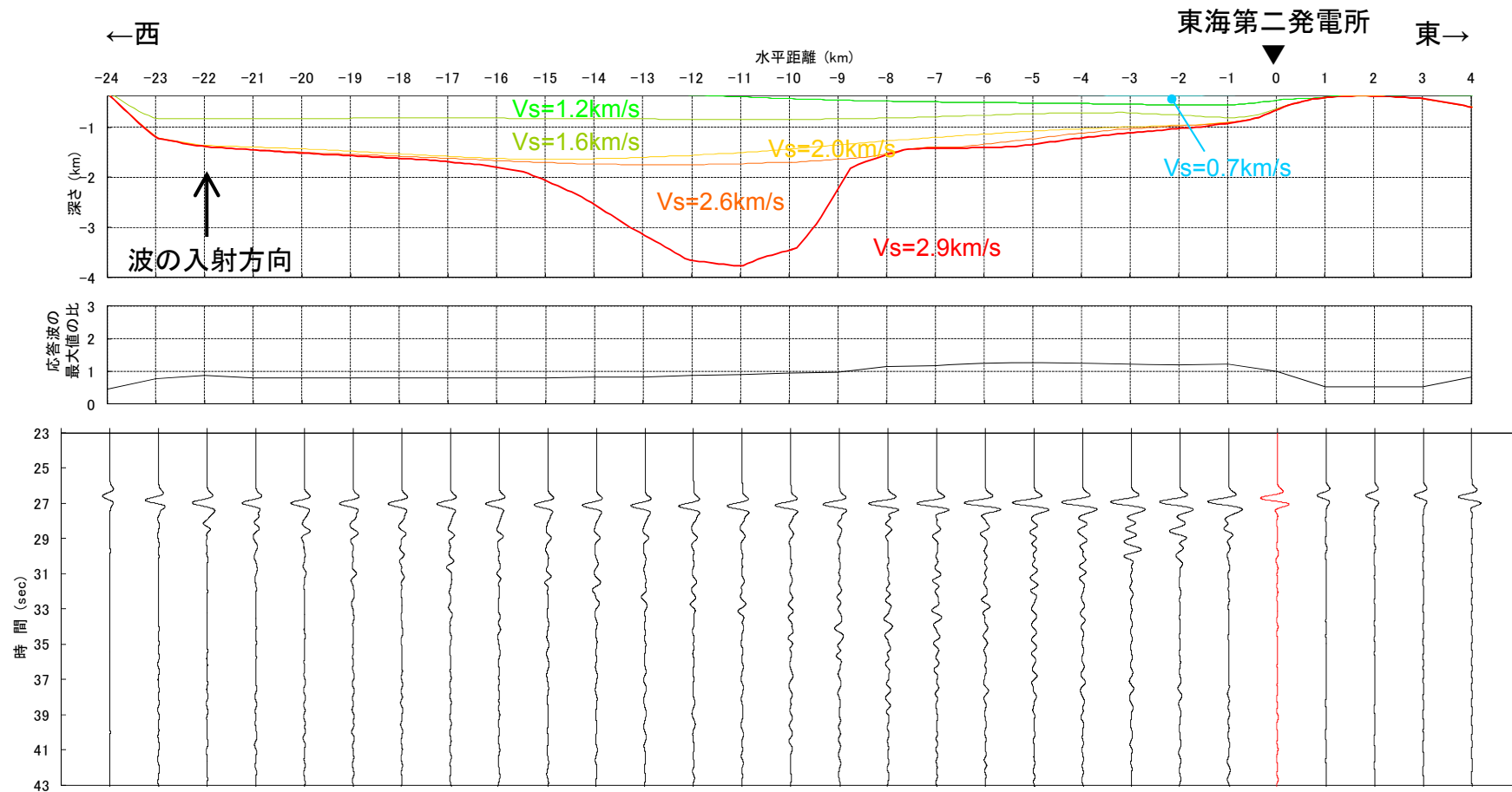


解析結果(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:北から40度)

黒は+側, 白は-側
縦横比=1:1

解析結果 一時刻歴波形, 応答波の最大値の比 (1/6)

【EW断面】

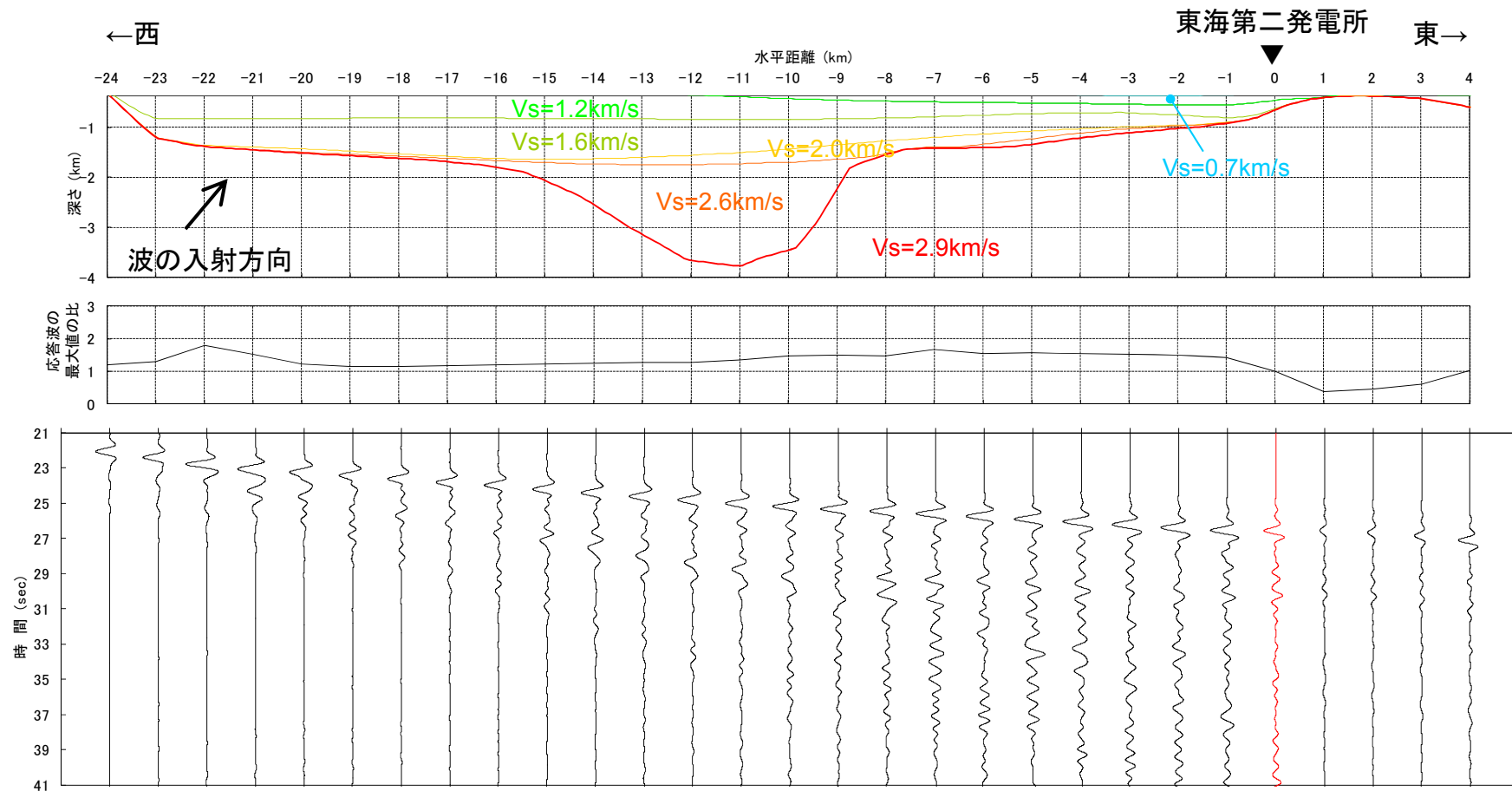


解析結果(上段:解析モデル, 中段:応答波の最大値の比, 下段:応答時刻歴波形)

(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角0度)

解析結果 一時刻歴波形, 応答波の最大値の比 (2/6)

【EW断面】

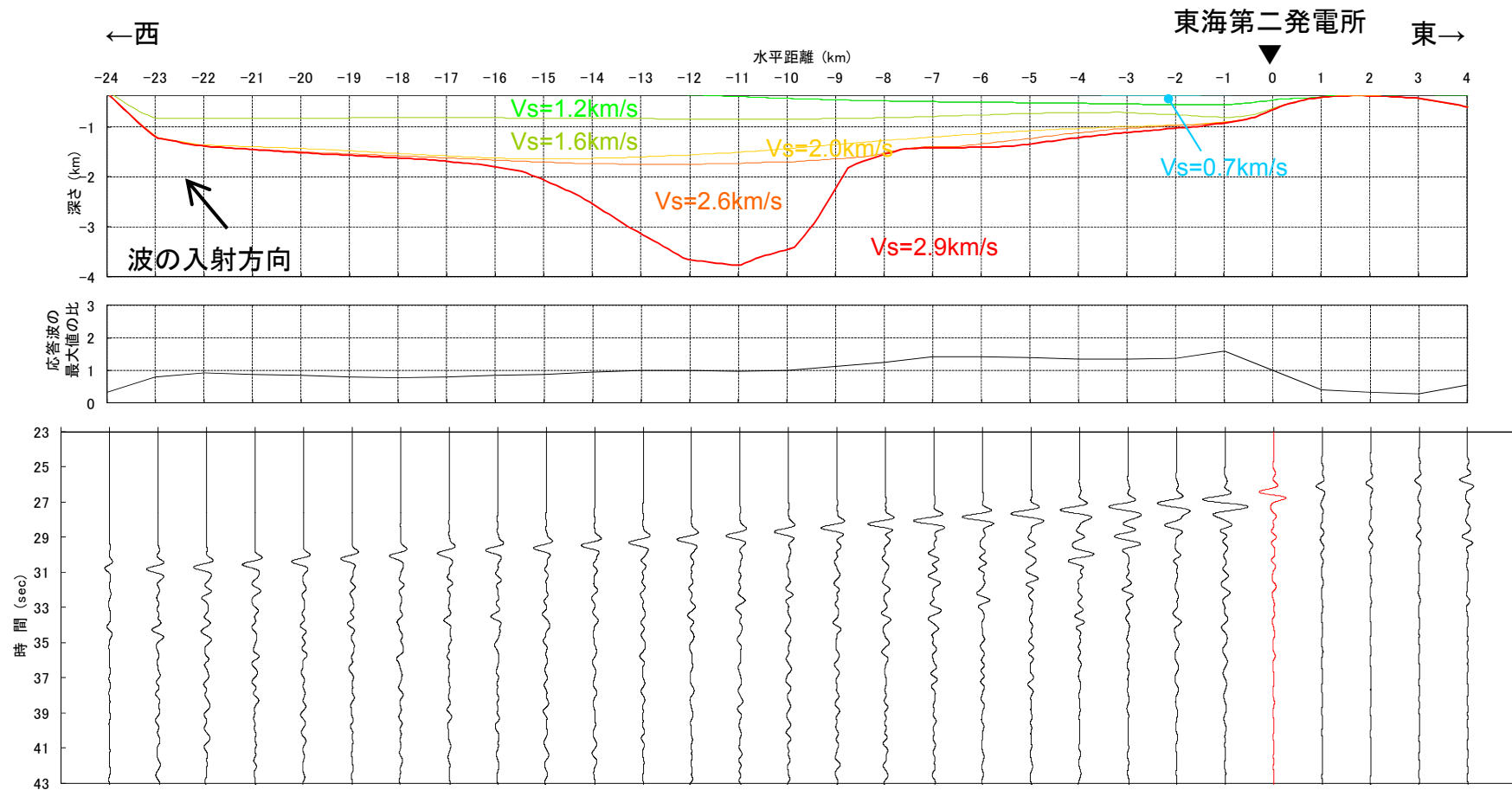


解析結果(上段:解析モデル, 中段:応答波の最大値の比, 下段:応答時刻歴波形)

(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:西から40度)

解析結果 一時刻歴波形, 応答波の最大値の比 (3/6)

【EW断面】

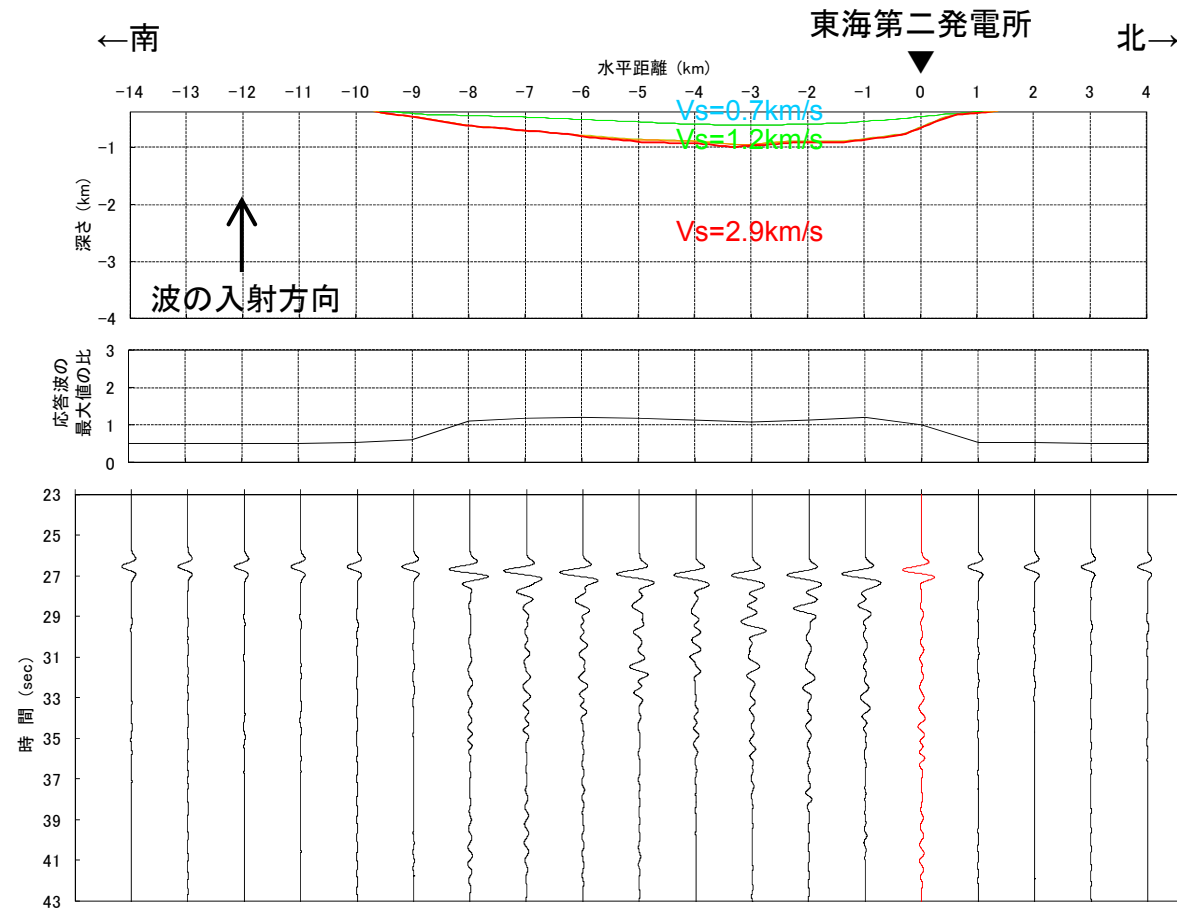


解析結果(上段:解析モデル, 中段:応答波の最大値の比, 下段:応答時刻歴波形)

(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:東から40度)

解析結果 一時刻歴波形, 応答波の最大値の比 (4/6)

