補足説明資料①-08
浅部地下構造モデルの設定及び解析検討

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

検討概要

＜目的＞

○地下構造調査結果及び地震観測記録に基づく検討により、2009年駿河湾の地震における浜岡原子力発電所５号炉周辺の増幅要因はS波低速度層※であると推定される。

※S波低速度層は５号炉から北東方向にかけて、深さ数百mの浅部に局所的に分布しており、その内部は、濃淡のある不均質な速度構造の集合体と考えられる。

○S波低速度層が地震動の増幅に影響を及ぼすか検討し、５号炉周辺の増幅要因の検証を行う。

＜浅部三次元地下構造モデルの作成＞

○敷地近傍の浅部地盤を対象として実施した地下構造調査（オフセットVSP探査、ベイケーブル探査、反射法地震探査、ボーリング調査・物理検層等）の結果に基づき、S波低速度層を含む敷地近傍の浅部三次元地下構造モデルを作成する。

＜三次元有限差分法による解析検討＞

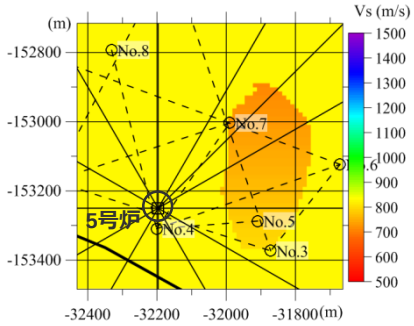
○作成した浅部三次元地下構造モデルを用いて、三次元有限差分法により、３～５号炉位置の地盤増幅特性に係る解析検討を行い、地震観測記録の特徴との関係について検討する。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

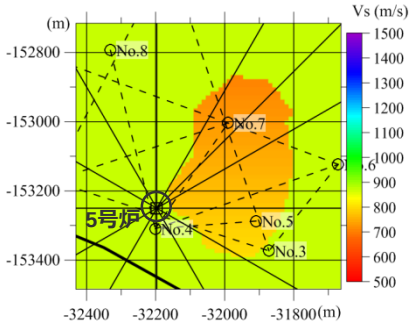
浅部地下構造モデルの設定

○低速度層、小低速度層※、母岩（相良層）から成る浅部三次元地下構造モデル（チューニングモデル）は、基本的に地下構造調査結果に基づき設定し、小低速度層は地震観測記録の特徴を説明できるよう、その形状をチューニングして低速度層の内部に設定する。

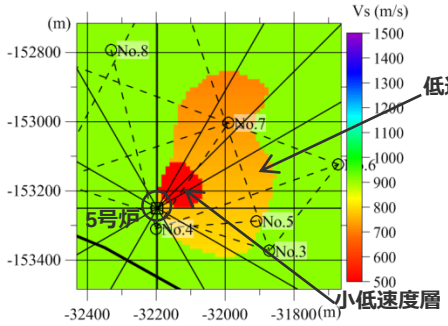
※オフセットVSP探査結果（フルウェーブ解析）によると、低速度層の内部が濃淡のある不均質な速度構造の集合体であることを踏まえ、低速度層の内部には更に速度が低い構造（小低速度層）をモデル化する。



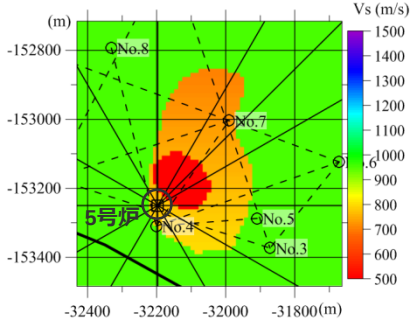
深さ144m断面



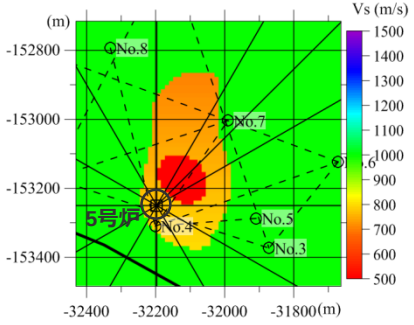
深さ192m断面



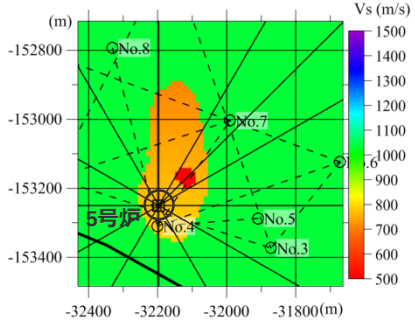
深さ240m断面



深さ288m断面

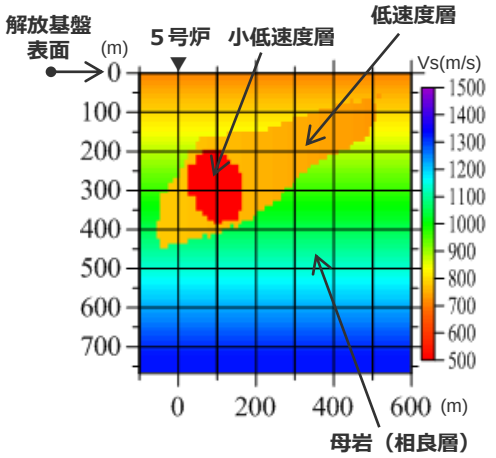


深さ336m断面



深さ384m断面

＜深さ毎の速度断面＞



＜N60E方向の速度断面＞
（2009年駿河湾の地震の地震波到来方向）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

浅部地下構造モデルの設定
（物性値の設定）

＜S波速度＞

○オフセットVSP探査結果等に基づき、低速度層は700～800m/s、小低速度層は500m/s、母岩（相良層）は深さ方向に漸増する速度構造とする。

＜P波速度及び密度＞

○地下構造調査結果において低速度層に対応する変化は認められないことから、低速度層、小低速度層ともに母岩（相良層）と同じ設定とする。

＜母岩（相良層）＞

深度(m)	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(g/cm^3)
0（モデル上面）	700	2000	2.07
∫	直線補間	直線補間	直線補間
-732（モデル下面）	1330	2560	2.21

＜低速度層及び小低速度層＞

	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(g/cm^3)
低速度層	700～800	母岩と同じ	母岩と同じ
小低速度層	500	母岩と同じ	母岩と同じ

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

第992回
資料1-3 p.123一部修正

浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）（解析諸元）

＜解析諸元＞

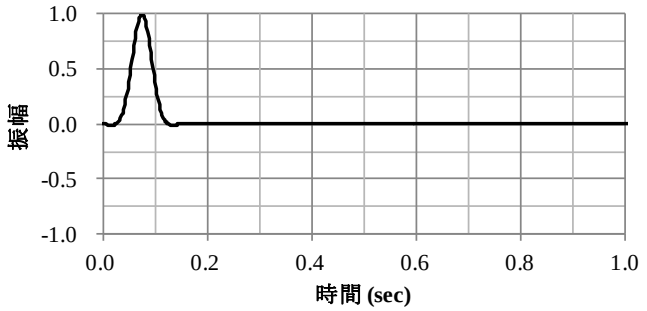
解析手法	三次元有限差分法
解析対象周波数	上限8Hz
メッシュサイズ	12m（最小）
入力波	BELL型単独波、BELL型連続波
入射角	20°※1 
入射方向	0°（北）,30°,60°※2, 90°（東）,120°,150°, 180°（南）, 210°,240°, 270°（西）,300°,330°

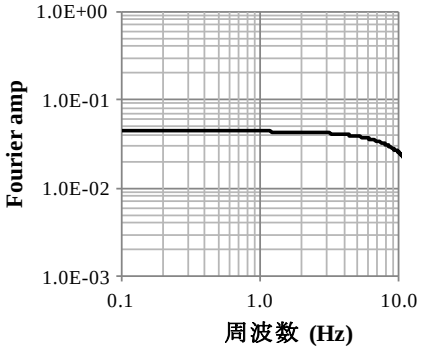
※1：2009年駿河湾の地震のレイトレーシング解析結果に基づく。（前述（補足説明資料①-07）の深部三次元地下構造モデルに基づき、2009年駿河湾の地震の震源位置まで拡張し、レイトレーシング解析を実施。）

※2：2009年駿河湾の地震の地震波到来方向。

＜入力波1：BELL型単独波＞
（左図：時刻歴波形、右図：フーリエスペクトル）
⇒地盤増幅率（応答波／入力波）の検討に用いる。

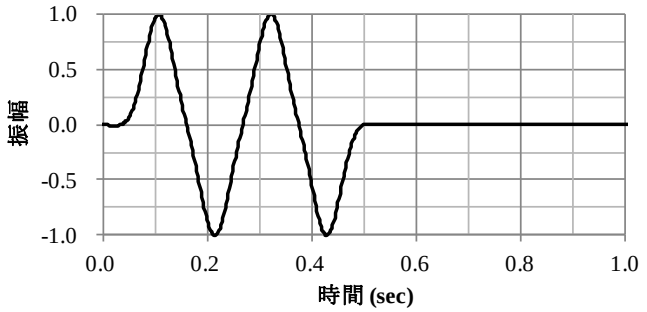
・解析結果①（周波数特性）
：入射方向N60E（2009年駿河湾の地震の地震波到来方向に相当）とした３～５号炉位置の地盤増幅率

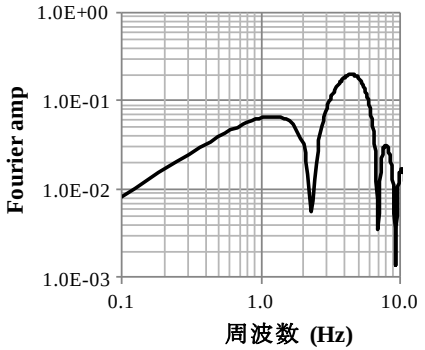




＜入力波2：BELL型連続波＞
（左図：時刻歴波形、右図：フーリエスペクトル）
⇒時刻歴波形の検討に用いる。

・解析結果②（経時特性）
：入射方向N60E（2009年駿河湾の地震の地震波到来方向に相当）とした３～５号炉位置の応答波形
・解析結果③（地震波到来方向毎の増幅特性）
：N0E～N330Eで入射方向を30°刻みとした３～５号炉位置の応答波形の最大値分布





Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

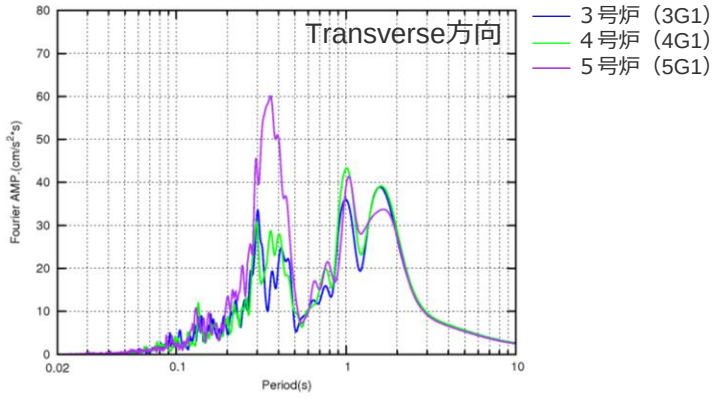
第992回
資料1-3 p.124再掲

浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

（地震観測記録の特徴と浅部地下構造モデルを用いた解析結果との比較（周波数特性））

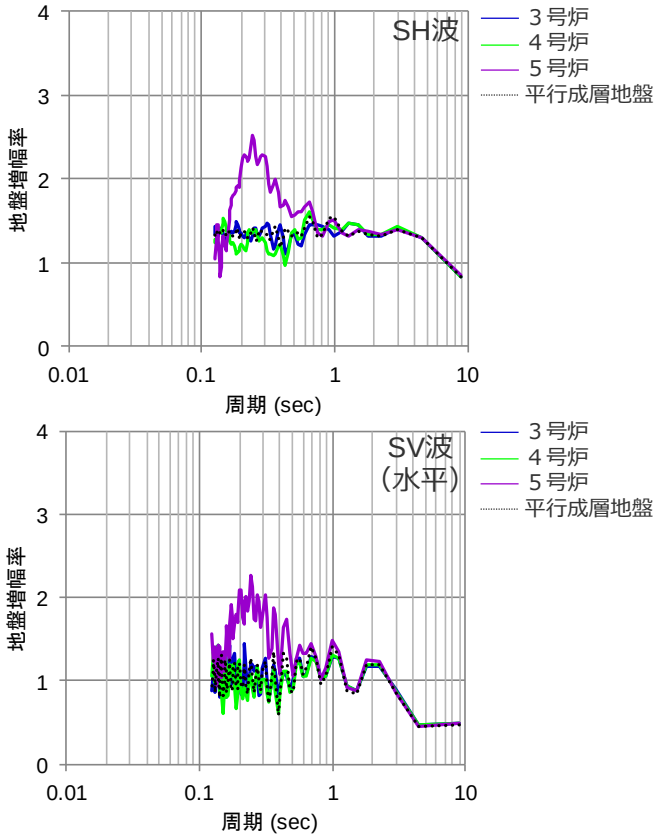
○地震観測記録として2009年駿河湾（本震）の地震の加速度フーリエスペクトルと、浅部三次元地下構造モデルを用いた解析結果として入射方向N60E（2009年駿河湾の地震の地震波到来方向に相当）とした３～５号炉位置の地盤増幅率を示す。
○地震観測記録の特徴として、５号炉周辺の顕著な増幅は周期0.2～0.5秒付近の狭帯域に見られ、解析結果においても、５号炉位置では周期0.2～0.5秒付近で増幅しており、両者は概ね整合している。

地震観測記録



＜2009年駿河湾の地震（本震）の加速度フーリエスペクトル＞
（3G1, 4G1, 5G1(G.L.-100m)）

解析結果



＜３～５号炉位置の地盤増幅率（応答波／入力波）＞
（入力波：BELL型単独波、入射方向：N60E方向、入射角：20°）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

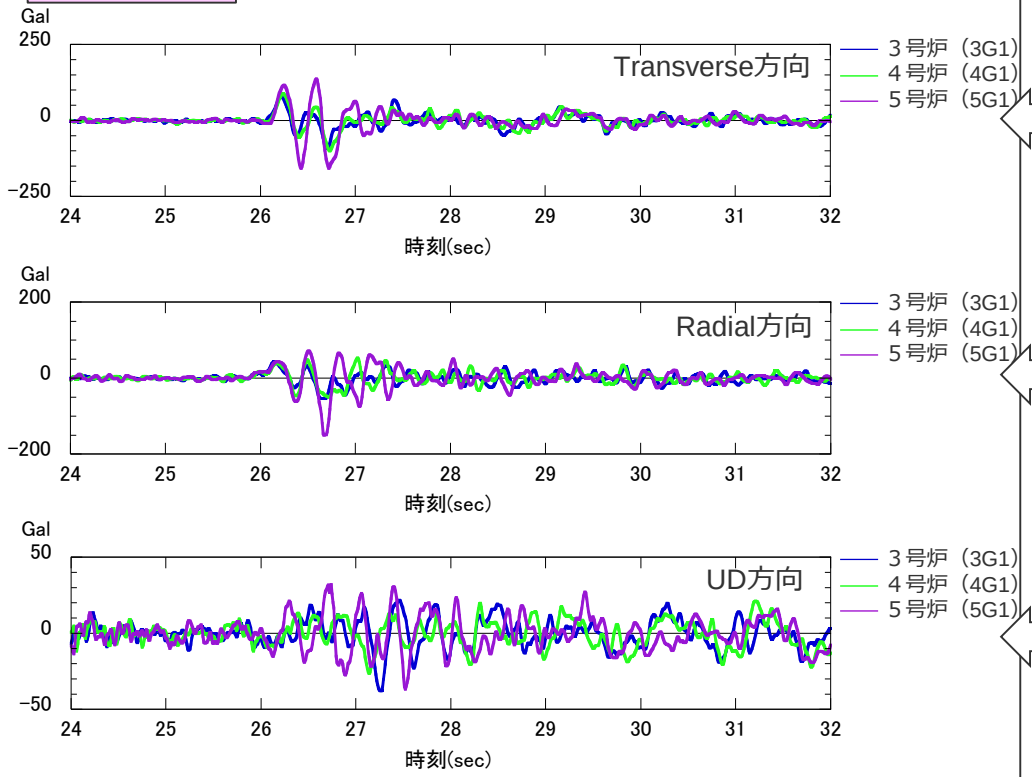
第992回
資料1-3 p.125一部修正

浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

（地震観測記録の特徴と浅部地下構造モデルを用いた解析結果との比較（経時特性））

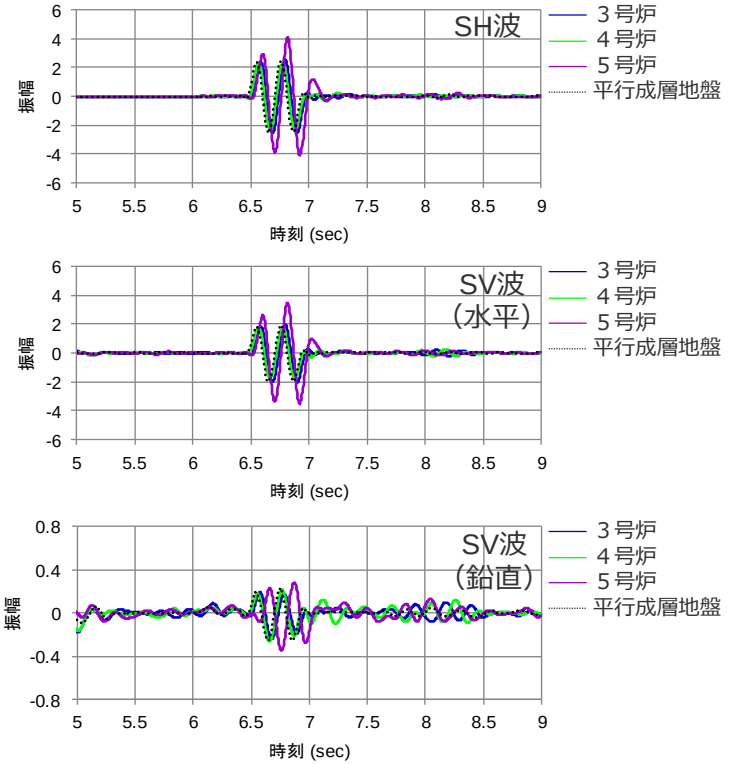
○ 地震観測記録として2009年駿河湾の地震（本震）の加速度時刻歴波形と、浅部三次元地下構造モデルを用いた解析結果として入射方向N60E（2009年駿河湾の地震の地震波到来方向に相当）とした３～５号炉位置の応答波形を示す。
○ 地震観測記録の特徴として、水平動では、S波主要動部で５号炉周辺の顕著な増幅が見られ、若干の位相遅れを伴うとともに、一波目より二波目以降でより増幅が大きい。また、鉛直動の位相特性はランダムになっている。
○ 解析結果において、５号炉位置では水平動でやや位相遅れを伴い、一波目より二波目以降でより増幅が大きい。また、鉛直動の位相特性はランダムになっており、地震観測記録の特徴と概ね整合している。

地震観測記録



<2009年駿河湾の地震（本震）の加速度時刻歴波形>
（3G1, 4G1, 5G1(G.L.-100m)）

解析結果



<３～５号炉位置の応答波形>
（入力波：BELL型連続波、入射方向：N60E方向、入射角：20°）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

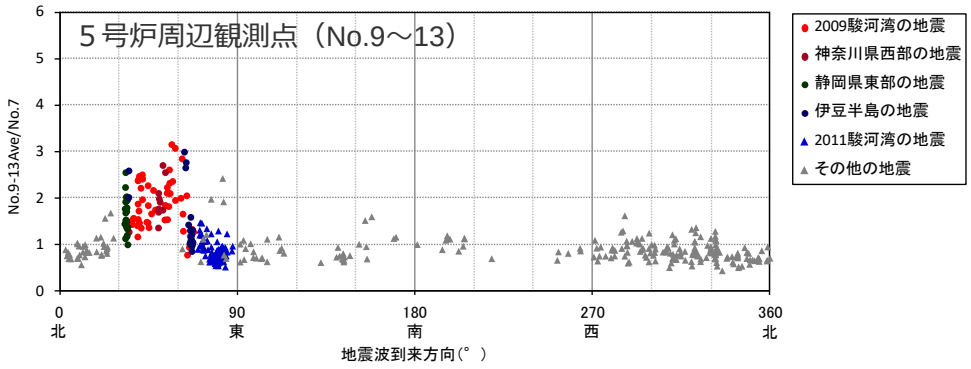
浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

（地震観測記録の特徴と浅部地下構造モデルを用いた解析結果との比較（地震波到来方向毎の増幅特性））

○ 多点連続地震観測の分析結果として５号炉周辺観測点における各地震の振幅比（No.7基準）と地震波到来方向との関係と、浅部三次元地下構造モデルを用いた解析結果としてN0E～N330Eで入射方向を30°刻みとした３～５号炉位置の応答波形の最大値分布を示す。
○ 地震観測記録の特徴として、５号炉周辺では、2009年駿河湾の地震の地震波到来方向（N30E～N70E）で顕著な増幅が見られるが、その他の方向では同様の増幅は見られず、増幅がやや小さい傾向が見られる。
○ 解析結果において、５号炉位置ではN30E～N60E付近で最大応答値が最も大きく、その他の方向では同様の増幅が見られず、増幅がやや小さい傾向が見られており、地震観測記録の特徴と概ね整合している。

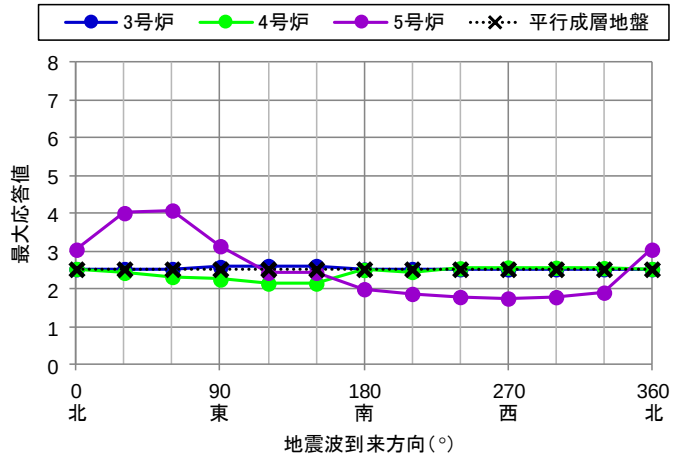
⇒ 以上の検討によると、浅部三次元地下構造モデルを用いた解析結果は地震観測記録の特徴と概ね整合していることから、５号炉周辺の増幅要因はS波低速度層であると評価した。

地震観測記録



＜各地震の振幅比（No.7基準）と地震波到来方向との関係（水平平均）＞
（観測分析期間：2009年9月20日～2014年7月26日）

解析結果



＜３～５号炉位置の応答波形の最大値分布＞
（入力波：BELL型連続波（SH波）、
入射方向：N0E～N330E（30°刻み）、入射角：20°）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

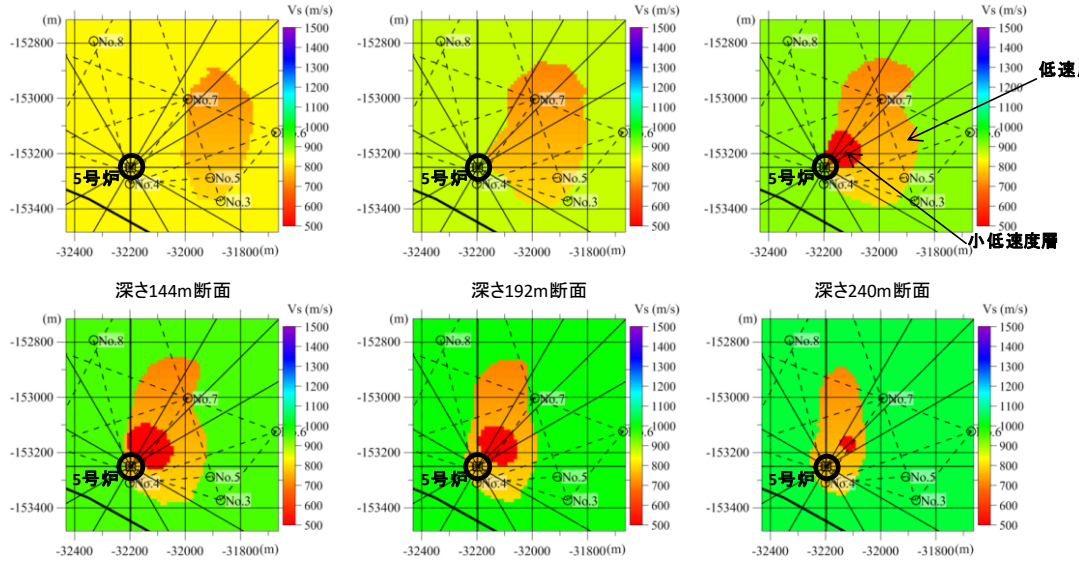
<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

第992回
資料1-3 p.127再掲

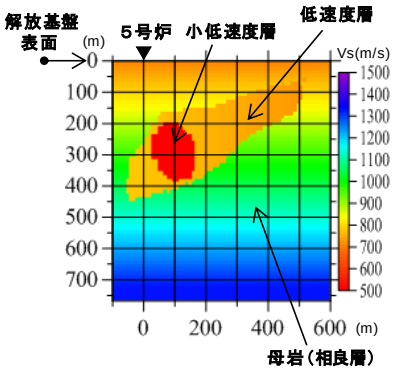
浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）
（小低速度層に関するパラメータスタディ（検討概要））

作成した浅部三次元地下構造モデル

○前述のとおり、低速度層、小低速度層、母岩から成る浅部三次元地下構造モデルは、基本的に地下構造調査結果に基づき設定し、小低速度層は地震観測記録の特徴を説明できるよう、その形状をチューニングして、低速度層の内部に設定している（以降の検討では、「チューニングモデル」という）。



<深さ毎の速度断面>



<N60E方向の速度断面>
（2009年駿河湾の地震の
地震波到来方向）

・低速度層のS波速度：700～800m/s
・小低速度層のS波速度：500m/s

小低速度層に関するパラメータスタディ

○小低速度層に関して、「サイズ」、「物性値（S波速度）」、「位置」、「形状」に関するパラメータスタディを行い、観測記録の特徴との整合性を検討する。

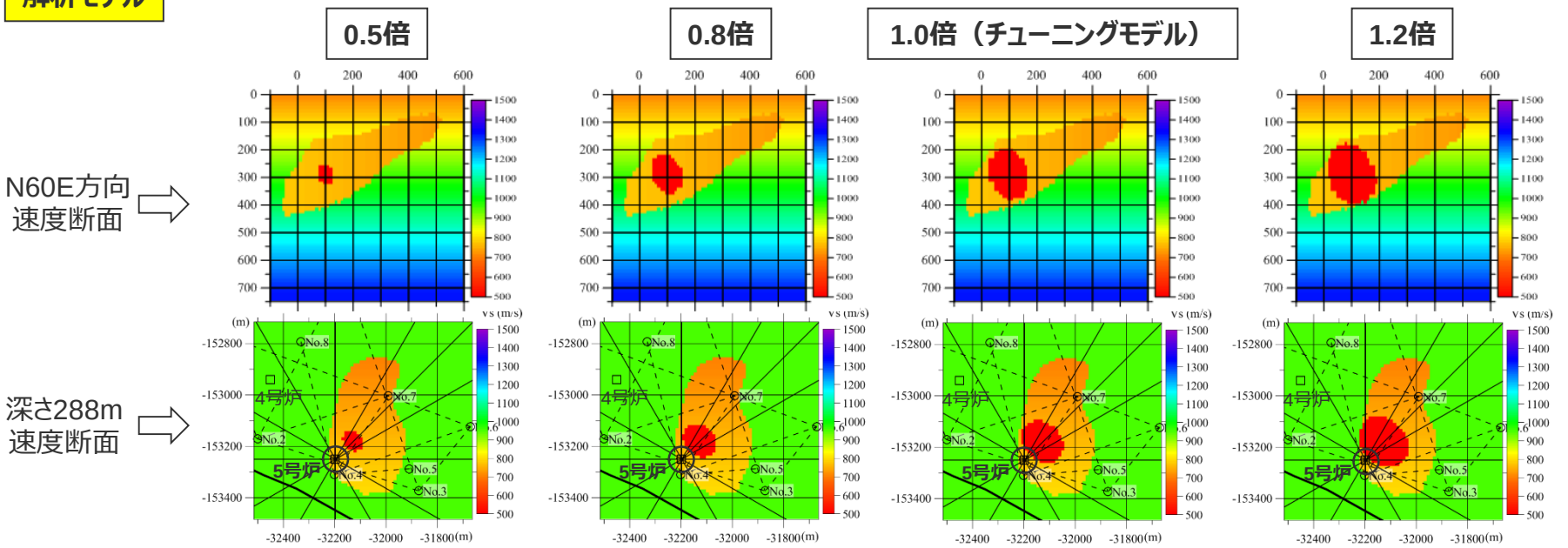
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

第992回
資料1-3 p.128再掲

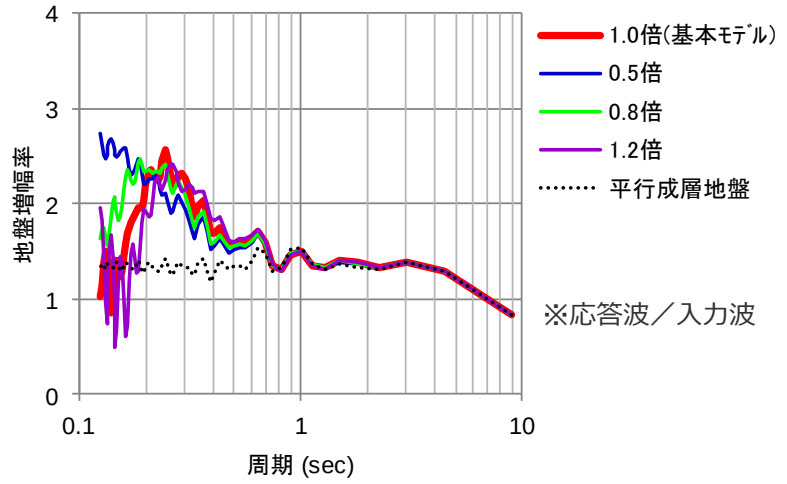
浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

（小低速度層に関するパラメータスタディ（サイズ））

解析モデル



解析結果（５号炉位置の地盤増幅率※）



○チューニングモデルの小低速度層（1.0倍）に対して、全体のサイズを0.5倍、0.8倍、1.2倍とした場合のパラメータスタディを実施。

○小低速度層のサイズが小さくなると、チューニングモデルに比べて、増幅が見られる周期帯は限定されない傾向がある。

・入力波：BELL型単独波（SH波）

・入射角：20°
・入射方向：60°
} 2009年駿河湾の地震の地震波の入射角、到来方向に基づく

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-08 浅部地下構造モデルの設定及び解析検討>

浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

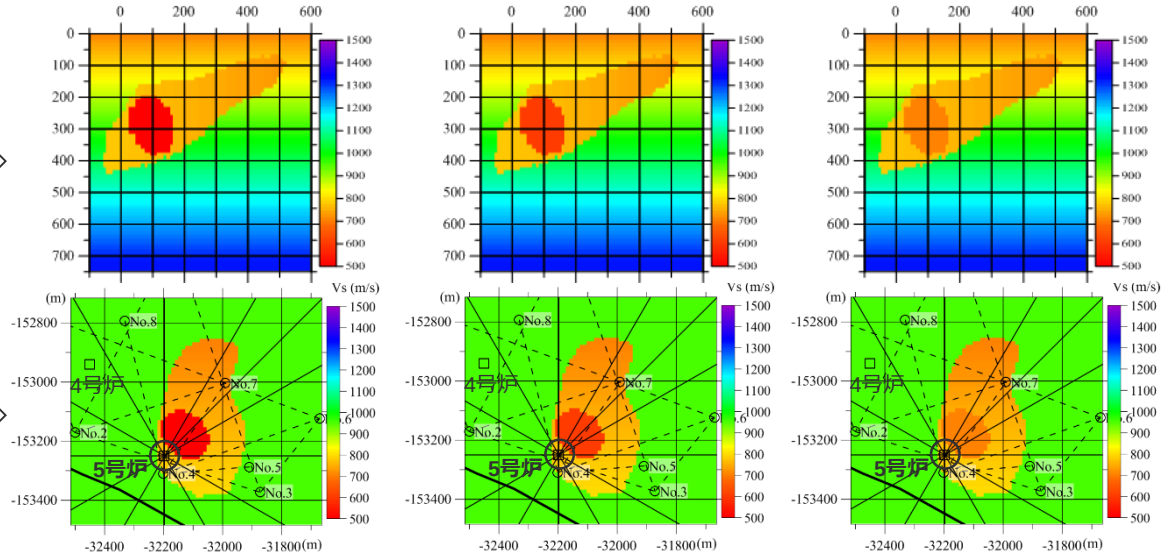
（小低速度層に関するパラメータスタディ（物性値））

解析モデル

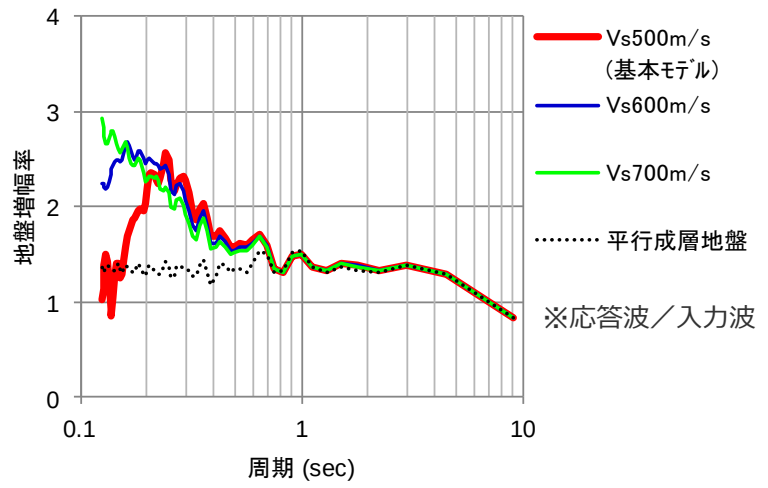
500m/s（チューニングモデル）　600m/s　700m/s

N60E方向
速度断面

深さ288m
速度断面



解析結果（５号炉位置の地盤増幅率※）



○チューニングモデルの小低速度層（Vs500m/s）に対して、S波速度を600m/s、700m/sとした場合のパラメータスタディを実施。

○小低速度層のS波速度が大きくなると（速度コントラストが小さくなると）、チューニングモデルに比べて、増幅が見られる周期帯は限定されない傾向がある。

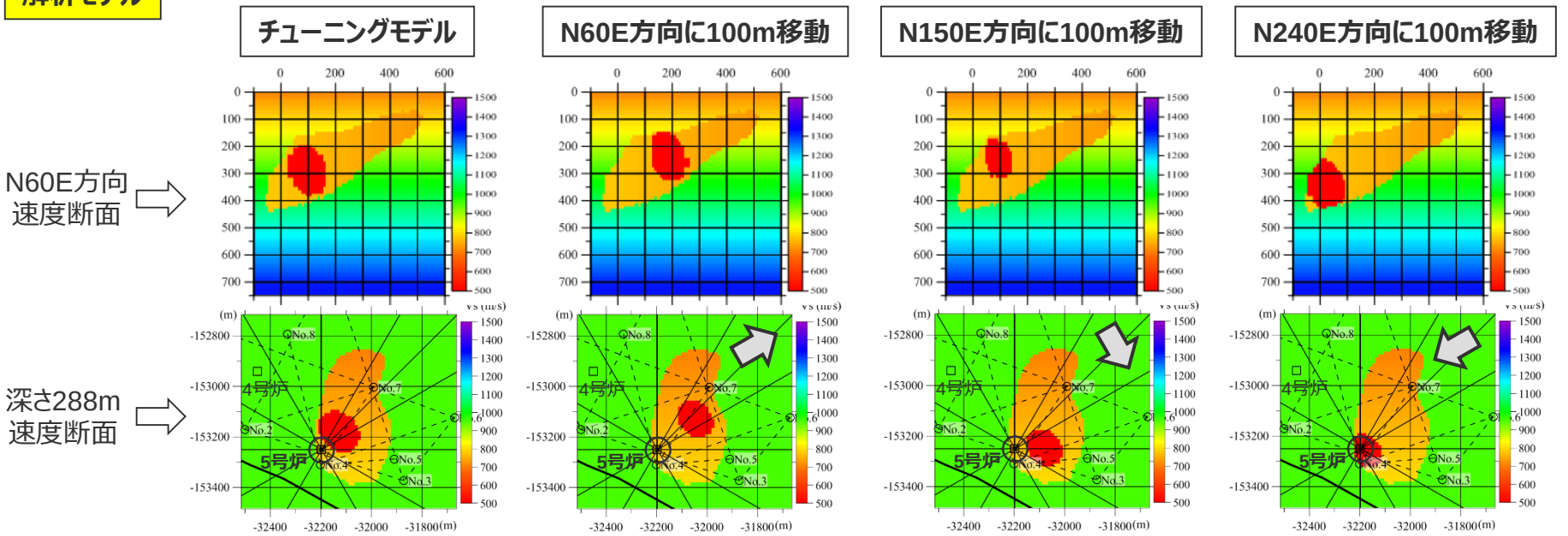
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