【NS断面】

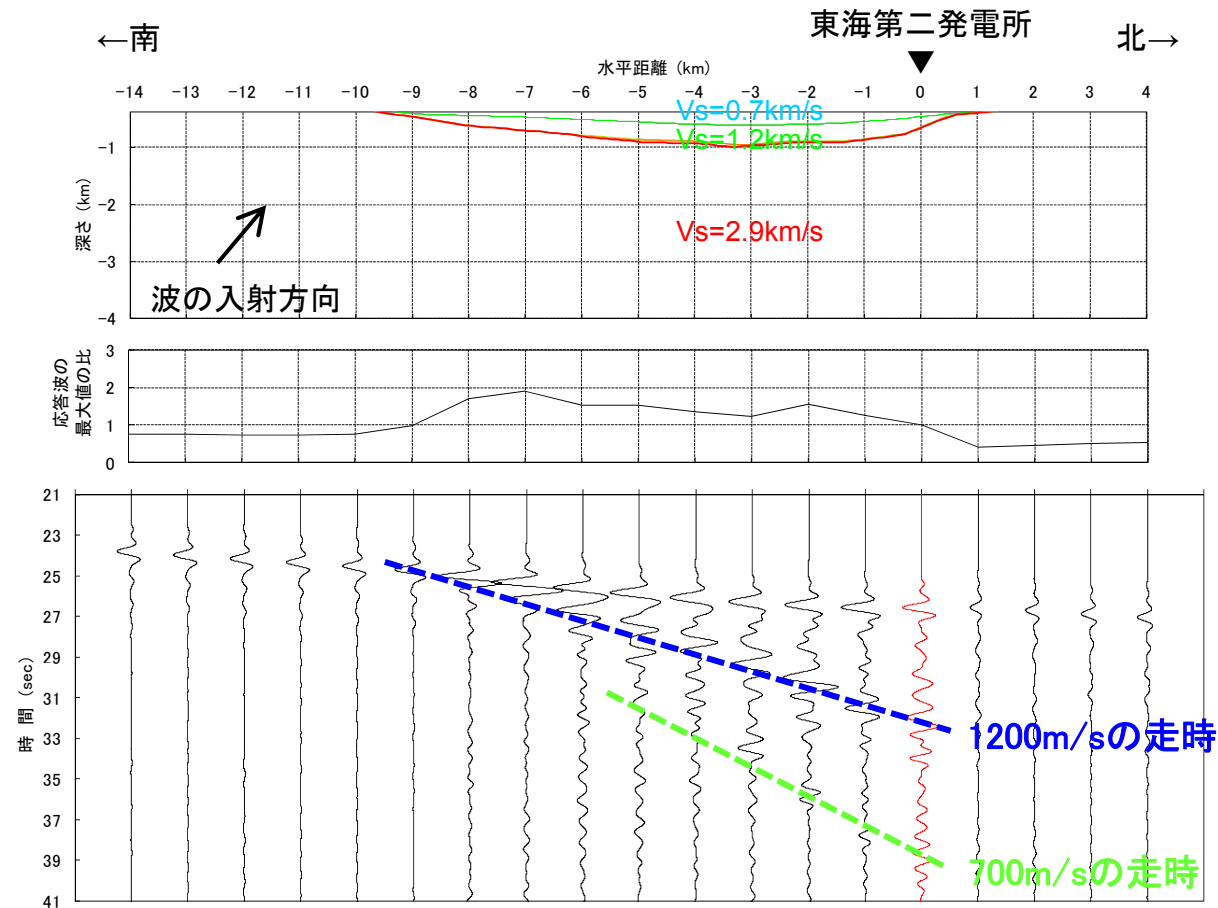


解析結果(上段:解析モデル, 中段:応答波の最大値の比, 下段:応答時刻歴波形)

(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角0度)

解析結果 一時刻歴波形, 応答波の最大値の比 (5/6)

【NS断面】

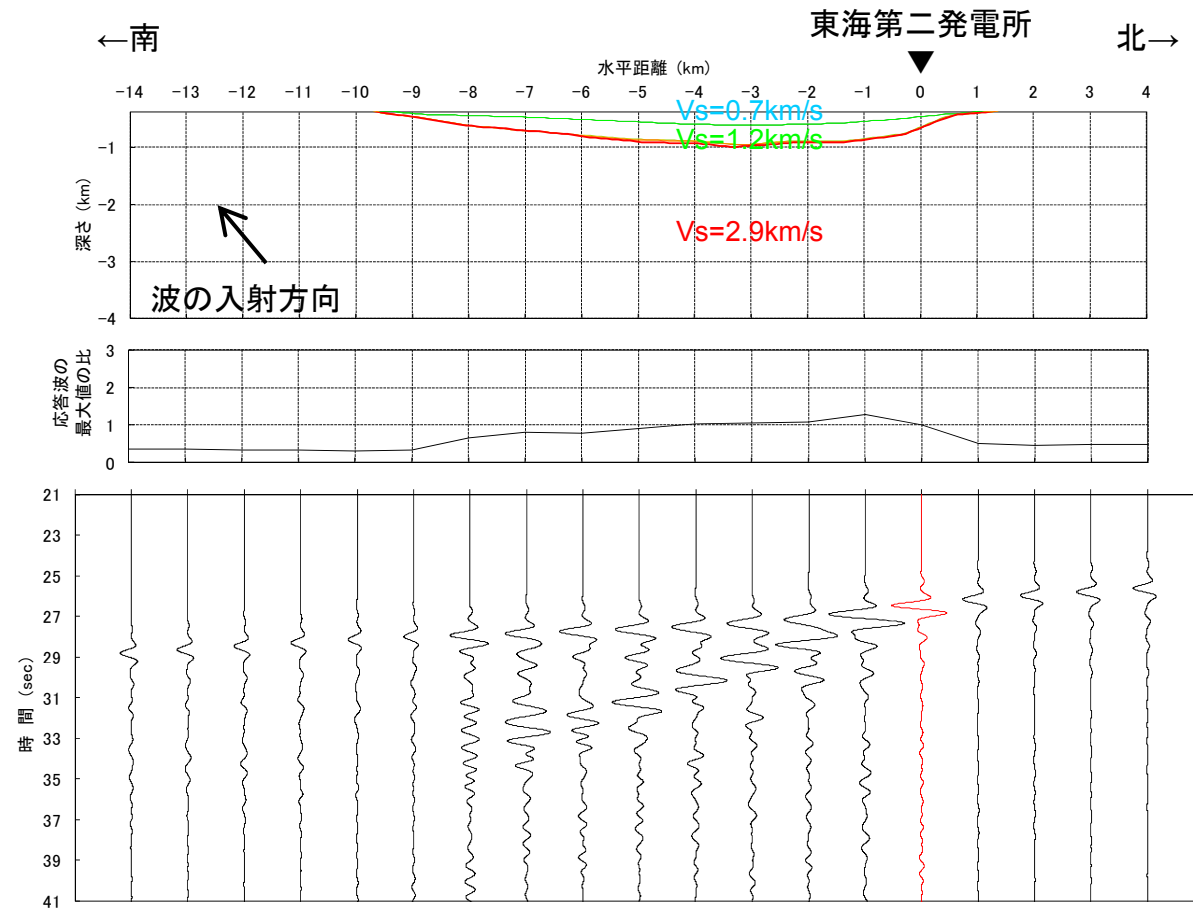


解析結果(上段:解析モデル, 中段:応答波の最大値の比, 下段:応答時刻歴波形)

(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:南から40度)

解析結果 一時刻歴波形, 応答波の最大値の比 (6/6)

【NS断面】

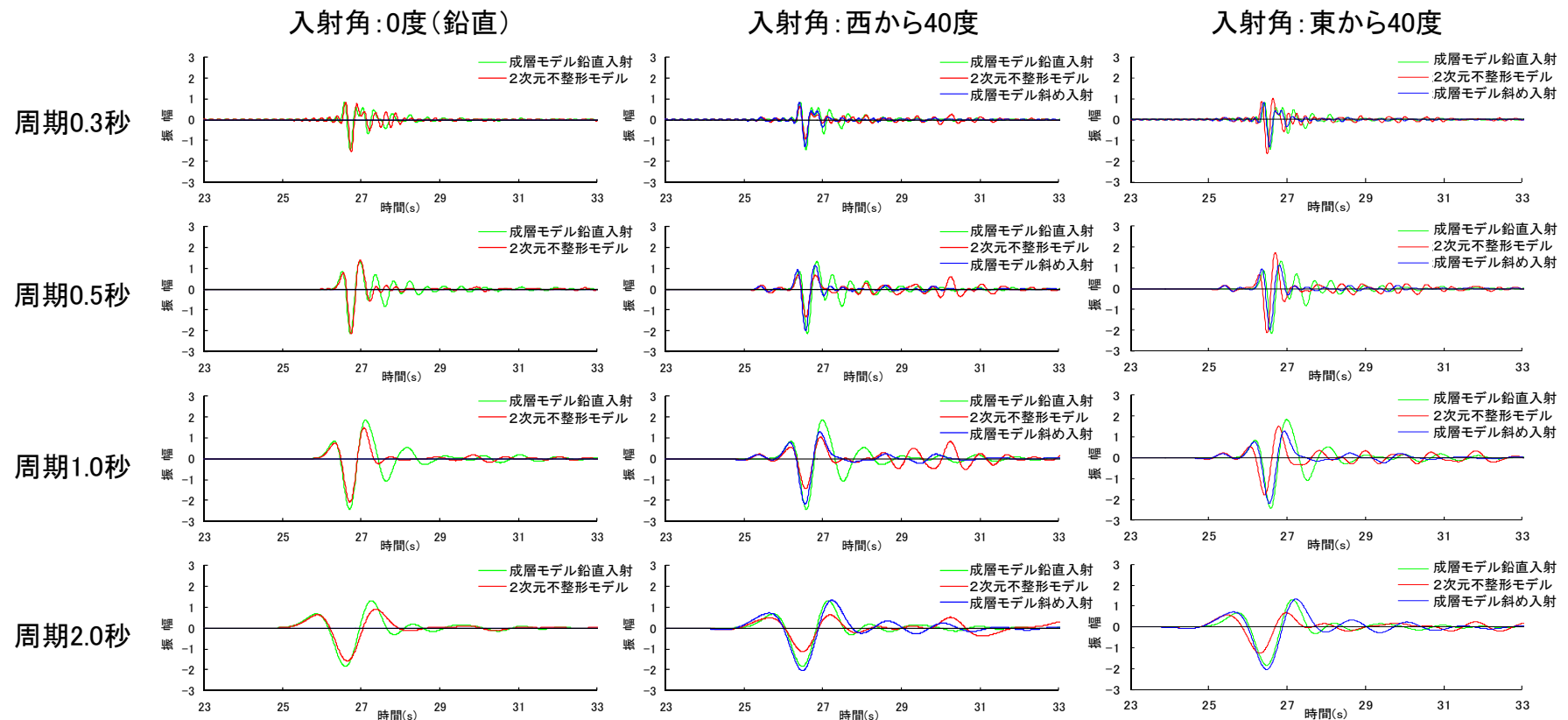


解析結果(上段:解析モデル, 中段:応答波の最大値の比, 下段:応答時刻歴波形)

(入力波:リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角:北から40度)

解析結果 一敷地における応答波形の比較 EW断面一

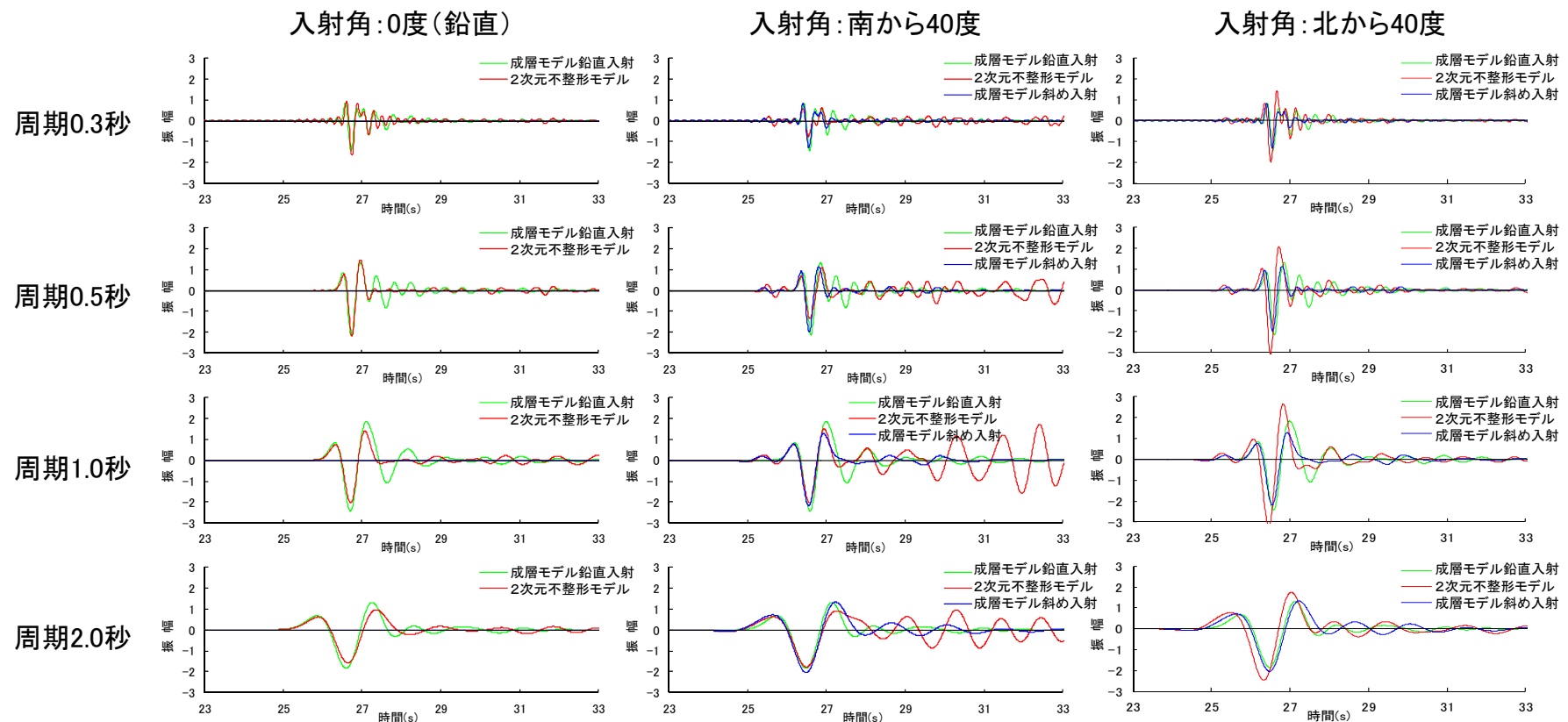
- ・2次元不整形モデルと成層モデルの解析結果を比較し、敷地の西側及び南側に見られる深い基盤形状による影響を検討した。
- ・以下に成層モデル鉛直入射、成層モデル斜め入射及び2次元不整形モデルの応答波形を示す。
- ・成層モデル鉛直入射、成層モデル斜め入射及び2次元不整形モデルの主要動部における波形(位相)は同様である。
- ・主要動付近の振幅は、それぞれのケースにおいて概ね同程度である。



解析結果(応答波形)

解析結果 一敷地における応答波形の比較 NS断面一

- ・主要動付近の振幅は、それぞれのケースにおいて概ね同程度である。
- ・NS断面に中心周期1.0秒のリッカー波を入射角40度で入力すると、他のケースより後続波が顕著に表れる特徴が見られるものの、後続波の振幅は、主要動の振幅と同程度またはそれ以下である。
- ・このように、各ケースにおいて成層モデル鉛直入射の最大振幅が2次元不整形モデルの最大振幅を上回ることより、発電所直下の地下構造を水平成層構造とみなして地震動が評価できることを確認した。

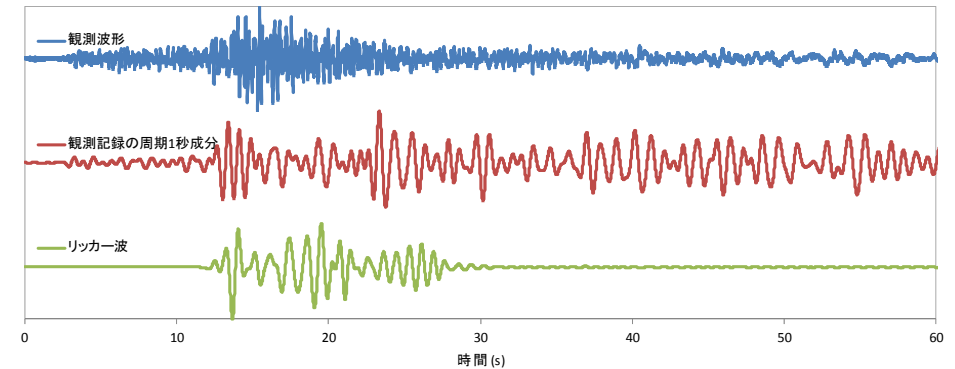
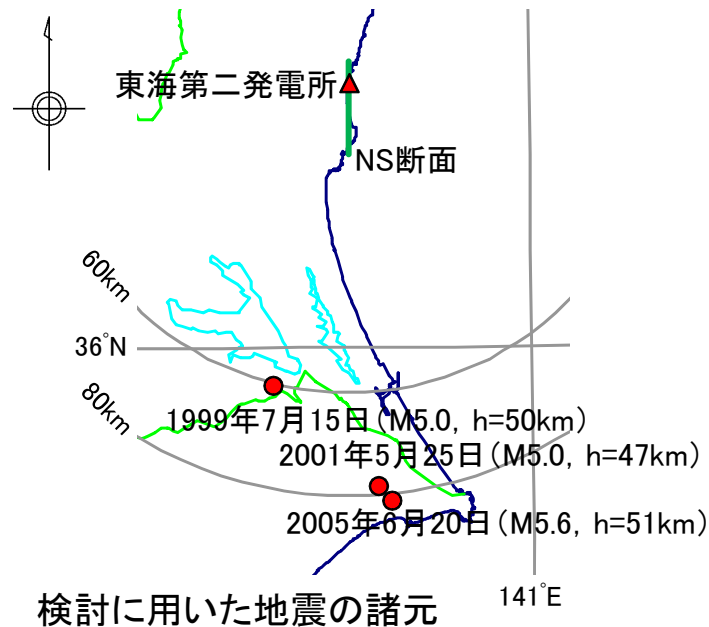