第992回
資料1-3 p.130再掲

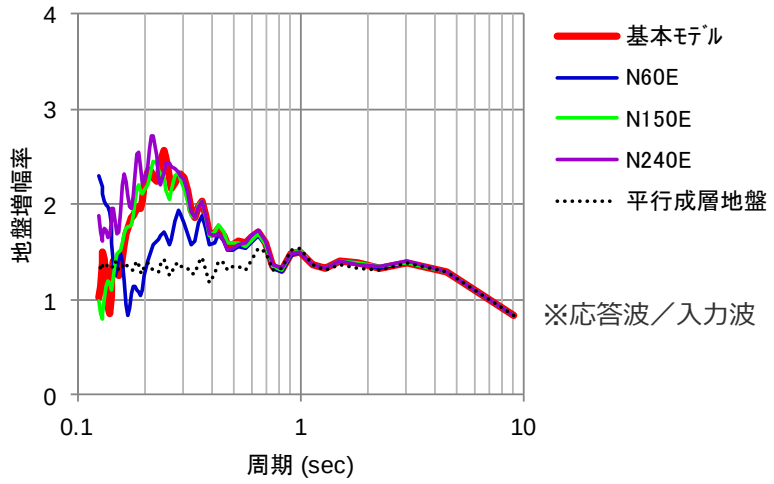
浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

（小低速度層に関するパラメータスタディ（位置））

解析モデル



解析結果（５号炉位置の地盤増幅率※）



○チューニングモデルの小低速度層に対して、N60E方向（2009年駿河湾の地震方向）、N150E方向（2009年駿河湾の地震方向と直交方向）、N240E方向（2009年駿河湾の地震方向と逆方向）へそれぞれ100m移動した場合のパラメータスタディを実施。

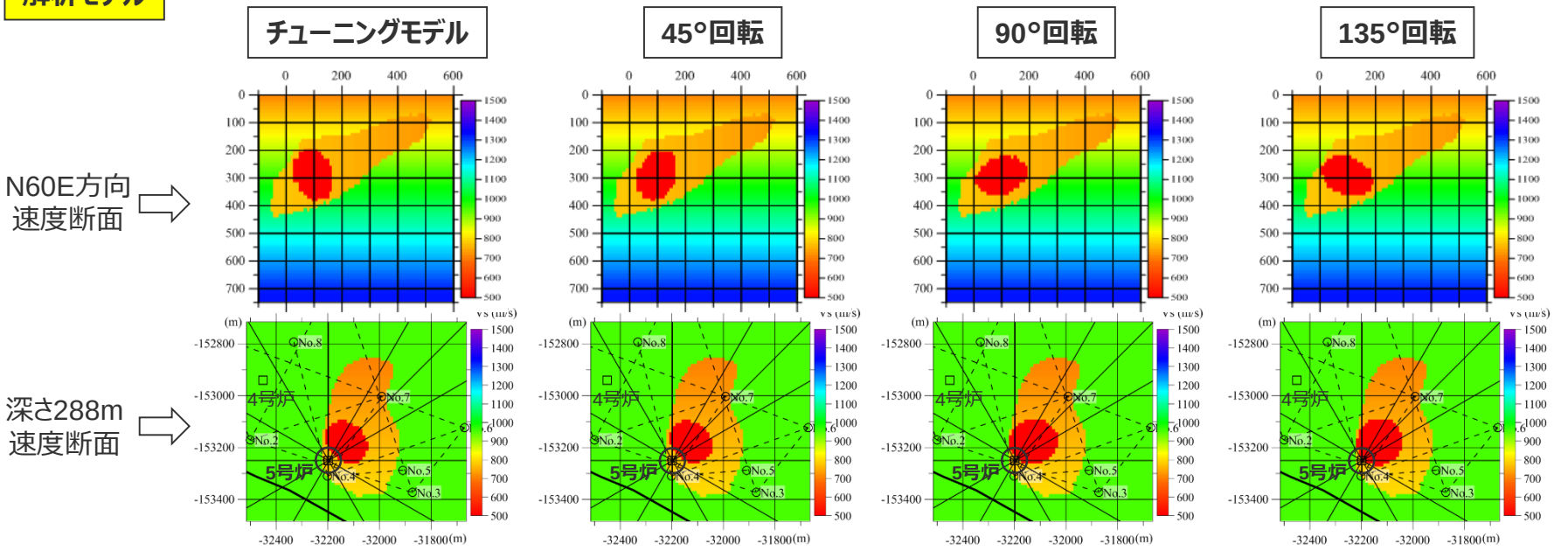
○N60E方向へ移動したモデルでは、チューニングモデルより増幅率は小さくなり、これと逆方向（N240E方向）に移動したモデルでは、チューニングモデルより増幅が見られる周期帯は限定されない傾向がある。また、N150E方向へ移動したモデルでは、チューニングモデルの増幅率と同等になっている。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

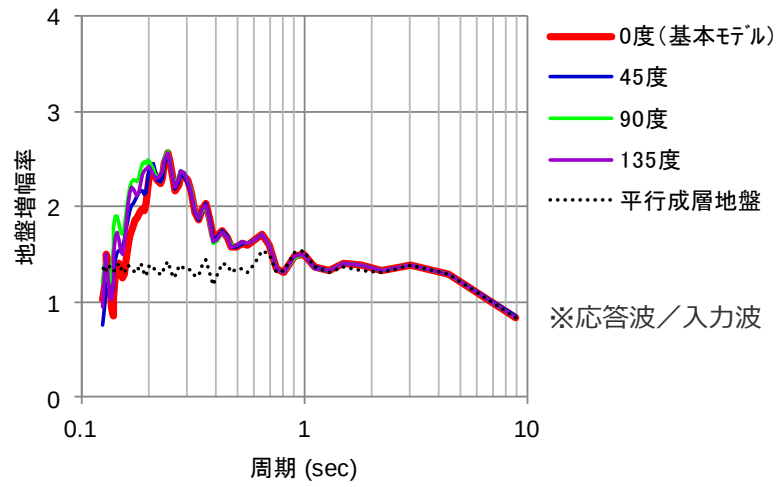
浅部地下構造モデルを用いた解析検討（三次元有限差分法）

（小低速度層に関するパラメータスタディ（形状））

解析モデル



解析結果（５号炉位置の地盤増幅率※）



○チューニングモデルの小低速度層に対して、2009年駿河湾の地震方向にそれぞれ45°、90°、135°回転させた場合のパラメータスタディを実施。
○いずれの解析結果もチューニングモデルと大きく変わらないが、増幅が見られる周期帯は若干短周期側に広がっている。

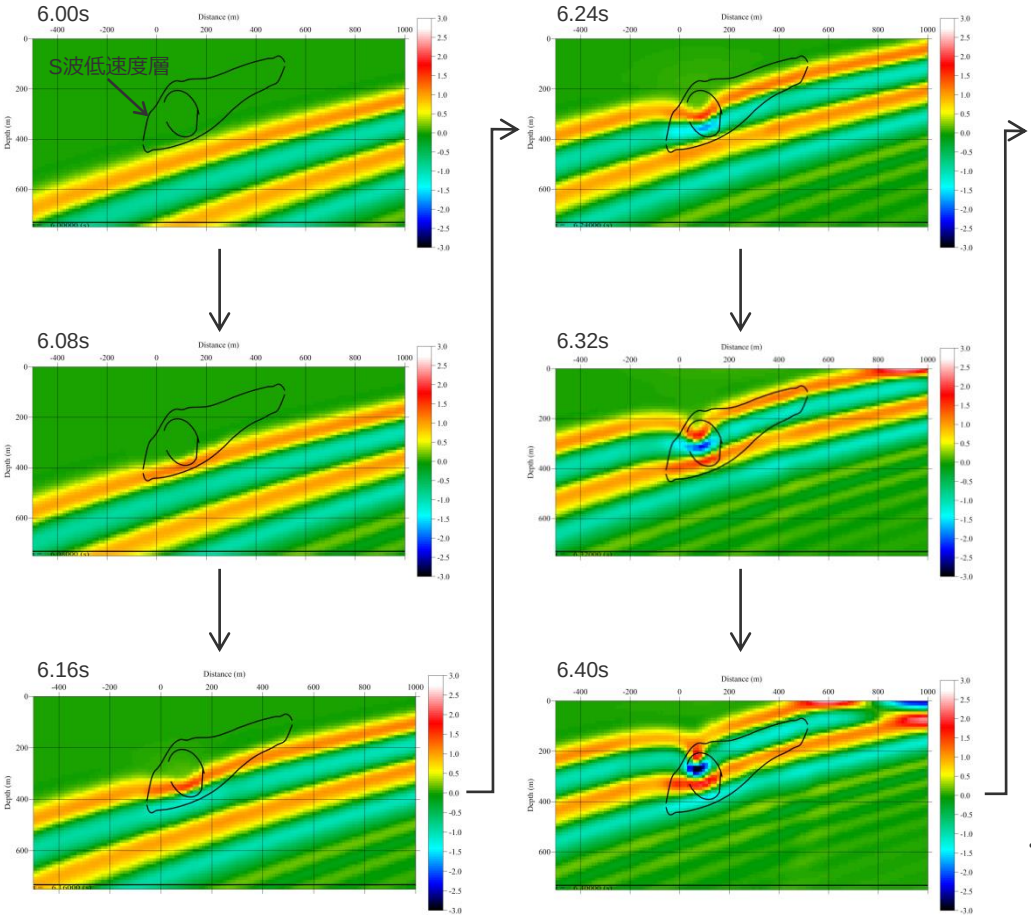
○以上のパラメータスタディによると、小低速度層の「サイズ」、「物性値（S波速度）」、「位置」、「形状」によって地盤増幅率は変化するが、チューニングモデルの解析結果は地震観測記録の特徴と整合しており、このパラメータスタディを踏まえても、チューニングモデルの妥当性に支障はない。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

5号炉周辺の地震波の増幅メカニズム

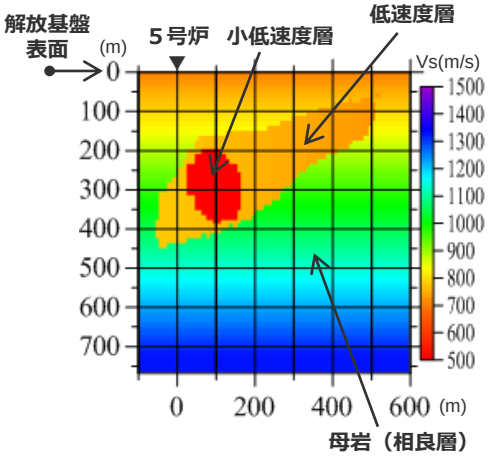
（浅部三次元地下構造モデルを用いた三次元有限差分法による解析結果（スナップショット）の分析）

○三次元有限差分法による解析結果の時間断面毎のスナップショットによると、下方から伝播する平行な波面が低速度層・小低速度層を通過すると、下に凹形状に屈曲していき、それとともに一部の振幅が大きくなっている。



・横軸Distance(m)の＋側がN60E方向
　－側がN240E方向

<三次元有限差分法による解析結果の時間断面毎のスナップショット（N60E方向断面、0.08秒刻み）>
（入力波：BELL型連続波、入射方向：N60E方向、入射角：20°）

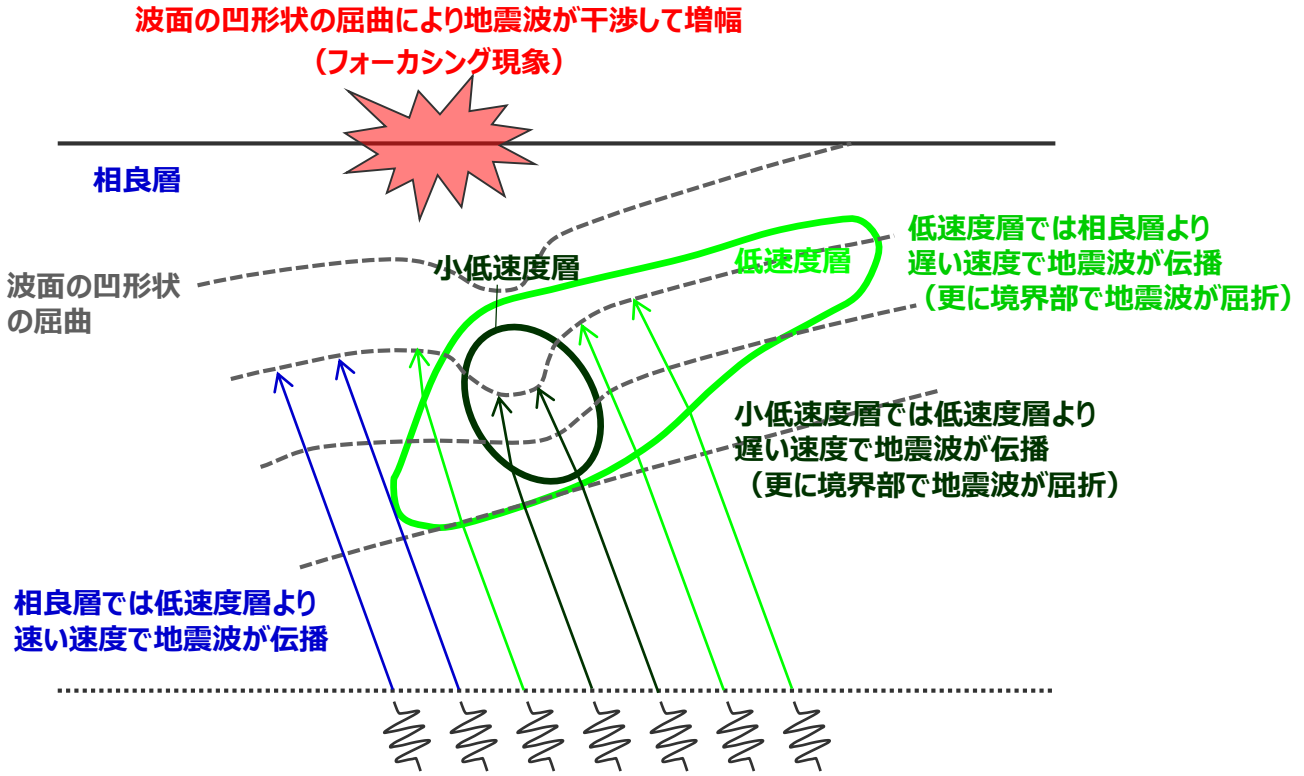


<浅部三次元地下構造モデル>
（2009年駿河湾の地震方向の断面）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

5号炉周辺の地震波の増幅メカニズムの考察

○下方から伝播する地震波は、低速度層、小低速度層それぞれの境界部で屈折するとともに、それぞれの層内の伝播速度が異なることにより、その波面が凹形状に屈曲する。この波面の凹形状の屈曲により地震波が干渉して増幅するフォーカシング現象が5号炉周辺の地震動の増幅メカニズムと分析した。



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

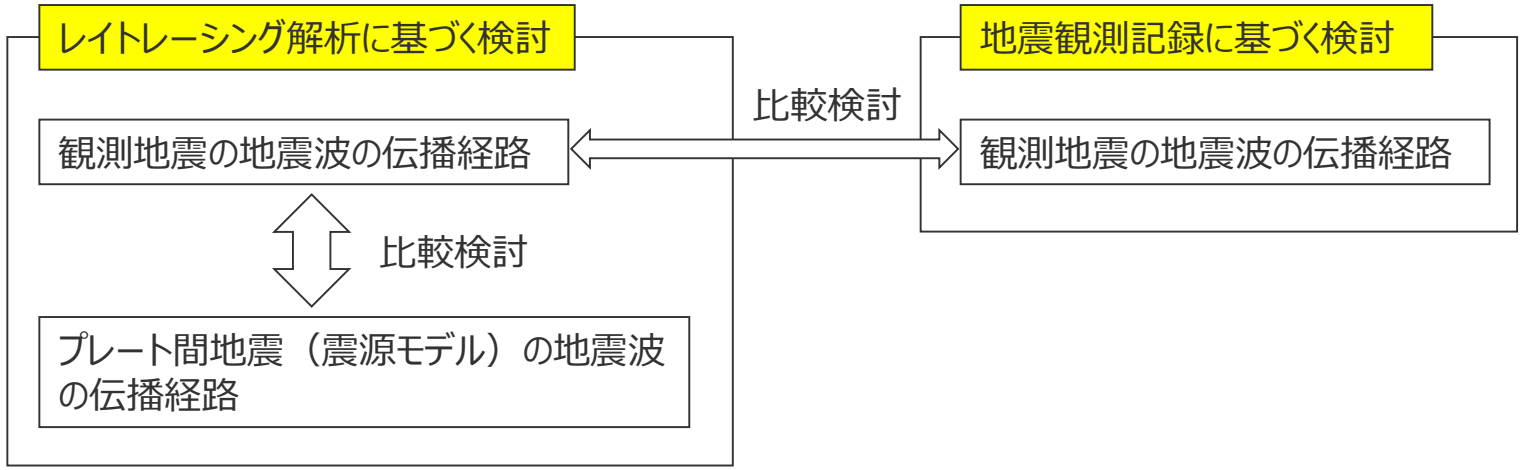
補足説明資料①-09
地震波の伝播経路に関する検討

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（検討概要）

○４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路について、観測地震の地震波及び敷地への影響が大きいプレート間地震（震源モデル）の地震波を対象として、レイトレーシング解析及び観測記録に基づき検討する。



○４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路の特徴（低速度層との関係を含む）、観測地震の地震波とプレート間地震（震源モデル）の地震波の伝播経路の関係等について把握する。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

第992回
資料1-3 p.136再掲

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（４号炉に到達する波線の分析（概要））

○多数の観測記録が得られている多点連続地震観測における観測地震及び内閣府(2012)によるプレート境界面（震源モデルの断層面に相当）の震源を対象としてレイトレーシング解析を行い、４号炉に到達する主要な地震波の伝播経路（波線）について検討する。

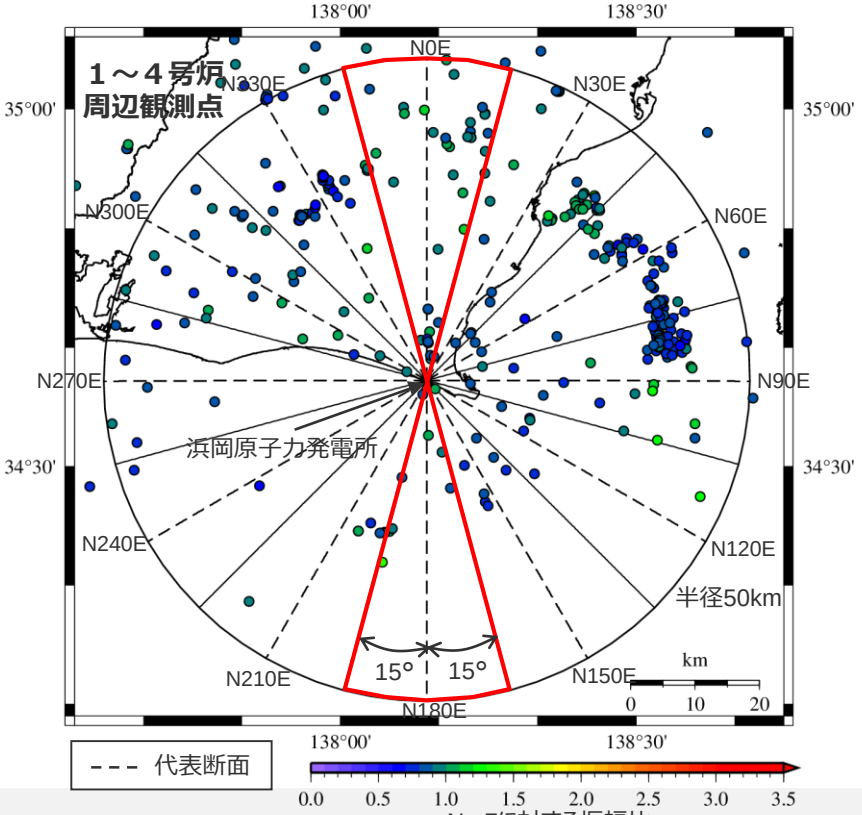
・レイトレーシング解析に用いる地下構造モデルについて、前述の深部三次元地下構造モデルに基づき、敷地から半径50kmを含む範囲まで拡張。

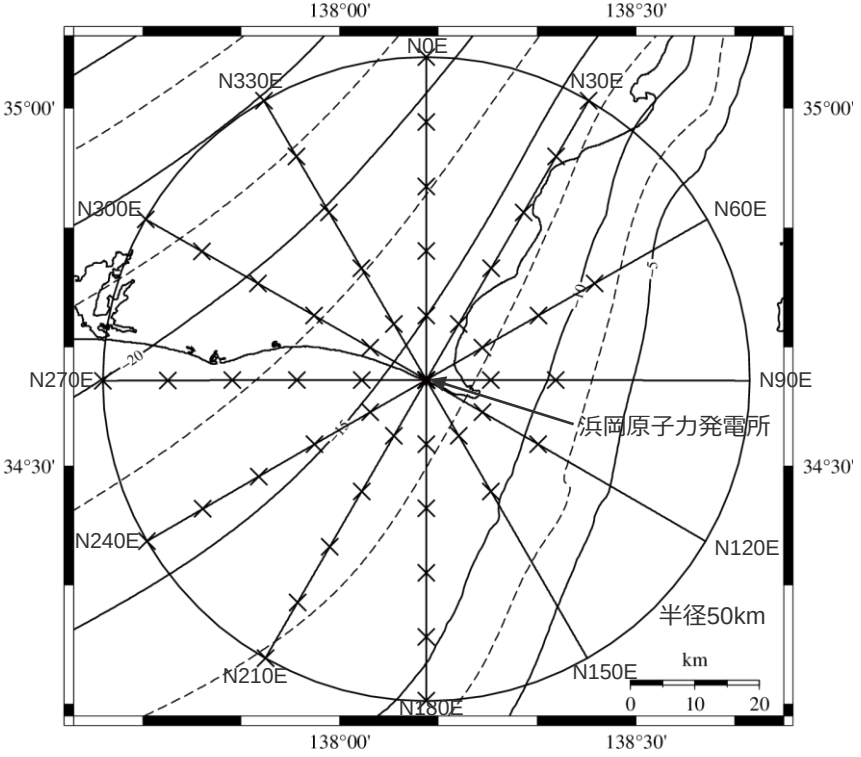
①観測地震（多点連続地震観測）の
レイトレーシング解析

・代表断面毎にレイトレーシング解析を実施
：代表断面は地震波到来方向30°毎
：代表断面±15度の範囲内にある観測地震を対象

②プレート境界面（内閣府(2012)）の震源の
レイトレーシング解析

・下図の×印毎にレイトレーシング解析を実施
：地震波到来方向30°毎
：敷地からの水平距離10km毎
（深さ約10km以浅は除く）



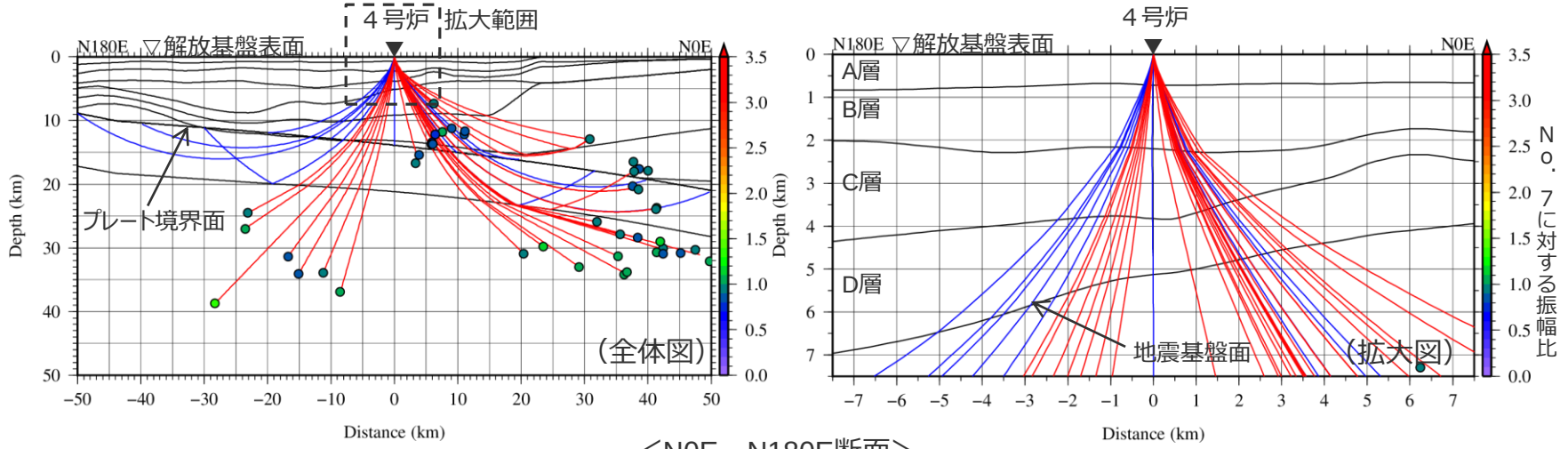


Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

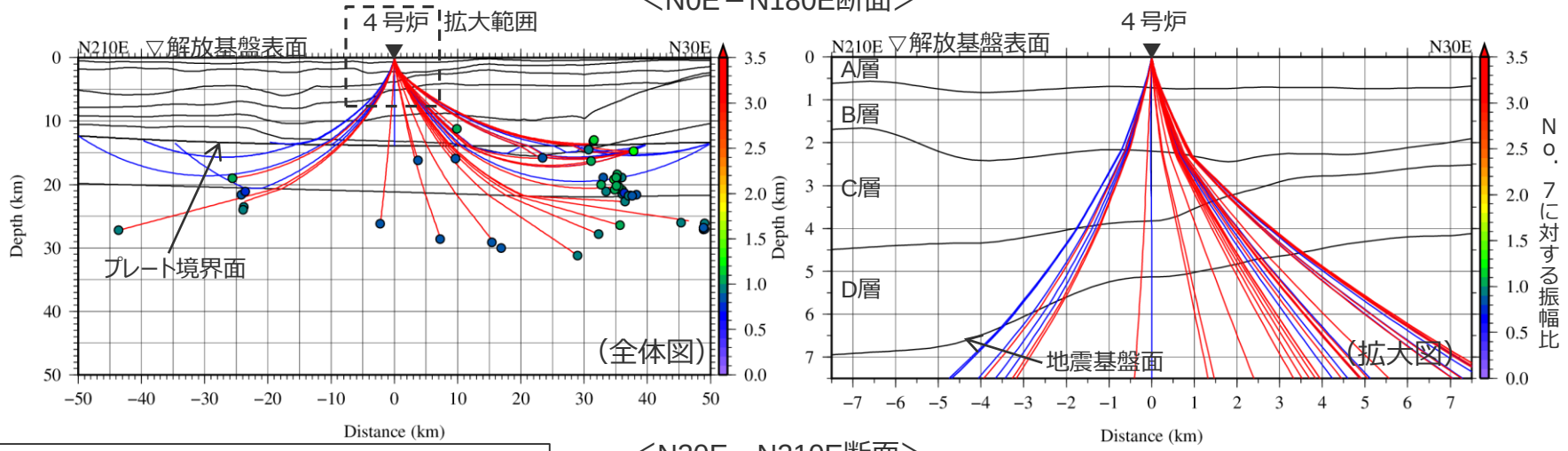
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（４号炉に到達する波線） １／３）

○ ４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線について、上方へ伝播するにつれて鉛直下方に近づいており、地震基盤面以浅では概ね同様の伝播経路となっている。



<N0E－N180E断面>



<N30E－N210E断面>

４号炉に到達する観測地震の波線
４号炉に到達するプレート境界面の震源の波線

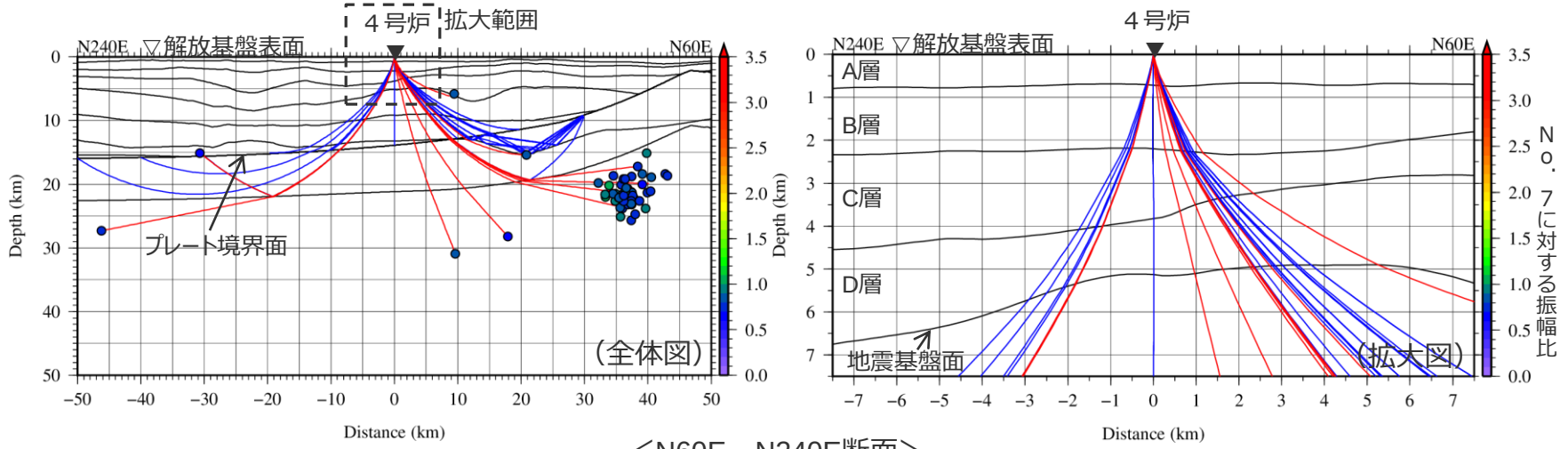
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

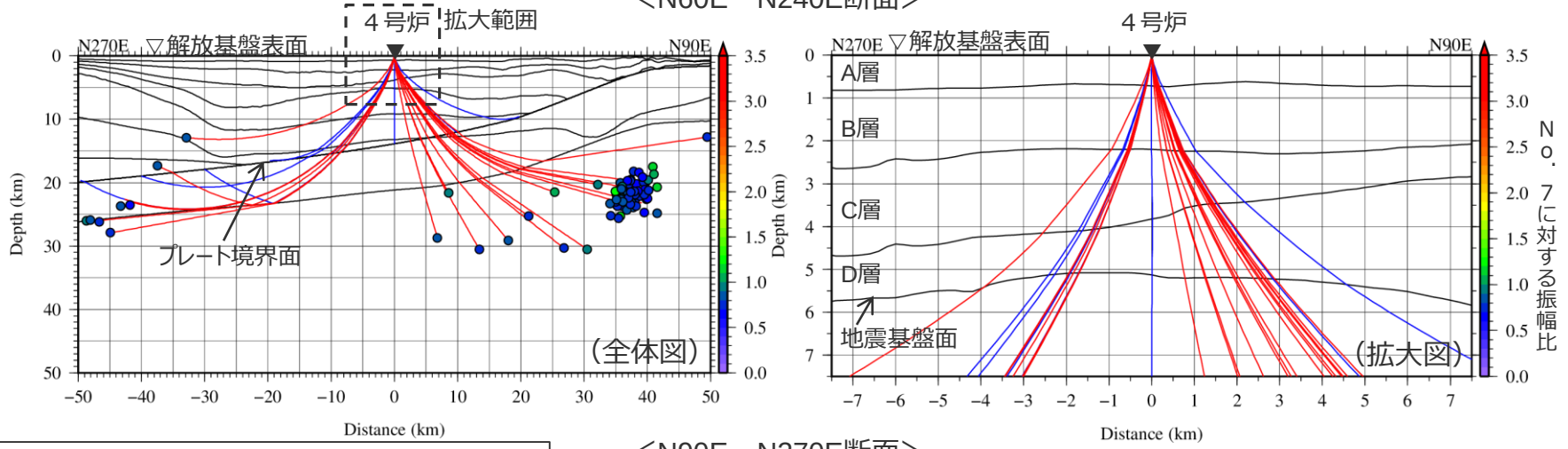
第992回
資料1-3 p.138再掲

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（４号炉に到達する波線）２／３）

○４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線について、上方へ伝播するにつれて鉛直下方に近づいており、地震基盤面以浅では概ね同様の伝播経路となっている。



<N60E－N240E断面>



<N90E－N270E断面>

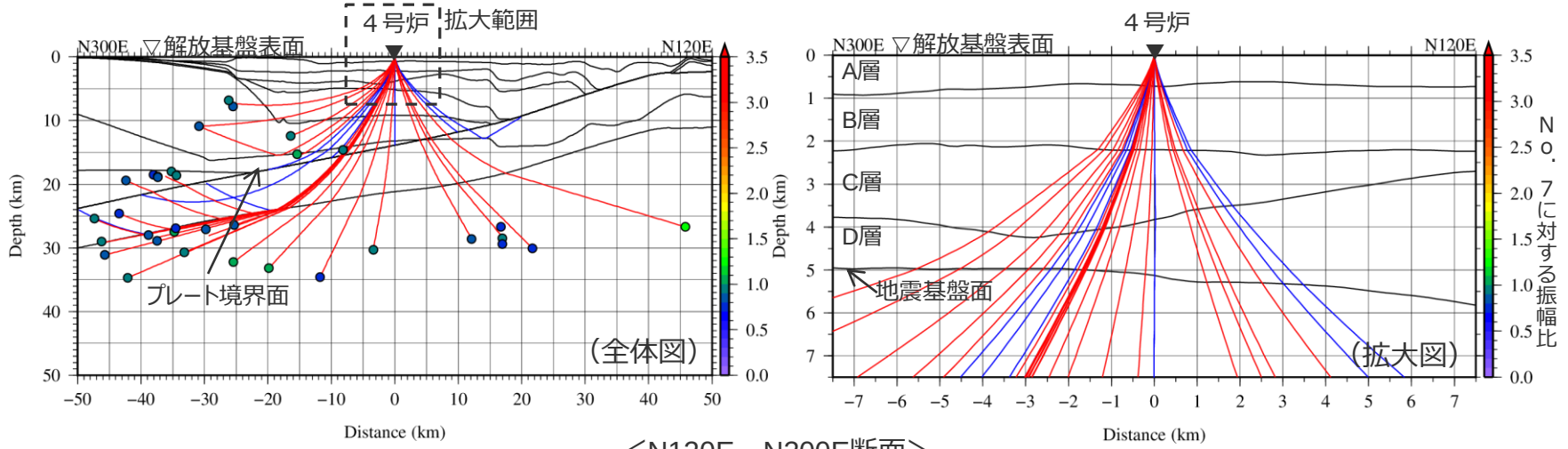
４号炉に到達する観測地震の波線
４号炉に到達するプレート境界面の震源の波線

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

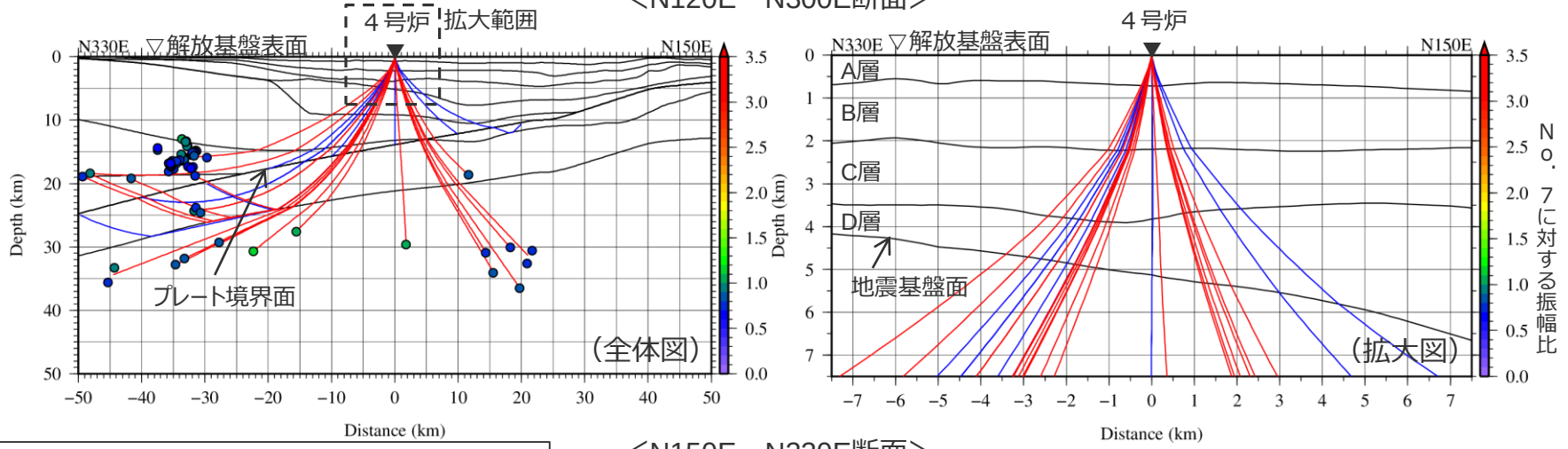
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（４号炉に到達する波線）３／３）

○４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線について、上方へ伝播するにつれて鉛直下方に近づいており、地震基盤面以浅では概ね同様の伝播経路となっている。



<N120E－N300E断面>



<N150E－N330E断面>

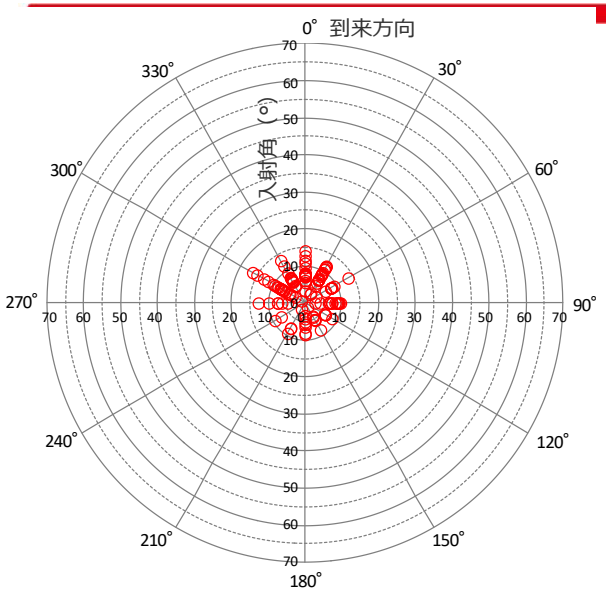
４号炉に到達する観測地震の波線
４号炉に到達するプレート境界面の震源の波線

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

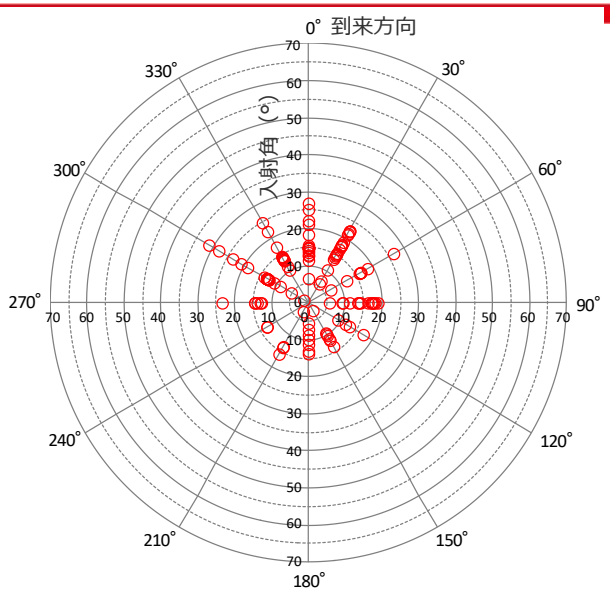
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

第992回
資料1-3 p.140再掲

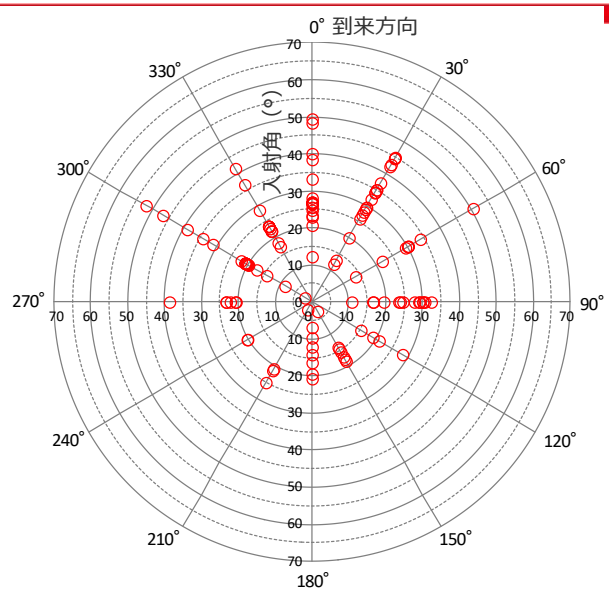
４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（観測地震の入射角））



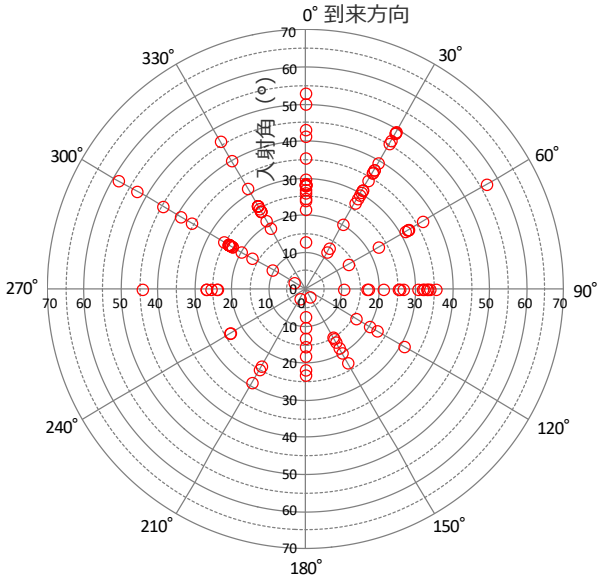
解放基盤表面



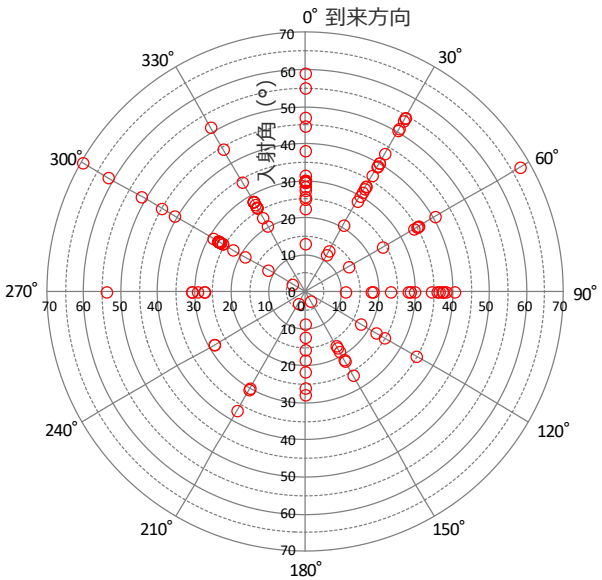
A層下面※



B層下面



C層下面



地震基盤面

○：観測地震の入射角

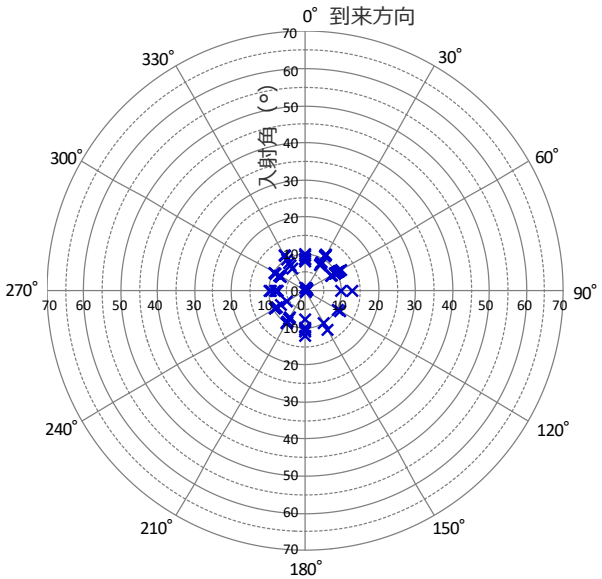
○ **<u>４号炉に到達する観測地震の波線</u>**について、地震基盤面では入射角が大きい震源も見られるが、**<u>上方に伝播するにつれて鉛直下方に近づき</u>**、浅部三次元地下構造モデルのモデル底面に相当する**<u>A層下面では20°程度</u>**、**<u>解放基盤表面では10°程度</u>**となっている。

※浅部三次元地下構造モデルの底面に相当

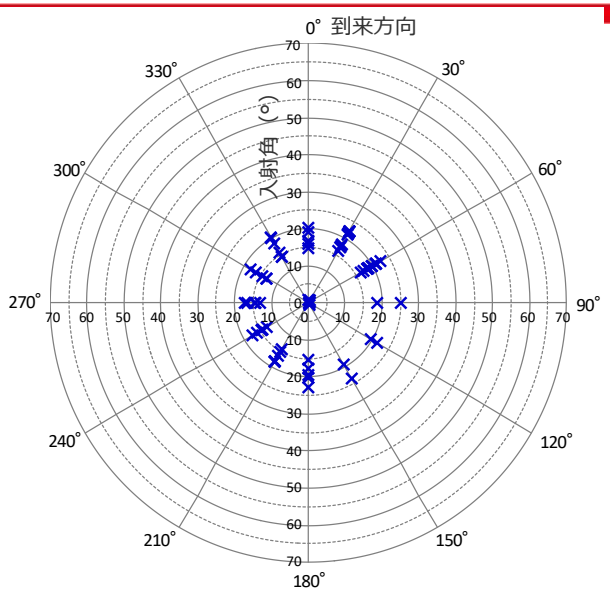
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

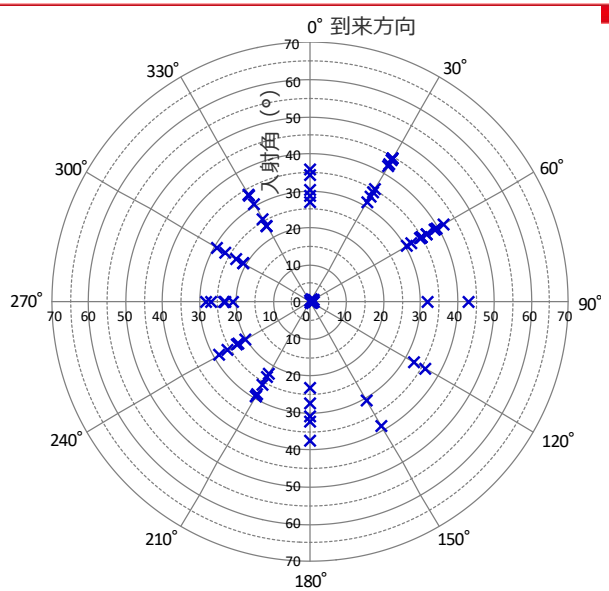
４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（プレート境界面の震源の入射角））



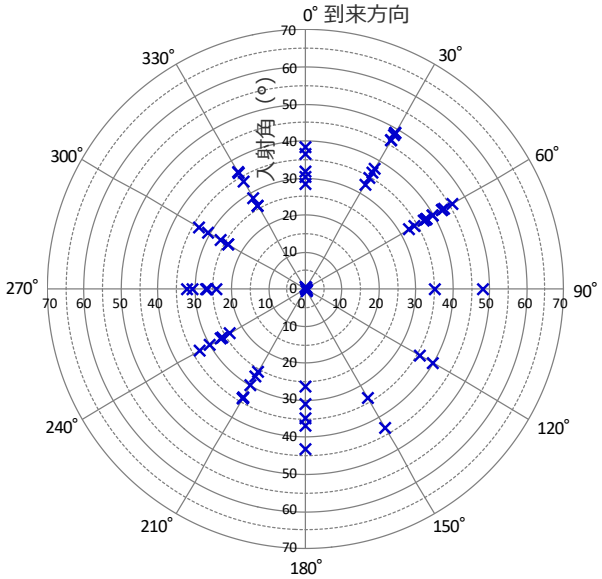
解放基盤表面



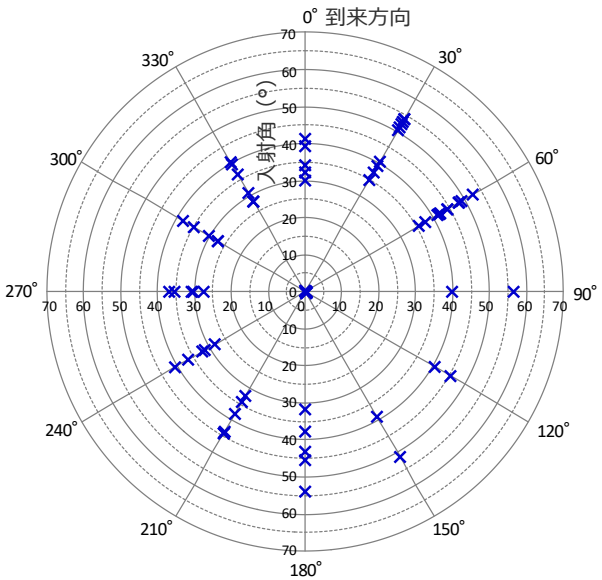
A層下面※



B層下面



C層下面



地震基盤面

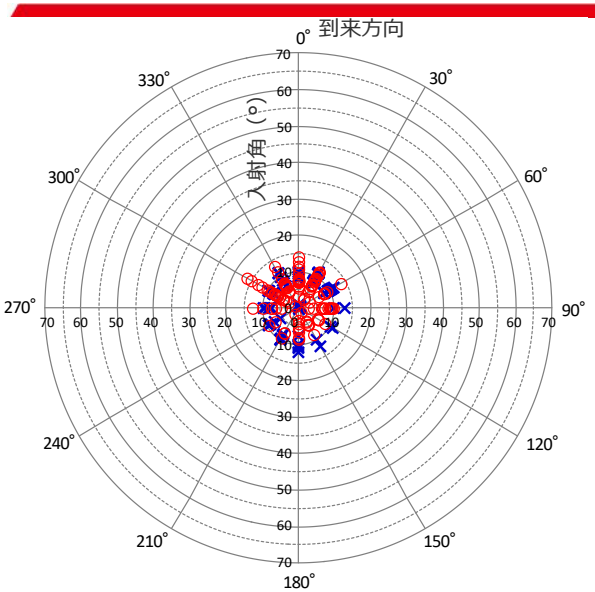
×：プレート境界面の震源の入射角

○ **<u>４号炉に到達するプレート境界面の震源の波線</u>**について、観測地震同様、地震基盤面では入射角が大きい震源も見られるが、**<u>上方に伝播するにつれて鉛直下方に近づき</u>**、浅部三次元地下構造モデルのモデル底面に相当する**<u>A層下面では20°程度</u>**、**<u>解放基盤表面では10°程度</u>**となっている。

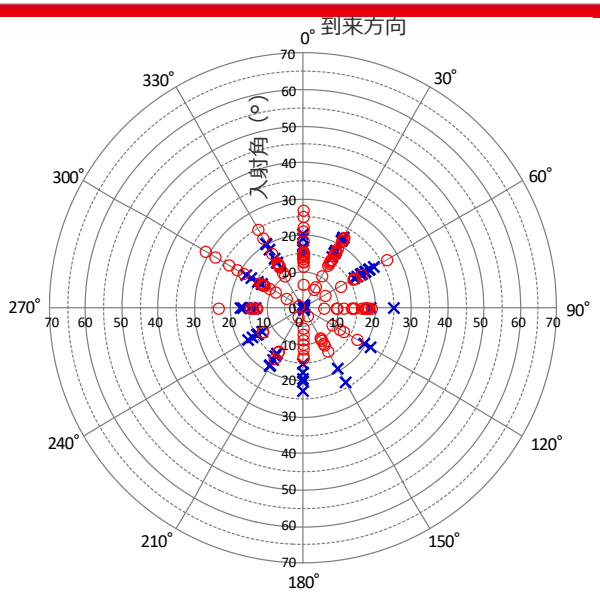
※浅部三次元地下構造モデルの底面に相当

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

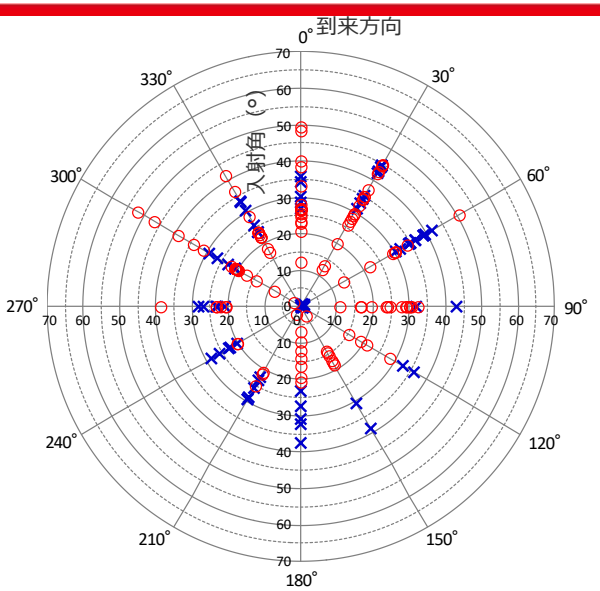
４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（観測地震及びプレート境界面の震源の入射角の比較））



解放基盤表面

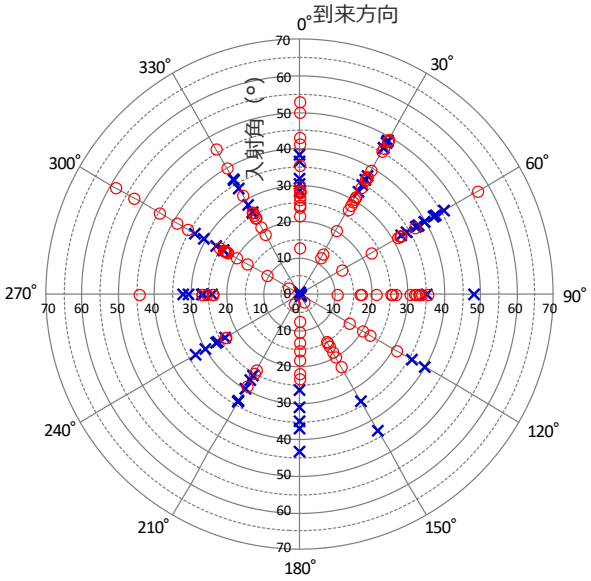


A層下面※

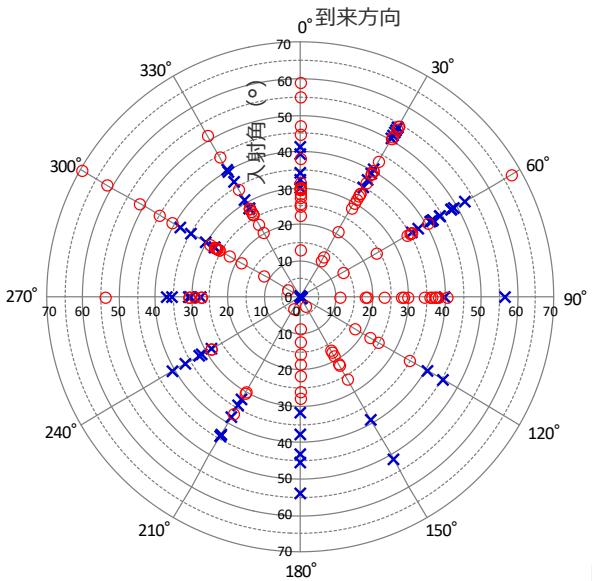


B層下面

○：観測地震の入射角
×：プレート境界面の震源の入射角



C層下面



地震基盤面

○ ４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線について、**いずれも上方に伝播するにつれて鉛直下方に近づき、同様の入射角**となっている。

⇒**これまでに得られている観測地震の分析結果に基づき、敷地への影響が大きいプレート間地震（震源モデル）の地盤増幅特性についても考慮することができる**と評価。

※浅部三次元地下構造モデルの底面に相当。

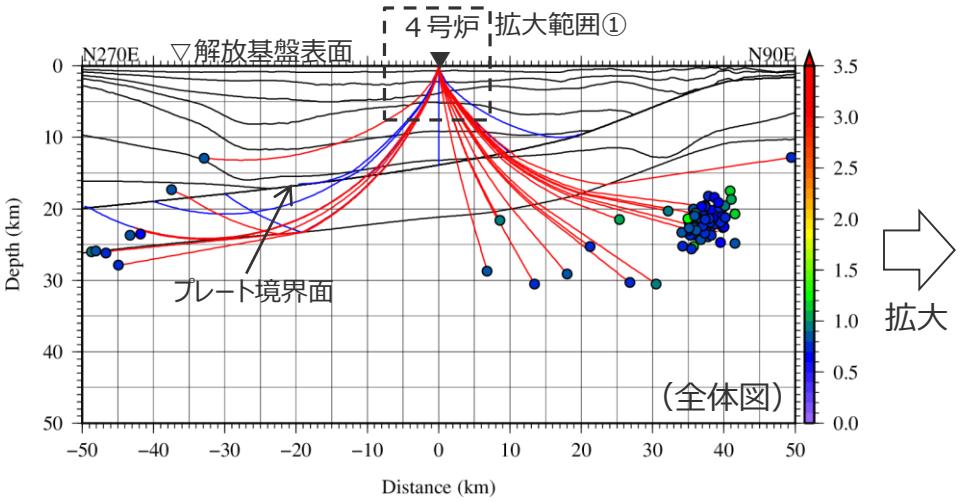
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

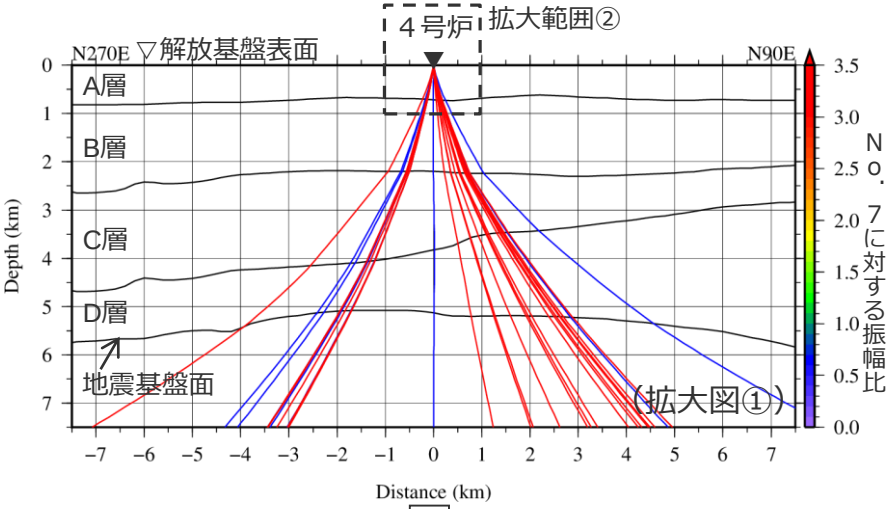
第992回
資料1-3 p.143再掲

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（４号炉に到達する波線とS波低速度層との関係）１／２）

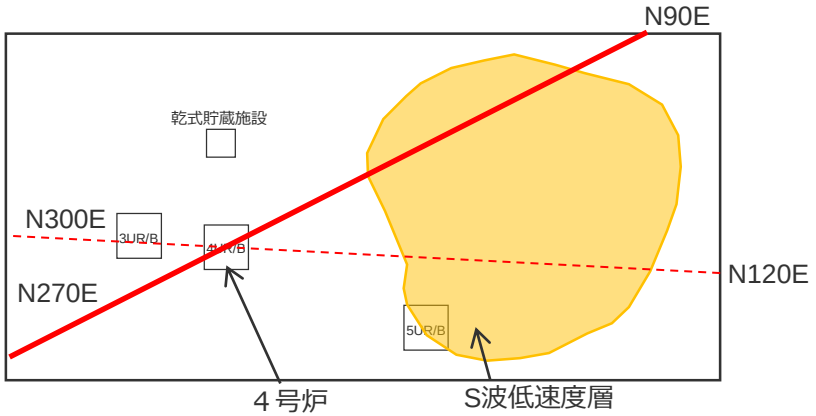
○**４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線**について、前述のとおり、上方へ伝播するにつれて鉛直下方に近づいており、**S波低速度層を伝播しない**。

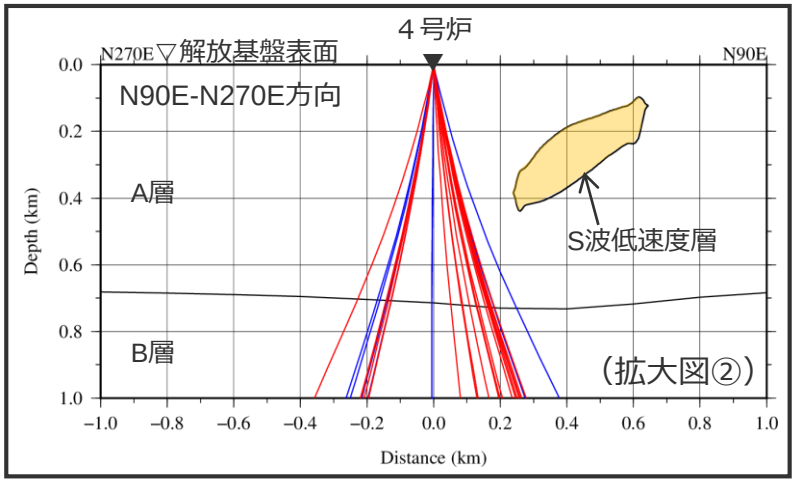


拡大



拡大





４号炉に到達する観測地震の波線
４号炉に到達するプレート境界面の震源の波線

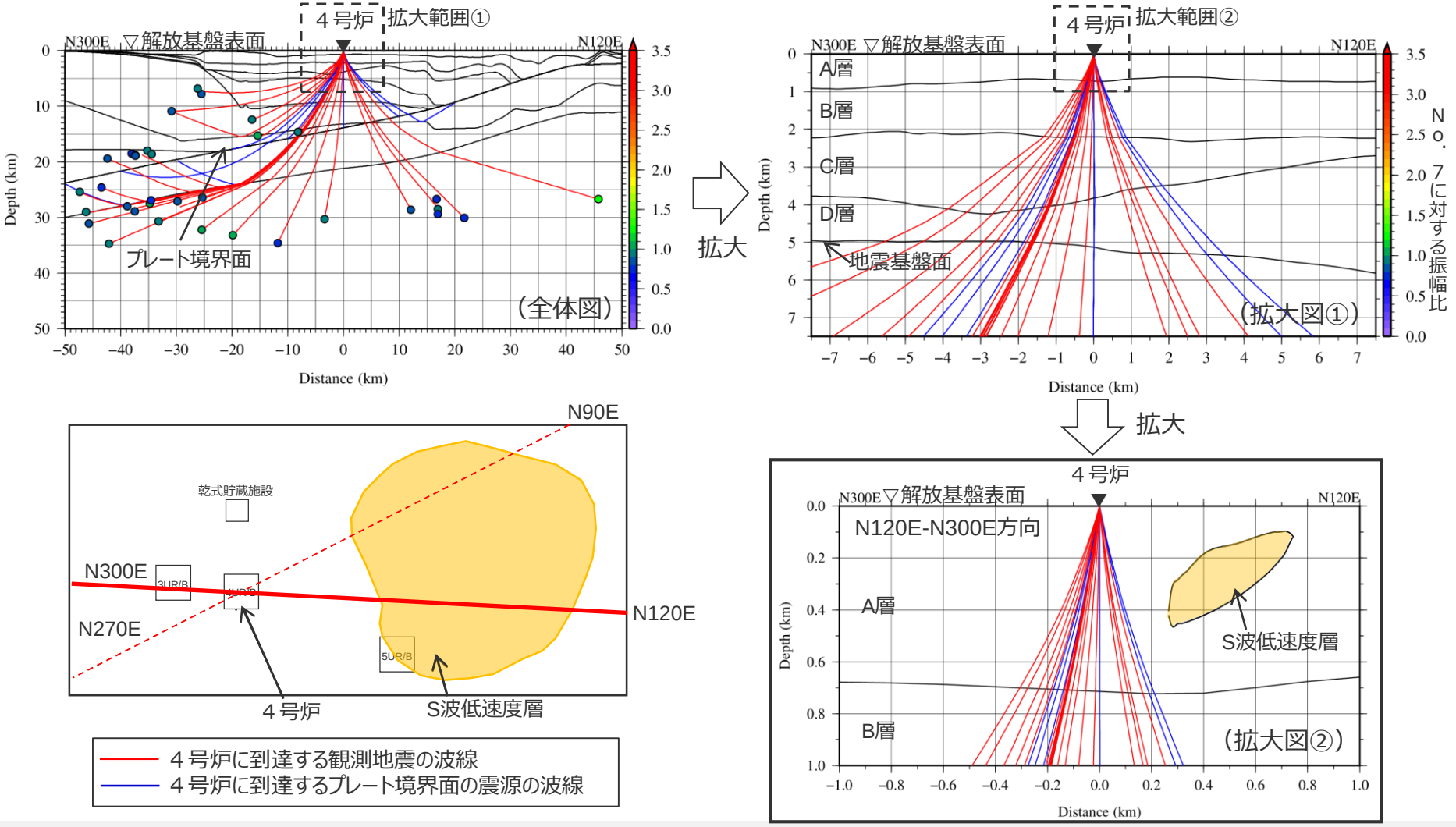
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

第992回
資料1-3 p.144再掲

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（レイトレーシング解析に基づく検討（４号炉に到達する波線とS波低速度層との関係）２／２）

○**４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線**について、前述のとおり、上方へ伝播するにつれて鉛直下方に近づいており、**S波低速度層を伝播しない**。



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

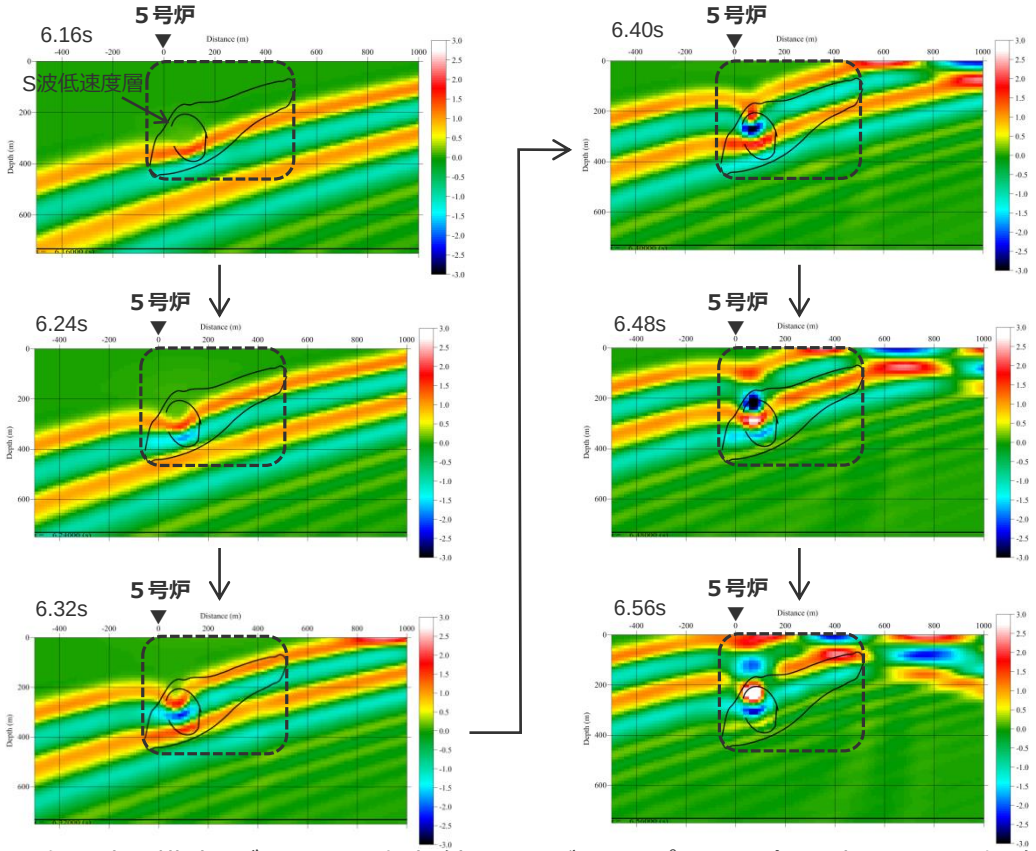
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

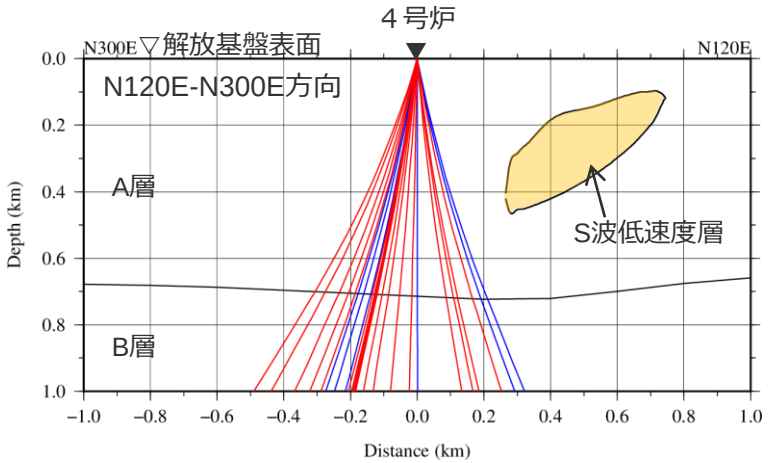
第992回
資料1-3 p.145再掲

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（スナップショット（浅部三次元地下構造モデルの解析結果）に基づく検討）

○ S波低速度層による５号炉周辺の地震波の増幅メカニズムについて、低速度層、小低速度層、相良層（母岩）の伝播速度が異なることにより、地震波の波面が凹形状に屈曲し、これにより地震波が干渉して増幅するフォーカシング現象と分析される。
○ 地震波の増幅メカニズムがこの波面の凹形状の屈曲に起因するため、**S波低速度層が影響を及ぼす範囲は、５号炉周辺等のS波低速度層の上部付近に限られる**。

⇒ ５号炉周辺の下方にはS波低速度層が確認されており、一部の方向で**５号炉周辺はS波低速度層による影響を受ける**が、５号炉から離れた４号炉周辺の下方にはS波低速度層が確認されていないことから、**４号炉周辺はS波低速度層による影響を受けない**と評価した。





<レイトレーシング解析結果（拡大図）>

４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線は、上方へ伝播するにつれて鉛直下方に近づいており、S波低速度層を伝播しない。

・横軸Distance(m)の＋側がN60E方向
　－側がN240E方向

<浅部三次元地下構造モデルを用いた解析結果に基づくスナップショット（５号炉から2009年駿河湾の地震方向の断面、0.08秒刻み）>
（入力波：BELL型連続波、入射方向： 2009年駿河湾の地震方向、入射角：20°）

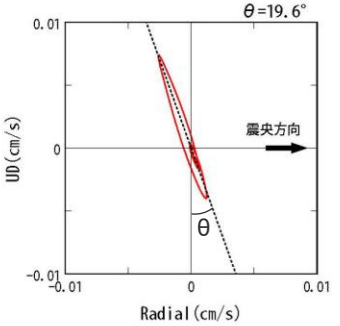
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