解析結果(応答波形)

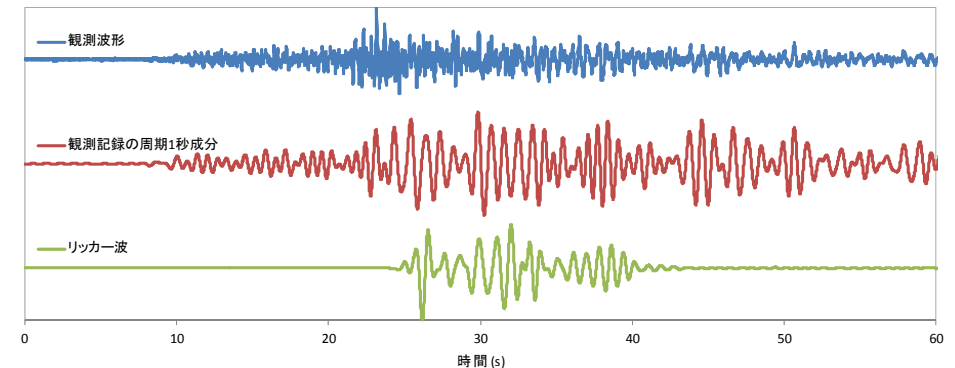
4.2.1 広域地盤モデルによる深部地下構造の検討

解析結果 ー応答波形と地震観測記録の比較ー

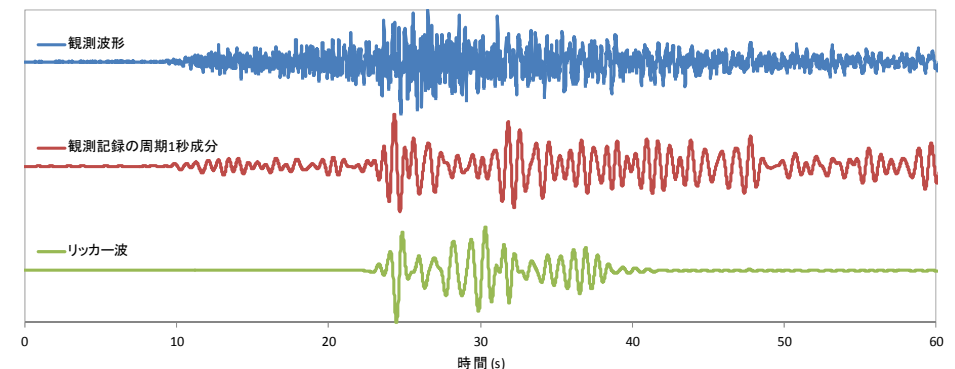
- ・NS断面に中心周期1.0秒のリッカー波を入射角40度で入力すると、他のケースより後続波が顕著に表れる特徴が見られるため、敷地での観測記録に同様の特徴が見られるか検討した。
- ・検討方法は、敷地での地震観測記録に周期1.0秒を強調するバンドパスフィルタ処理を行い、中心周期1.0秒のリッカー波を入射角40度でNS断面に入力した場合の発電所位置での応答波と比較した。
- ・解析結果のような主要動の後に後続波が複数回到達する様子は観測記録にも見られ、解析結果と観測記録が整合していることが確認できた。



1999年7月15日 茨城県南部



2001年5月25日 千葉県北東部

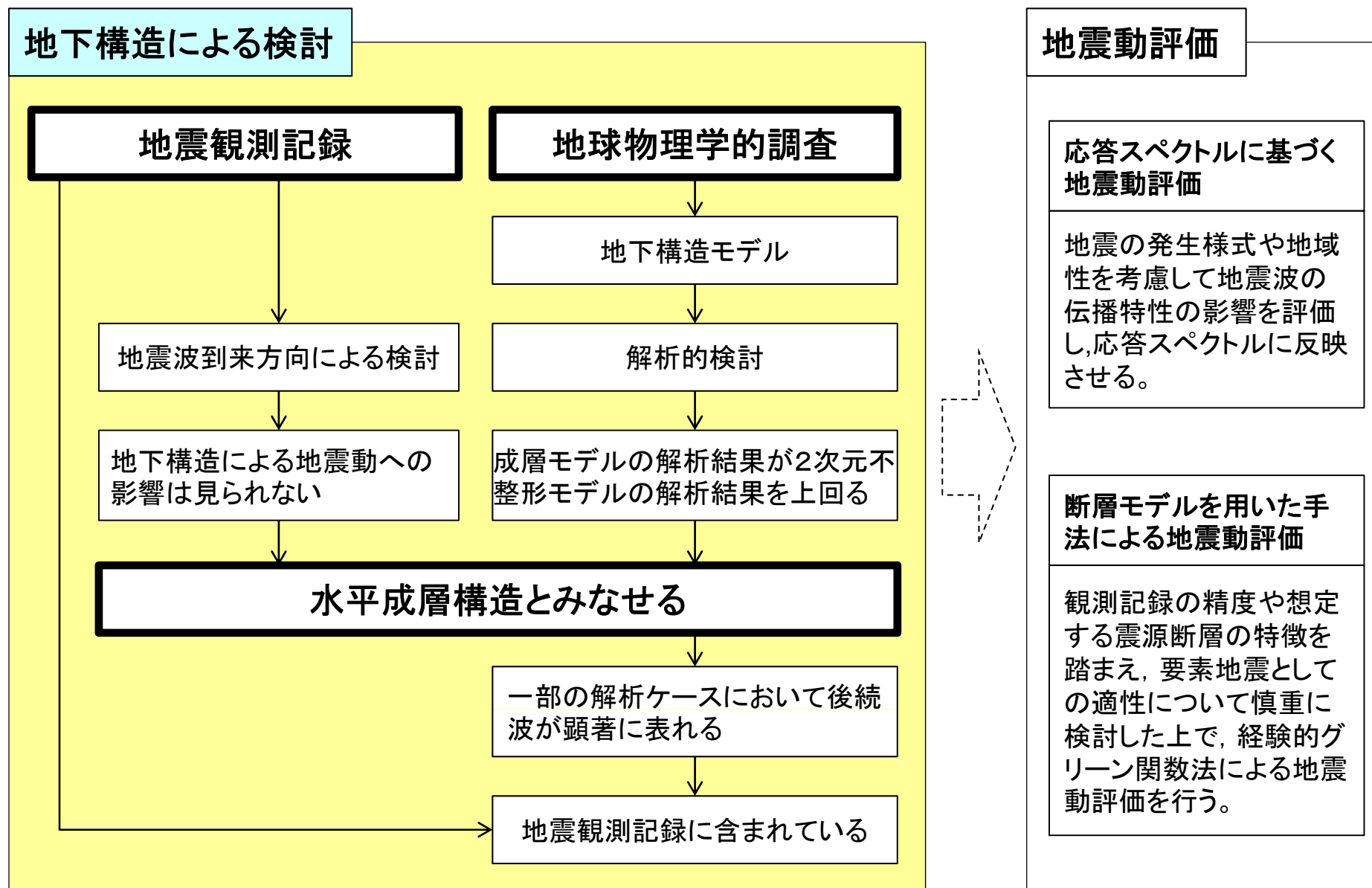


2005年6月20日 千葉県北東部

広域地盤モデルによる深部地下構造検討のまとめ

- 敷地の西側及び南側に見られる基盤($V_s=3\text{km/s}$ 相当)の上面が深くなる基盤形状による影響を地盤モデルを用いた解析により検討し、以下の結果が得られた。
 - ・ 発電所位置での短周期入力波の最大振幅は、基盤が深い地域と同程度である。
 - ・ 発電所位置での長周期入力波の最大振幅は、基盤が深い地域より小さくなる。
 - ・ 1次元モデルと2次元モデルの主要動部における波形(位相)は同様である。
 - ・ 主要動付近の振幅は、成層モデル鉛直入射と成層モデル斜め入射が概ね同程度の振幅となり、2次元不整形モデルは同程度またはそれ以下である。
 - ・ NS断面に中心周期1.0秒のリッカー波を入射角40度で入力すると、他のケースより後続波が顕著に表れる特徴が見られるものの、後続波の振幅は、主要動の振幅と同程度またはそれ以下である。
 - ・ このように、各ケースにおいて成層モデル鉛直入射の最大振幅が2次元不整形モデルの最大振幅を上回ることより、発電所直下の地下構造を水平成層構造とみなして地震動が評価できることを確認した。
 - ・ なお、一部の解析ケースにおいて後続波が顕著に表れ、主要動の振幅と同程度またはそれ以下となる特徴については、地震観測記録に含まれており、地震観測記録と解析結果が整合的であることを確認した。

広域地盤モデルによる深部地下構造検討のまとめ



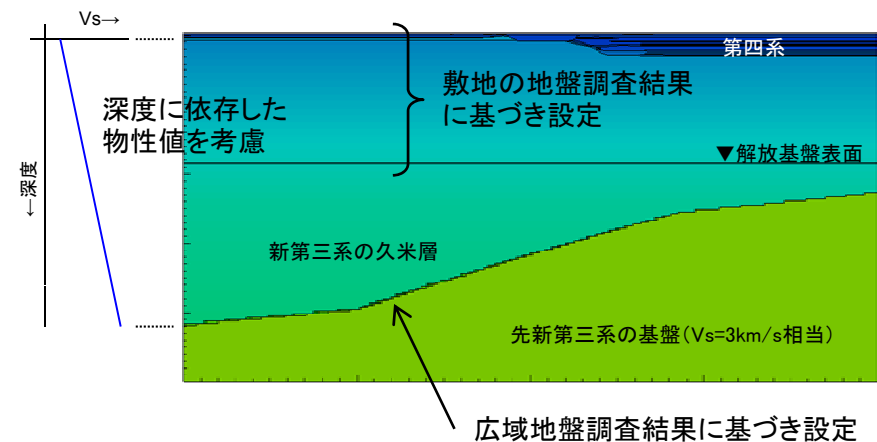
4. 地球物理学的調査による地下構造評価

4.2 解析による検討

4.2.2 敷地の詳細モデルによる地震動への影響について

検討方針

- 広域地盤モデルを用いた深部地下構造の検討により、発電所直下の地下構造を水平成層構造とみなして地震動が評価できることを確認した。
- 敷地内における耐震重要施設の設計・確認に用いる地震動の妥当性を確認するため、敷地の詳細な地盤モデルを用いて以下の検討を行う。
 - ・解放基盤表面における地震動の差異
 - ・解放基盤表面から地表にかけての地震動の変化
- 地盤速度の遅い表層を伝播する地震波の波長は短いため、解析モデルのメッシュサイズを細かくする必要があるため、解析可能な要素規模を踏まえ、解析モデルの大きさ(領域)は原子炉建屋を中心とする幅2km、深さ1kmとした。
- 解析モデルは以下の方針で作成する。
 - ・新第三系の久米層と先新第三系の基盤($V_s=3\text{km/s}$ 相当)の境界の深さは、広域地盤調査の結果に基づき設定する。
 - ・表層の地盤構造については、敷地の地盤調査結果に基づき設定する。
 - ・解析用物性値は、基盤については広域地盤モデルを参考に設定し、表層については敷地の地盤調査結果に基づき設定する。なお、第四系の一部の地層及び久米層については、深度に依存する物性値を考慮する。



解析モデル作成における主な方針

解析モデル — 解析用地盤物性値 —

解析用地盤物性値一覧表

- ・解析モデルの物性値を右表に示す。
なお、減衰は一律 $Q=100$ とする。
- ・メッシュサイズは、波長の $1/5$ がモデル化できるように解析要素高さを設定する。ただし、地表付近の最小要素高さは 1m とする。
- ・周波数応答解析の実施にあたり、モデル底面は粘性境界、左右はエネルギー伝達境界を設定する。

○入力波

- ・広域地盤モデルの解析と同様に、リッカー波の平面波を入力波とし、中心周期を $0.3, 0.5, 1.0, 2.0$ 秒、入射角を 0 度(鉛直)及び東西南北の各方位から 20 度、 40 度と設定する。なお、本資料では、中心周期 1.0 秒の入射角 0 度(鉛直)及び各方位から 40 度の結果を示す。

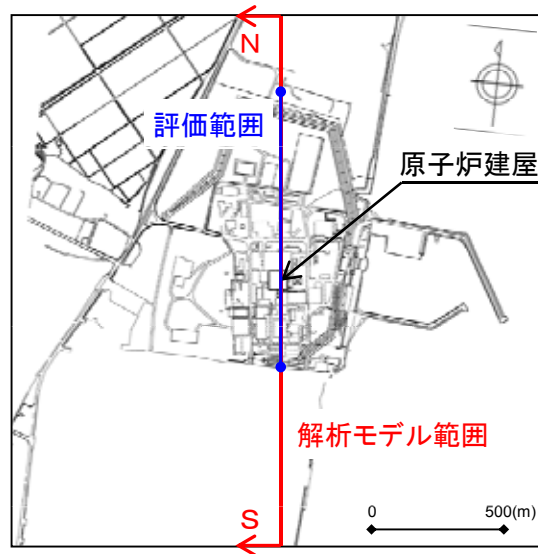
地 層		S波速度 $V_s(\text{km/s})$	密 度 $\rho(\text{g/cm}^3)$
埋戻し土		0.21	1.98 (1.82)
第四系	du層	0.21	1.98 (1.82)
	Ac層	$(163-1.54Z)/1000$	1.65
	As層	$(211-1.19Z)/1000$	1.74
	Ag2層	0.24	2.01 (1.89)
	Ag1層	0.35	2.01
	D2c-3層	0.27	1.77
	D2s-3層	0.36	1.92
	D2g-3層	0.50	2.15
新第三系	Km層	$(433-0.771Z)/1000$	$1.72-1.03 \times 10^{-4}Z$
先新第三系		2.90	2.58

※ ・Zは、標高E.L.(m)を示す。

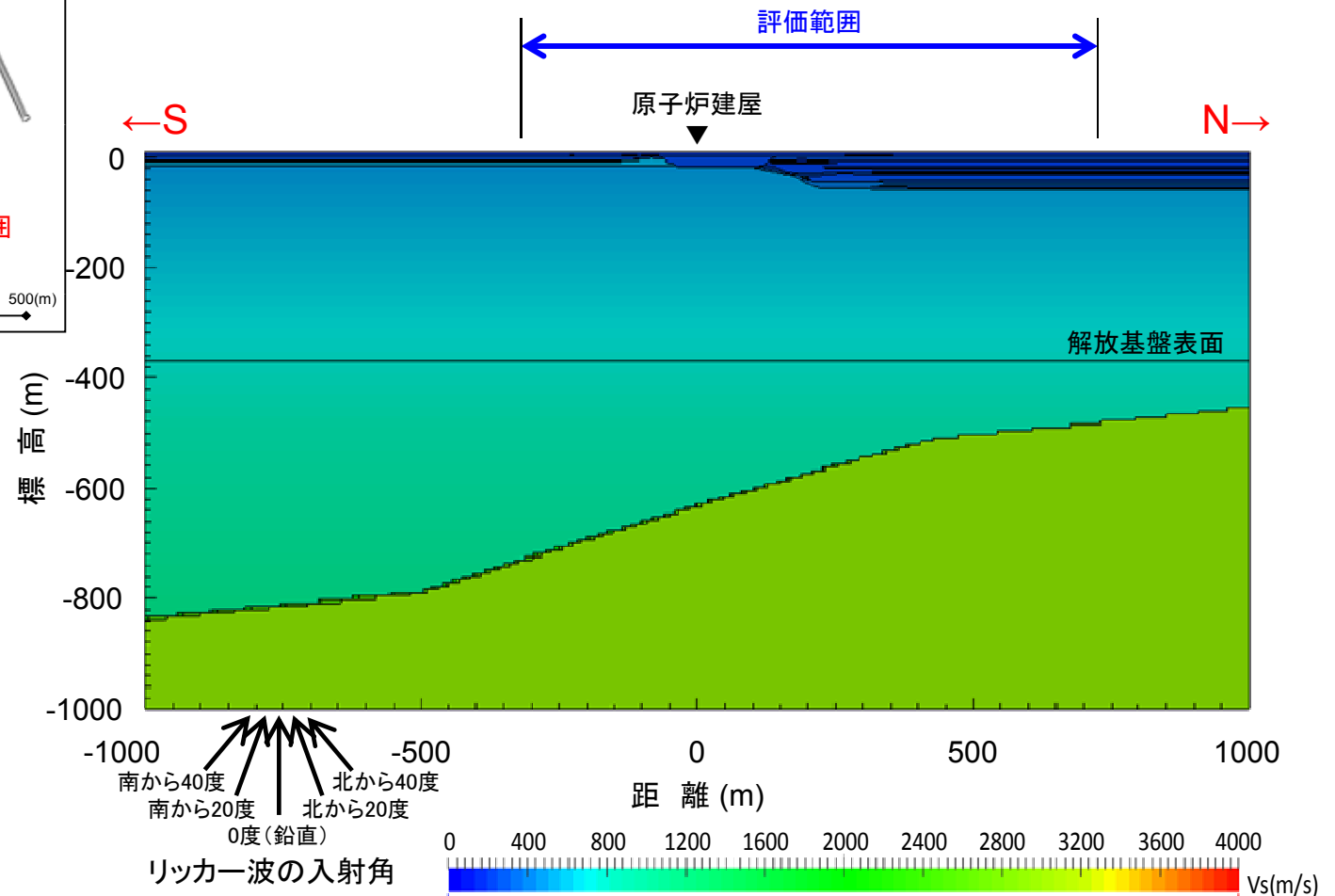
・密度欄の括弧内の数値は、地下水位以浅に対する値を示す。

解析モデル —S波速度構造— (1/2)