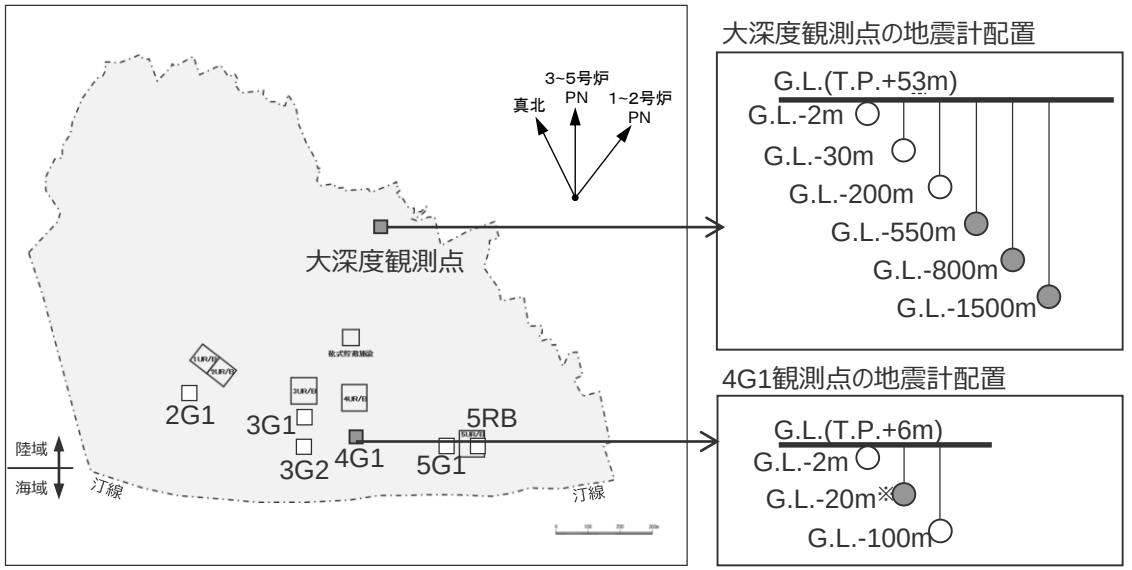
第992回
資料1-3 p.146一部修正

4号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（地震観測記録に基づく検討（概要））

○地震観測記録のP波初動部から算出したRadial-UD方向のオービットに基づき、観測地震の入射角を検討する。
○検討に用いる観測点について、深部には大深度観測点（G.L.-550m，-800m，-1500m）を、浅部には4G1観測点（解放基盤表面）を用いる。

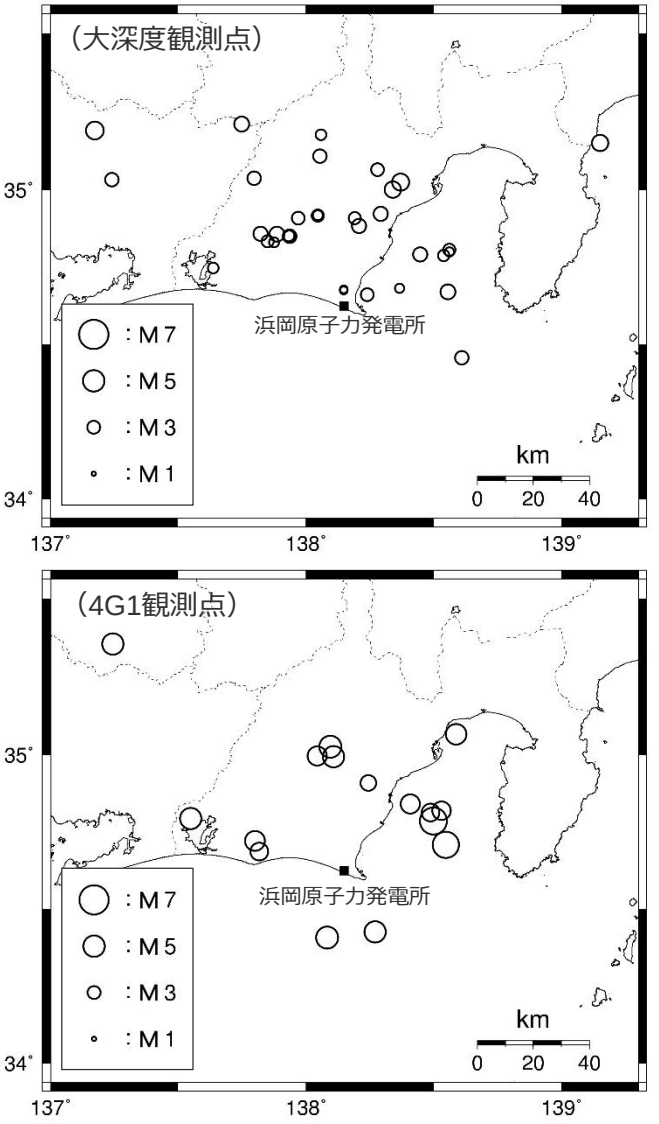


入射角の検討例
（G.L.-1500m）



●：検討に用いる地震計
※解放基盤表面付近

<地震計の配置図>

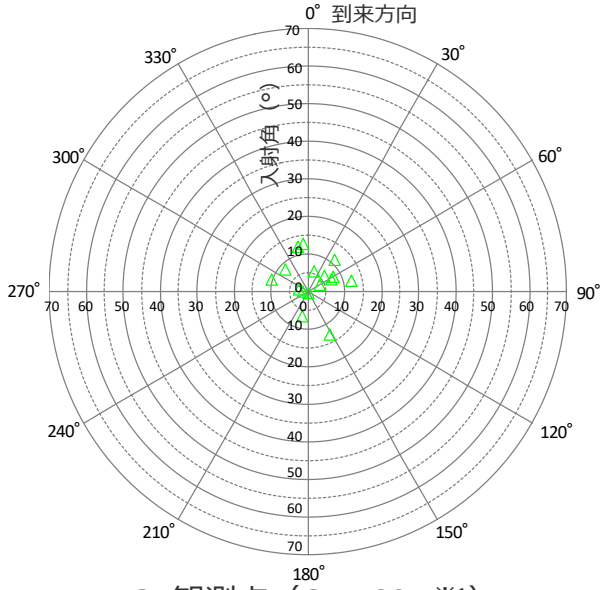


<検討に用いる観測地震の震央分布>

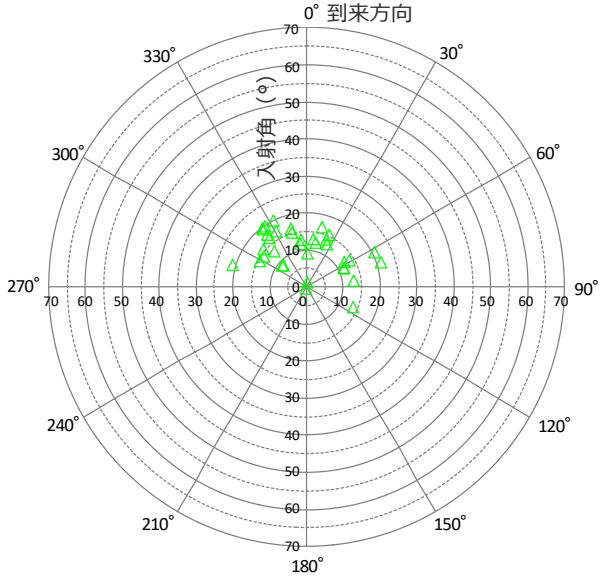
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

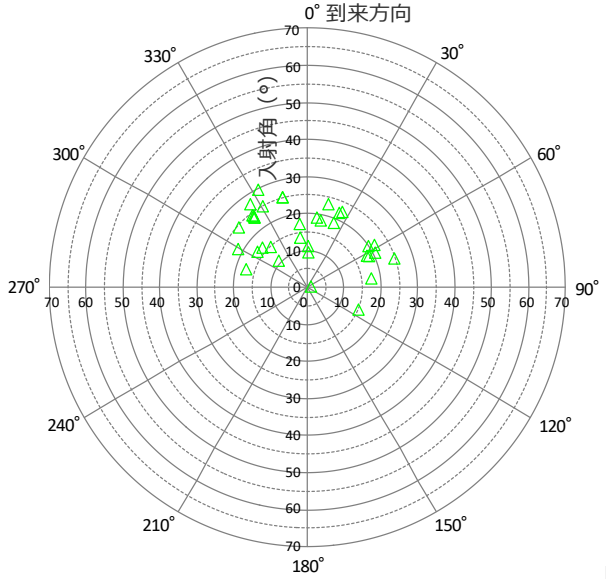
４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（地震観測記録に基づく検討（観測地震の入射角））



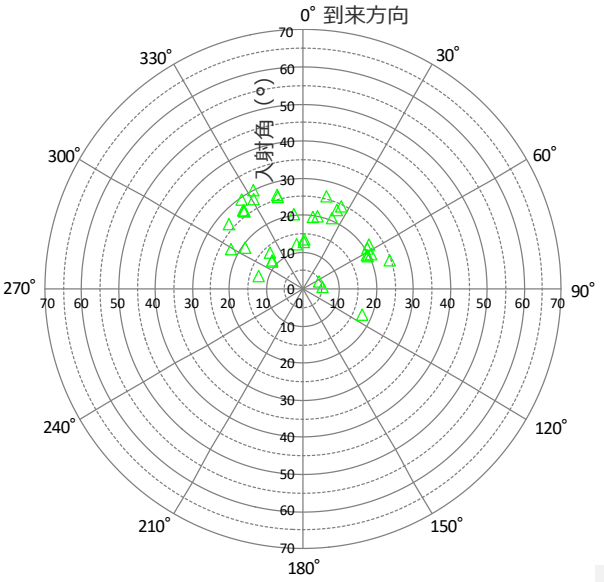
4G1観測点（G.L.-20m※1）



大深度観測点（G.L-550m）



大深度観測点（G.L-800m※2）



大深度観測点（G.L-1500m）

○地震観測記録に基づく観測地震の入射角についても、上方に伝播するにつれて鉛直下方に近づき、浅部三次元地下構造モデルのモデル底面に相当するG.L.-800mでは20°程度、解放基盤表面では10°程度となっている。

△：観測地震の入射角（観測記録に基づく）

※1 解放基盤表面付近

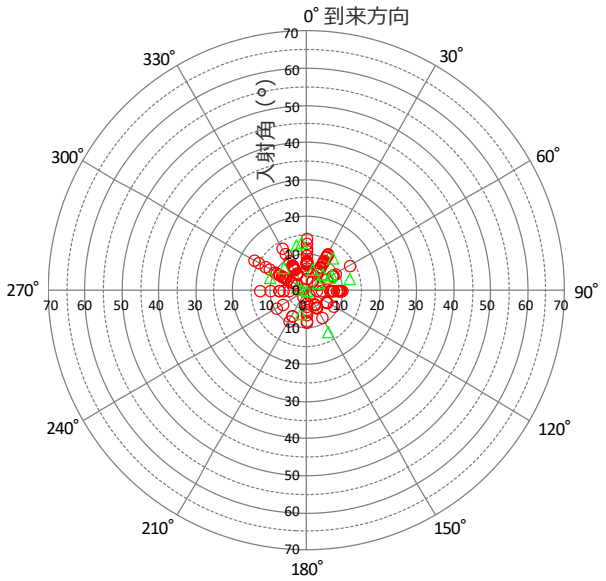
※2 浅部三次元地下構造モデルの底面に相当

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

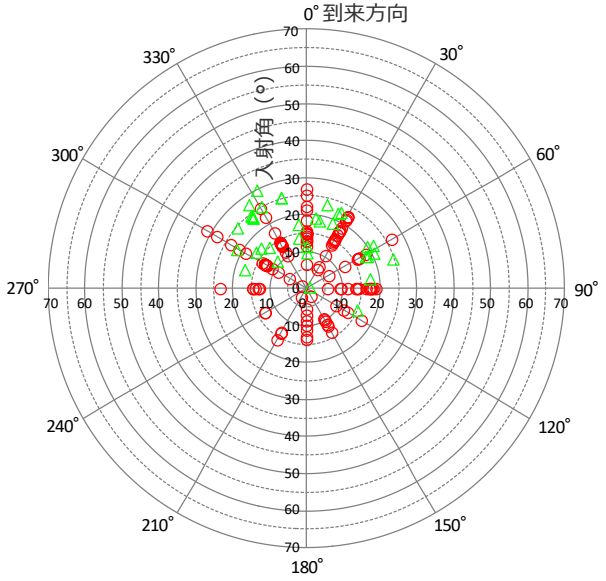
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

４号炉周辺に到達する地震波の伝播経路
（地震観測記録に基づく検討（観測地震の入射角の比較））

○観測地震について、その震源は異なるものの、観測記録に基づく場合とレイトレーシング解析に基づく場合（前述参照）の入射角の比較検討を行った。
○比較検討が可能な解放基盤表面及び浅部三次元地下構造モデルのモデル底面において、両者は概ね整合しており、それぞれの入射角の妥当性を表している。



<解放基盤表面>
・観測記録：G.L-20m
・レイトレーシング解析：解放基盤表面



<浅部三次元地下構造モデルのモデル底面>
・観測記録：G.L-800m
・レイトレーシング解析：A層下面

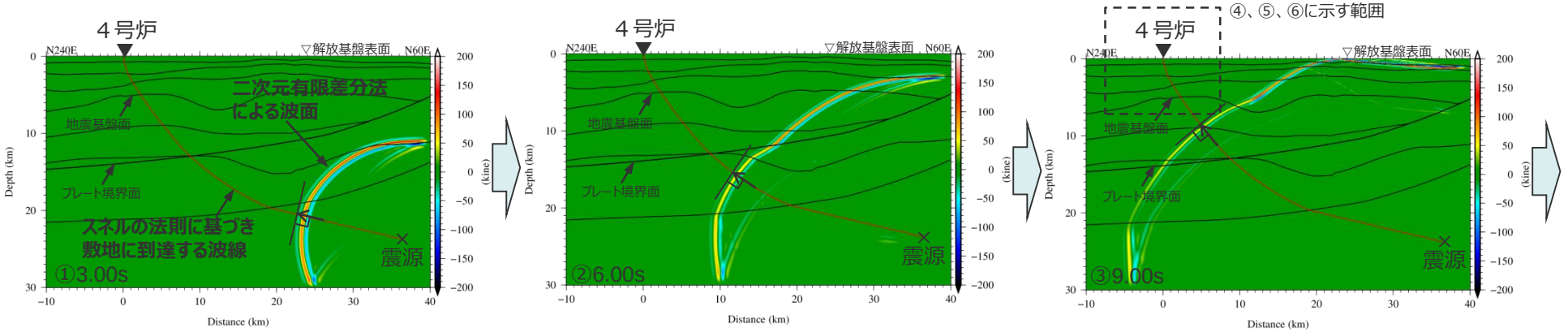
△：観測地震の入射角（観測記録に基づく）
○：観測地震の入射角（レイトレーシング解析に基づく）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

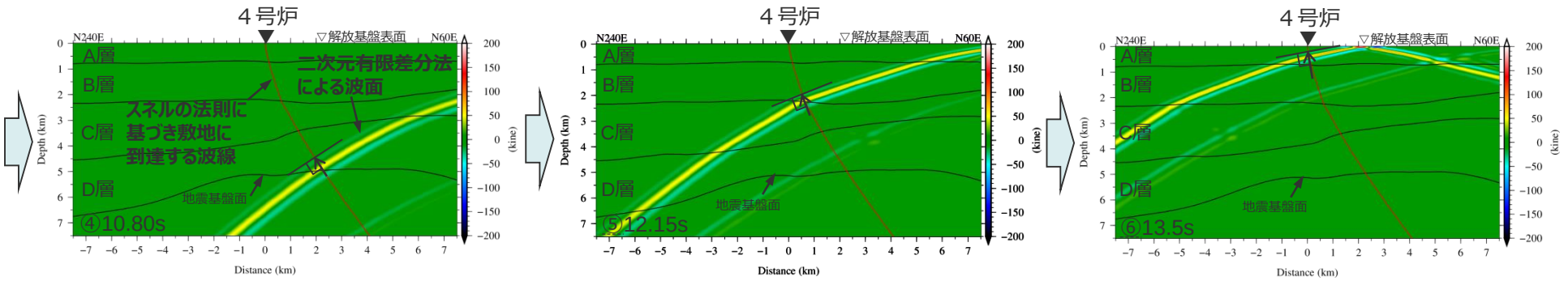
第992回
資料1-3 p.149再掲

４号炉に到達する波線と主要な地震波との関係

○**<u>レイトレーシング解析による波線</u>**は、スネルの法則に基づいており、**<u>敷地に到達する地震波の最短経路</u>**を表している。
○４号炉に到達する地震波に関して、スネルの法則に基づき敷地に到達する波線と二次元有限差分法による波面を比較すると、振幅が大きい主要な地震波は波線にしたがって伝播しており、**<u>最短経路を表す波線は敷地に到達する主要な地震波の伝播経路を表している</u>**と分析した。



（地震基盤面以深におけるスナップショット）



（地震基盤面以浅におけるスナップショット）

＜４号炉に到達する波線と二次元有限差分法による波面の比較（N60E-N240E方向断面）＞

・解析は二次元有限差分法により実施した。また、発震条件は点加震とし、入力波は中心周波数2.8HzのRicker波とした。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

小括①

地震波の伝播特性（最短経路）に関する検討

○スネルの法則に基づき**４号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線**は、**敷地に到達する地震波の最短経路を表しており、S波低速度層を伝播しない**。

○**最短経路を表す波線は、敷地に到達する主要な地震波の伝播経路を表している**。

地震波の伝播特性（迂回経路）に関する検討

○敷地に到達する地震波には、地震動への寄与は小さいと考えられるが、最短経路以外の経路（以下、「迂回経路」という。）を伝播して到達する地震波も存在する。

○以降では、迂回経路として地震波が伝播する領域について、フレネルゾーンを用いて検討する。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

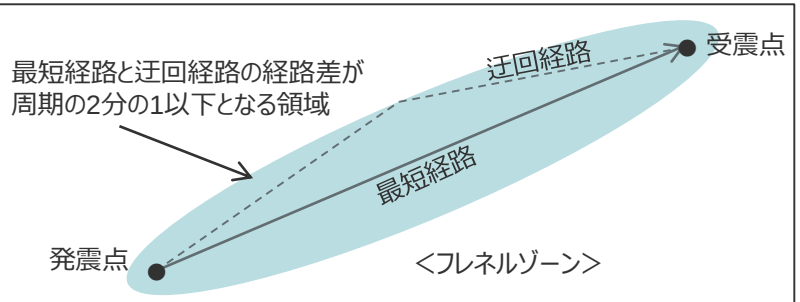
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

地震波の伝播特性（迂回経路）に関する検討
（フレネルゾーンと算出方法）

フレネルゾーン

○フレネルゾーンは、最短経路の他、ホイヘンスの原理により迂回経路として地震波が伝播する領域を表している。ここでは、Watanabe et al.(1999)に基づき、発震点から受震点に至る最短経路と迂回経路の経路差が周期の2分の1以下となる領域をフレネルゾーン（第一フレネルゾーン）とする。

○４号炉に到達する波線を対象にフレネルゾーンを求め、S波低速度層との位置関係を確認する。



フレネルゾーンの算出方法

○以下に示す手順で4号炉に到達する波線のフレネルゾーンを求めた。

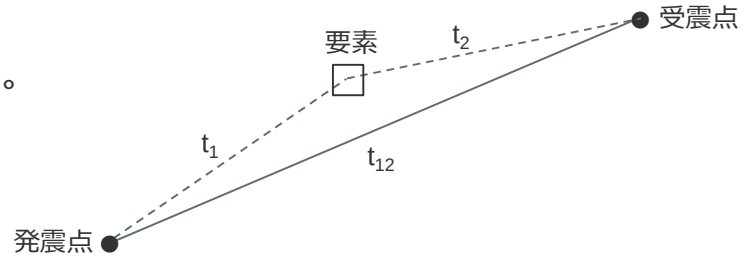
①震源（発震点）から断面上の各要素までの走時 t_1 を算出。

②４号炉（受震点）から断層面上の各要素までの走時 t_2 を算出。

③震源（発震点）から４号炉（受震点）までの走時 t_{12} を算出。

④下記に示す式を満たす領域を、フレネルゾーンとした。

$$| t_1 + t_2 - t_{12} | \leqq T/2$$ （ここで、Tは周期を表す）



フレネルゾーンの算出条件

○算出断面：N90E-N270E方向断面（4号炉から見て、S波低速度層が位置する方向）

○対象波線：多点連続観測記録の波線

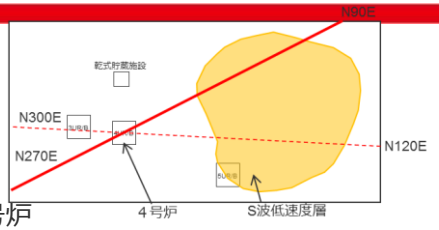
○計算周期：0.2秒、0.5秒（5号炉で顕著な増幅が見られる周期帯（0.2～0.5秒）の最小値及び最大値）

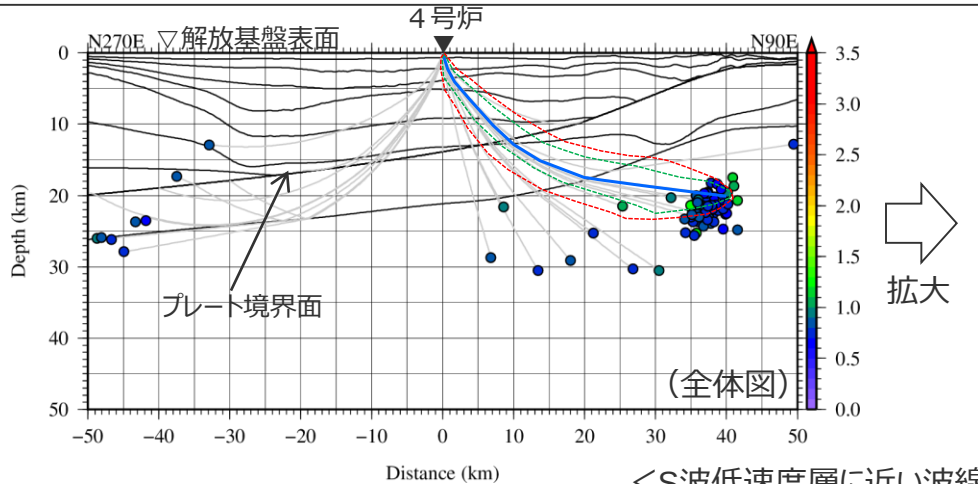
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

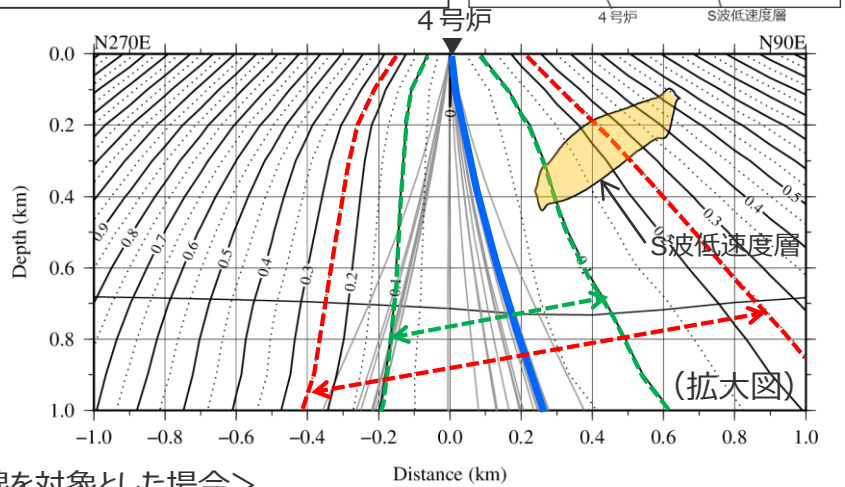
地震波の伝播特性（迂回経路）に関する検討
（フレネルゾーンとS波低速度層の位置関係）

○ S波低速度層に近い波線を対象とした場合、周期0.2、0.5秒でS波低速度層の一部がフレネルゾーンに含まれる。また、S波低速度層から離れた波線を対象とした場合、周期0.2秒ではS波低速度層がフレネルゾーンに含まれないが、周期0.5秒ではS波低速度層の一部がフレネルゾーンに含まれる。
○ S波低速度層の一部がフレネルゾーンに含まれるが、地震動の顕著な増幅は見られない。

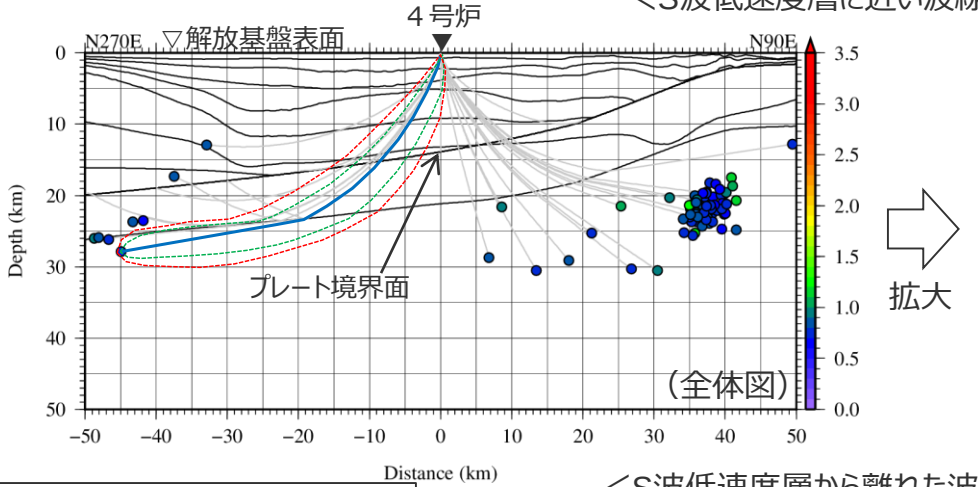




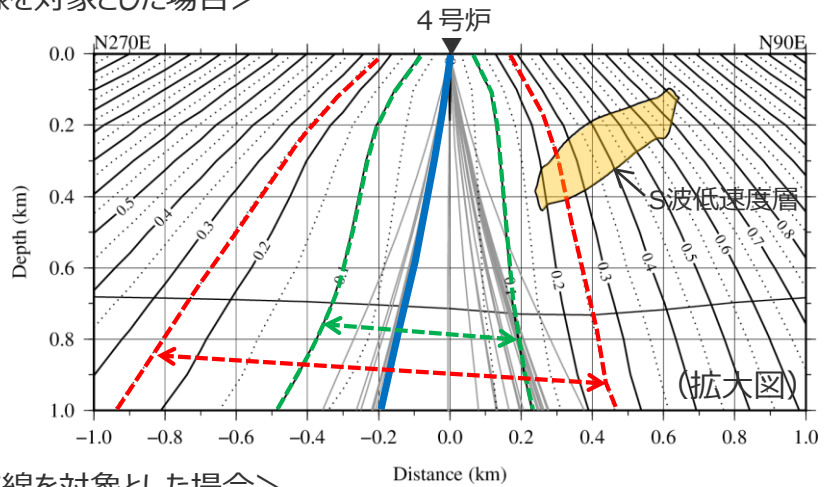
拡大



<S波低速度層に近い波線を対象とした場合>



拡大



<S波低速度層から離れた波線を対象とした場合>

フレネルゾーンを求めた波線
周期0.2秒におけるフレネルゾーン
周期0.5秒におけるフレネルゾーン

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

小括②

地震波の伝播特性（迂回経路）に関する検討

○フレネルゾーンは最短経路の他、迂回経路として地震波が伝播する領域を表している。
○４号炉に到達する地震波の波線を対象にフレネルゾーンを求め、S波低速度層との位置関係を確認した結果、S波低速度層から離れた波線であっても、S波低速度層の一部がフレネルゾーンに含まれるが、地震動の顕著な増幅は見られない。

既往報告に基づくS波低速度層の影響確認

○最短経路や迂回経路を伝播するすべての地震波の影響が含まれる「地震観測記録の分析」（既往報告）および「地下構造モデルを用いた解析検討」（既往報告）に基づき、S波低速度層による４号炉への影響を確認する。

既往報告①
：地震観測記録の分析に基づく影響確認
・地震観測記録（多点連続地震観測）の分析結果に基づき、S波低速度層による４号炉への影響を確認する。

既往報告②
：地下構造モデルを用いた解析検討に基づく影響確認
・浅部三次元地下構造モデルを用いた解析検討の結果に基づき、S波低速度層による４号炉への影響を確認する。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

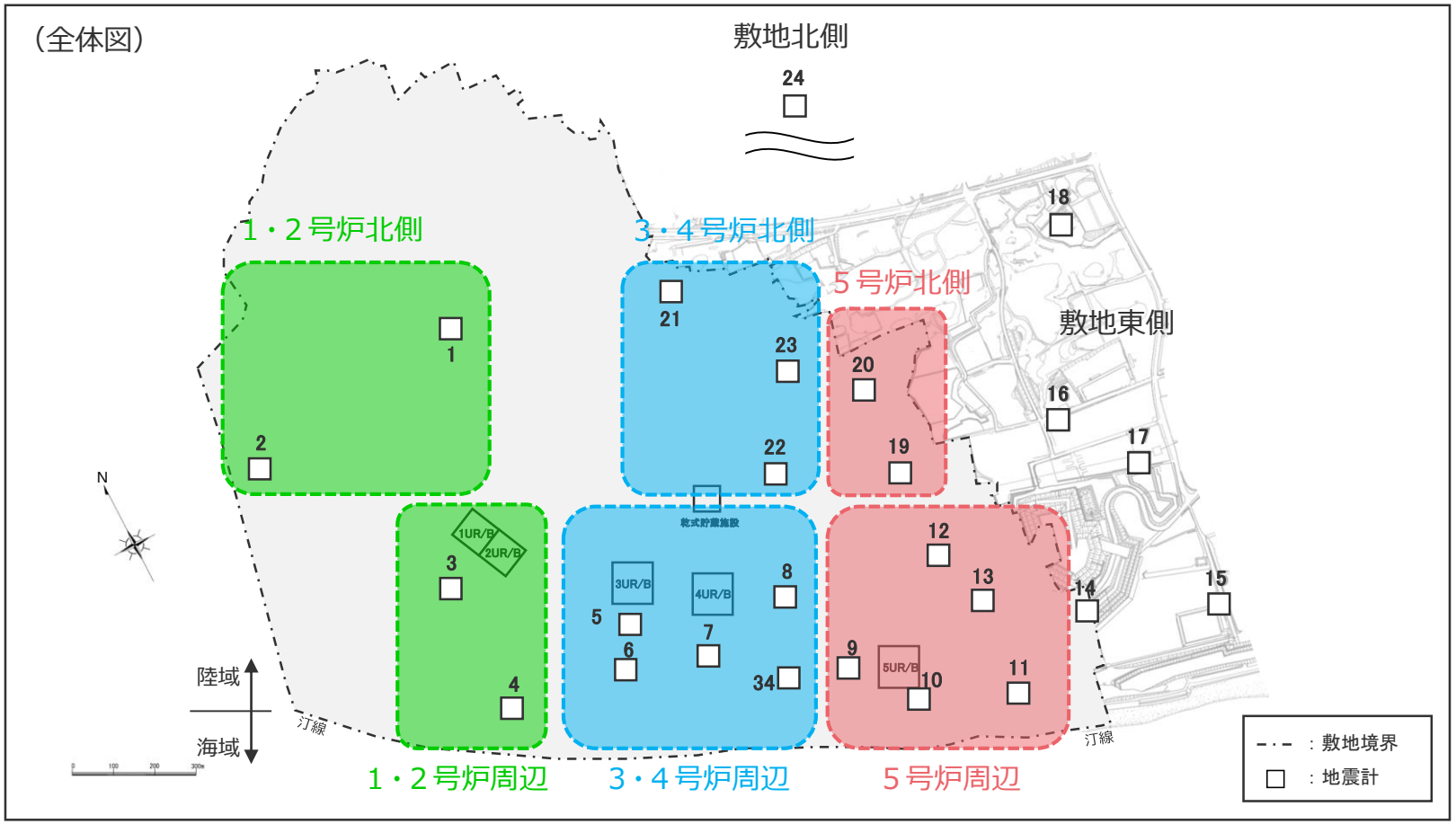
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

S波低速度層の影響確認
（多点連続観測記録の分析）

第992回
資料1-3 p.154再掲

○敷地では、地表に地震計（2Hz速度計）を多数設置し、連続地震観測を行っている。
○この多点連続地震観測の分析結果に基づき、S波低速度層による４号炉への影響を確認する。

・敷地全体の解放基盤表面相当深さの地盤増幅特性を検討するために、自然地震のフーリエスペクトル比、微動アレイ探査の分散曲線及びボーリングデータを用いて表層地盤を推定し、地表で得られた観測記録からはぎとり波を推定。
・推定したはぎとり波について、No.7に対する各観測点の振幅比を算出して、地震波到来方向毎の地盤増幅特性を検討。



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

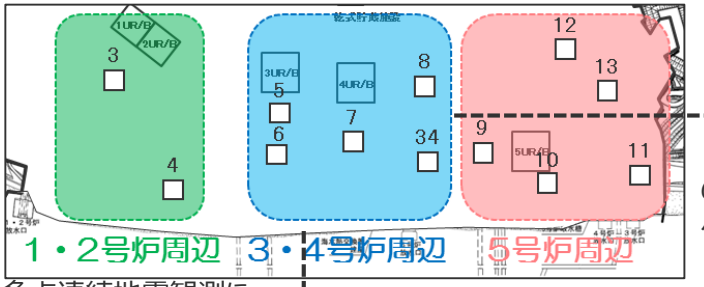
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

第992回
資料1-3 p.155再掲

S波低速度層の影響確認
（４号炉周辺の地盤増幅特性）

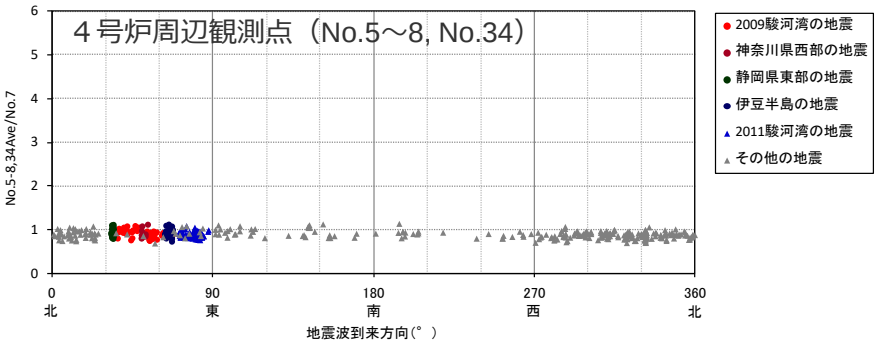
○ ４号炉周辺の観測点（No.5～No.8, No.34）をグルーピングした場合の各地震の振幅比（No.7基準）は、**いずれの地震波到来方向の地震でも振幅比は１程度**である。また、４号炉周辺の観測点それぞれの各地震の振幅比（No.7基準）も、若干のばらつきはあるものの、**いずれの地震波到来方向の地震でも振幅比は１程度**である。

⇒ 最短経路や迂回経路を伝播する**すべての地震波の影響が含まれる地震観測記録の分析結果**によると、**S波低速度層による４号炉の地震動の顕著な増幅は見られない**。