■NS断面



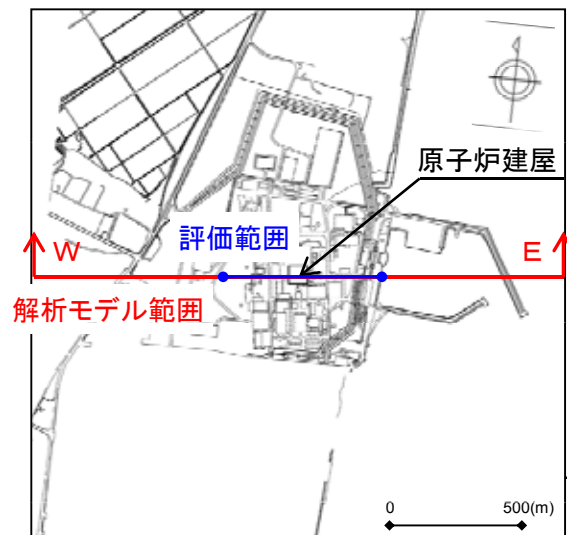
断面位置図



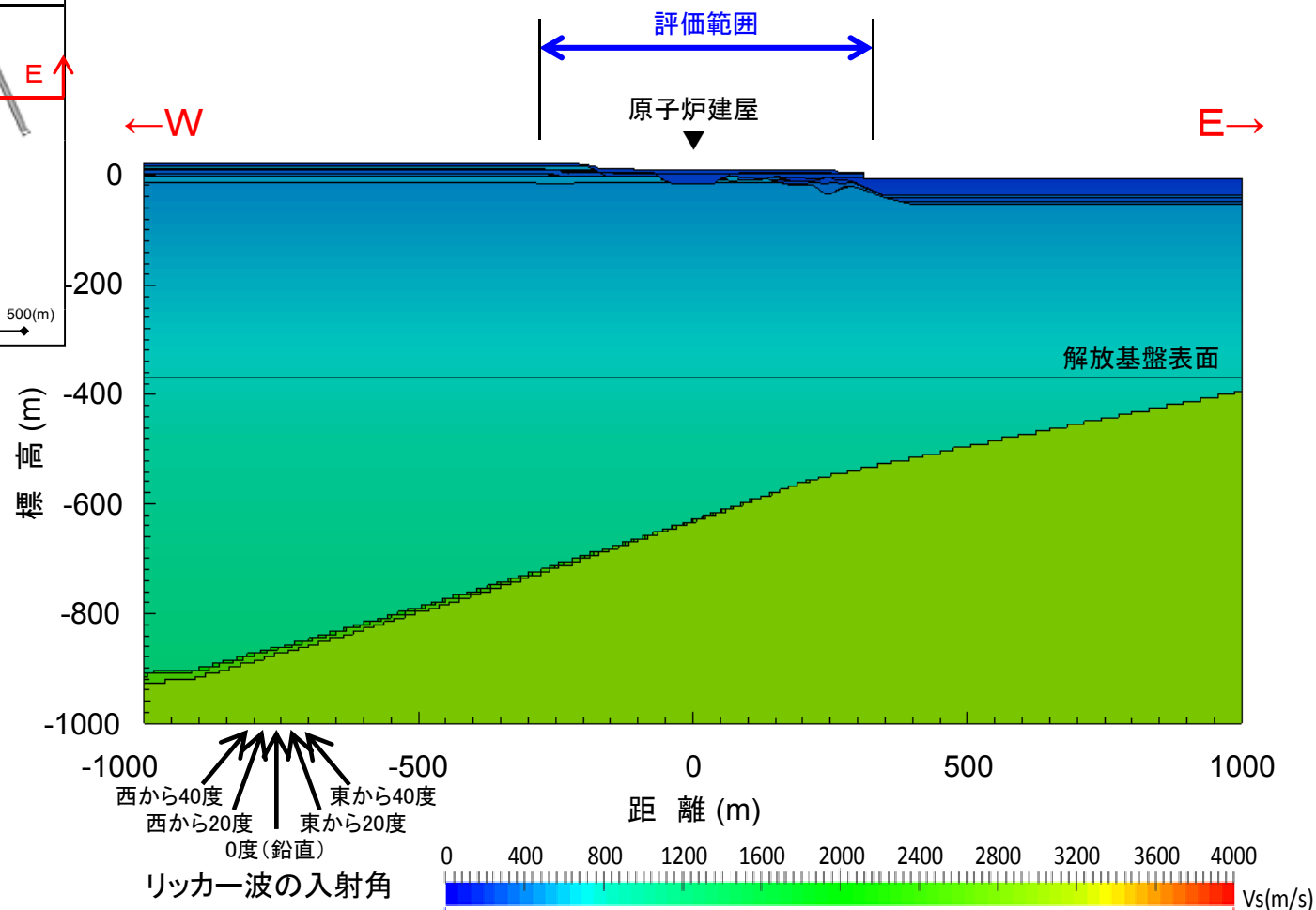
4.2.2 敷地の詳細モデルによる地震動への影響について 解析モデル —S波速度構造— (2/2)

第338回審査会合
資料4 修正

■EW断面

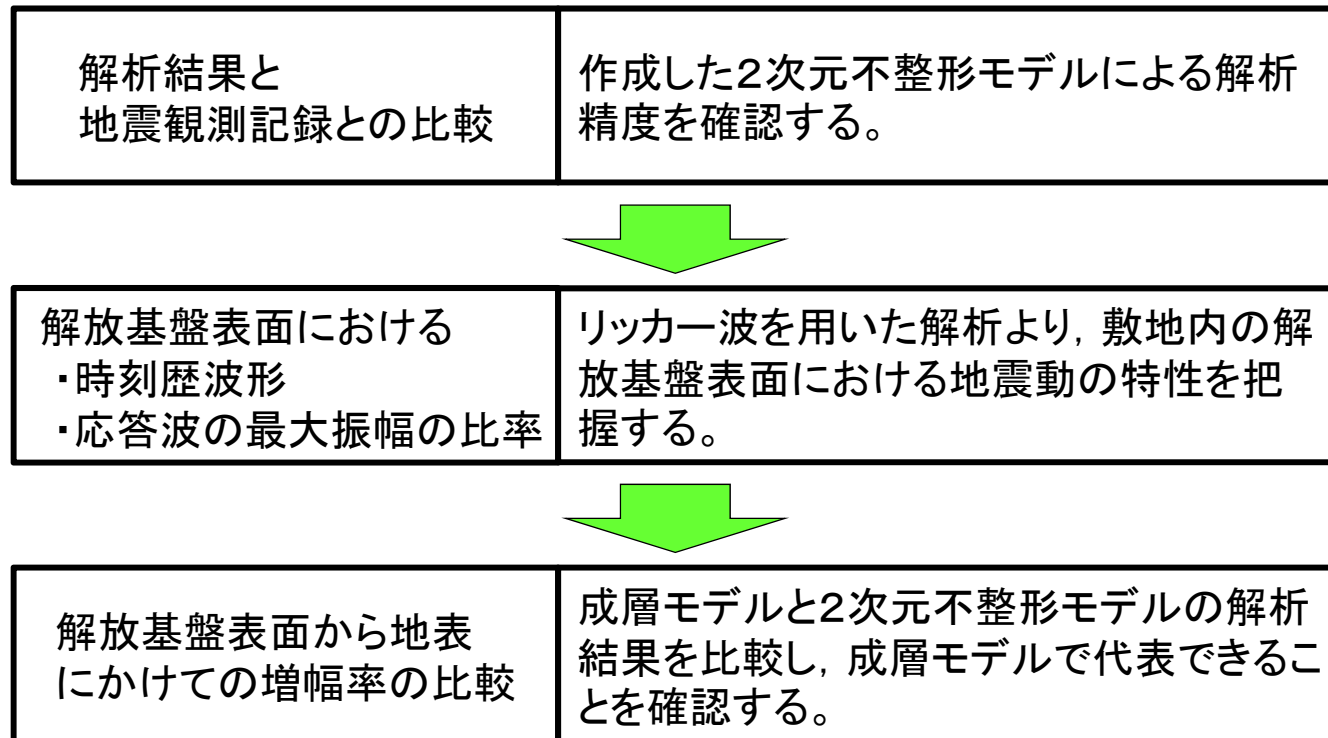


断面位置図



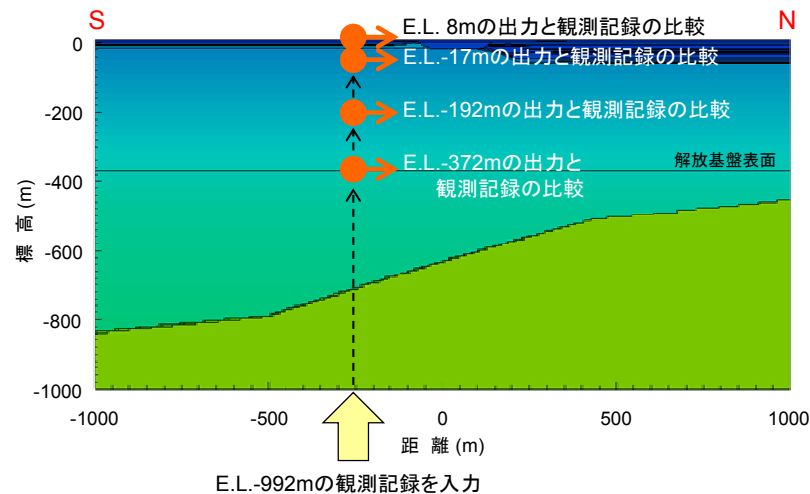
解析結果

- 2次元不整形モデルによる解析を行い、以下のとおり検討する。

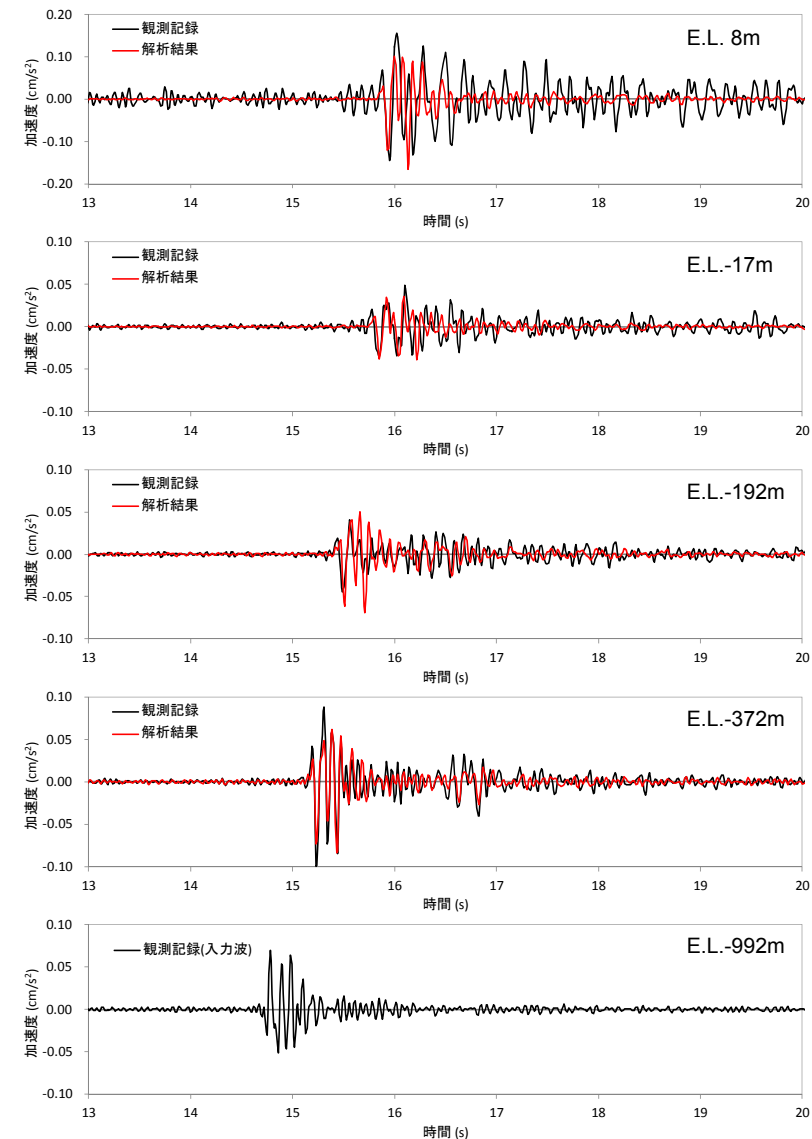


解析結果 ー地震観測記録との比較ー

- 東海第二発電所では、敷地の南西において地表及び地中に地震計を設置し、地震観測を行っている。(NS断面の水平距離-240m付近)
- 作成した解析モデルの妥当性を確認するため、NS断面の解析モデル下端(E.L.-1000m)に大深度ボーリング内(E.L.-992m)で観測した地震記録を入力し、地表(E.L.8m)、E.L.-17m、E.L.-192m、E.L.-372mの地震記録と各深度で算定された波形を比較した。
- それぞれの解析結果を地震記録と比較すると、主要動の到達時刻、最大振幅、位相が一致しており、地震動の伝播を精度よく再現できる解析モデルであることが確認できた。



本検討の概念図

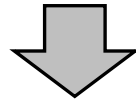


2012年9月2日13時33分の地震(NS成分)

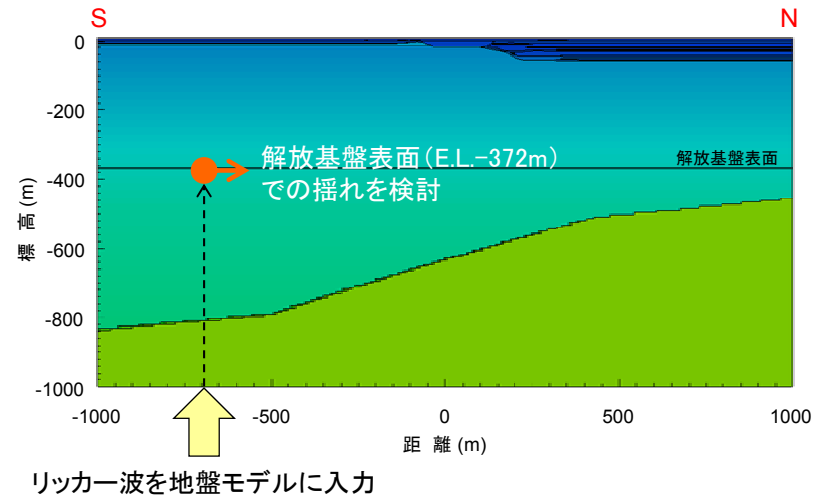
解析結果 ー解放基盤表面における時刻歴波形, 応答波の最大振幅の比ー (1/7)

第338回審査会合
資料4 再掲

- 敷地の地下構造をモデル化した2次元不整形モデルの底面 (E.L.-1000m) にリッカー波を入力し, 敷地における解放基盤表面の深さ (E.L.-370m) における応答の時刻歴波形及び応答波形の最大振幅の比率について検討する。

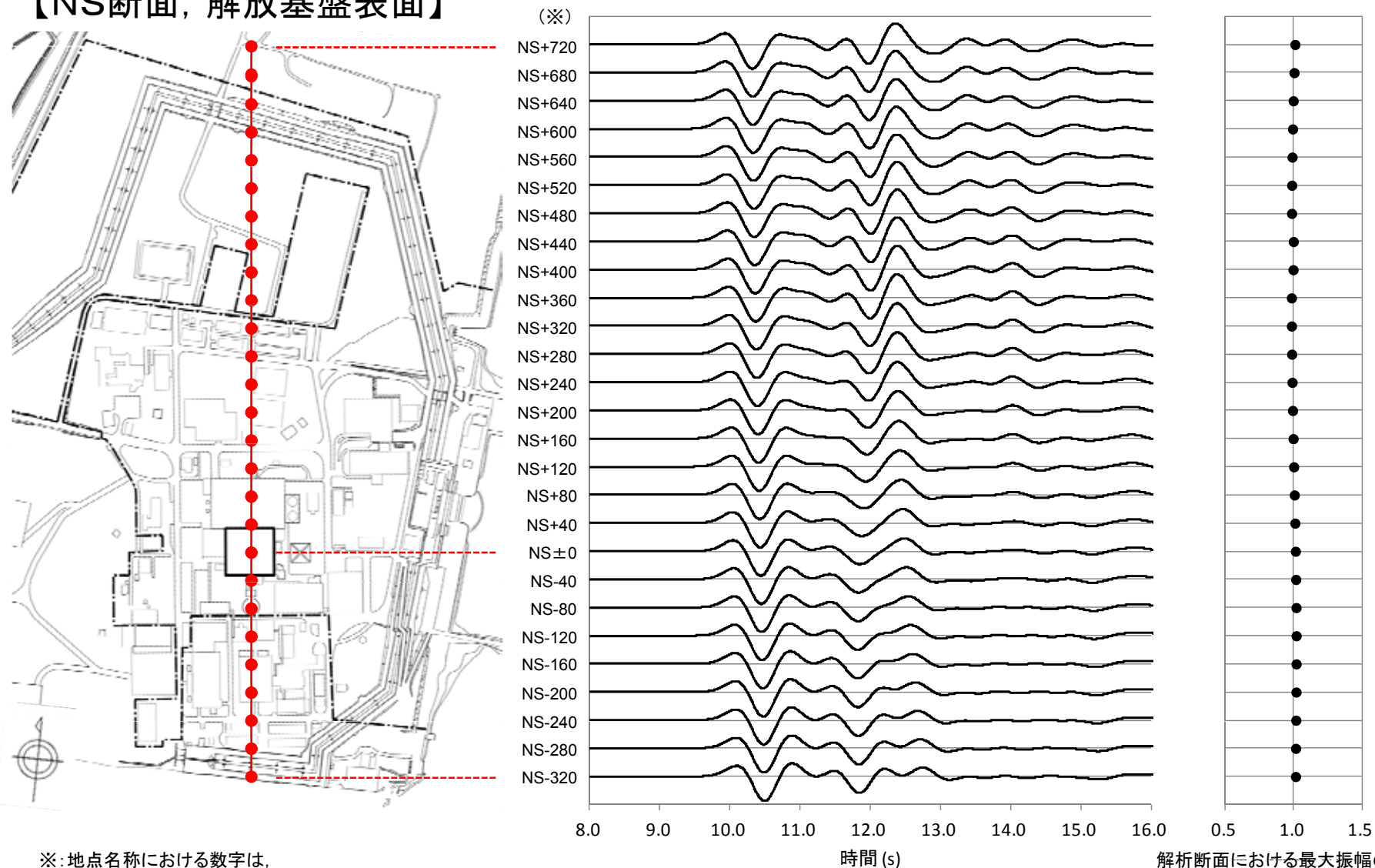


- 敷地の範囲において局所的で急激な変化は見られない。
- 解放基盤表面の深さにおける地震動の振幅は一定と見なせる。



本検討の概念図

【NS断面, 解放基盤表面】



※: 地点名称における数字は,
原子炉建屋からの距離を
表している。

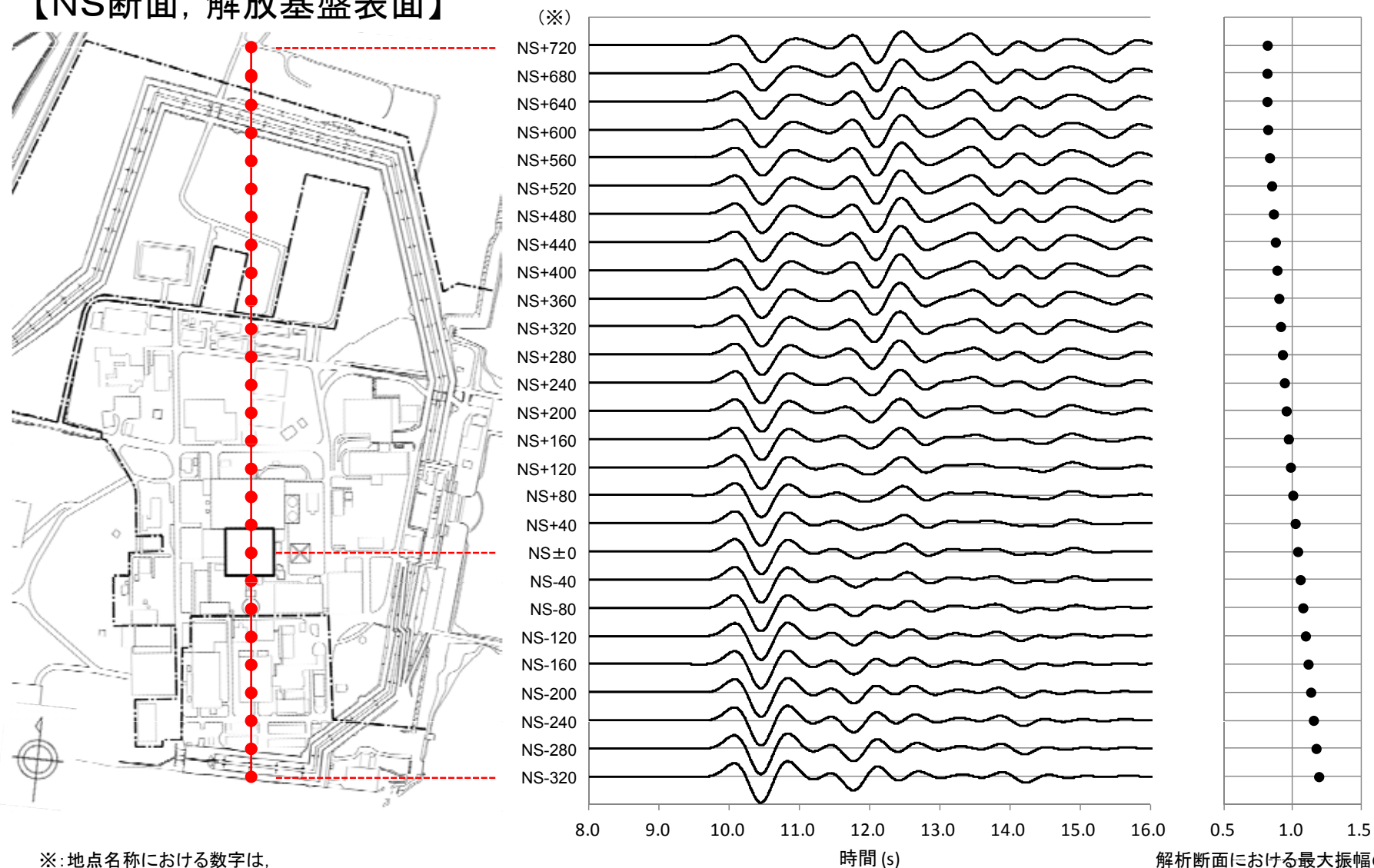
解析結果(中央: 応答時刻歴波形, 右: 応答波の最大振幅の比)
(入力波: リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角 0度)

解析断面における最大振幅の平均
に対する各点の最大振幅の比率

解析結果 ー解放基盤表面における時刻歴波形, 応答波の最大振幅の比ー (3/7)

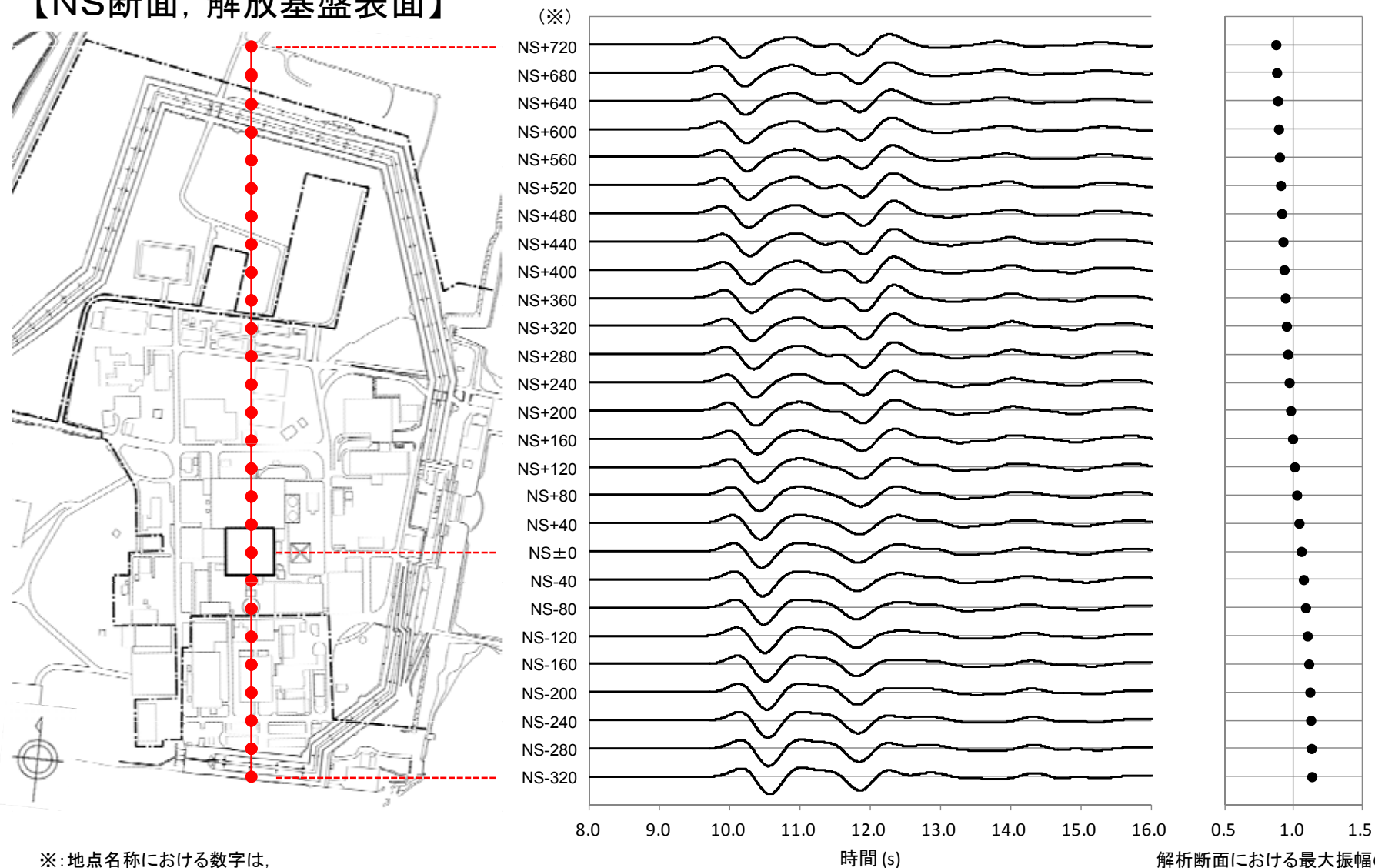
第338回
審査会合
資料4 修正

【NS断面, 解放基盤表面】



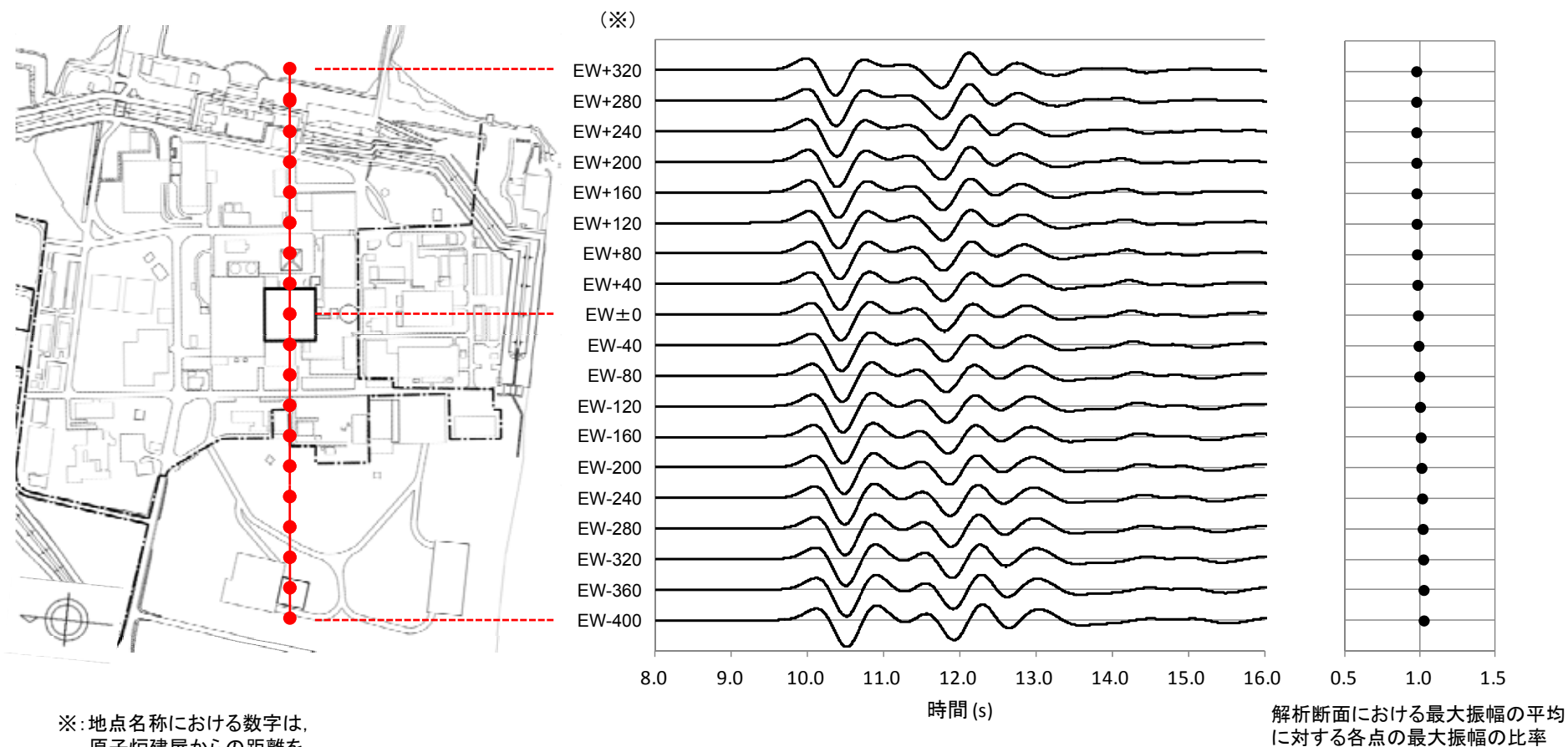
解析結果(中央: 応答時刻歴波形, 右: 応答波の最大振幅の比)
(入力波: リッカー波, 中心周期1.0秒, 南から入射角40度)

【NS断面, 解放基盤表面】



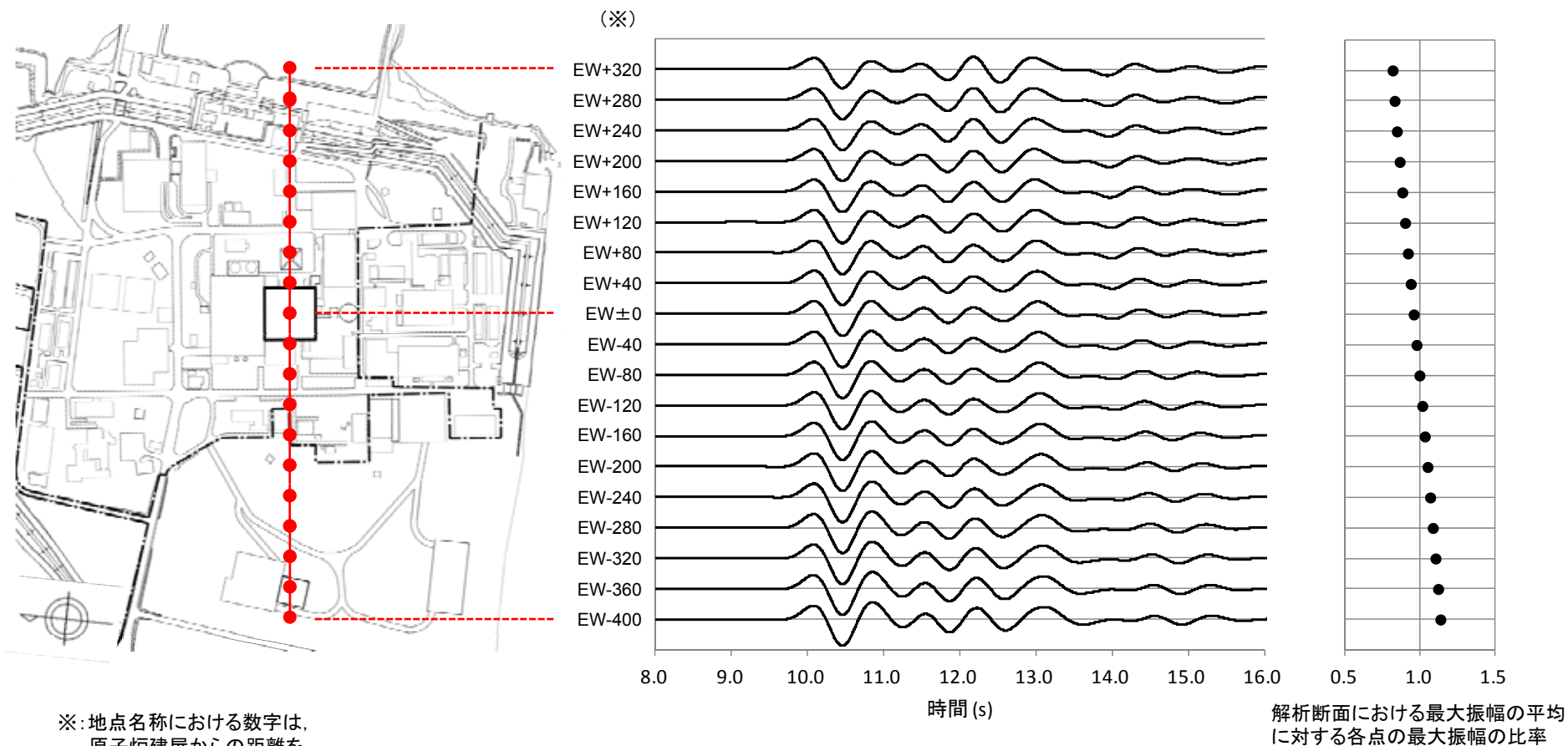
解析結果(中央: 応答時刻歴波形, 右: 応答波の最大振幅の比)
(入力波: リッカー波, 中心周期1.0秒, 北から入射角40度)