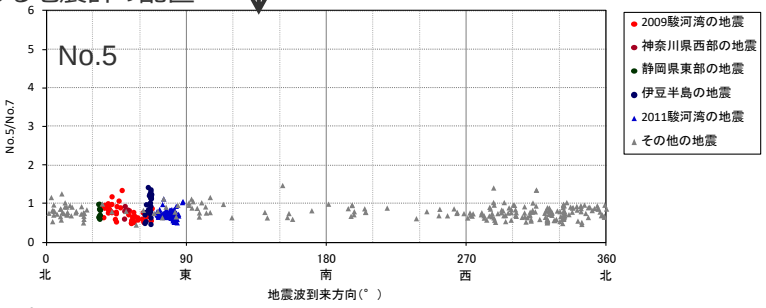


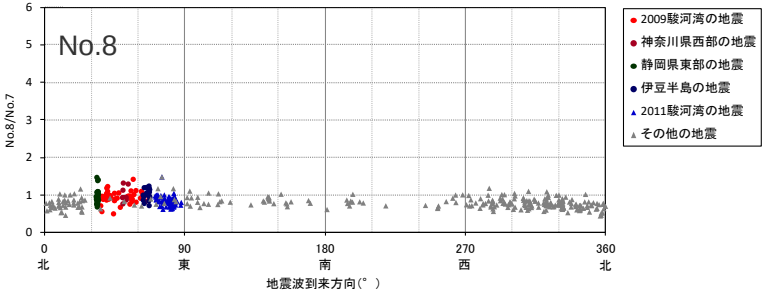
多点連続地震観測における地震計の配置

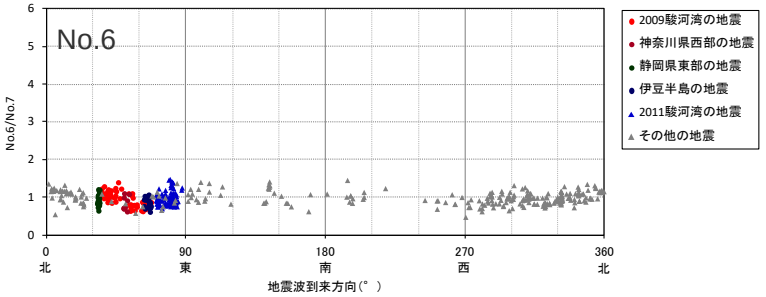
４号炉周辺の観測点をグルーピング

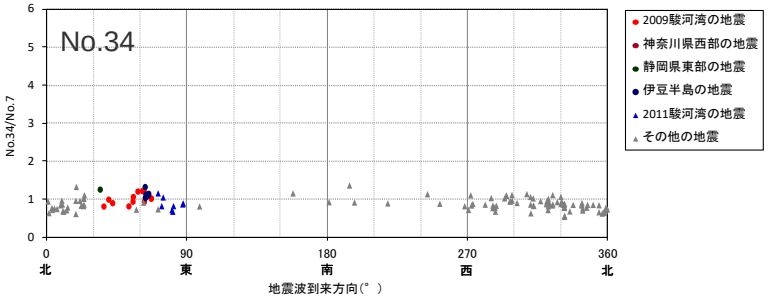


４号炉周辺の各観測点









<各地震の振幅比（No.7基準）と地震波到来方向との関係（水平平均）>（観測分析期間：2009年9月20日～2014年7月26日）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

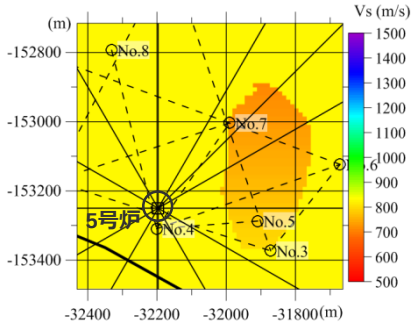
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

第992回
資料1-3 p.156再掲

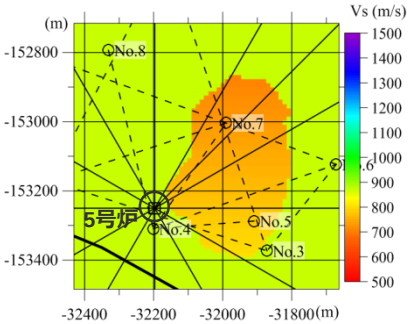
S波低速度層の影響確認
（浅部地下構造モデル）

○地下構造調査結果や地震観測記録の特徴に基づくモデルのチューニングを踏まえて、S波低速度層を含む浅部三次元地下構造モデル※を作成している。
○この浅部三次元地下構造モデルを用いた解析検討に基づき、S波低速度層による４号炉への影響を確認する。

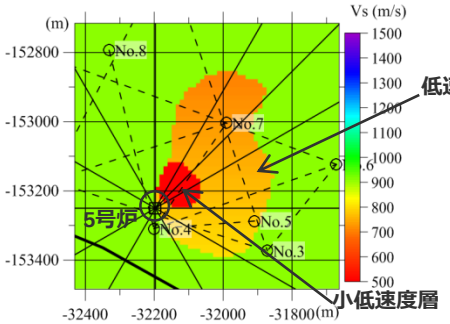
※低速度層、小低速度層、母岩（相良層）から成る浅部三次元地下構造モデル（チューニングモデル）は、基本的に地下構造調査結果に基づき設定し、小低速度層は地震観測記録の特徴を説明できるよう、その形状をチューニングして低速度層の内部に設定。



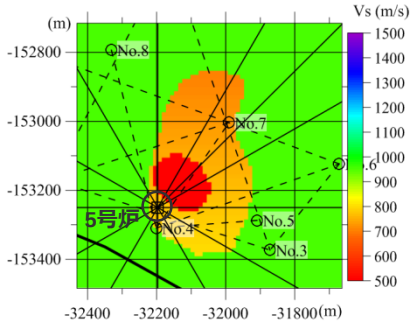
深さ144m断面



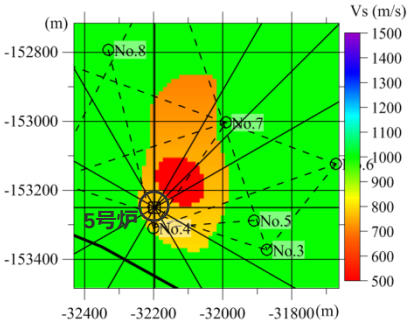
深さ192m断面



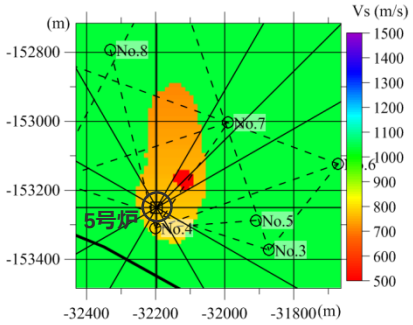
深さ240m断面



深さ288m断面

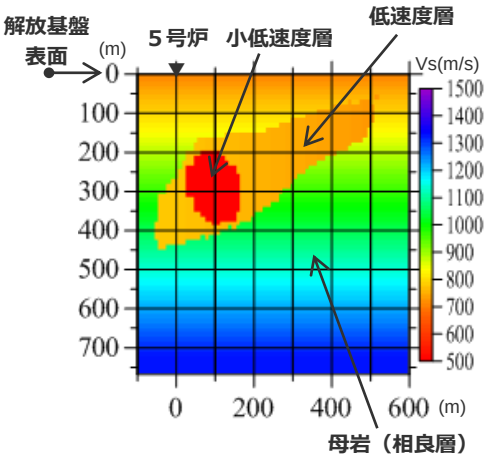


深さ336m断面



深さ384m断面

＜深さ毎の速度断面＞



＜N60E方向の速度断面＞
（2009年駿河湾の地震の地震波到来方向）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

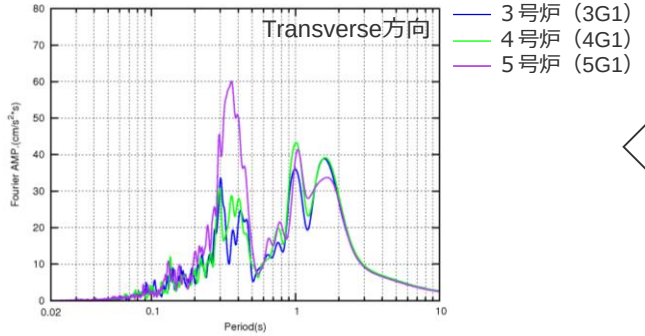
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

第992回
資料1-3 p.157一部修正

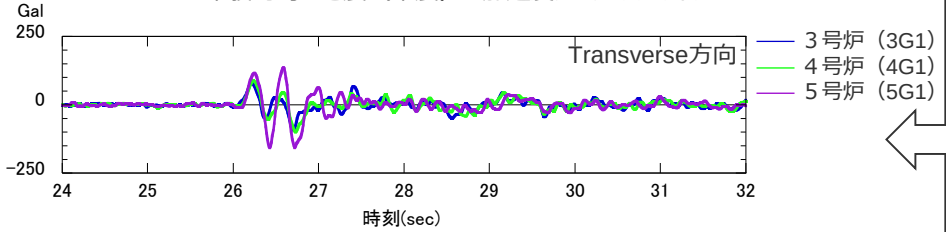
S波低速度層の影響確認
（浅部地下構造モデルの妥当性確認）

○周波数特性、経時特性、地震波到来方向毎の増幅特性について、浅部三次元地下構造モデルを用いた解析結果は地震観測記録の特徴と概ね整合しており、５号炉周辺の増幅要因として、当該モデルは妥当であると考えられる。

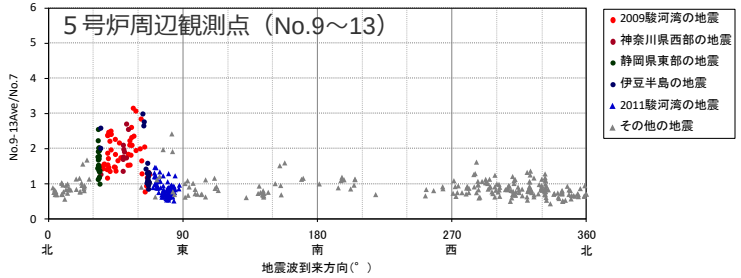
地震観測記録



＜2009年駿河湾の地震（本震）の加速度フーリエスペクトル＞



＜2009年駿河湾の地震（本震）の加速度時刻歴波形＞



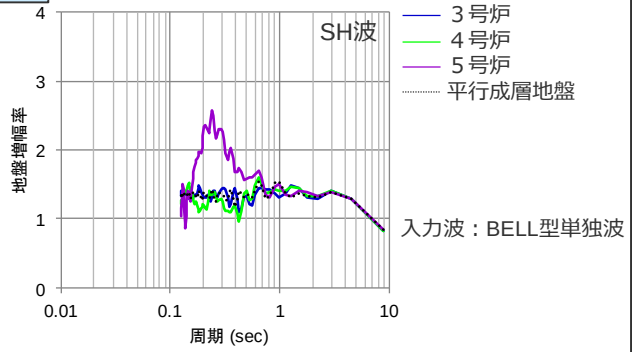
＜各地震の振幅比（No.7基準）と地震波到来方向との関係（水平平均）＞

周波数特性

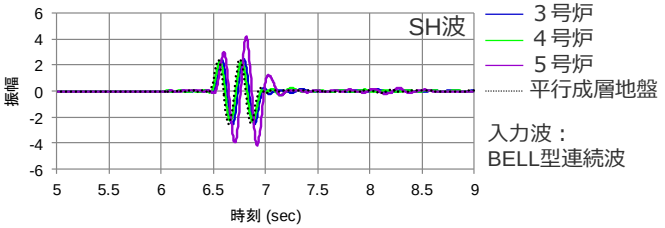
経時特性

地震波到来方向毎の増幅特性

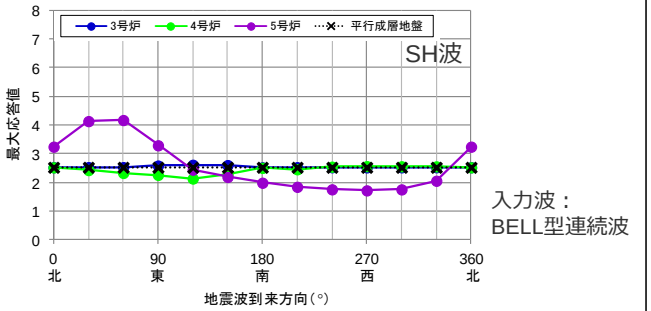
解析結果



＜３～５号炉位置の地盤増幅率（入射：2009年駿河湾の地震方向）＞



＜３～５号炉位置の応答波形（入射：2009年駿河湾の地震方向）＞



＜３～５号炉位置の応答波形の最大値分布（入射：各方向）＞

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

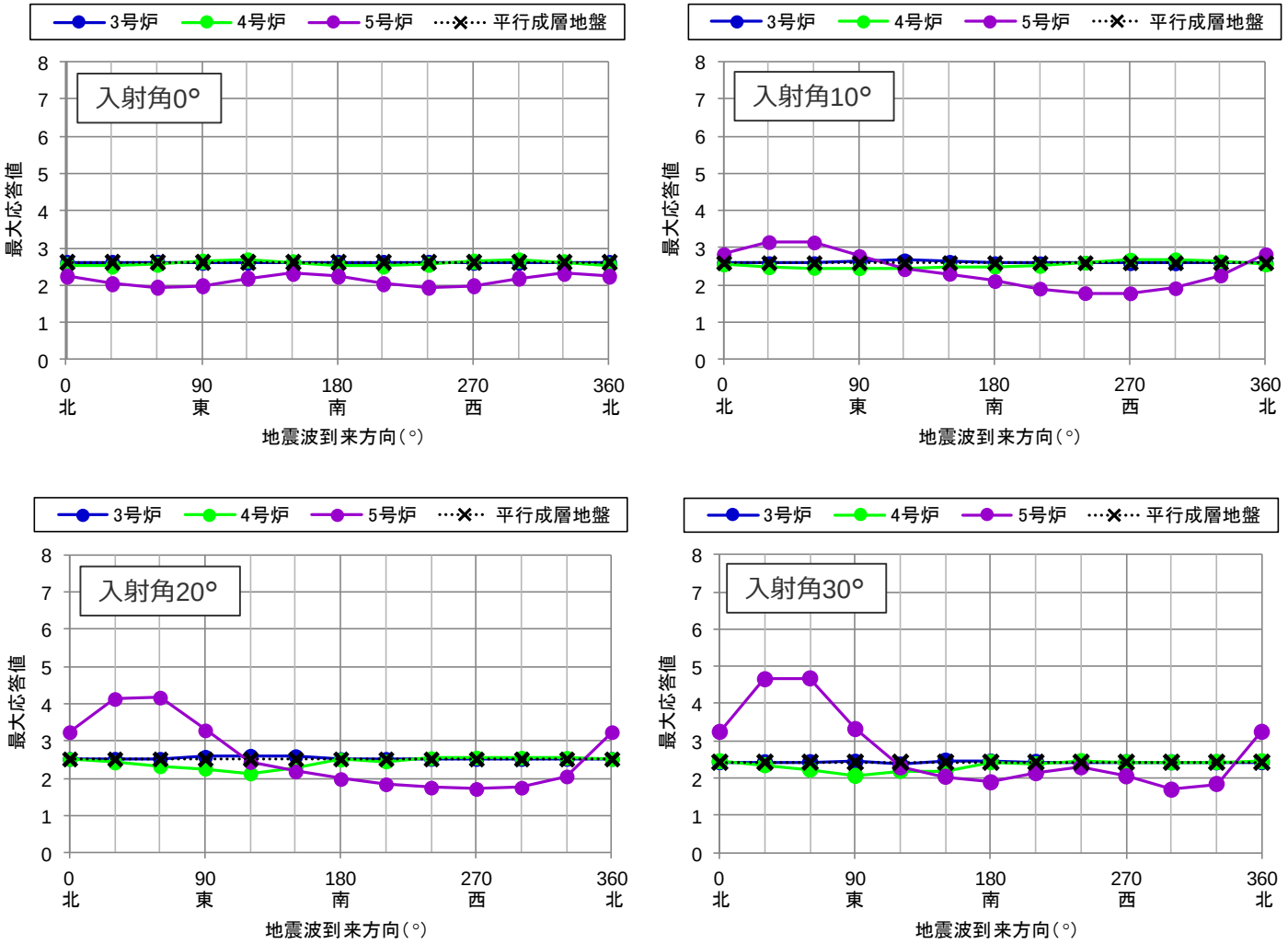
<補足説明資料①-09 地震波の伝播経路に関する検討>

S波低速度層の影響確認
（浅部三次元地下構造モデルによる解析結果）

○浅部三次元地下構造モデルに基づき、「入射角、入射方向」に関するパラメータスタディを行う。
・入射方向は全方位30°刻みとする。
・入射角は0°、10°、20°、30°とする。

＜**４号炉位置**＞
○４号炉位置の最大応答値は、**いずれの入射角、到来方向においても平行成層地盤と同程度**であり、顕著な増幅は見られない。

⇒最短経路や迂回経路を伝播する**すべての地震波の影響が含まれる地下構造モデルを用いた解析検討の結果**によると、**S波低速度層による4号炉の地震動の顕著な増幅は見られない**。



＜３～５号炉位置の応答波形の最大値分布＞
（入力波：BELL型連続波（SH波））

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

小括③

○最短経路や迂回経路を伝播する**すべての地震波の影響が含まれる「地震観測記録の分析」および「地下構造モデルを用いた解析検討」**に基づき、以下のとおり、S波低速度層による４号炉への影響を確認した。

＜地震観測記録の分析（既往報告）＞
・地震観測記録（多点連続地震観測）の分析結果によると、**S波低速度層による４号炉の地震動の顕著な増幅は見られない**。

＜地下構造モデルを用いた解析検討（既往報告）＞
・浅部三次元地下構造モデルを用いた解析検討の結果によると、**S波低速度層は４号炉の地震動の顕著な増幅は見られない**。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

まとめ

地震波の伝播特性（最短経路）に関する検討

○スネルの法則に基づき**4号炉に到達する観測地震及びプレート境界面の震源の波線**は、**敷地に到達する地震波の最短経路を表しており、S波低速度層を伝播しない**。

○**最短経路を表す波線は、敷地に到達する主要な地震波の伝播経路を表している**。

地震波の伝播特性（迂回経路）に関する検討

○フレネルゾーンを用いて、最短経路の他、迂回経路として地震波が伝播する領域を検討した結果、S波低速度層の一部はフレネルゾーンに含まれるが、 地震動の顕著な増幅は見られない。

既往報告に基づくS波低速度層の影響確認

○最短経路や迂回経路を伝播する**すべての地震波の影響が含まれる「地震観測記録の分析」および「地下構造モデルを用いた解析検討」**に基づき、**S波低速度層による４号炉周辺の地震動の顕著な増幅は見られない**ことを確認した。

○**４号炉周辺に到達する主要な地震波はS波低速度層を伝播**せず、フレネルゾーンの検討を踏まえても、**すべての地震波の影響が含まれる「地震観測記録の分析」および「地下構造モデルを用いた解析検討」**に基づき、**S波低速度層による４号炉周辺の地震動の顕著な増幅は見られない**ことを確認した。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

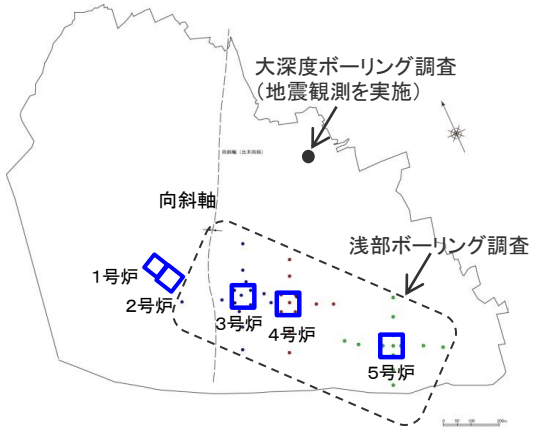
補足説明資料①-10
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

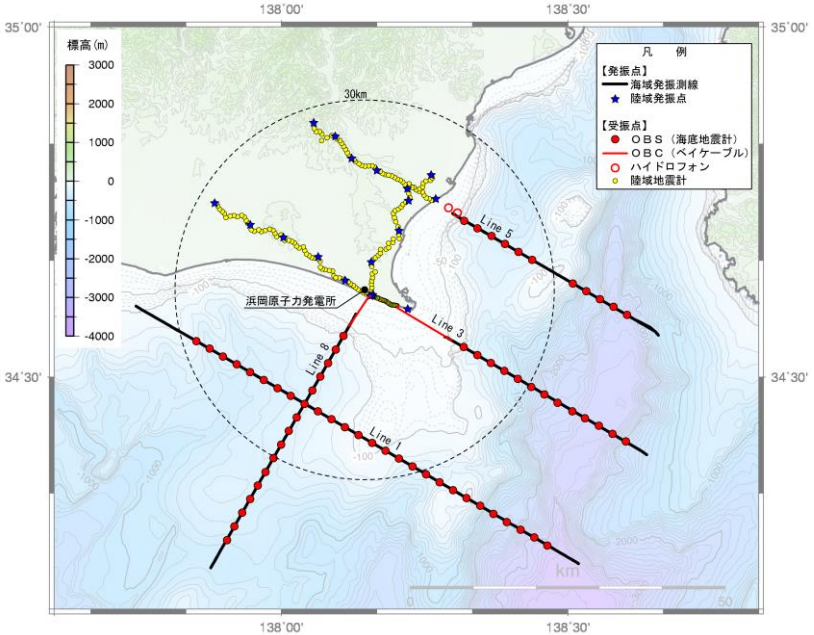
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

一次元地下構造モデルの設定
（設定に用いる調査結果）

第992回
資料1-3 p.162再掲



<ボーリング調査位置図>

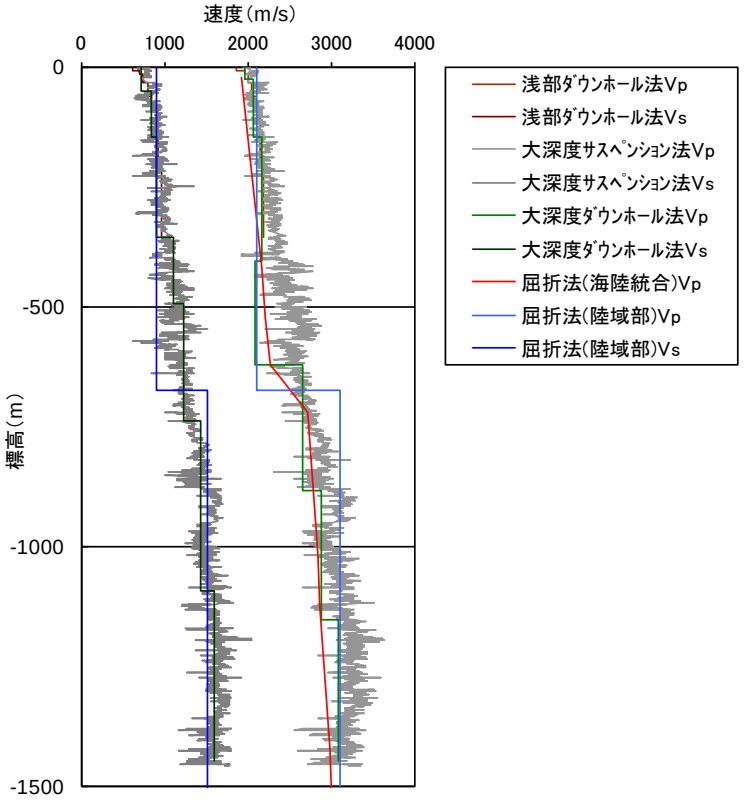


<屈折法地震探査測線図>

<一次元地下構造モデルの設定に用いる調査結果>

○浅部ボーリング調査（標高約-300m以浅）　：P波速度、S波速度、密度
○大深度ボーリング調査（標高約-1500m以浅）　：P波速度、S波速度、密度
○屈折法地震探査（陸域部）（標高約-5000m以浅）　：P波速度、S波速度
○屈折法地震探査（海陸統合）（標高約-23000m以浅）　：P波速度

⇒ 各調査結果は整合しており、これらの調査結果を用いて、地震動評価に用いる一次元地下構造モデルを設定する。



<敷地における各調査結果の比較>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.163再掲

一次元地下構造モデルの設定
（Vp－Vs、Vp－ρ関係式）

＜Vp－Vs関係式＞

○ T.P.-2050m～T.P.-5050m（地震基盤面）のS波速度は、サンプル数が多い大深度ボーリング調査のPS検層結果（サスペンション法）に基づき作成した以下のVp－Vs関係式を用いて、P波速度から推定する。

Vp－Vs関係式：Vs=0.68Vp－580(m/s)

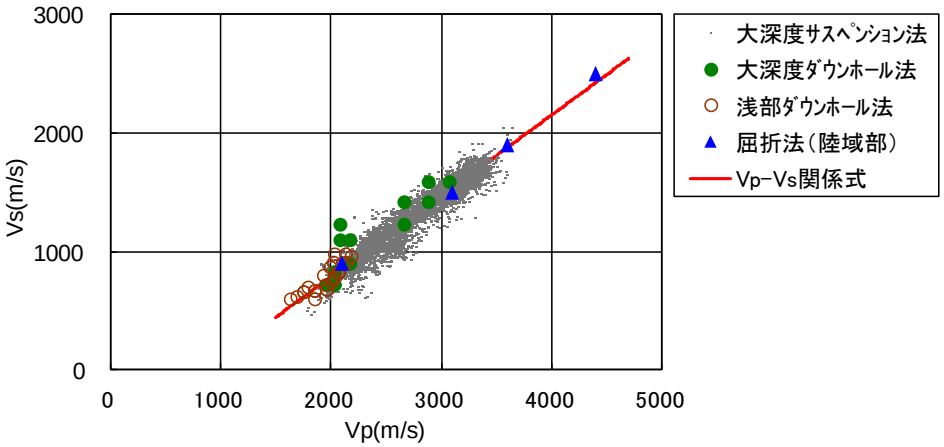
○ この関係式は、浅部及び大深度ボーリング調査のPS検層結果（ダウンホール法）や屈折法地震探査（陸域部）の結果と整合している。

＜Vp－ρ関係式＞

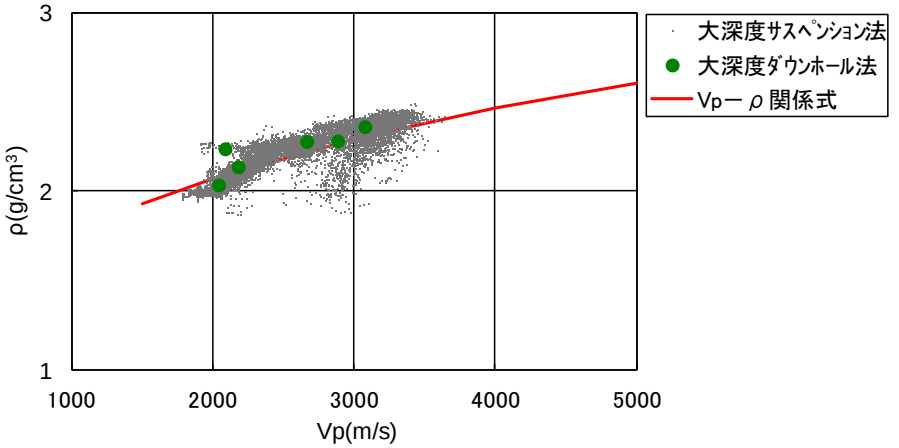
○ 密度は、以下のVp－ρ関係式（Gardner et al.(1974)）を用いて、P波速度から推定する。

Vp－ρ関係式：$\rho=0.31Vp^{0.25}(g/cm^3)$

○ この関係式は、大深度ボーリング調査におけるPS検層結果（サスペンション法及びダウンホール法）と密度検層結果との関係と整合している。



＜Vp－Vs関係式と各調査結果との対応＞



＜Vp－ρ関係式と各調査結果との対応＞

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（地震動評価に用いる一次元地下構造モデル（概要））

○断層モデルを用いた手法（統計的グリーン関数法（短周期領域）と波数積分法（長周期領域）によるハイブリッド合成法）による地震動評価に用いる一次元地下構造モデルは、地下構造調査により得られた詳細な地下構造データ等に基づき設定し、敷地の観測記録の再現検討等を踏まえてその妥当性を確認している※1。

＜速度構造＞

・T.P.-14m～T.P.-2050mでは、S波速度及びP波速度の両方が得られる浅部及び大深度ボーリング調査のPS検層結果（ダウンホール法）に基づき、S波速度及びP波速度を設定する。

・T.P.-2050m以深について、P波速度は屈折法地震探査結果（海陸統合）に基づき設定し、S波速度は、T.P.-5050m以浅では各調査結果に基づき算定したVp－Vs関係式（Vs=0.68Vp-580(m/s)）を、T.P.-5050m以深ではObana et al.(2004)によるVp-Vs関係式（Vp/Vs=1.78）を用いて、P波速度から推定する。

＜密度＞

・各調査結果との対応が良いGardner et al.(1974)のVp－ρ関係式（$\rho=0.31Vp^{0.25}$(g/cm^3)）を用いて、P波速度から推定する。

＜Q値＞

・統計的グリーン関数法（短周期の地震動評価）：$100f^{0.7}$※2、波数積分法（長周期の地震動評価）：Qs=Vs/10、Qp=2Qs※3

※1 一次元地下構造モデルの設定に係る妥当性確認等の詳細な説明は、補足説明資料①-10,11参照。
※2 中央防災会議(2001a)、 ※3 原子力安全基盤機構(2007)、新色・山中(2013)。

解放基盤表面

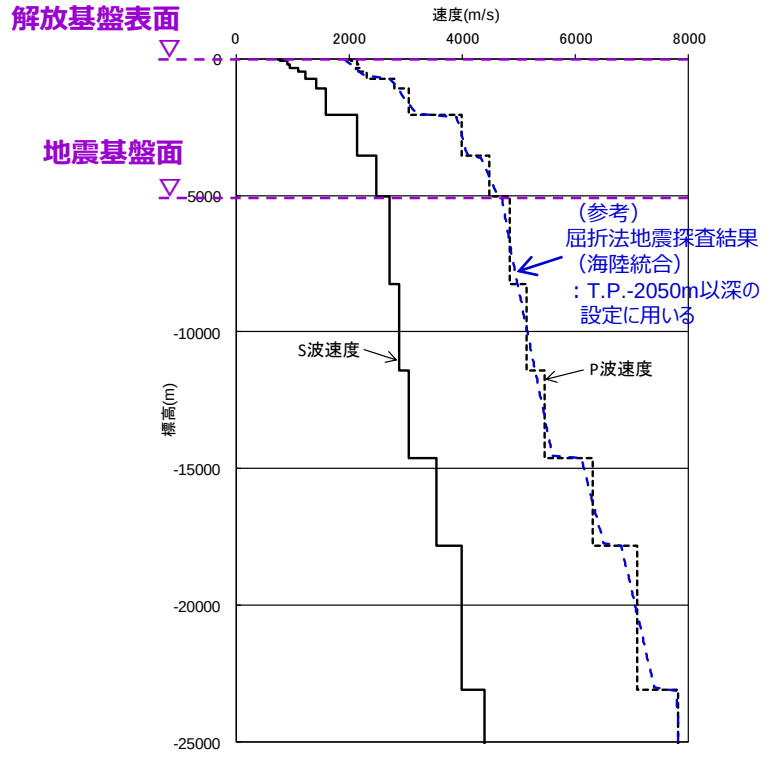
統計的グリーン関数法で用いる地下構造（地震基盤以浅）

地震基盤面

波数積分法で用いる地下構造（全層）

層	標高 (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm^3)	SGF法※4	波数積分法※5	
					Qs,Qp	Qs	Qp
1	-14	740	2000	2.07	$100f^{0.7}$	74	148
2	-32	790	2030	2.08	$100f^{0.7}$	79	158
3	-62	830	2070	2.09	$100f^{0.7}$	83	166
4	-92	910	2140	2.11	$100f^{0.7}$	91	182
5	-192	960	2180	2.12	$100f^{0.7}$	96	192
6	-354	1100	2110	2.10	$100f^{0.7}$	110	220
7	-493	1230	2320	2.15	$100f^{0.7}$	123	246
8	-739	1420	2790	2.25	$100f^{0.7}$	142	284
9	-1094	1590	3060	2.31	$100f^{0.7}$	159	318
10	-2050	2150	3990	2.46	$100f^{0.7}$	215	430
11	-3550	2470	4470	2.53	$100f^{0.7}$	247	494
12	-5050	2720	4830	2.58	-	272	544
13	-8240	2880	5130	2.62	-	288	576
14	-11400	3060	5450	2.66	-	306	612
15	-14600	3540	6300	2.76	-	354	708
16	-17800	3990	7100	2.85	-	399	798
17	-23100	4390	7810	2.91	-	439	878

※4 統計的グリーン関数法（短周期の地震動評価）、※5 波数積分法（長周期の地震動評価）



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（ ）は、一部修正箇所を示す。
・左下の記載を削除。

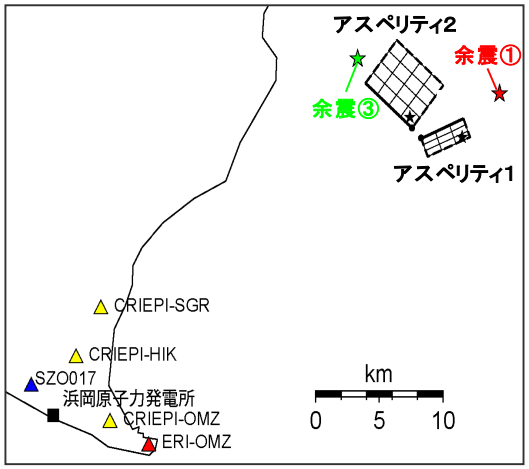
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.165一部修正

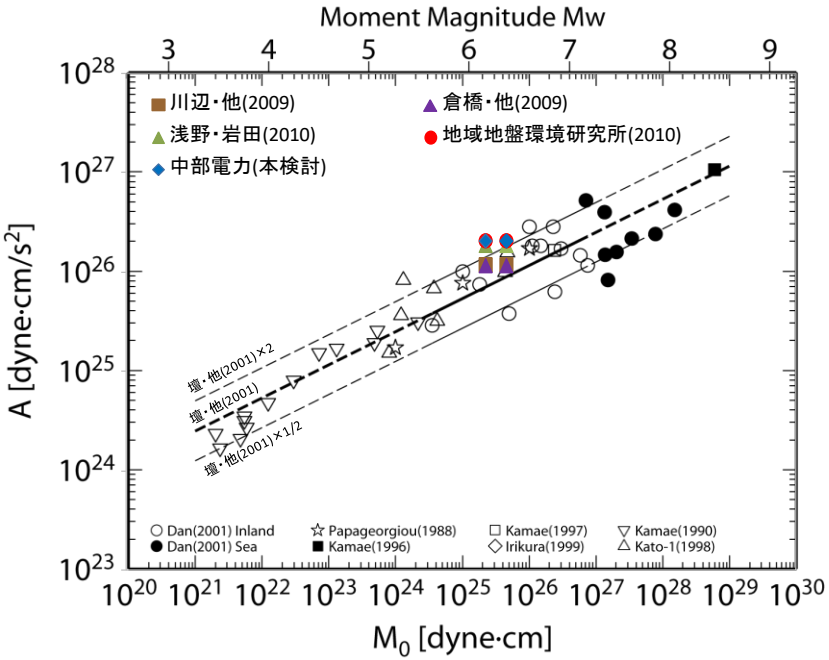
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（地震動の顕著な増幅が見られない観測点の地震観測記録の再現検討）

○振幅レベルが大きく、信頼性の高い記録が得られている2009年駿河湾の地震（本震）を対象として、この地震の特性化震源モデルに基づき、一次元地下構造モデルを用いた統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、敷地の観測記録（３号炉及び４号炉）の再現性について検討する。

	面積	地震モーメント	応力降下量
アスペリティ１（南部）	13.0km^2	6.80×10^{17}Nm	35.7MPa
アスペリティ２（北部）	23.0km^2	1.20×10^{18}Nm	27.5MPa



<経験的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の特性化震源モデル>
（当社作成）



・地震モーメントは2.25×10^{18}Nm(F-net)、4.6×10^{18}Nm(鈴木・他(2009))を用いる

<2009年駿河湾の地震（本震）のM$_0$－A関係>
（壇・他(2001)に各文献・当社作成モデルの
地震モーメント－短周期レベル関係を加筆）

・経験的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の特性化震源モデル（当社作成）は、補足説明資料③-23参照。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿）は、一部修正箇所を示す。