【EW断面, 解放基盤表面】



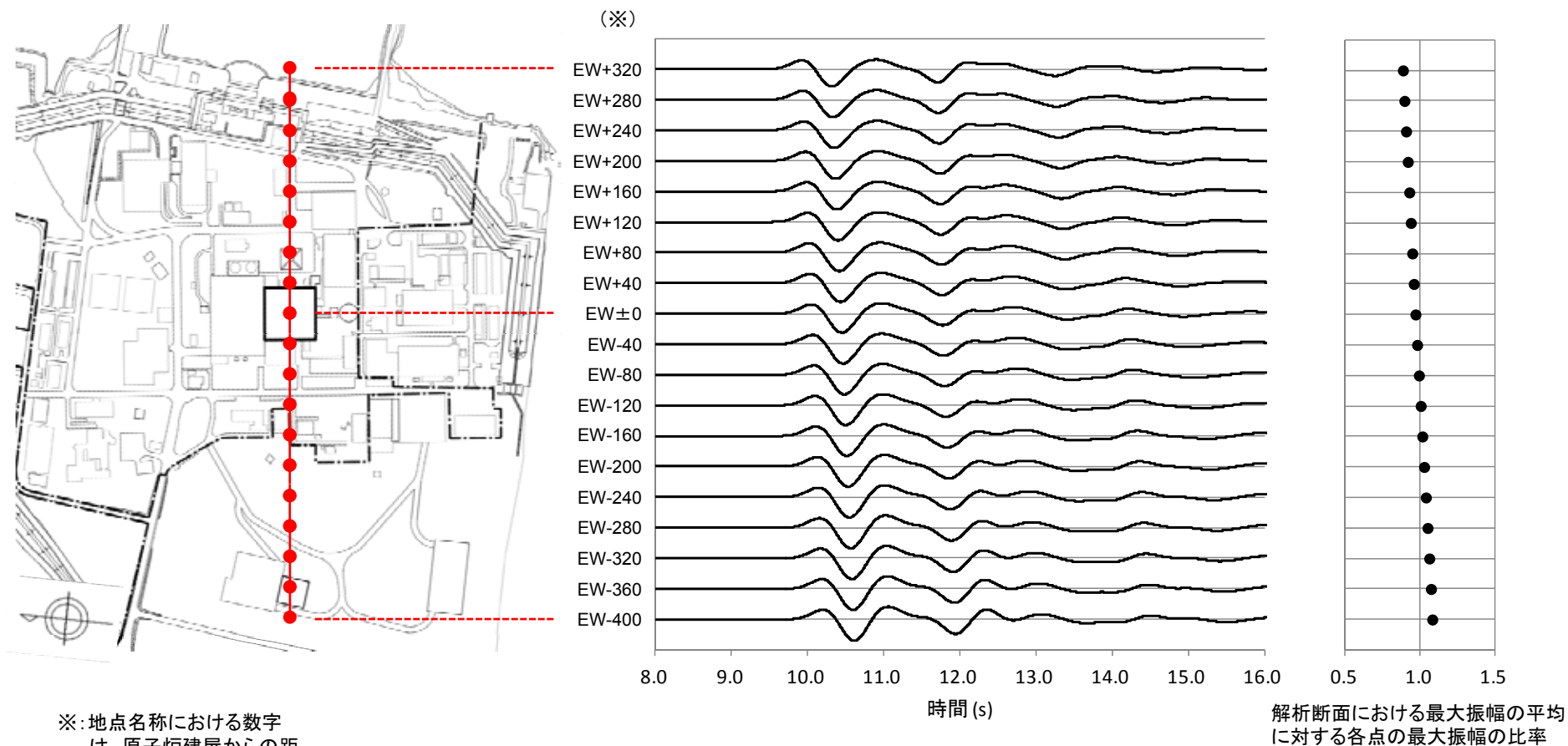
解析結果(中央: 応答時刻歴波形, 右: 応答波の最大振幅の比)
(入力波: リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角 0度)

【EW断面, 解放基盤表面】



解析結果(中央: 応答時刻歴波形, 右: 応答波の最大振幅の比)
(入力波: リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角: 西から40度)

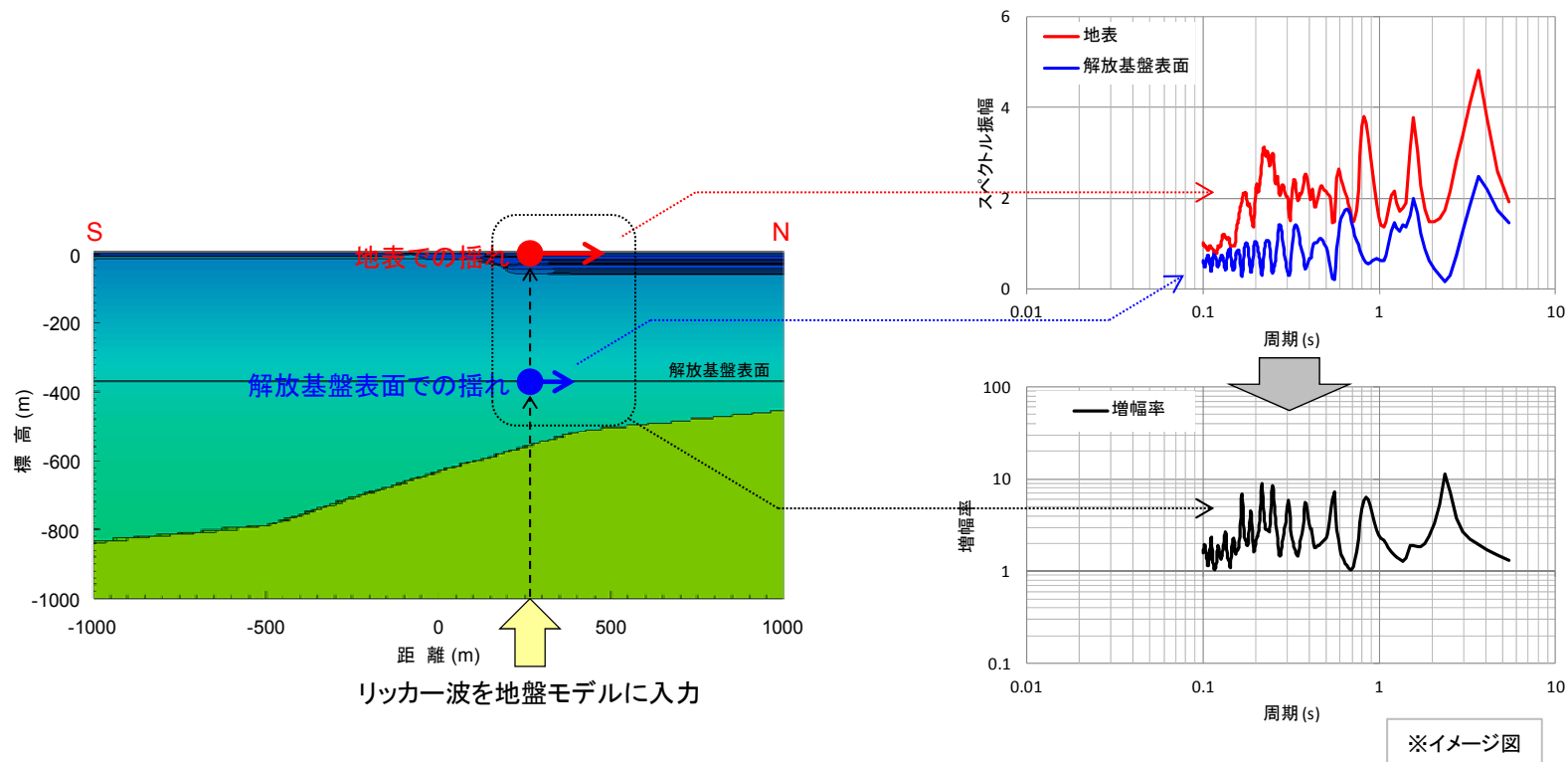
【EW断面, 解放基盤表面】



解析結果(中央: 応答時刻歴波形, 右: 応答波の最大振幅の比)
(入力波: リッカー波, 中心周期1.0秒, 入射角: 東から40度)

解析結果 —解放基盤表面から地表における増幅率— (1/3)

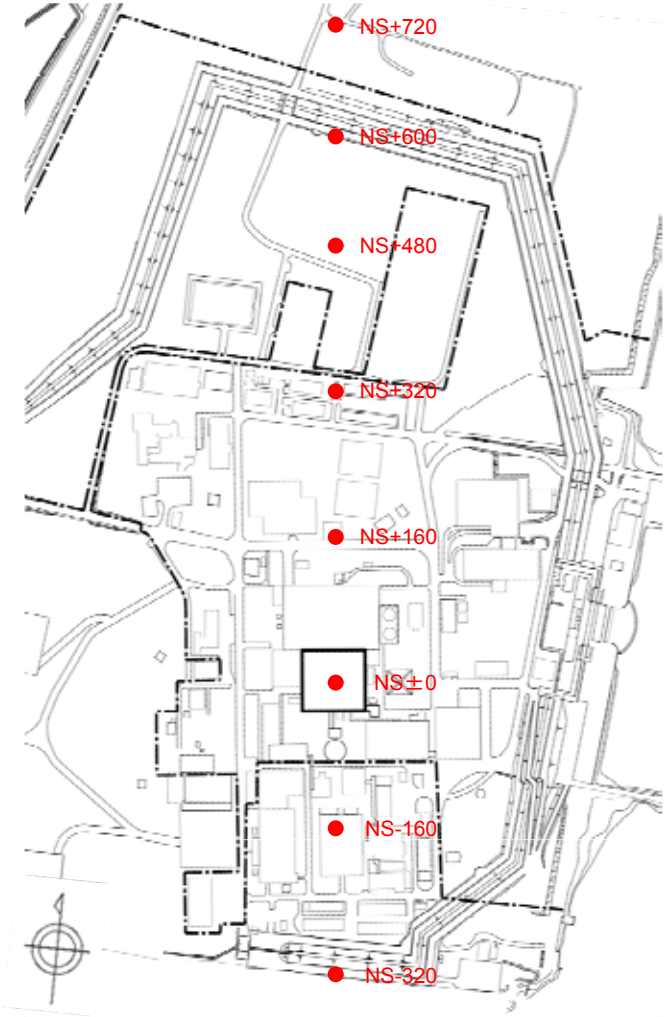
- 解放基盤表面から地表にかけての地震動の変化について、解放基盤表面から地表にかけての増幅率を用いて検討する。



本検討の概念図

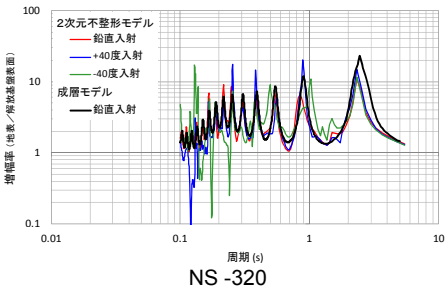
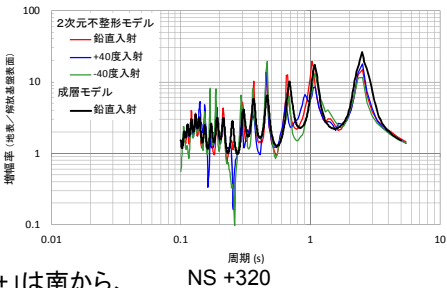
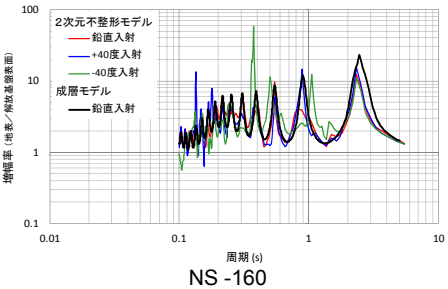
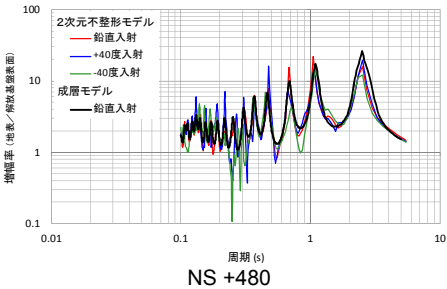
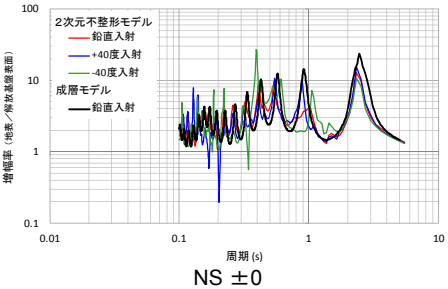
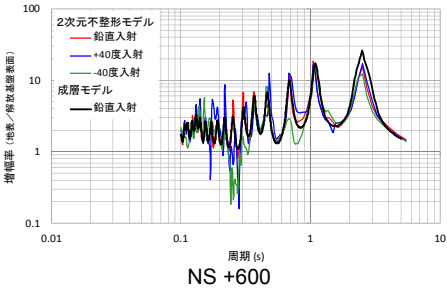
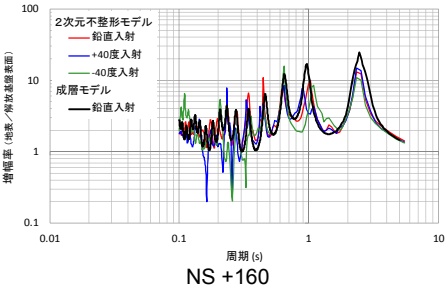
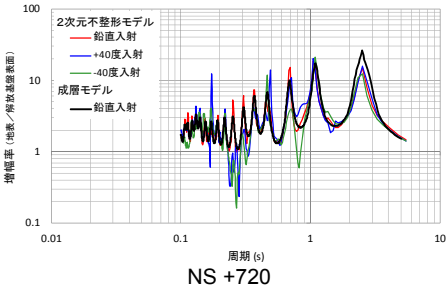
4.2.2 敷地の詳細モデルによる地震動への影響について
解析結果 ー解放基盤表面から地表にかけての増幅率ー (2／3)

【NS断面】



※: 地点名称における数字は、原子炉建屋からの距離を表している。

※: 凡例における「+」は南から、「-」は北からを表している。

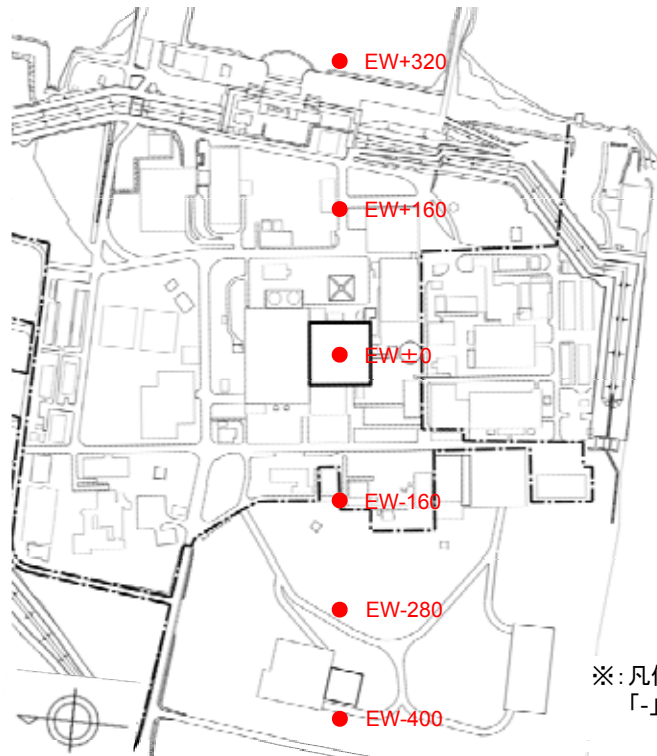


(Parzen Window 0.12Hz)