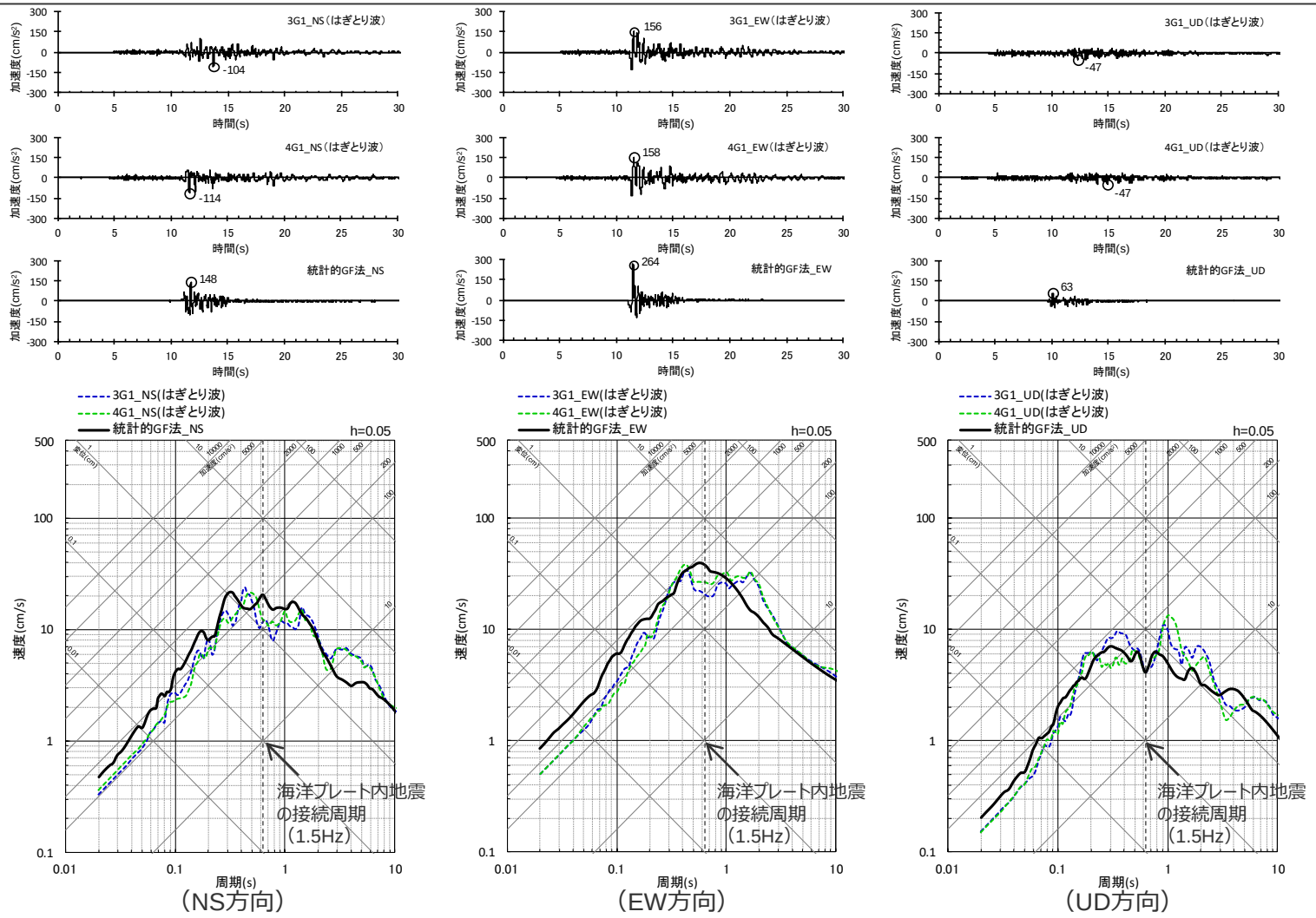
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.166再掲

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定

（2009年駿河湾の地震（本震）の再現検討結果と３号炉（3G1）、４号炉（4G1）の観測記録（はぎとり波））

○統計的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果は、その評価対象周期（短周期）で**３号炉（3G1）、４号炉（4G1）の観測記録（はぎとり波）を概ね再現**している。



（NS方向）　（EW方向）　（UD方向）

<2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果と３号炉（3G1）、４号炉（4G1）の観測記録（はぎとり波）との比較>
（上図：加速度時刻歴波形、下図：応答スペクトル）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデルによる検証）

地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの設定（前述）

○地震動評価に用いる一次元地下構造モデル（統計的グリーン関数法）は、地下構造調査により得られた詳細な地下構造データ等に基づき、敷地の観測記録の再現検討を踏まえて設定し、Q値は安全評価上、中央防災会議(2001a)等の$100f^{0.7}$を用いる。

比較検討

地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの検証

○地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの妥当性を検証するため、以下の観点で両モデルの比較検討を行う。

・地盤増幅率
・プレート間地震の地震動評価結果
・観測記録（Coda波部H/Vスペクトル、微動アレイ観測による分散曲線）との整合性

地震観測記録を用いて推定した地盤モデル

○地震動評価に用いる一次元地下構造モデルを検証するため、異なるアプローチとして、地震観測記録を用いて推定した地盤モデルを２通り設定する。

・アプローチ①：P波部H/Vスペクトル及びレシーバー関数を用いて推定した地盤モデル（地震基盤面以浅）
・アプローチ②：大深度伝達関数を用いて推定した地盤モデル（G.L.-1500m以浅）

地震動評価に用いる一次元地下構造モデルについて、周期特性はその他の地盤モデルと同様であり、振幅は保守的になっていること、観測記録と概ね整合していることから、当該一次元地下構造モデルの妥当性を確認。

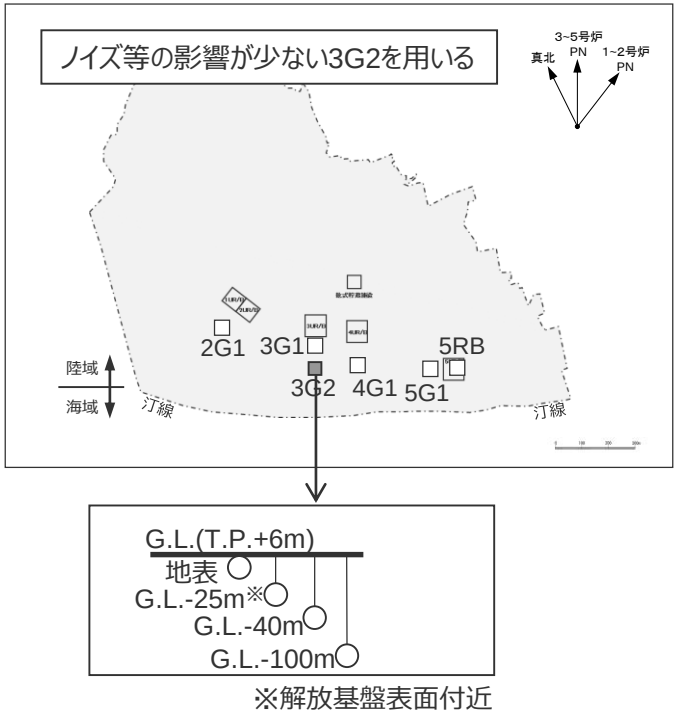
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

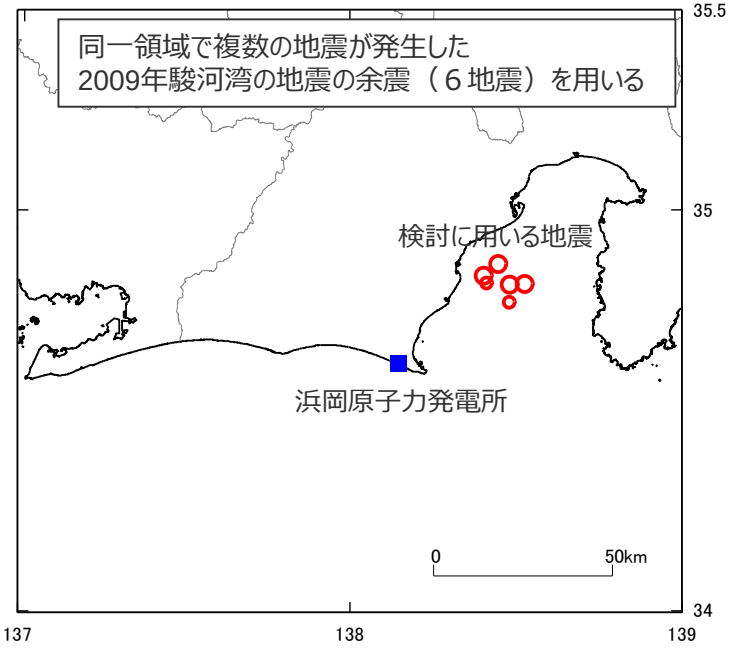
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①））

＜アプローチ①＞地震観測記録を用いた地盤モデルの推定（地震基盤面以浅）

＜浅部地盤モデルの推定＞
・2009年駿河湾の地震の余震（６地震）における伝達関数（G.L.-100m以浅）の観測値と理論値の差が最小となる浅部地盤モデルを推定。

＜深部地盤モデルの推定＞
・2009年駿河湾の地震の余震（６地震）におけるP波部H/Vスペクトル及びレシーバー関数の観測値と理論値の差が最小となる深部地盤モデルを推定。





Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①））

＜浅部地盤モデルの推定＞

○ 3 号炉PS検層結果に基づき、層モデルと探索範囲を設定。

○ 2009年駿河湾の地震の余震（６地震）における伝達関数（G.L.-100m以浅）の逆解析により浅部地盤モデルを推定。

＜層モデルと探索範囲の設定＞

層No.	深度(m)※	層厚(m)	ρ(t/m³)	Vs(m/s)	Qs		Vp(m/s)	Qp	
					Qo	n		Qo	n
1	-2	2	1.80	50～400	1～20	0.0～1.0	300～1000	1～20	0.0～1.0
2	-4	2	1.80						
3	-10	6	2.10	50～651	1～20	0.0～1.0	600～1724	1～20	0.0～1.0
4	-20	10	2.10	200～693	1～20	0.0～1.0	1715～1785	1～20	0.0～1.0
5	-25	5	2.10	700～735	1～20	0.0～1.0	1754～1826	1～20	0.0～1.0
6	-30	5	2.10						
7	-40	10	2.10	760～840	1～20	0.0～1.0	1891～1968	1～20	0.0～1.0
8	-60	20	2.10						
9	-100	40	2.10	826～913	1～20	0.0～1.0	1950～2030	1～20	0.0～1.0
10		∞	2.10	910			2020		

＜推定した浅部地盤モデル＞

層No.	深度(m)※	層厚(m)	ρ(t/m³)	Vs(m/s)	Qs		Vp(m/s)	Qp	
					Qo	n		Qo	n
1	-2	2	1.80	200	8.77	0.85	380	1.16	0.81
2	-4	2	1.80	200	8.77	0.85	380	1.16	0.81
3	-10	6	2.10	320	7.19	0.83	700	1.14	0.71
4	-20	10	2.10	650	1.08	0.61	1760	1.07	0.61
5	-25	5	2.10	720	1.13	0.85	1820	1.10	0.75
6	-30	5	2.10	720	1.13	0.85	1820	1.10	0.75
7	-40	10	2.10	830	5.43	0.88	1960	2.26	0.84
8	-60	20	2.10	830	5.43	0.88	1960	2.26	0.84
9	-100	40	2.10	880	1.10	0.98	2020	2.95	0.82
10		∞	2.10	910	1.10	0.98	2020	2.95	0.82

Q値モデル：$Q(f)=Q_0 f^n$

地震計の設置位置
解放基盤表面
浅部地盤モデル推定部

※層下端深度を示す。

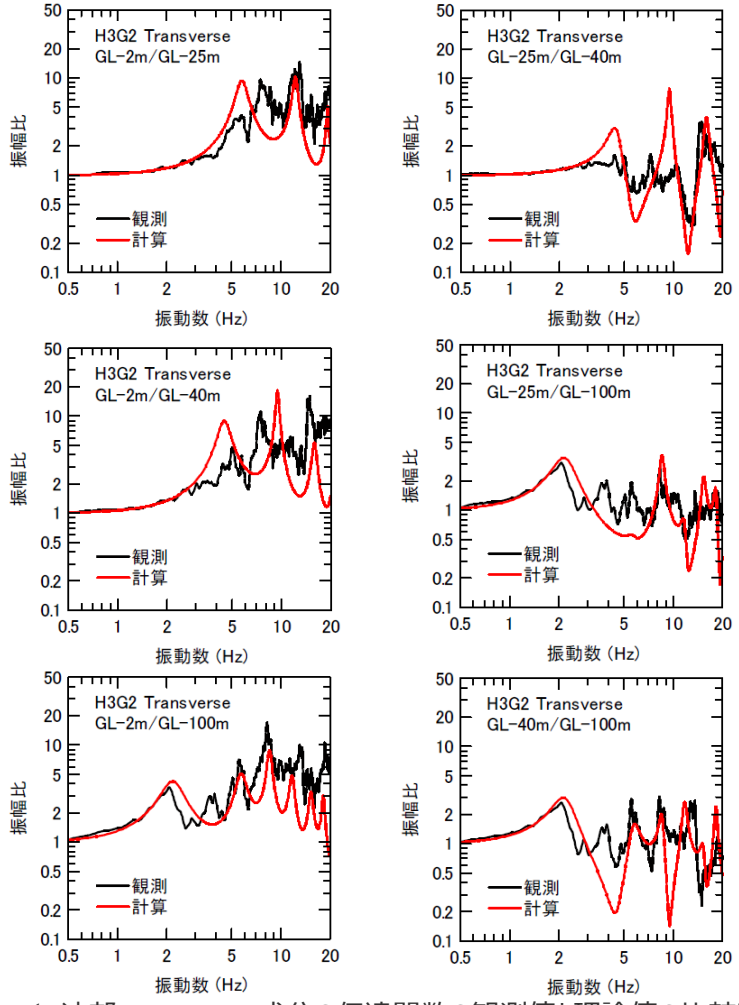
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.170再掲

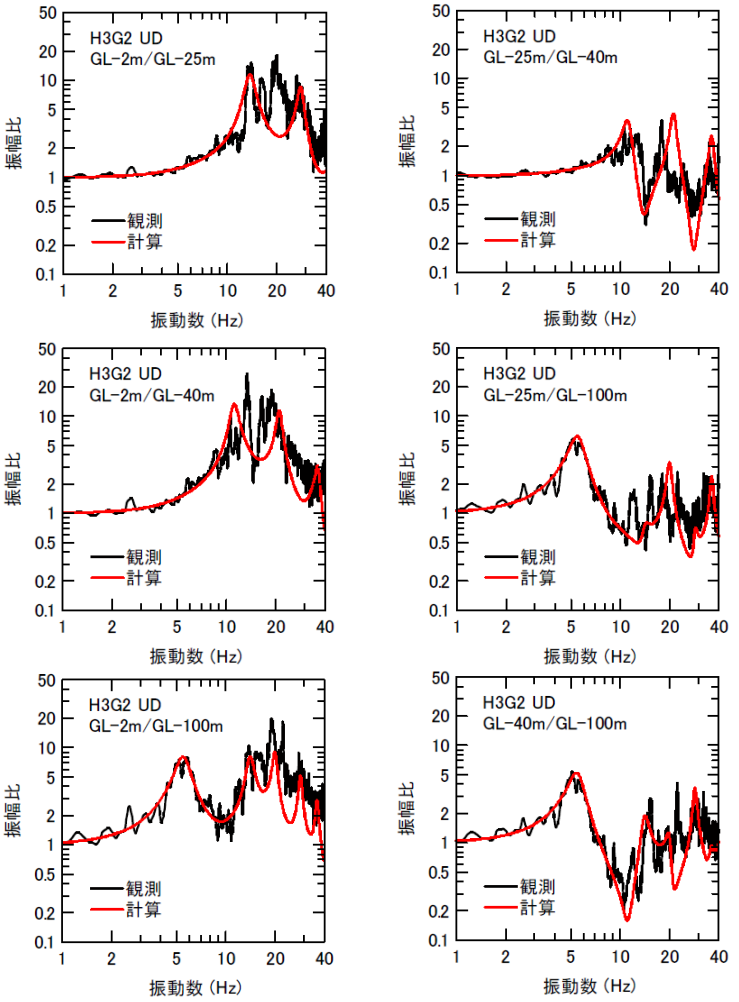
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①））

○2009年駿河湾の地震の余震（６地震）におけるS波部Transverse成分の伝達関数の観測値と理論値の差が最小となるよう、浅部地盤モデル（Vs, Qs）を推定。



<S波部Transverse成分の伝達関数の観測値と理論値の比較>

○2009年駿河湾の地震の余震（６地震）におけるP波部UD成分の伝達関数の観測値と理論値の差が最小となるよう、浅部地盤モデル（Vp, Qp）を推定。



<P波部UD成分の伝達関数の観測値と理論値の比較>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①））

＜深部地盤モデルの推定＞
○地震動評価に用いる一次元地下構造モデルに基づき、層モデルと探索範囲を設定。
○2009年駿河湾の地震の余震（６地震）におけるP波部H/Vスペクトル及びレシーバー関数の逆解析により深部地盤モデルを推定。

＜層モデルと探索範囲の設定＞

層No.	層厚(m)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	Qs		Qp	
				Qo	n	Qo	n
1	2	200	380	8.77	0.85	1.16	0.81
2	2	200	380	8.77	0.85	1.16	0.81
3	6	320	700	7.19	0.83	1.14	0.71
▼4	10	650	1760	1.08	0.61	1.07	0.61
5	5	720	1820	1.13	0.85	1.10	0.75
6	5	720	1820	1.13	0.85	1.10	0.75
7	10	830	1960	5.43	0.88	2.26	0.84
8	20	830	1960	5.43	0.88	2.26	0.84
9	40	880	2020	1.10	0.98	2.95	0.82
10	48～148	810～1010	2040～2240	10～50	0.5～1	5～50	0.5～1
11	62～262	860～1060	1980～2380	10～50	0.5～1	5～50	0.5～1
12	39～239	1000～1200	1910～2310	10～50	0.5～1	5～50	0.5～1
13	146～346	1130～1330	2120～2520	10～150	0.5～1	5～150	0.5～1
14	255～455	1220～1620	2590～2990	10～150	0.5～1	5～150	0.5～1
15	856～1056	1390～1790	2860～3260	10～150	0.5～1	5～150	0.5～1
16	1300～1700	1800～2350	3790～4190	10～150	0.5～1	5～150	0.5～1
▽17	1300～1700	1800～2670	4270～4670	20～150	0.5～1	5～150	0.5～1
18	2990～3390	2520～2920	4630～5030	20～150	0.5～1	10～150	0.5～1
19	∞	2680～3080	4930～5330	20～150	0.5～1	10～150	0.5～1

＜推定した深部地盤モデル＞

層No.	深度(m)※	層厚(m)	ρ(t/m³)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	Qs		Qp	
						Qo	n	Qo	n
1	-2	2	1.80	200	380	8.77	0.85	1.16	0.81
2	-4	2	1.80	200	380	8.77	0.85	1.16	0.81
3	-10	6	2.10	320	700	7.19	0.83	1.14	0.71
▼4	-20	10	2.10	650	1760	1.08	0.61	1.07	0.61
5	-25	5	2.10	720	1820	1.13	0.85	1.10	0.75
6	-30	5	2.10	720	1820	1.13	0.85	1.10	0.75
7	-40	10	2.10	830	1960	5.43	0.88	2.26	0.84
8	-60	20	2.10	830	1960	5.43	0.88	2.26	0.84
9	-100	40	2.10	880	2020	1.10	0.98	2.95	0.82
10	-180	80	2.10	920	2090	15.6	0.76	8.07	0.60
11	-310	130	2.08	1000	2020	20.1	0.72	10.5	0.78
12	-540	230	2.14	1170	2260	22.2	0.73	11.3	0.63
13	-880	340	2.14	1140	2280	33.0	0.82	17.7	0.57
14	-1170	290	2.24	1620	2740	38.2	0.80	26.3	0.63
15	-2150	980	2.28	1650	2950	90.3	0.76	58.8	0.75
16	-3530	1380	2.46	2070	3940	139	0.72	92.7	0.69
▽17	-5180	1650	2.55	2290	4600	146	0.67	120	0.61
18	-8260	3080	2.57	2820	4720	145	0.78	129	0.73
19		∞	2.60	3010	4960	145	0.78	129	0.73

Q値モデル：$Q(f)=Q_0 f^n$

深部地盤モデル推定部
推定した浅部地盤モデル（固定）
▼解放基盤表面
▽地震基盤面

※層下端深度を示す。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

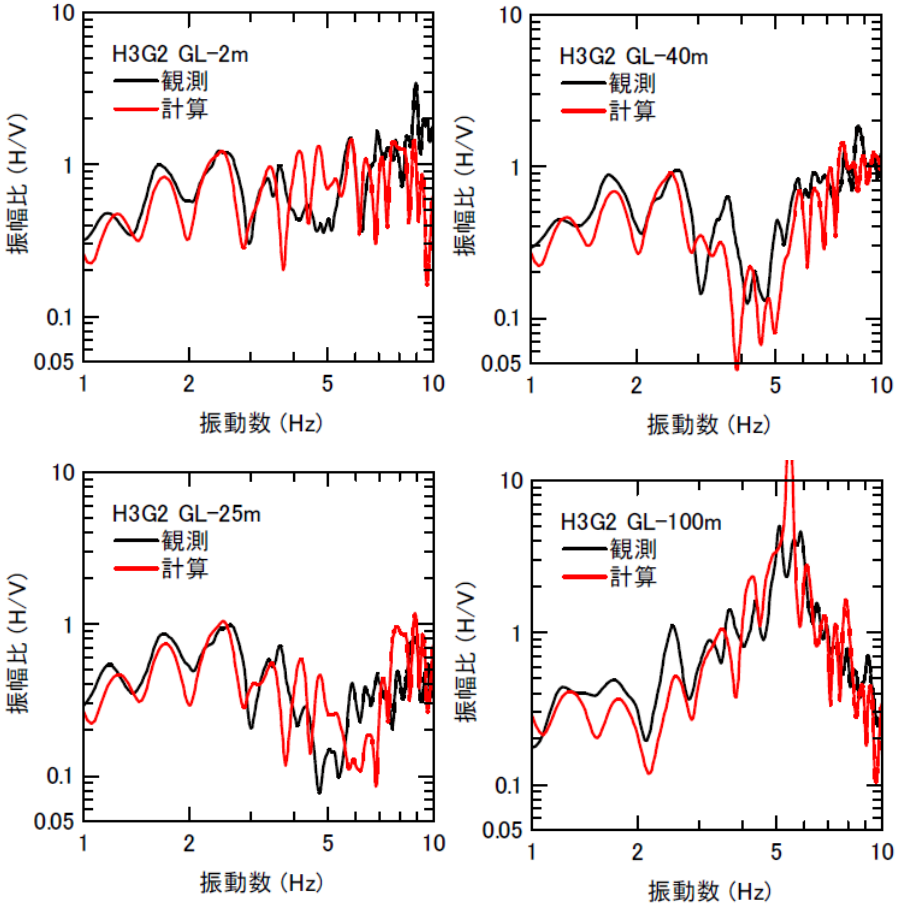
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.172再掲

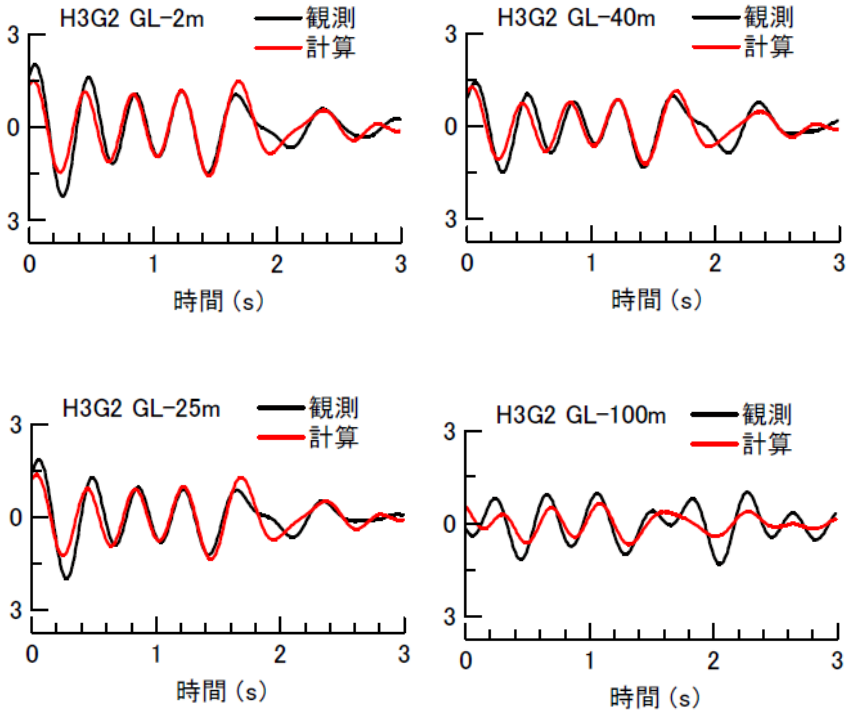
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①））

○2009年駿河湾の地震の余震（６地震）におけるP波部H/Vスペクトル及びレシーバー関数の観測値と理論値の差が最小となるよう、深部地盤モデルを推定。



<P波部H/Vスペクトルの観測値と理論値の比較>



<レシーバー関数の観測値と理論値の比較>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

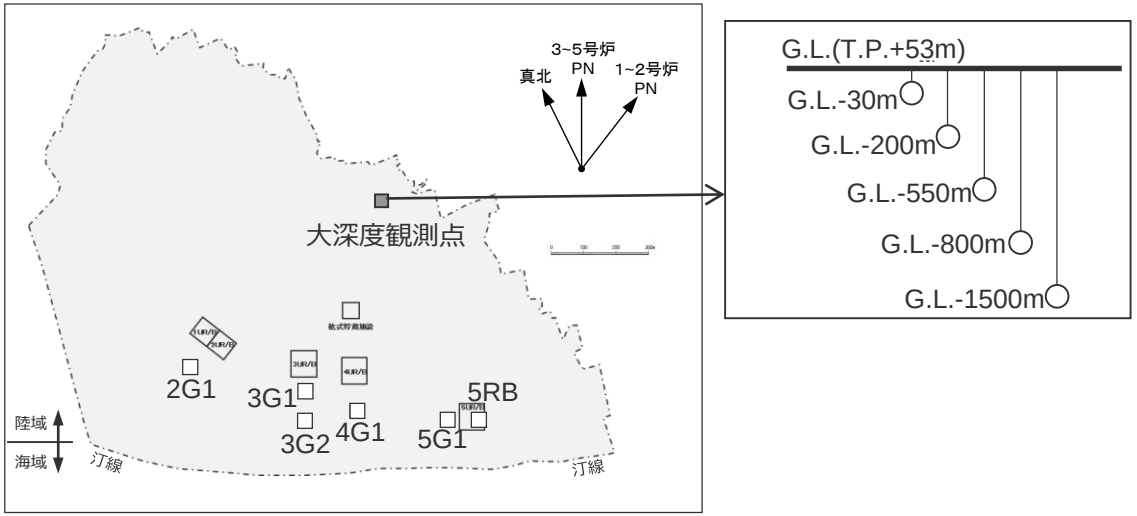
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.173一部修正

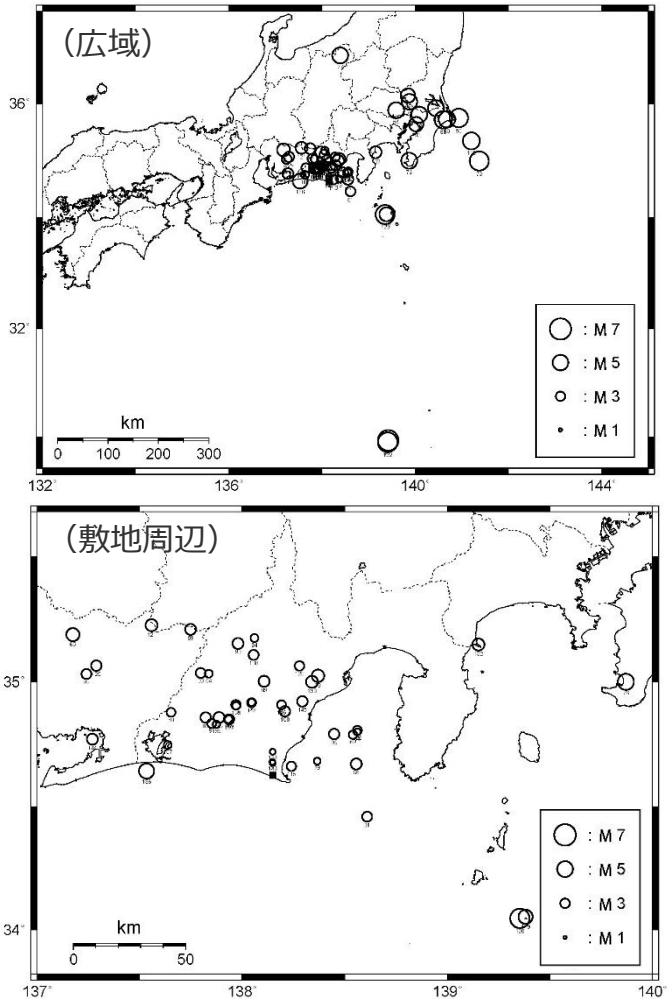
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②））

＜アプローチ②＞地震観測記録を用いた地盤モデルの推定（G.L.-1500m以浅）

○大深度観測点において、伝達関数（G.L.-1500m以浅）の観測値と理論値の差が最小となる地盤モデルを推定。



＜検討に用いる地震計の配置図（大深度観測点）＞



＜検討に用いる観測地震の震央分布＞
（観測分析期間：2012年3月14日～2013年10月6日）

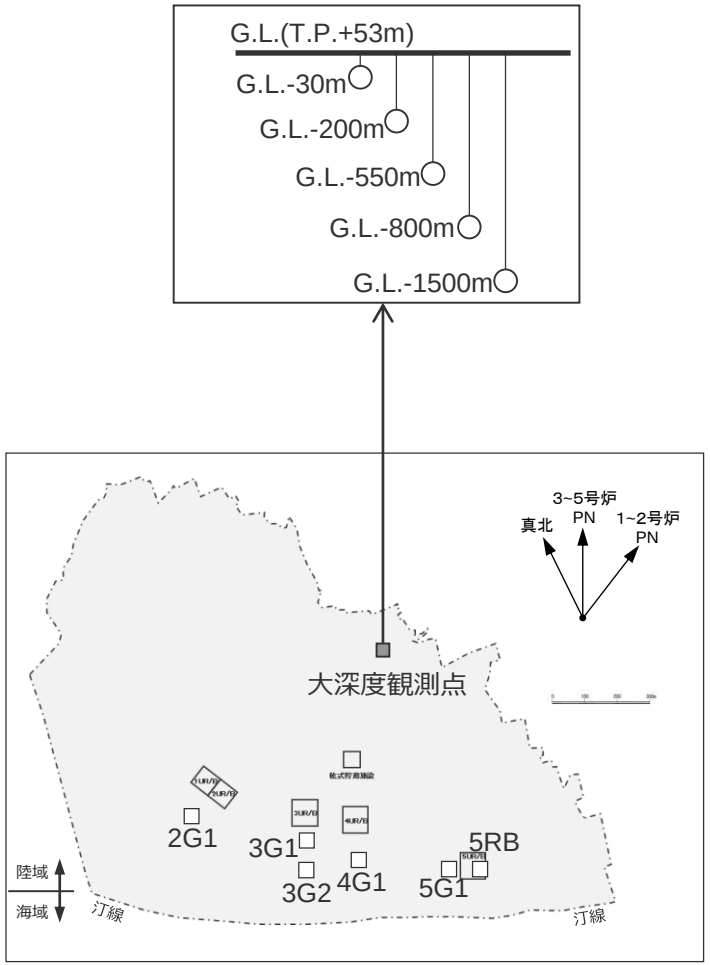
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

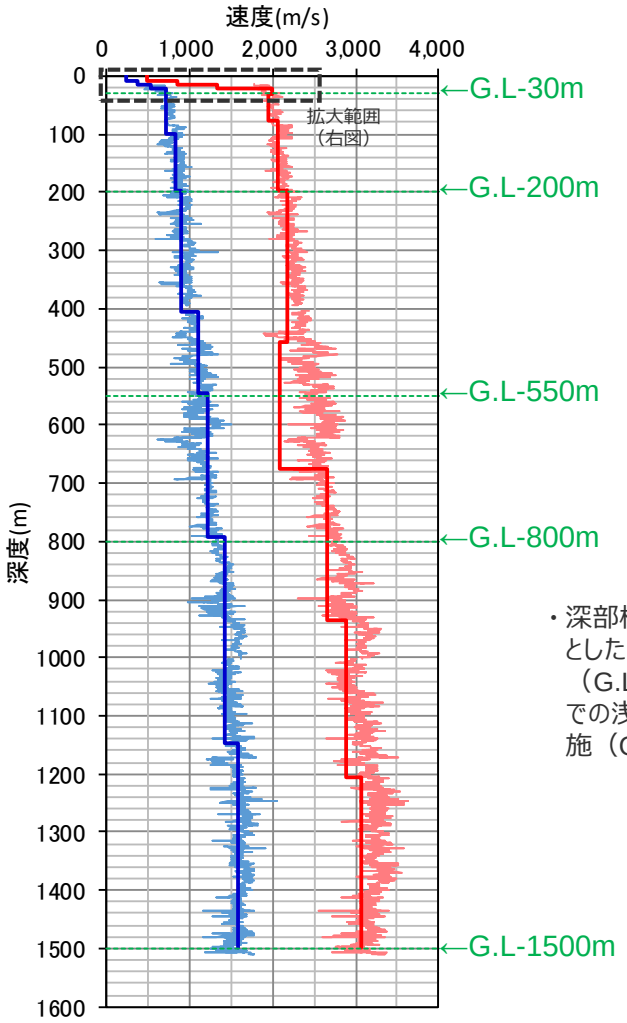
・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

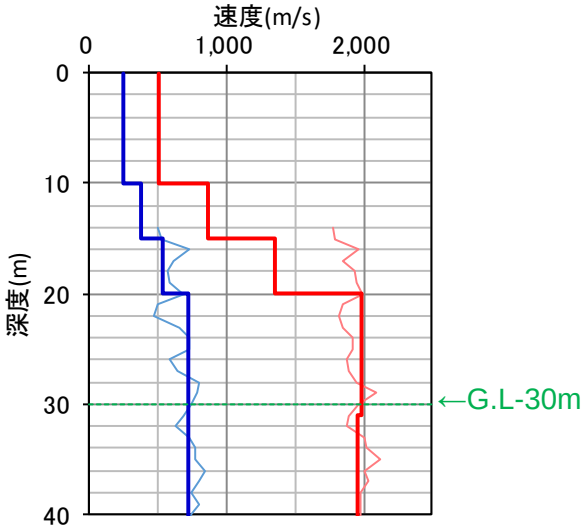
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②））







（拡大図）

・深部構造の把握を目的として、G.L.-1500m程度までを対象としたPS検層（ダウンホール法・サスペンション法）を実施（G.L.-30m以深の速度構造）。その後、G.L-30m程度までの浅部構造を対象としたPS検層（ダウンホール法）を実施（G.L.-30m以浅の速度構造）。

P波速度（ダウンホール法）
P波速度（サスペンション法）
S波速度（ダウンホール法）
S波速度（サスペンション法）

<大深度観測点の各地震計設置深さとPS検層結果との関係>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.174再掲

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②））

○大深度観測点におけるPS検層結果等に基づき、初期モデルと探索範囲を設定。
○観測地震における伝達関数（G.L.-1500m以浅）の逆解析により、地盤モデルを推定。

深さ GL-(m)	層厚 (m)	密度 (g/cm³)	初期モデル S波速度 (m/s)	探索範囲 S波速度 (m/s) 下限	探索範囲 S波速度 (m/s) 上限	探索範囲 h0 下限	探索範囲 h0 上限	探索範囲 α 下限	探索範囲 α 上限	最適化結果 S波速度 (m/s)	最適化結果 h0	最適化結果 α
0												
2	10	1.88	240	120	480					187		
10												
	5	1.88	380	190	760	0	1	0	1	296	1.000	0.484
15												
	5	1.88	540	270	1080					420		
20												
● 30	12	2.07	720	360	1440					560		
32												
▼ 67	69	2.06	720	360	1440					773		
101												
	97	2.09	830	415	1660	0	1	0	1	831	0.065	1.000
198												
● 200	209	2.12	900	450	1800					978		
407												
	139	2.09	1100	550	2200					1045		
546												
● 550	246	2.09	1230	615	2460					1201		
792												
● 800	355	2.27	1420	710	2840					1486		
1147						0	1	0	1		0.022	1.000
	353	2.31	1590	795	3180					1759		
● 1500												
	-	2.31	1590	795	3180					1759		