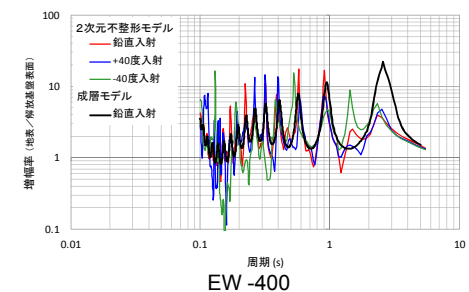
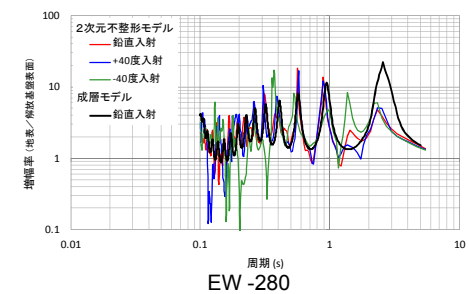
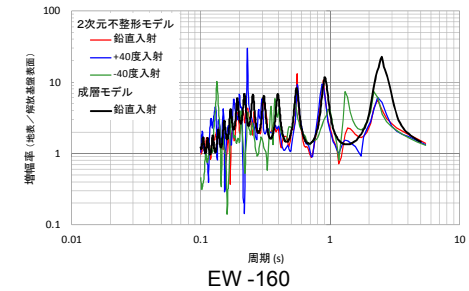
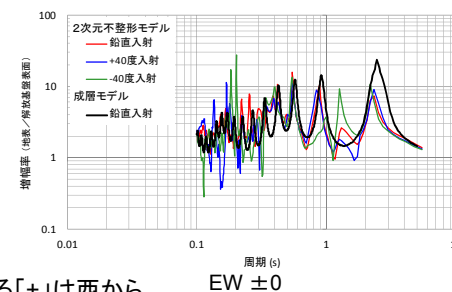
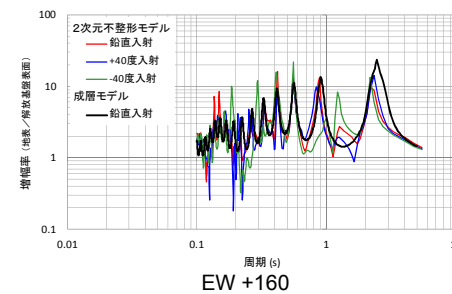
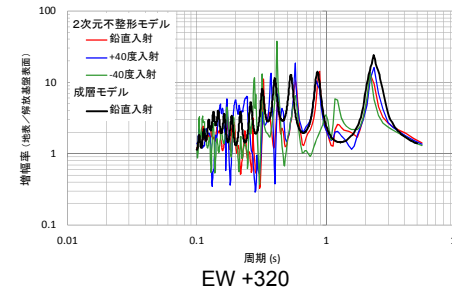
4.2.2 敷地の詳細モデルによる地震動への影響について

解析結果 ー解放基盤表面から地表にかけての増幅率ー (3/3)

【EW断面】



※: 地点名称における数字は、原子炉建屋からの距離を表している。

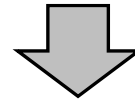


※: 凡例における「+」は西から、「-」は東からを表している。

- 各ケースにおいて2次元不整形モデルと成層モデルの増幅率は概ね一致しており、発電所直下の地下構造は、水平成層構造とみなすことができる。
- EW断面の増幅率における長周期側は、2次元不整形モデルより成層モデルの方が小さくなっており、保守的な評価となる。

敷地の詳細モデルによる地震動への影響についてのまとめ

- ・敷地内における耐震重要施設の設計・確認に用いる地震動の策定位置に関する妥当性を確認するため、敷地の詳細な地盤モデルを用いて、解放基盤表面における地震動の差異と解放基盤表面から地表にかけての地震動の変化について検討した。



○地震観測記録との比較

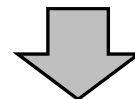
- ・各地震の各深度での比較では、解析結果と観測記録が概ね一致しており、地震動の伝播を精度よく再現できる解析モデルとなっていることが確認できた。

○時刻歴波形、応答波の最大振幅の比

- ・解放基盤表面における地震動の振幅は一定と見なすことができ、局所的で急激な変化は見られない。

○解放基盤表面から地表の増幅率の比較

- ・2次元不整形モデルと成層モデルの増幅率は概ね一致しており、発電所直下の地下構造は、水平成層構造とみなすことができる。



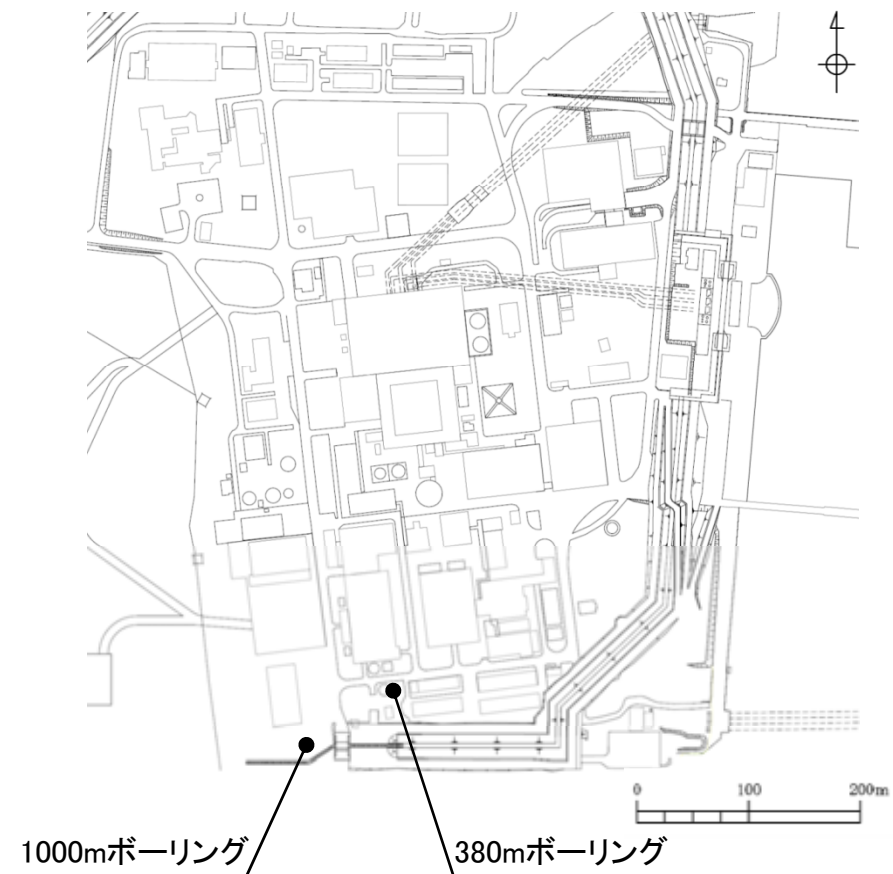
- ・東海第二発電所直下の地下構造は、水平成層構造と見なすことができ、解放基盤表面の設定は、基準地震動の策定位置として妥当であることを確認した。

5. 敷地の地盤モデル

5.1 地盤モデルの設定について

地盤モデルの設定方針

- 地震観測記録を用いた地震波の到来方向による検討や、地球物理学的調査に基づき作成した地下構造モデルによる解析的検討の結果より、東海第二発電所の地下構造は水平成層とみなせることを確認したので、地盤調査結果と地震観測記録を用いて、一次元波動論に基づき地盤モデルを設定する。
- 東海第二発電所の敷地では、1993年に深さ380m程度の解放基盤表面までを対象としたボーリング調査を実施するとともに、ボーリング孔を利用した鉛直アレイ地震観測を開始した。その後、2011年までに深さ1000m程度のボーリング調査を追加実施した。
- 解放基盤表面以浅については、ボーリング調査結果と地震観測記録を用いた地盤同定解析を実施した。
- 東海第二発電所敷地直下の地盤モデルは、解放基盤表面以浅を地震観測記録により同定した解析モデルを用い、解放基盤表面以深に深さ1000m程度のボーリング調査結果を組み合わせ設定することとした。



地盤モデルの検討に用いたボーリング位置(平面)

PS検層結果(ダウンホール法)

【380mボーリング】

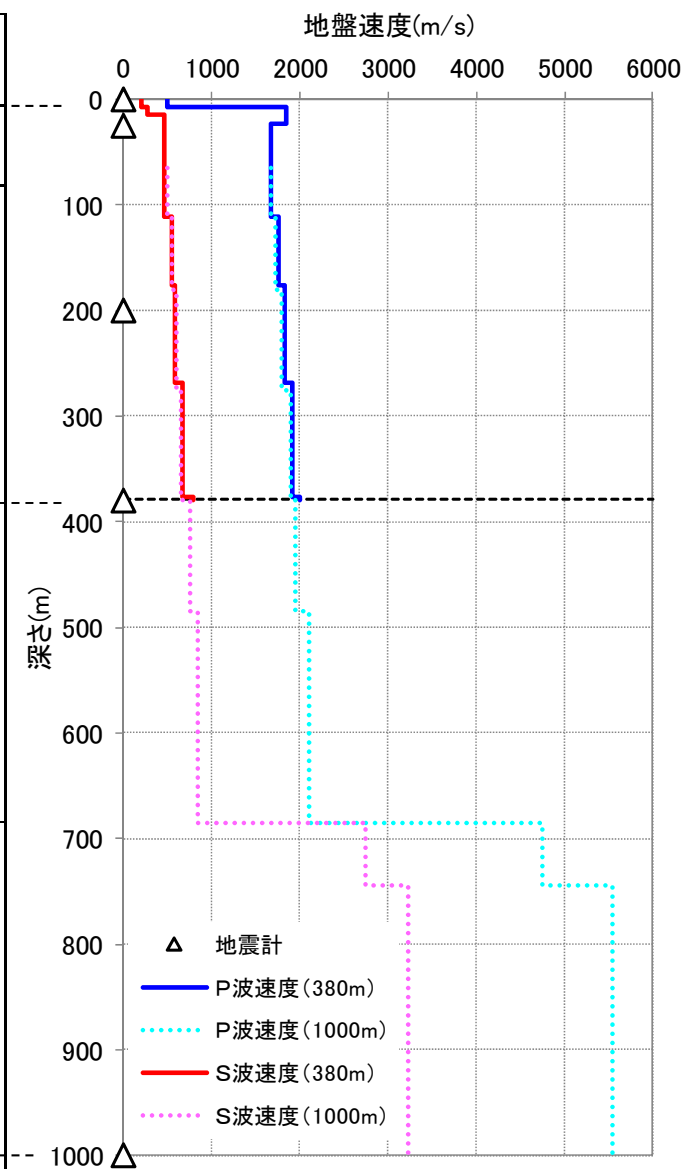
上端深さ (m)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	地層
0	210	500	第四系
7	280	1850	
15	470	1850	
23	460	1680	新第三系
114	540	1760	
176	590	1830	
268	670	1920	
376	790	2000	
380	—	—	

※ G.L. = E.L.8.0m

注) 1000mボーリングにおける65m以浅のS波速度とP波速度, 485m以浅の減衰定数は取得していない。

【1000mボーリング】

上端深さ (m)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	減衰定数		地層
			水平	鉛直	
—	—	—	—	—	—
65	500	1680			新第三系
110	540	1730			
180	600	1790			
275	650	1890			
380	750	1950	0.0246	0.0103	新第三系
485	840	2110			
685	2750	4740	0.0725	0.0397	先新第三系
745	3220	5550	0.0154	0.0102	
1000	—	—	—	—	



浅部地盤の同定解析【水平動】(1/2)

●地盤モデルの同定結果(水平動)

- ・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。
- ・初期値は、380mボーリングの調査結果とし、S波速度と減衰定数について同定した。
- ・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。

同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果(水平動)

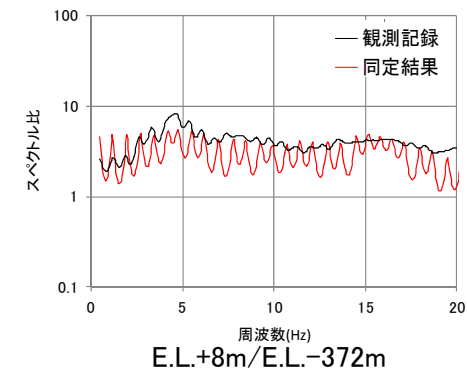
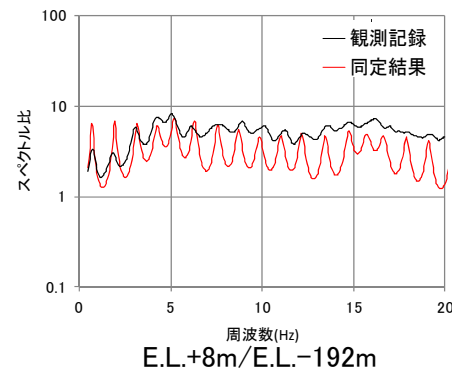
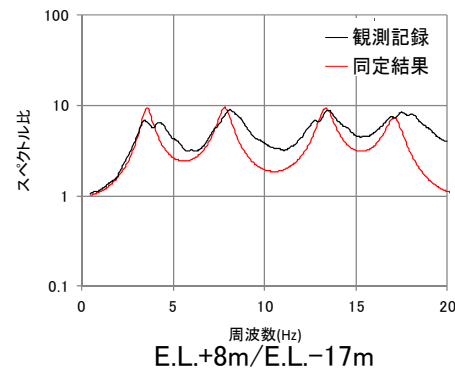
固定パラメータ					初期値	探索範囲		同定結果		
G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	地層区分	地層	S波速度 (m/s)	S波速度	減衰 h(f)=h ₀ ×f ^{-α}	S波速度 (m/s)	減衰定数 h(f)=h ₀ ×f ^{-α}	
▲ 0.0		1.71	砂	第四系	210	初期値の 0.6～1.2倍	h ₀ :0.010～1.000 α:0.00～1.00	130	h ₀ :0.236 α:0.75	
	-2.5							4.5		151
	-7.0							8.0		1.66	礫混じり砂	280	308
	-15.0	8.0	1.82		砂礫	470		478		
	-23.0	91.0	1.69		砂質 泥岩	新第三系		460	477	h ₀ :0.072 α:0.93
	▲ -114.0	62.0	1.74					540	557	
▲ -176.0		92.0	1.78	590				669		
	-268.0	108.0	1.82	670				756		
-376.0	4.0	1.85	▽	790					790	
▲ -380.0	—									

▲:地震計設置位置
▽:解放基盤表面

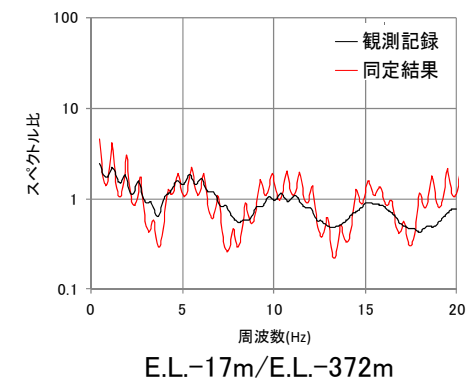
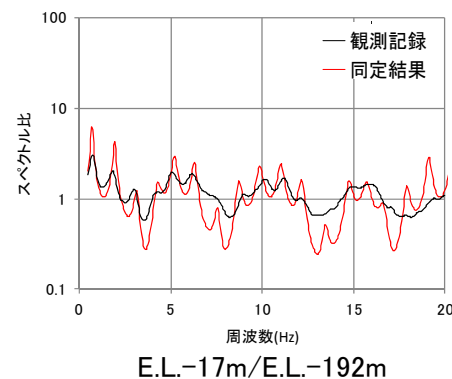
同定対象

※ G.L. = E.L.8.0m

●地盤モデルの同定結果(水平動)

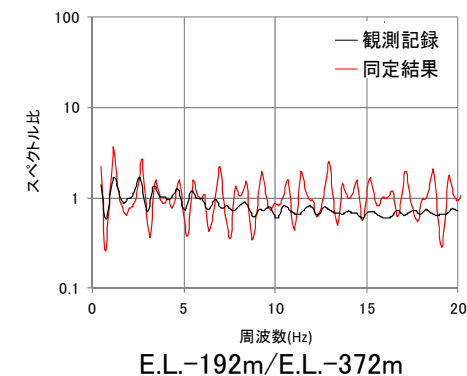


※ G.L. = E.L.8.0m



地震観測記録による伝達関数※(黒線)と
同定結果の理論伝達関数(赤線)の比較

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで
平滑化している。



浅部地盤の同定解析【鉛直動】(1/2)

●地盤モデルの同定結果(鉛直動)

- ・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。
- ・初期値は、380mボーリングの調査結果とし、P波速度と減衰定数について同定した。
- ・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。

同定解析における初期値, 探索範囲, 同定結果(鉛直動)