● ：地震計
▼ ：解放基盤表面

（水平動）

深さ GL-(m)	層厚 (m)	密度 (g/cm³)	初期モデル P波速度 (m/s)	探索範囲 P波速度 (m/s) 下限	探索範囲 P波速度 (m/s) 上限	探索範囲 h0 下限	探索範囲 h0 上限	探索範囲 α 下限	探索範囲 α 上限	最適化結果 P波速度 (m/s)	最適化結果 h0	最適化結果 α
0												
2	10	1.88	571	571	571					571		
10												
	5	1.88	982	982	982	0	1	0	1	982	1.000	0.447
15												
	5	1.88	1541	1541	1541					1541		
20												
● 30	11	2.07	1991	1991	1991					1991		
31												
▼ 67	46	2.06	1961	1961	1961					1961		
77												
	121	2.09	2239	2239	2239	0	1	0	1	2239	0.219	1.000
198												
● 200	260	2.12	2197	2197	2197					2197		
458												
● 550	216	2.09	2203	2203	2203					2203		
674												
● 800	263	2.23	2525	2525	2525					2525		
937												
	270	2.27	3037	3037	3037	0	1	0	1	3037	0.049	1.000
1207												
	293	2.31	3440	3440	3440					3440		
● 1500												
	-	2.31	3440	3440	3440					3440		

● ：地震計
▼ ：解放基盤表面

減衰定数モデル：$h(f)=h_0 f^{-\alpha}$

（鉛直動）

<推定した地盤モデル>

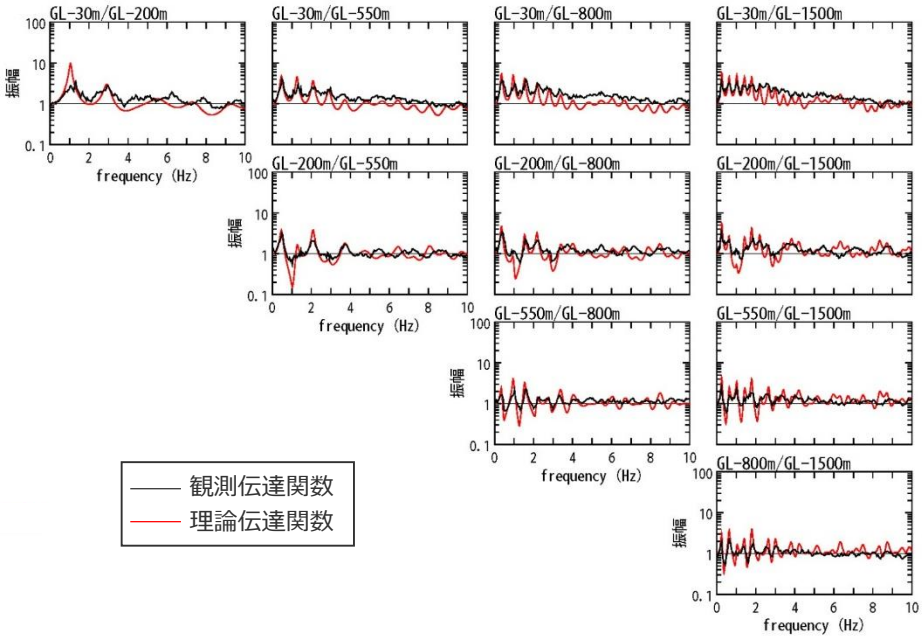
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.175一部修正

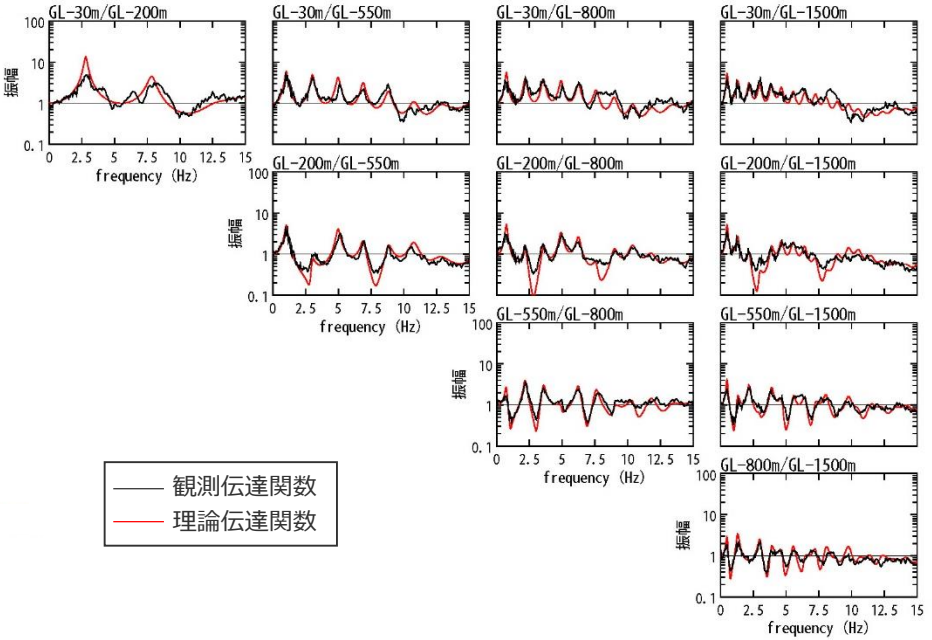
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②））

○観測地震におけるS波部（水平平均）の伝達関数の観測値と理論値の差が最小となるよう、地盤モデル（Vs, Qs）を推定。



<S波部（水平平均）の伝達関数の観測値と理論値の比較>

○観測地震におけるP波部（鉛直成分）の伝達関数の観測値と理論値の差が最小となるよう、地盤モデル（Vp, Qp）を推定。



<P波部（鉛直成分）の伝達関数の観測値と理論値の比較>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②））

○鉛直動の地盤モデルは、最適化解析をより安定化させるために、まずP波区間（鉛直成分）の観測伝達関数を用いた逆解析によりP波速度を推定して固定したうえで、S波区間（鉛直成分）の観測伝達関数を用いた逆解析により減衰の値の推定している。

	深さ GL-(m)	層厚 (m)	密度 (g/cm³)	初期モデル P波速度 (m/s)	探索範囲 P波速度 (m/s) 下限	探索範囲 P波速度 (m/s) 上限	探索範囲 h0 下限	探索範囲 h0 上限	探索範囲 α 下限	探索範囲 α 上限	最適化結果 P波速度 (m/s)	最適化結果 h0	最適化結果 α
	0												
●	2	10	1.88	500	250	1000					571		
	10												
		5	1.88	860	430	1720	0	1	0	1	982	1.000	0.501
	15												
		5	1.88	1350	675	2700					1541		
	20												
●	30	11	2.07	1990	995	3980					1991		
	31												
▼	67	46	2.06	1960	980	3920					1961		
	77						0	1	0	1		0.128	1.000
		121	2.09	2060	1030	4120					2239		
	198												
●	200	260	2.12	2170	1085	4340					2197		
	458												
●	550	216	2.09	2080	1040	4160					2203		
	674												
●	800	263	2.23	2660	1330	5320					2525		
	937												
		270	2.27	2880	1440	5760	0	1	0	1	3037	0.078	0.603
	1207												
		293	2.31	3070	1535	6140					3440		
●	1500												
		-	2.31	3070	1535	6140					3440		

● ：地震計
▼ ：解放基盤表面

<P波区間（鉛直成分）の伝達関数を対象とした逆解析結果>

	深さ GL-(m)	層厚 (m)	密度 (g/cm³)	初期モデル P波速度 (m/s)	探索範囲 P波速度 (m/s) 下限	探索範囲 P波速度 (m/s) 上限	探索範囲 h0 下限	探索範囲 h0 上限	探索範囲 α 下限	探索範囲 α 上限	最適化結果 P波速度 (m/s)	最適化結果 h0	最適化結果 α
	0												
	2	10	1.88	571	571	571					571		
	10												
		5	1.88	982	982	982	0	1	0	1	982	1.000	0.447
	15												
		5	1.88	1541	1541	1541					1541		
	20												
●	30	11	2.07	1991	1991	1991					1991		
	31												
▼	67	46	2.06	1961	1961	1961					1961		
	77						0	1	0	1		0.219	1.000
		121	2.09	2239	2239	2239					2239		
	198												
●	200	260	2.12	2197	2197	2197					2197		
	458												
●	550	216	2.09	2203	2203	2203					2203		
	674												
●	800	263	2.23	2525	2525	2525					2525		
	937												
		270	2.27	3037	3037	3037	0	1	0	1	3037	0.049	1.000
	1207												
		293	2.31	3440	3440	3440					3440		
●	1500												
		-	2.31	3440	3440	3440					3440		

減衰定数モデル：$h(f)=h_0 f^{-\alpha}$

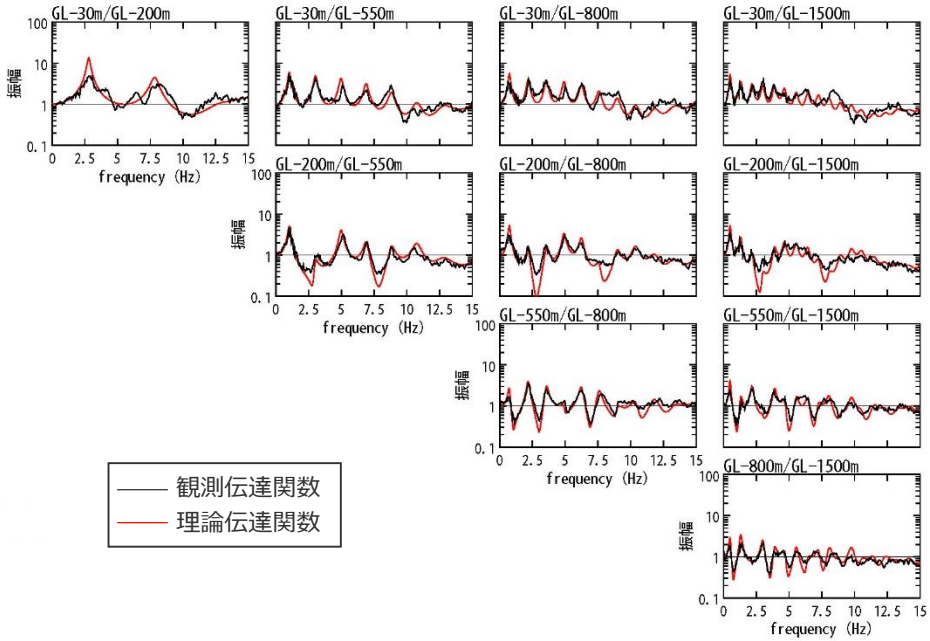
● ：地震計
▼ ：解放基盤表面

<S波区間（鉛直成分）の伝達関数を対象とした逆解析結果>

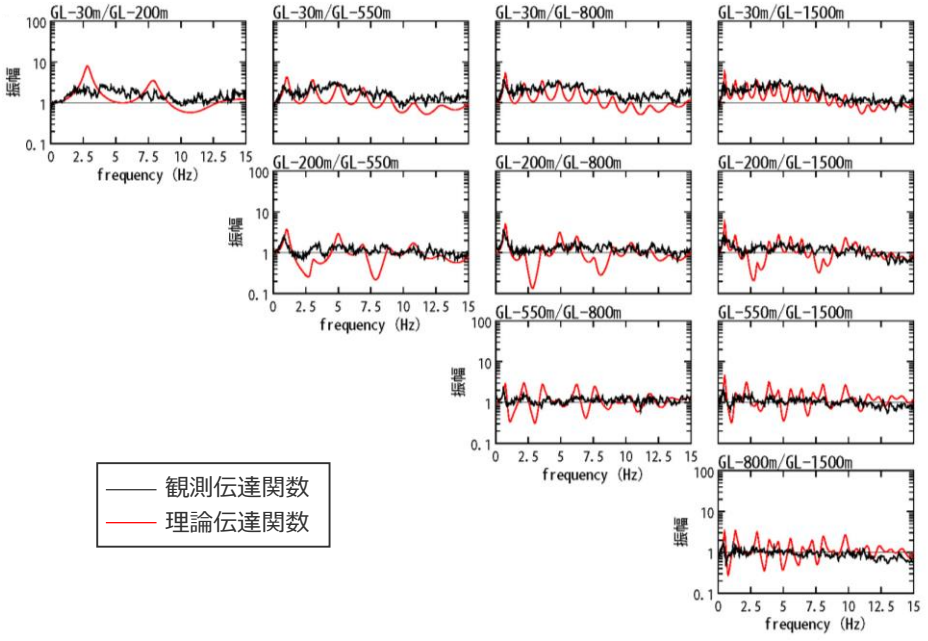
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②））



<P波部（鉛直成分）の伝達関数の観測値と理論値の比較>



<S波部（鉛直成分）の伝達関数の観測値と理論値の比較>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

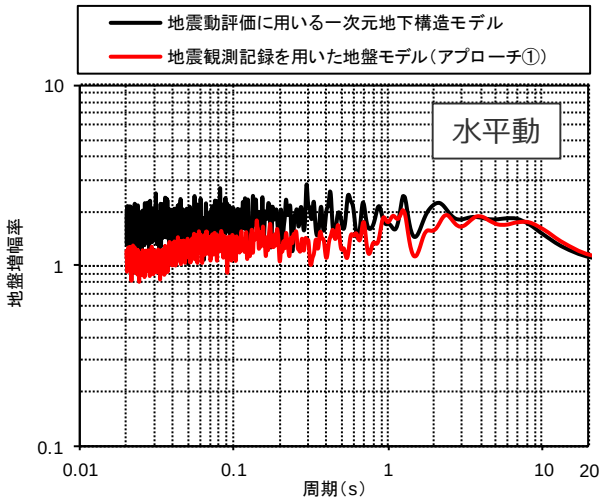
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（地盤増幅率の比較検討）

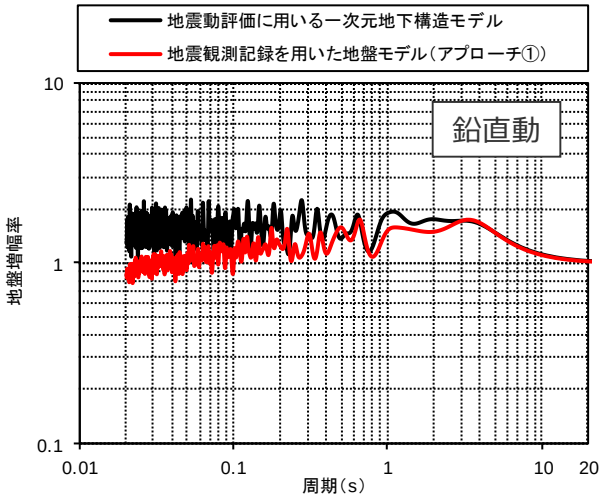
○地震動評価に用いる一次元地下構造モデルと地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①及びアプローチ②）との地盤増幅率の比較検討を行った。

○その結果、地盤増幅の周期特性については、両者に明瞭な卓越周期は見られず概ね一致しており、振幅については、地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの方が大きくなっている。

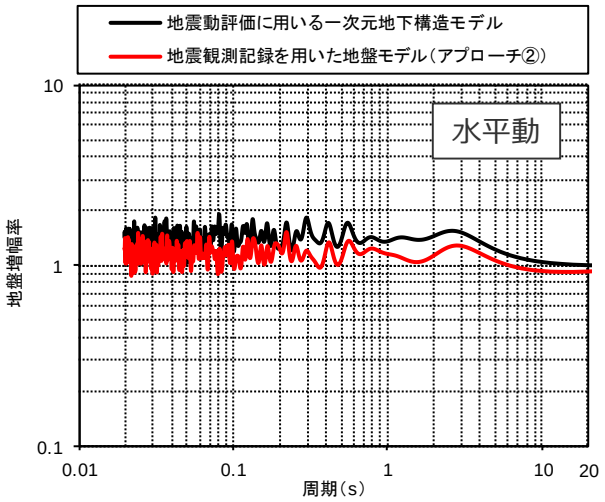
⇒**速度構造については両者が概ね同様**となっており、**Q値については地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの方が地震観測記録を用いて推定した地盤モデルに比べ保守的に設定**されていることを示している。

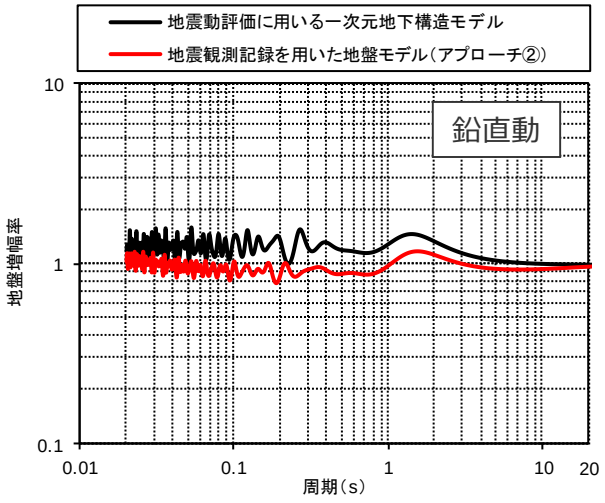
地震動評価に用いる一次元地下構造モデルと地盤モデル（アプローチ①）との地盤増幅率の比較（解放基盤表面／地震基盤面）





地震動評価に用いる一次元地下構造モデルと地盤モデル（アプローチ②）との地盤増幅率の比較（解放基盤表面／G.L.-1500m）





Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

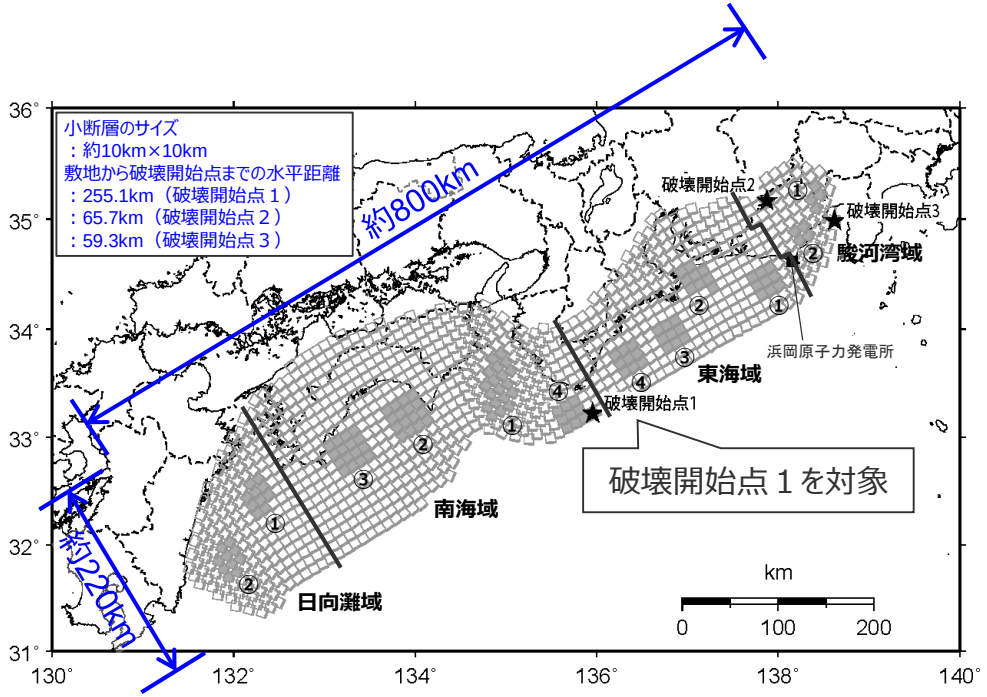
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.177再掲

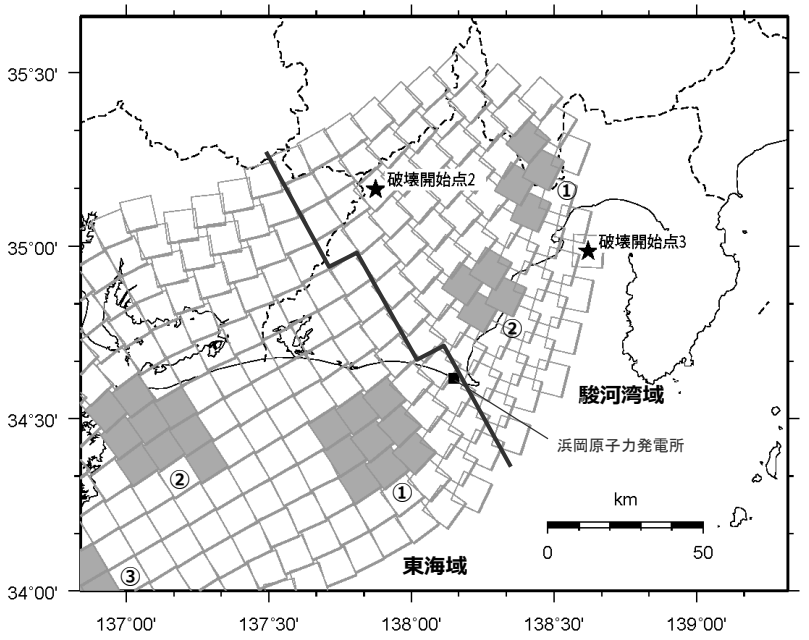
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（プレート間地震の地震動評価結果の比較検討）

○プレート間地震の検討用地震である南海トラフ最大クラス地震モデル（基本ケース）を例として、地震動評価に用いる一次元地下構造モデル及び地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①及びアプローチ②※1）をそれぞれ用いた統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、各評価結果の比較検討を行う。

※1：地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ②）はG.L.-1500m以浅のモデルであり、地震動評価に際して、これ以深は地震動評価に用いる一次元地下構造モデルを用いる。



（全体）



（敷地周辺）

<プレート間地震の検討用地震（南海トラフ最大クラス地震モデル（基本ケース）※2）>

※2：内閣府(2012)の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」で検討された南海トラフで想定される最大クラスの地震の強震断層モデルに基づき設定。

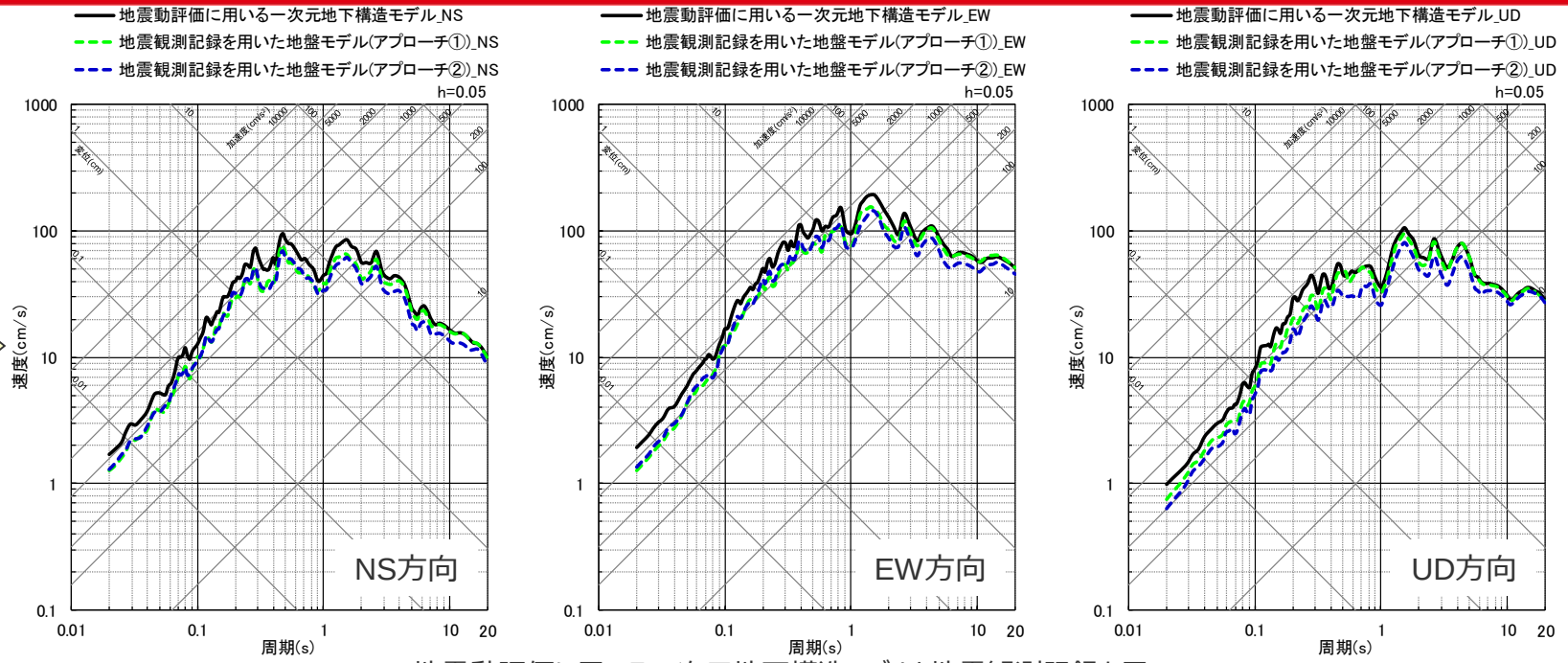
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.178再掲

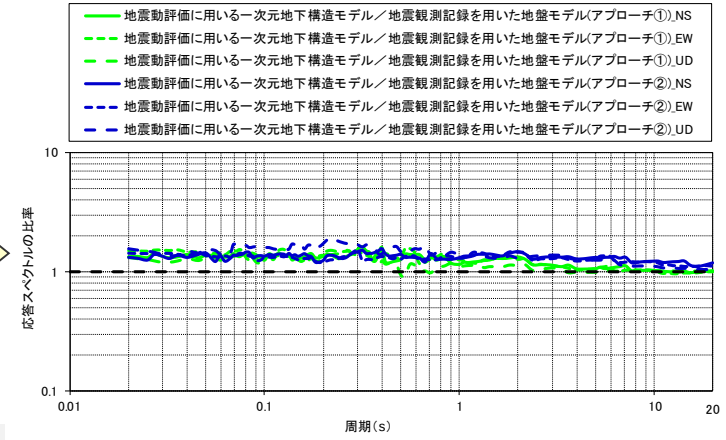
統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（プレート間地震の地震動評価結果の比較検討）

地震動評価結果の比較



地震動評価に用いる一次元地下構造モデルと地震観測記録を用いて推定した地盤モデル（アプローチ①、②）との応答スペクトル比を算出

応答スペクトルの比率



○地震動評価結果の周期特性については、いずれも同様となっており、振幅については、地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの方が大きくなっている。

⇒**速度構造についてはいずれも概ね同様**となっており、**Q値については地震動評価に用いる一次元地下構造モデルの方が地震観測記録を用いて推定した地盤モデルに比べ保守的に設定**されていることを示している。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

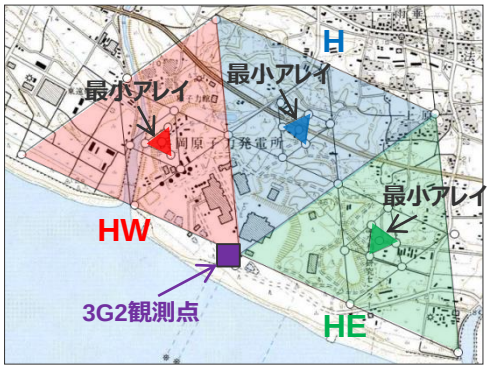
<補足説明資料①-10 統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

統計的グリーン関数法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（観測記録（Coda波部H/Vスペクトル、微動アレイ観測による分散曲線）との整合性）

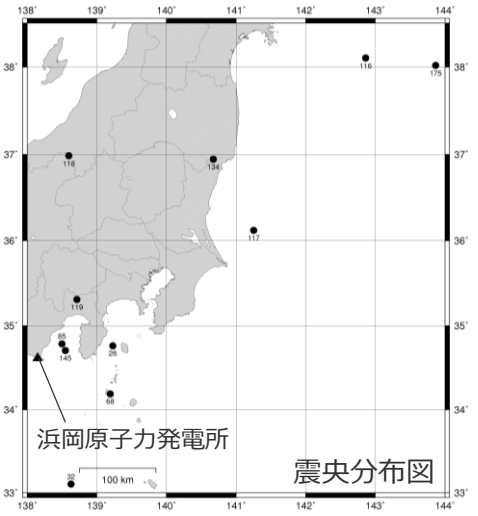
○Coda波部を対象とした観測H/Vスペクトル（観測値）と各モデルの理論H/Vスペクトル（理論値）との比較検討を行った結果、観測値に明瞭な卓越周期は見られず、各モデルの理論値は同様の傾向となっており、観測値と概ね整合している。

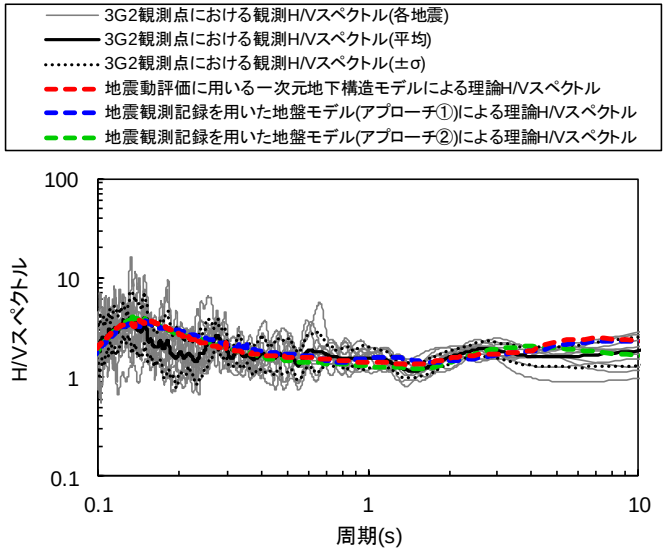
○微動アレイ観測による観測分散曲線（観測値）と各モデルの理論分散曲線（理論値）との比較検討を行った結果、各モデルの理論値は同様の傾向となっており、観測値と概ね整合している。

・観測H/Vスペクトルは3G2観測点の観測記録に基づき算出しており、各モデルの解放基盤表面以浅の表層地盤には3G2観測点における最適化地盤を用いる。
・微動アレイ観測の最小アレイ位置の表層地盤状況を踏まえて、各モデルの解放基盤表面以浅の表層地盤には上記の最適化地盤モデル（3G2観測点）に表層地盤（Vs200m/s、層厚6m）を付加。

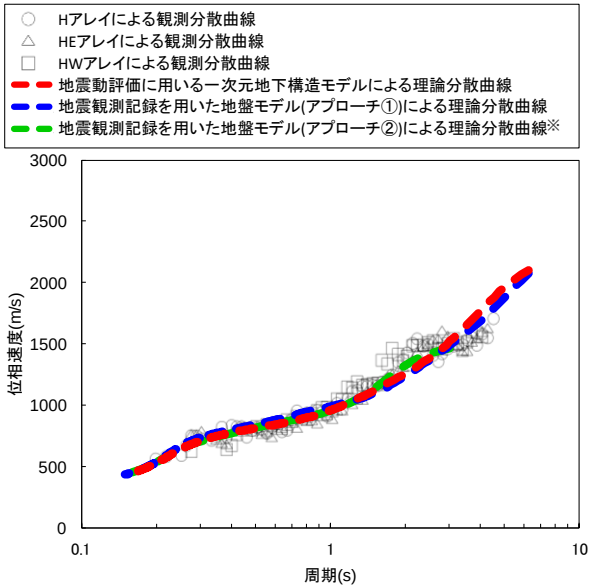


<微動アレイ観測及び3G2観測点の位置図>





<H/Vスペクトルの比較>



<分散曲線の比較>

※地盤モデル（アプローチ②）は、G.L.-1500m以浅のモデルであり、地震基盤面以浅のモデルであるその他のモデルと下端深さが異なるため、描画帯域を変更する。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

余 白

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

補足説明資料①-11
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.181一部修正

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（地震動評価に用いる一次元地下構造モデル（概要））

○断層モデルを用いた手法（統計的グリーン関数法（短周期領域）と波数積分法（長周期領域）によるハイブリッド合成法）による地震動評価に用いる一次元地下構造モデルは、地下構造調査により得られた詳細な地下構造データ等に基づき設定し、敷地の観測記録の再現検討等を踏まえてその妥当性を確認している※1 。

＜速度構造＞

・T.P.-14m～T.P.-2050mでは、S波速度及びP波速度の両方が得られる浅部及び大深度ボーリング調査のPS検層結果（ダウンホール法）に基づき、S波速度及びP波速度を設定する。

・T.P.-2050m以深について、P波速度は屈折法地震探査結果（海陸統合）に基づき設定し、S波速度は、T.P.-5050m以浅では各調査結果に基づき算定したVp－Vs関係式（Vs=0.68Vp-580(m/s)）を、T.P.-5050m以深ではObana et al.(2004)によるVp-Vs関係式（Vp/Vs=1.78）を用いて、P波速度から推定する。

＜密度＞

・各調査結果との対応が良いGardner et al.(1974)のVp－ρ関係式（$\rho=0.31Vp^{0.25}$(g/cm^3)）を用いて、P波速度から推定する。

＜Q値＞

・統計的グリーン関数法（短周期の地震動評価）：$100f^{0.7}$※2、波数積分法（長周期の地震動評価）：Qs=Vs/10、Qp=2Qs※3

※1 一次元地下構造モデルの設定に係る妥当性確認等の詳細な説明は、補足説明資料①-10,11参照。
※2 中央防災会議(2001a)、 ※3 原子力安全基盤機構(2007)、新色・山中(2013)。

解放基盤表面

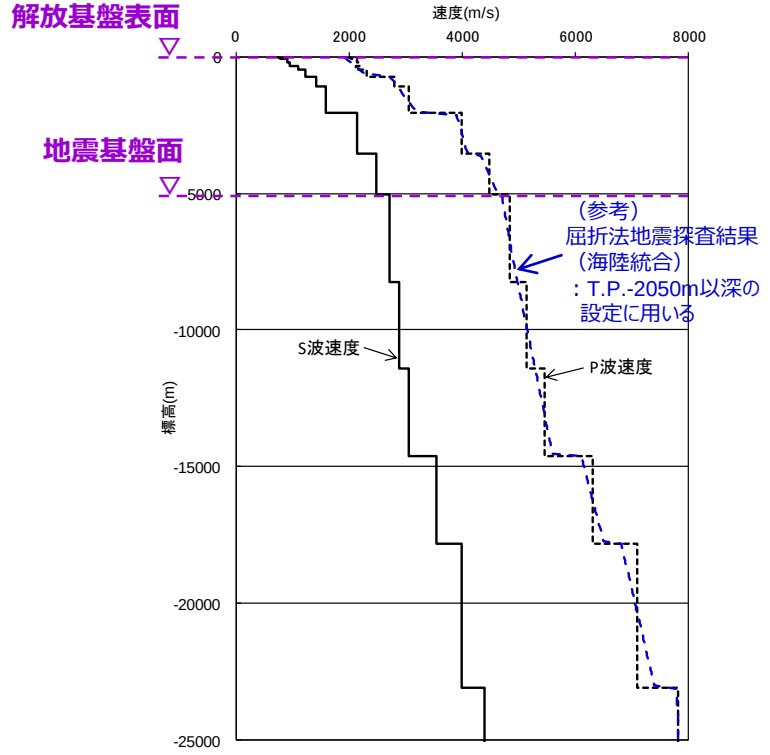
統計的グリーン関数法で用いる地下構造（地震基盤以浅）

地震基盤面

波数積分法で用いる地下構造（全層）

層	標高 (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm^3)	SGF法※4	波数積分法※5	
					Qs,Qp	Qs	Qp
1	-14	740	2000	2.07	$100f^{0.7}$	74	148
2	-32	790	2030	2.08	$100f^{0.7}$	79	158
3	-62	830	2070	2.09	$100f^{0.7}$	83	166
4	-92	910	2140	2.11	$100f^{0.7}$	91	182
5	-192	960	2180	2.12	$100f^{0.7}$	96	192
6	-354	1100	2110	2.10	$100f^{0.7}$	110	220
7	-493	1230	2320	2.15	$100f^{0.7}$	123	246
8	-739	1420	2790	2.25	$100f^{0.7}$	142	284
9	-1094	1590	3060	2.31	$100f^{0.7}$	159	318
10	-2050	2150	3990	2.46	$100f^{0.7}$	215	430
11	-3550	2470	4470	2.53	$100f^{0.7}$	247	494
12	-5050	2720	4830	2.58	-	272	544
13	-8240	2880	5130	2.62	-	288	576
14	-11400	3060	5450	2.66	-	306	612
15	-14600	3540	6300	2.76	-	354	708
16	-17800	3990	7100	2.85	-	399	798
17	-23100	4390	7810	2.91	-	439	878