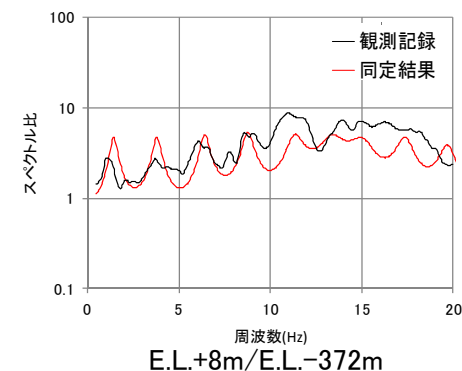
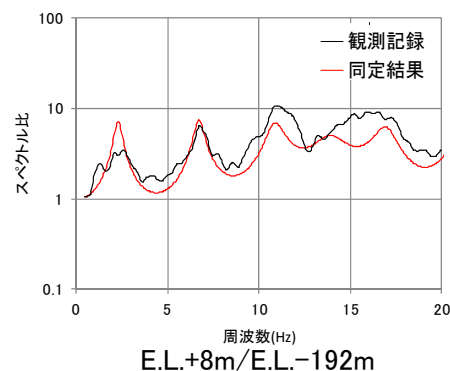
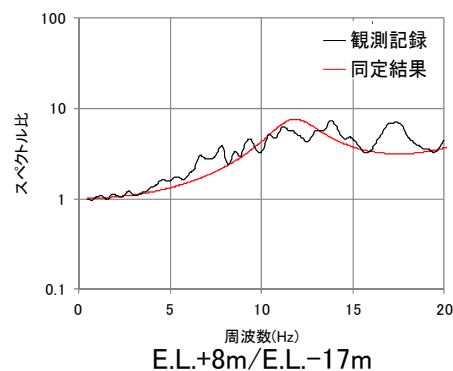
固定パラメータ					初期値	探索範囲		同定結果		
G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	地層区分	地層	P波速度 (m/s)	P波速度	減衰 h(f)=h ₀ ×f ^{-α}	P波速度 (m/s)	減衰定数 h(f)=h ₀ ×f ^{-α}	
▲ 0.0		1.71	砂	第四系	500	100～500 (m/s)	h ₀ :0.010～1.000 α:0.00～1.00	280	h ₀ :0.203 α:0.21	
	-2.5							4.5		403
	-7.0							8.0		1.66	礫混じり砂	1589
	-15.0	8.0	1.82		シルト	1509				
	-23.0	91.0	1.69		砂質 泥岩	新第三系		1680	1753	h ₀ :0.203 α:0.93
	-114.0	62.0	1.74					1760	1742	
-176.0	92.0	1.78	1830	2067						
-268.0	108.0	1.82	1920	2256						
-376.0	4.0	1.85	2000	2000						
▽	—									
▲ -380.0	—									

▲: 地震計設置位置
▽: 解放基盤表面

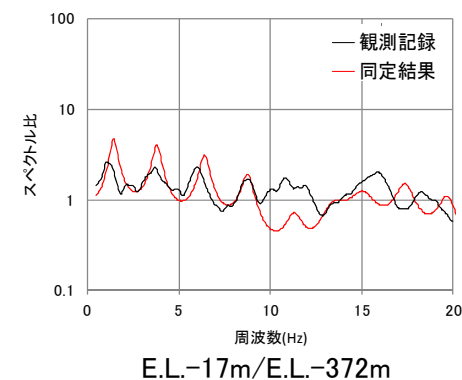
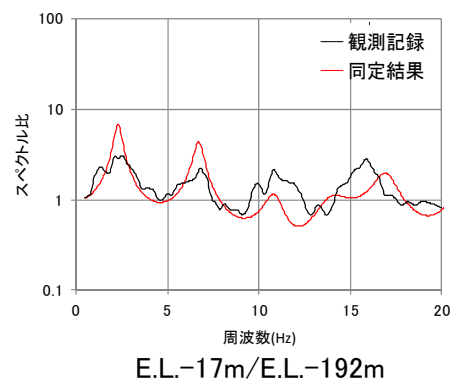
同定対象

※ G.L. = E.L.8.0m

●地盤モデルの同定結果(鉛直動)

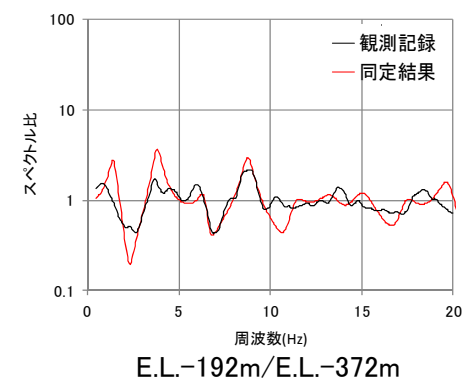


※ G.L. = E.L.8.0m



地震観測記録による伝達関数※(黒線)と
同定結果の理論伝達関数(赤線)の比較

※地震観測記録の伝達関数は、0.4HzのParzen windowで
平滑化している。



5.1 地盤モデルの設定について 地盤モデルの設定

第338回審査会合
資料4 再掲

- ①解放基盤表面以浅の地盤モデルは、地盤同定解析結果を基に設定した。
- ②解放基盤表面以深の地盤モデルは、1000mボーリングの調査結果を基に設定した。
- ③なお、解放基盤表面以深の最上層のS波速度、P波速度及び密度については、地盤モデルにおける物性値の連続性を考慮し、解放基盤表面以浅の地盤モデルにおける最下層の数値とした。
- ④減衰定数については、解放基盤表面から地震基盤までは信岡ほか(2012)、地震基盤以深については佐藤ほか(1994)に基づき設定した。

▽解放基盤表面(E.L.-370m)

▽地震基盤(E.L.-677m)

設定した地盤モデル

※ E.L. (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			
					水平	鉛直		
①	8.0	2.5	130	280	1.71	0.236f ^{-0.752}	0.203f ^{-0.21}	
	5.5							
	4.5	151	403	1.66				
	1.0	8.0	308					1589
	-7.0	8.0	478					1509
	-15.0	91.0	477	1753	1.69	0.072f ^{-0.931}	0.203f ^{-0.93}	
	-106.0	62.0	557	1742	1.74			
	-168.0	92.0	669	2067	1.78			
	-260.0	108.0	756	2256	1.82			
	-368.0	2.0	790	2000	1.85			
-370.0	107.0	③ 790	2000	1.85	④ 0.02	0.01		
-477.0	200.0	840	2110	1.96				
-677.0	60.0	2750	4740	2.63	Q=110f ^{0.69}			
-737.0	265.0	3220	5550	2.70				
-1002.0	-	3220	5550	2.70				

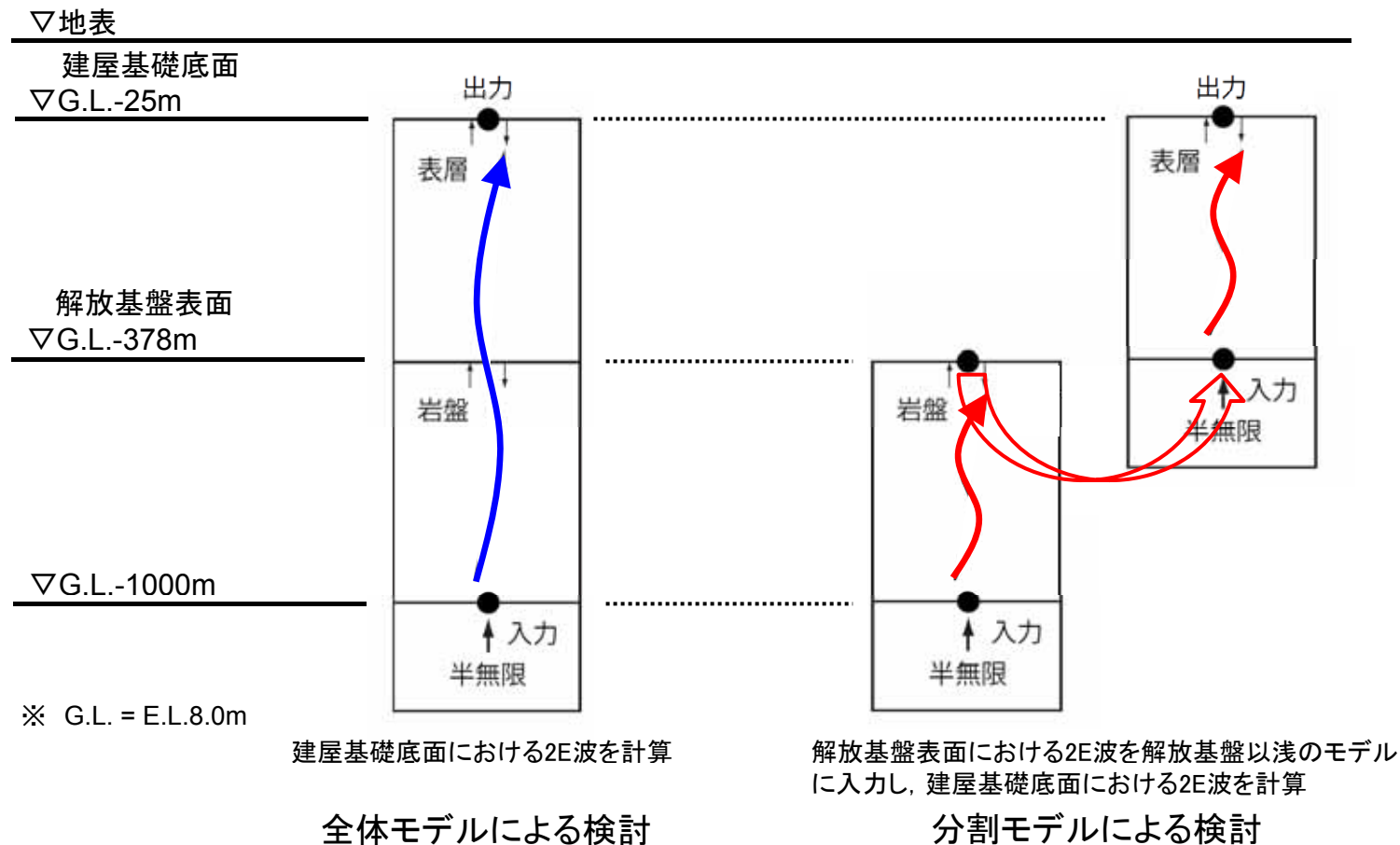
※ G.L. = E.L.8.0m

5. 敷地の地盤モデル

5.2 地盤モデルによる振動特性の検討

吉田ほか(2005)に基づく検討方針

- 原子力発電所の耐震設計においては、解放基盤表面で基準地震動を策定し、設定された基準地震動を浅部の地盤モデルに入力し、建屋への入力地震動を算定している。
- 吉田ほか(2005)の知見を踏まえ、G.L.-1000mから建屋基礎底面までを一体解析する「全体モデル」による建屋基礎底面のG.L.-25mの地震動と、深部モデルを用いて求めた解放基盤表面の2E波を浅部モデルに入力して解析する「分割モデル」によるG.L.-25mの地震動とを比較する。

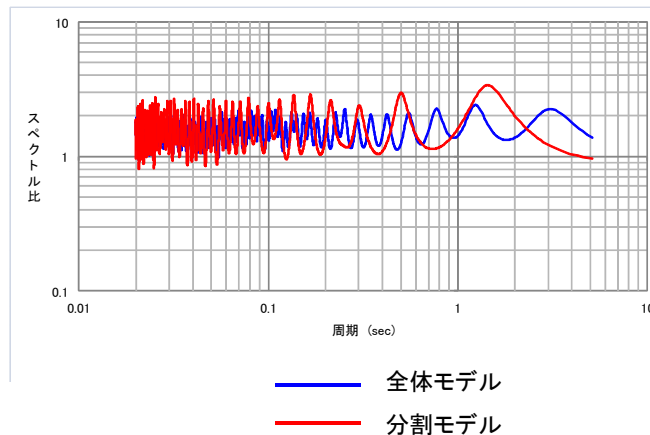


検討結果 —地震観測記録を用いた場合—

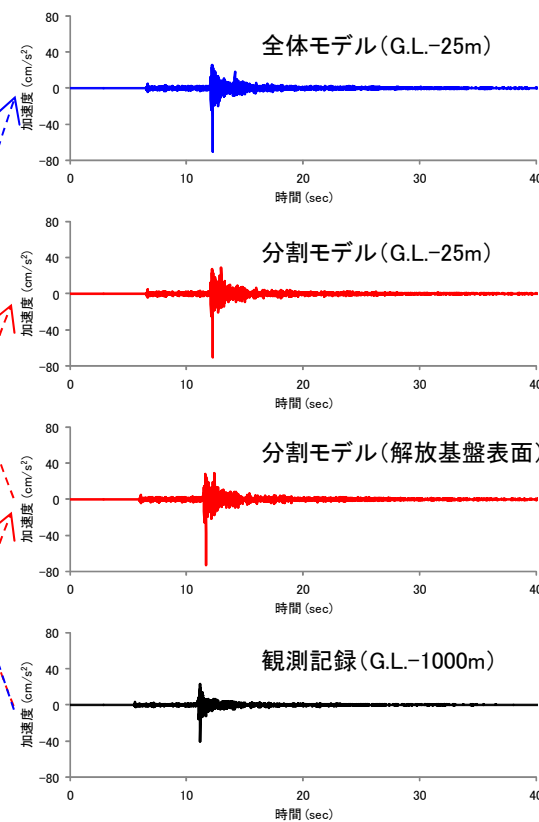
- ・G.L.-1000mで観測した地震記録を全体モデルと分割モデルに入力し、建屋基礎底面に相当するG.L.-25mの地震動を算出する。以下に、G.L.-1000mに対するG.L.-25mのフーリエスペクトル比、加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。
- ・フーリエスペクトル比では、周期0.8秒付近より長周期側において分割モデルの卓越周期が短周期側に移動するものの、応答スペクトルでは、全体モデルと分割モデルの違いによる差は小さい。

検討に用いた観測記録の地震諸元

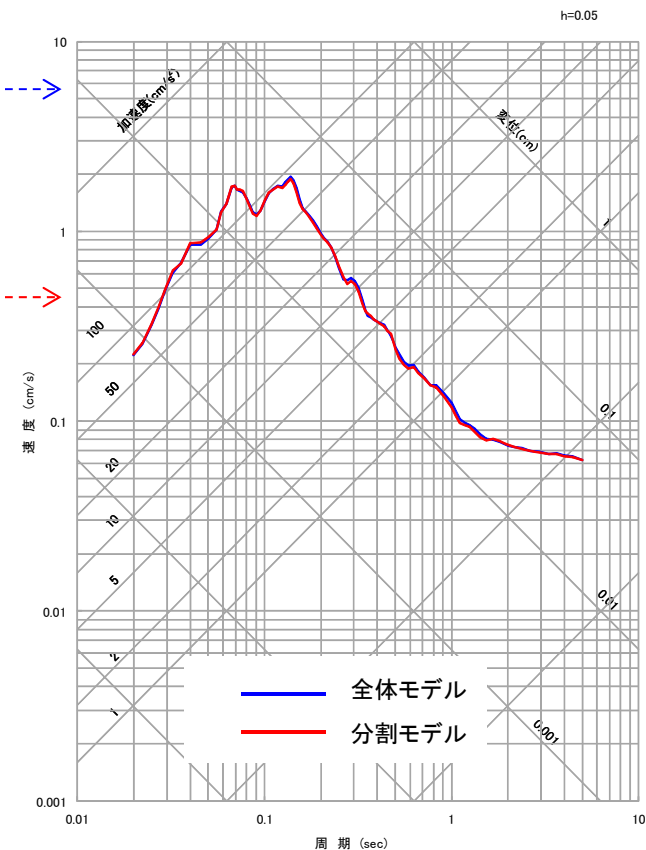
- ・発震日時：2013年3月18日 6時53分
- ・地震規模：M4.4
- ・震源深さ：56km
- ・震源地：茨城県北部



フーリエスペクトル比



加速度時刻歴波形



応答スペクトル (G.L.-25m)

- ・地質調査総合センター編：日本重力データベース DVD版，産業技術総合研究所地質調査総合センター，数値地質図 p.2, 2013.
- ・Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C.L. Drake (1970): Seismic Refraction, in “The Sea, Vol.4”, edited by A.E. Maxwell, Wiley Interscience, New York, 53–84.
- ・山中浩明・石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，p.436–444, 1995.
- ・信岡大・川里健・生玉真也：人工振源を用いた軟岩サイトにおけるQ値測定，物理探査学会第127回学術講演会論文集，p.102–105, 2012.
- ・佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明：表層地盤の影響を取り除いた工学的基礎波の統計的スペクトル特性－仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析－，日本建築学会構造系論文集，p.79–89, 1994.
- ・吉田望・篠原秀明・澤田純男・中村晋：設計用地震動の設定における工学的基盤の意義，土木学会地震工学論文集，第28巻，Paper No.170, 2005.
- ・諸井孝文・広谷浄・石川和也・水谷浩之・引間和人・川里健・生玉真也・釜田正毅：標準的な強震動レシビに基づく東北地方太平洋沖巨大地震の強震動の再現，日本地震工学会第10回年次大会梗概集，p.381–382, 2013.
- ・鈴木晴彦・山中浩明：地震動のS波部分を用いた深部地盤のS波速度構造モデルの推定，物理探査学会物理探査 第62巻第2号，p.261–275, 2009.