※4 統計的グリーン関数法（短周期の地震動評価）、※5 波数積分法（長周期の地震動評価）



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（ ）は、一部修正箇所を示す。
・左下の記載を削除。

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.182再掲

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（検討概要）

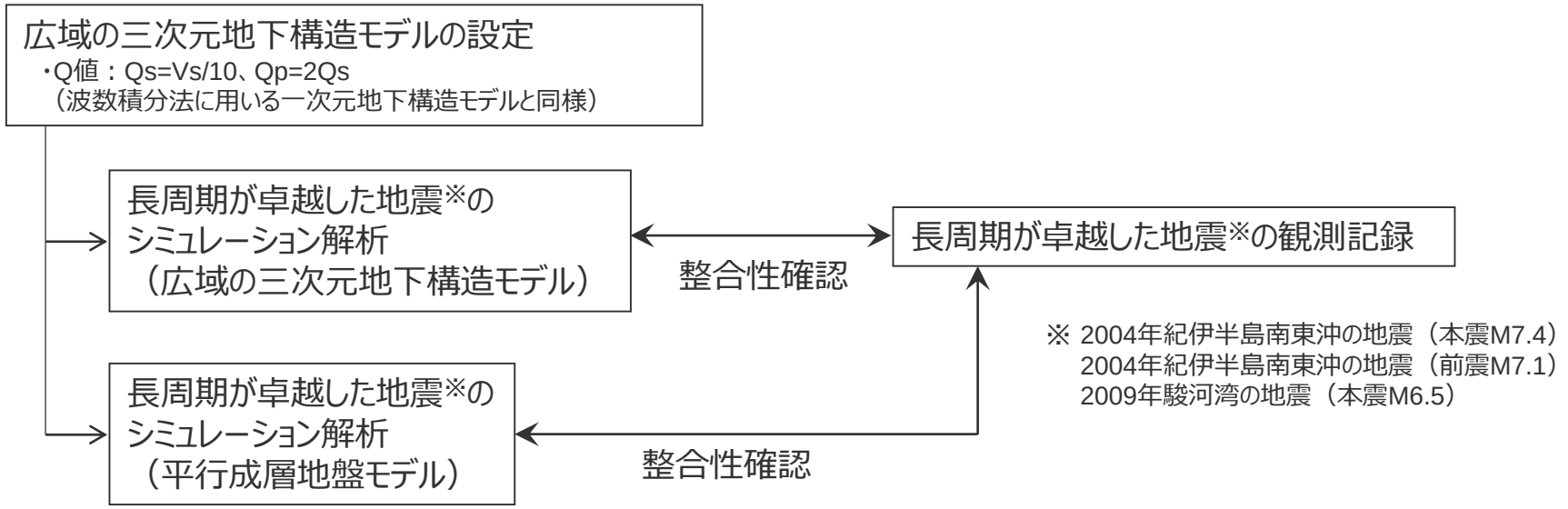
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定

○波数積分法（長周期の地震動評価）に用いる一次元地下構造モデルについて、速度構造は統計的グリーン関数法と同様の方法で設定し、**Q値はQs=Vs/10、Qp=2Qsとして設定**している。

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定の妥当性確認

○長周期の地震動が卓越した、2004年紀伊半島南東沖の地震（本震M7.4及び前震M7.1）、2009年駿河湾の地震（本震M6.5）を対象として、**波数積分法に用いる一次元地下構造モデルと同様のQ値**を用いて、**広域の三次元地下構造モデル及び平行成層地盤モデルによるシミュレーション解析**を行い、**観測記録の再現性を検討**する。

⇒波数積分法に用いる一次元地下構造モデル（Q値や速度構造）の設定の妥当性を確認する。



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（概要））

○敷地周辺の三次元地下構造モデル（地震基盤以浅）を踏まえて、2004年紀伊半島南東沖の地震（本震及び前震）や2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録のシミュレーション解析を行うため、モデル化範囲を拡張した広域の三次元地下構造モデルを設定する。

【既往報告】
敷地周辺の三次元地下構造モデル
（解放基盤表面～地震基盤）

長周期の地震動を評価するため
・表層地盤及び地震基盤以深の層を追加
・駿河湾域～東南海域～南海域～日向灘域にかけてモデル化範囲を拡張

【新規報告】
広域の三次元地下構造モデル※1
（表層地盤～地震基盤～マントル）

三次元有限差分法によるシミュレーション解析

長周期の地震動が卓越した地震※2のシミュレーション解析

フィードバック

整合性確認

長周期の地震動が卓越した地震※2の観測記録

※1： Q値はQs=Vs/10、Qp=2Qsとして設定

※2： 2004年紀伊半島南東沖の地震（本震M7.4）
2004年紀伊半島南東沖の地震（前震M7.1）
2009年駿河湾の地震（本震M6.5）

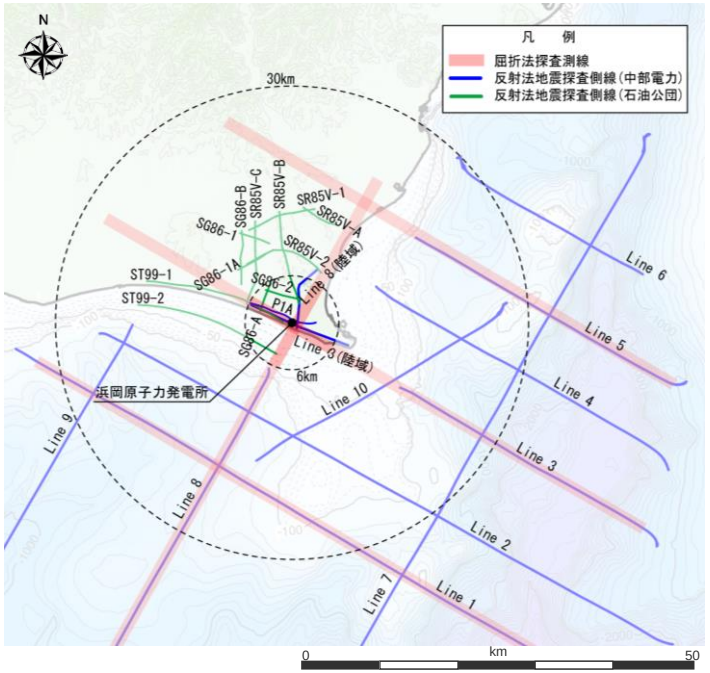
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.184一部修正

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（敷地周辺の三次元地下構造モデル）

○敷地周辺の深部からやや浅部を対象とした地下構造調査（屈折法地震探査、反射法地震探査、大深度ボーリング調査・物理検層、既往調査等）の結果に基づき、敷地周辺の地震基盤以浅の深部三次元地下構造モデルを作成。

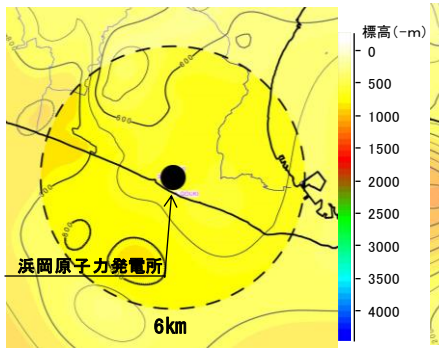


<敷地周辺の地下構造調査>

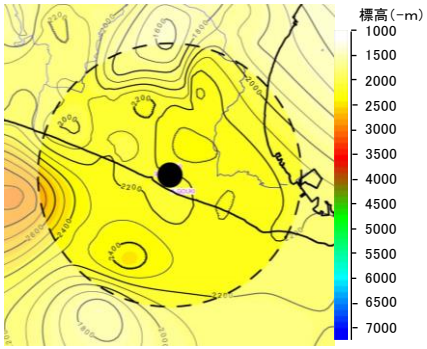
深部三次元地下構造モデルの作成

<各層の物性値>

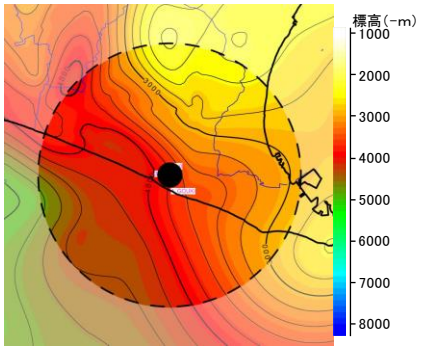
層区分	上面			下面		
	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 (g/cm³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 (g/cm³)
A層	700	2000	2.07	1330	2560	2.21
B層	1330	2560	2.21	1580	3180	2.33
C層	2130	3990	2.46	2200	4080	2.48
D層	2350	4310	2.51	2560	4610	2.56
E層	2620	4700	2.57	3230	5600	2.68



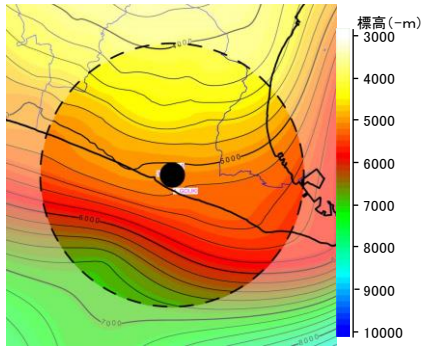
A層下面



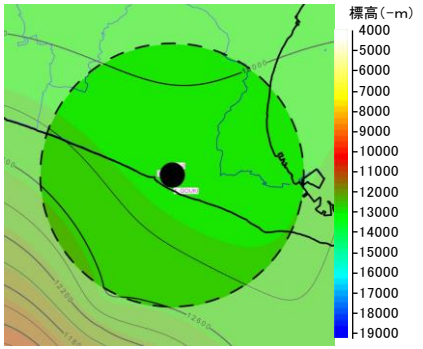
B層下面



C層下面



D層下面



E層下面

<各層境界のコンター>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・左図にスケール、方位を追加。

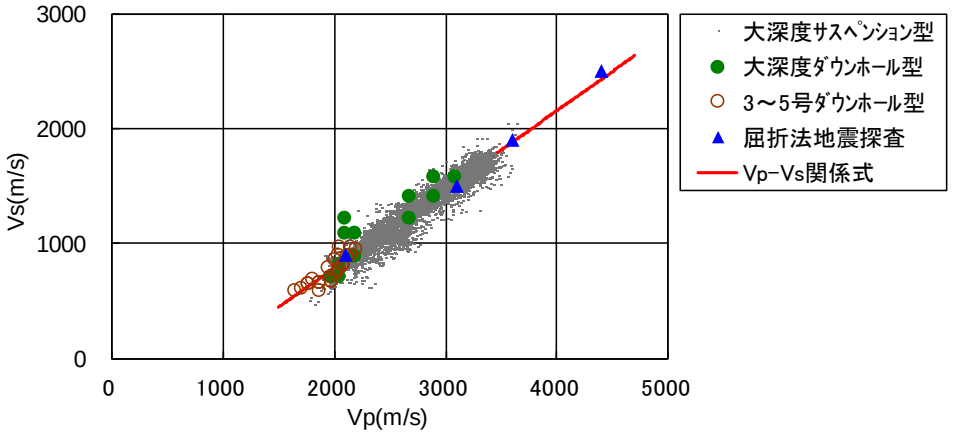
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.185再掲

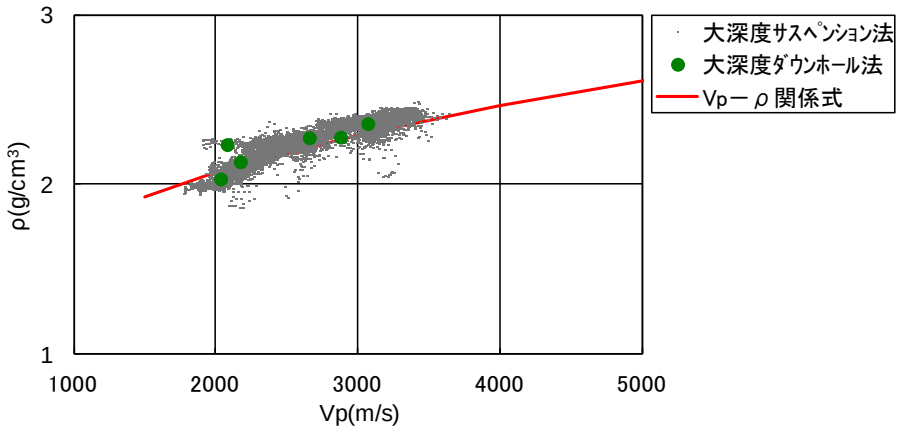
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（概要））

<各層の物性値の設定方法>

層	物性値	設定方法
A層～B層	P波速度	・大深度ボーリングのPS検層結果を用いて設定する。
	S波速度	
	密度	・各調査結果との対応が良いVp－ρ関係式を用いてP波速度から推定する。 Vp－ρ関係式：$\rho=0.31Vp^{0.25}$(g/cm^3)（Gardner et al.(1974)）
C層～E層	P波速度	・屈折法地震探査結果を用いて設定する。
	S波速度	・各調査結果に基づき作成したVp－Vs関係式を用いてP波速度から推定する。 Vp－Vs関係式：Vs=0.68Vp－580(m/s)
	密度	・A層～B層の設定方法と同じ。



<Vp－Vs関係式と各調査結果との対応>



<Vp－ρ関係式と各調査結果との対応>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（物性値の設定））

：敷地周辺の三次元地下構造モデル（前述）から追加する層区分

Q値の設定：Qs=Vs(m/s)/10、Qp=2Qs

No.	層区分		上面 Vp (km/s)	上面 Vs (km/s)	上面 密度 (g/cm^3)	下面 Vp (km/s)	下面 Vs (km/s)	下面 密度 (g/cm^3)
1	Vs350	表層地盤の物性値（地震調査委員会(2012b)による地下構造モデルを踏まえて設定）	1.70	0.35	1.99	1.70	0.35	1.99
2	Vs400		1.70	0.40	1.99	1.70	0.40	1.99
3	Vs500		1.80	0.50	2.02	1.80	0.50	2.02
4	Vs600		2.00	0.60	2.07	2.00	0.60	2.07
5	A1	敷地周辺の三次元地下構造モデル（前述）と同様の設定	2.00	0.70	2.07	2.14	0.86	2.11
6	A2		2.14	0.86	2.11	2.28	1.02	2.14
7	A3		2.28	1.02	2.14	2.42	1.17	2.17
8	A4		2.42	1.17	2.17	2.56	1.33	2.21
9	B1		2.56	1.33	2.21	2.77	1.41	2.25
10	B2		2.77	1.41	2.25	2.97	1.50	2.29
11	B3		2.97	1.50	2.29	3.18	1.58	2.33
12	C		3.99	2.13	2.46	4.08	2.20	2.48
13	D		4.31	2.35	2.51	4.61	2.56	2.55
14	E1		4.70	2.62	2.57	5.15	2.93	2.63
15	E2		5.15	2.93	2.63	5.60	3.23	2.68
16	Conrad面まで	地震基盤以深の物性値（地震調査委員会(2012b)による地下構造モデルを踏まえて設定）	6.00	3.47	2.73	6.40	3.70	2.77
17	Moho面まで		6.41	3.71	2.77	6.83	3.95	2.82
18	F（陸域マントル）		7.80	4.51	2.91	7.80	4.51	2.91
19	G1（海洋性地殻第2層）		5.00	2.90	2.40	5.00	2.90	2.40
20	G2（海洋性地殻第3層）		6.00	3.47	2.73	7.40	4.28	2.88
21	H（海域マントル）		8.00	4.62	2.93	8.00	4.62	2.93

解放基盤表面→（A1層上面）

地震基盤面→（E1層上面）

プレート境界面→（G1層上面）

・層境界の分割は地震調査委員会(2012b)による地下構造モデルを踏まえて設定。
・密度はGardner et al.(1974)に基づき設定（G1層のみ地震調査委員会(2012b)による地下構造モデルに基づき設定）。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

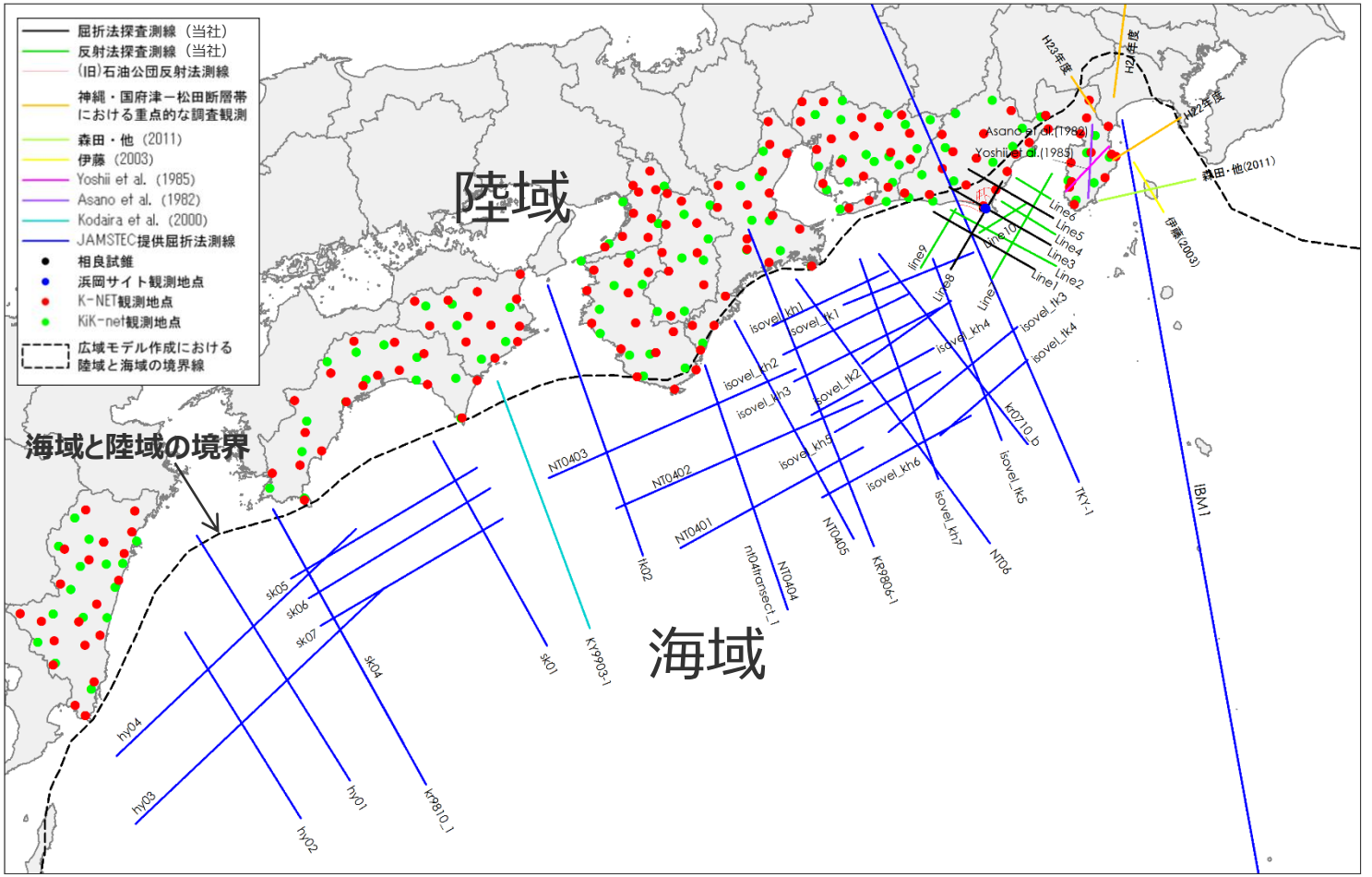
・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（層境界の設定））

第992回
資料1-3 p.187再掲

○層境界について、海域は主に弾性波探査の探査結果を踏まえて設定し、陸域は地震調査委員会(2012b)に基づき作成した地下構造モデルをベースに、H/Vスペクトルによるモデルチューニングを踏まえて設定する。



・海域部と陸域部の境界については、弾性波探査の探査結果（海域）と地震調査委員会(2012b)による地下構造モデル（陸域）との連続性を踏まえて設定する。

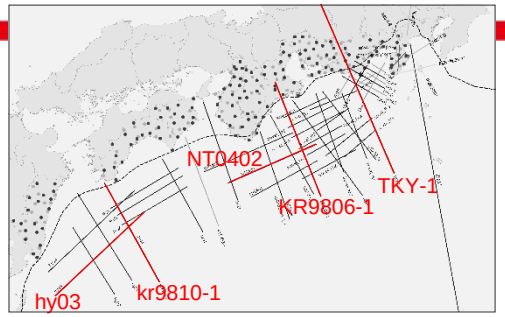
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

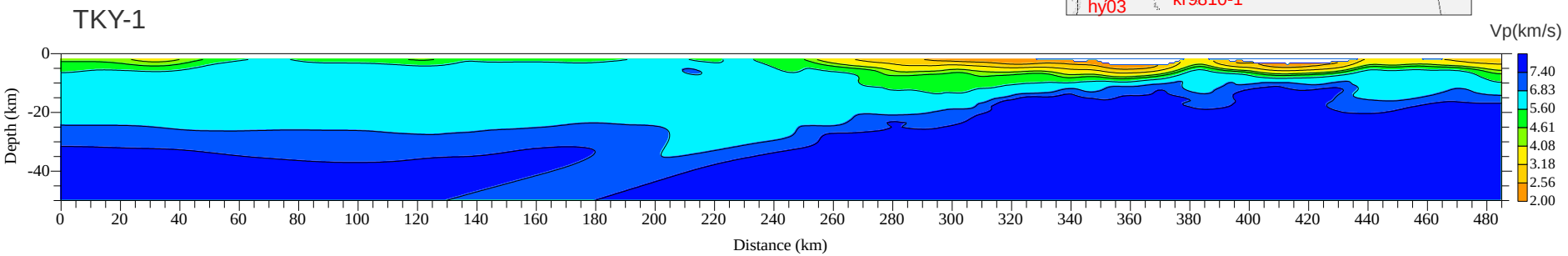
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

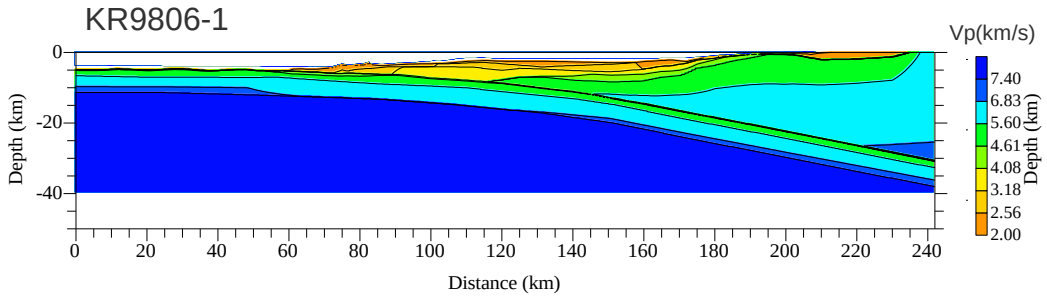
第992回
資料1-3 p.188再掲

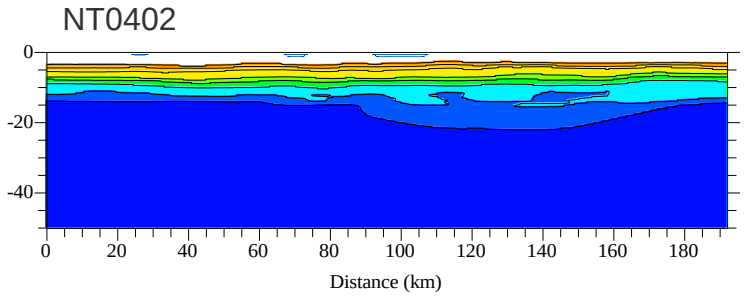
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（調査結果））

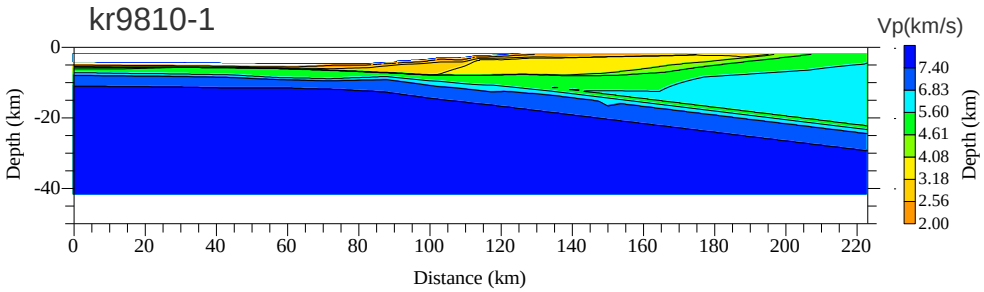
○海域の層境界の設定に用いる弾性波探査の探査結果（P波速度構造）の例を以下に示す。

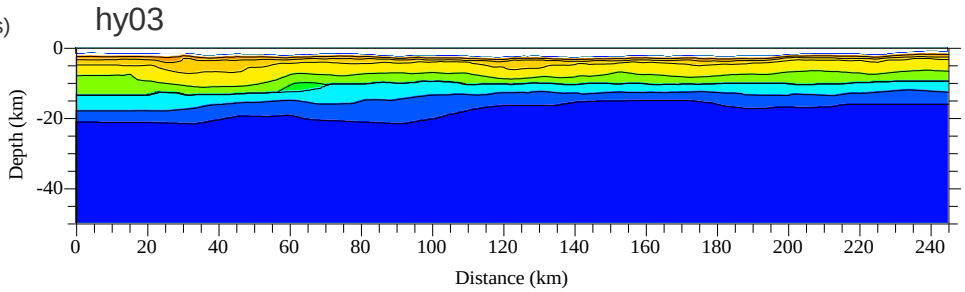










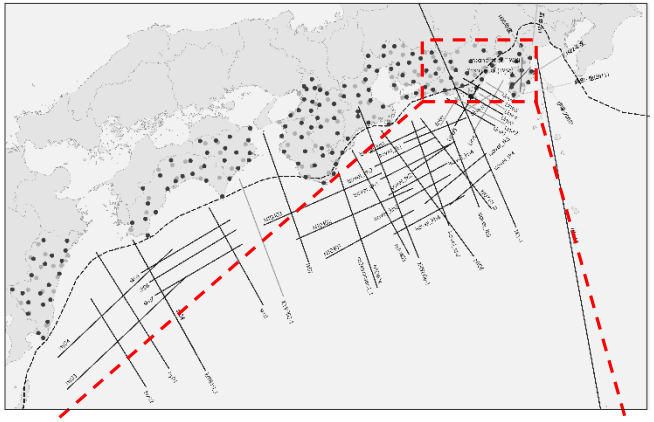


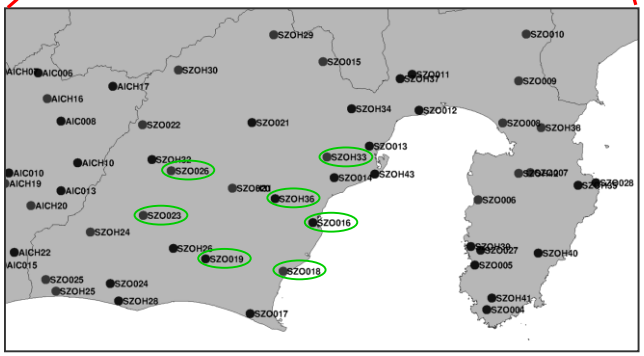
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定

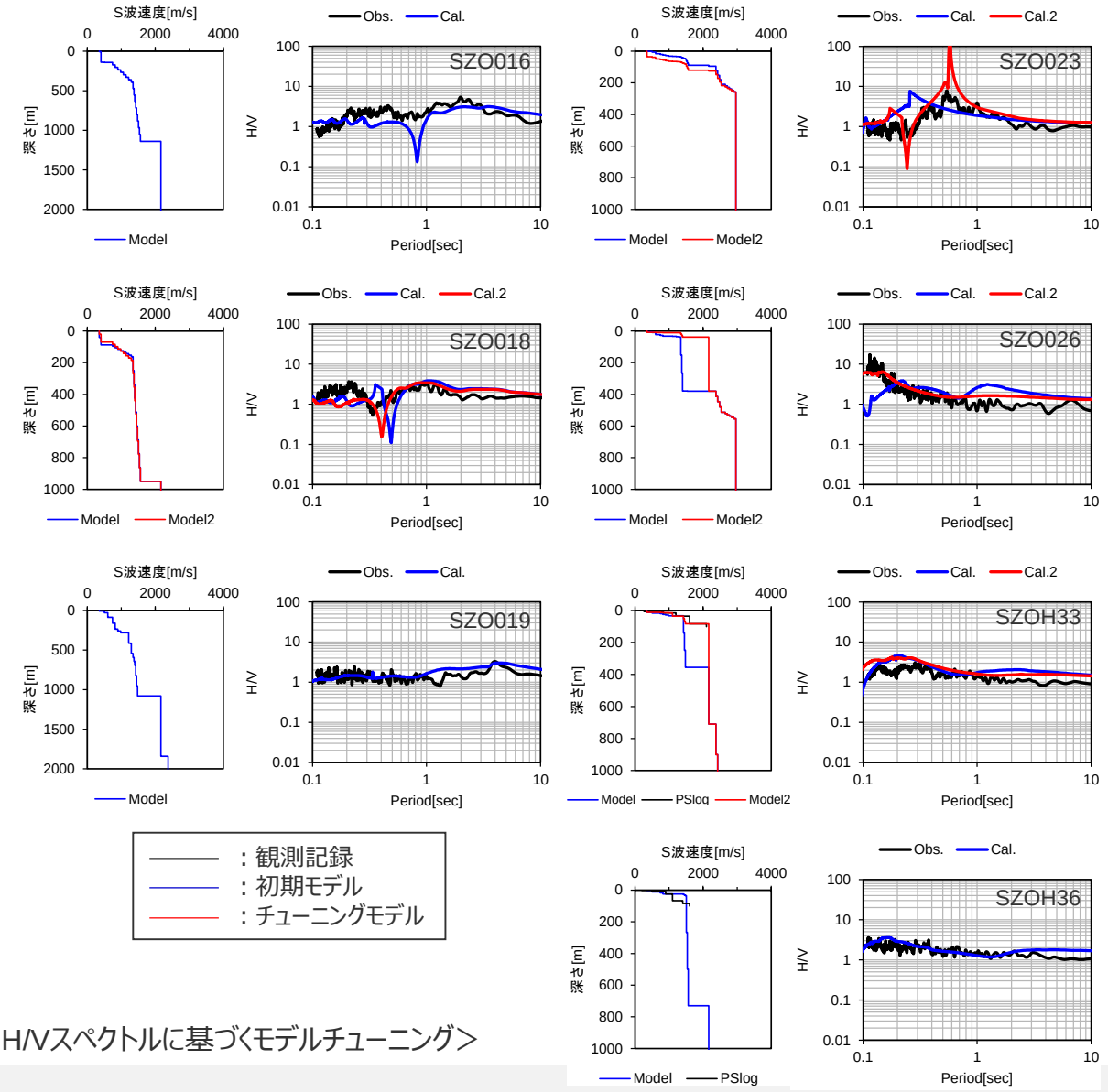
（広域の三次元地下構造モデル（H/Vスペクトルに基づくモデルチューニング））

○陸域において、地震調査委員会(2012b)に基づき作成した地下構造モデルをベースとして、H/Vスペクトルによりモデルをチューニングした例を以下に示す。





：H/Vスペクトルチューニング例を示す観測点



：観測記録
：初期モデル
：チューニングモデル

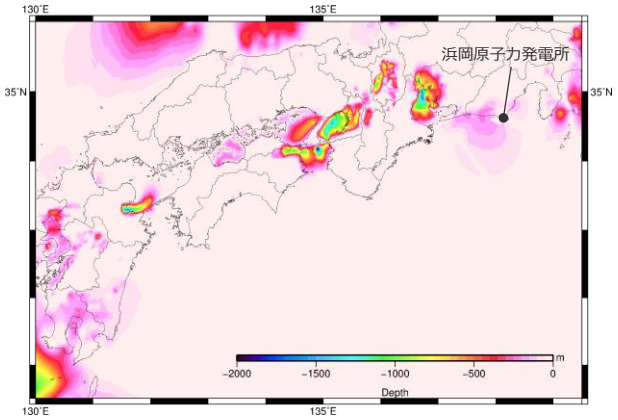
<H/Vスペクトルに基づくモデルチューニング>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

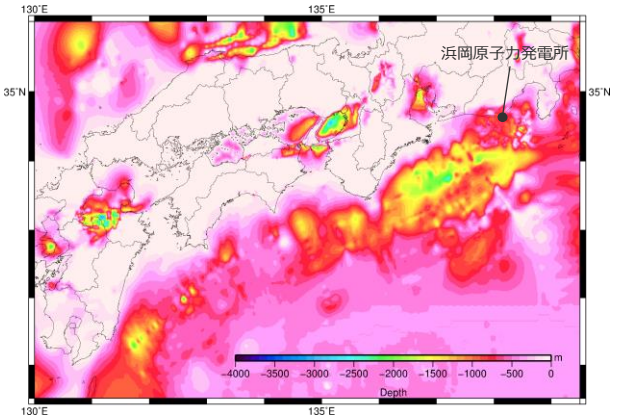
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.190再掲

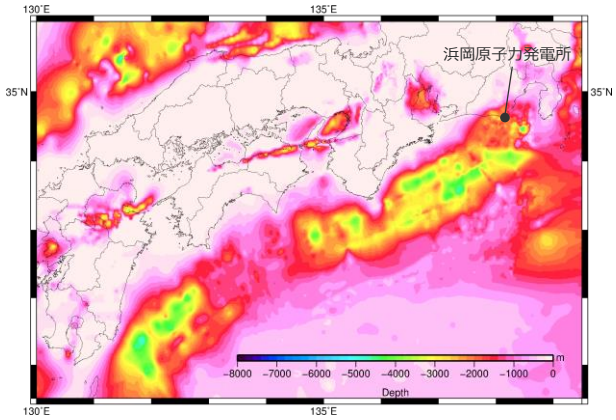
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（各層境界のコンター））



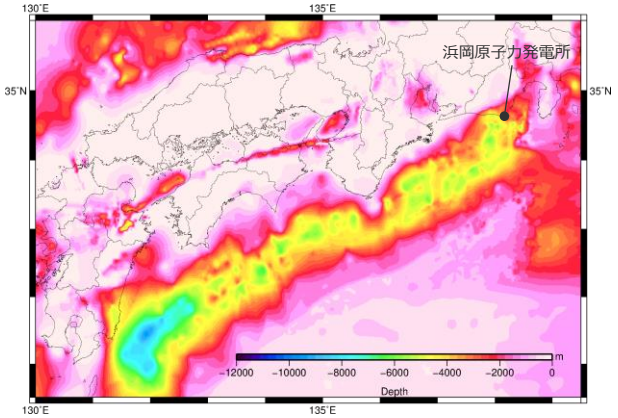
表層下面
（L4層下面）



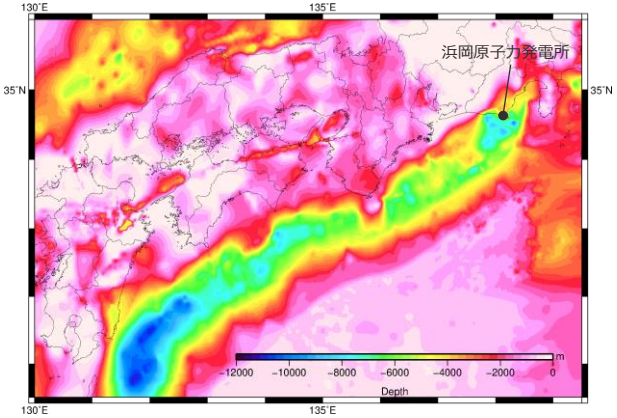
A層（A4層）下面
（L8層下面）



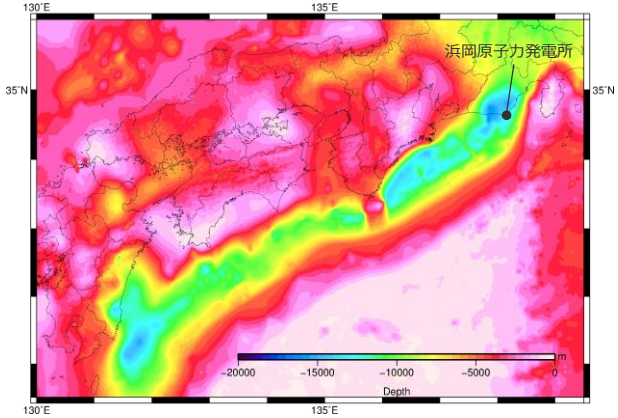
B層（B3層）下面
（L11層下面）



C層下面
（L12層下面）



D層下面
（L13層下面）
<地震基盤面>

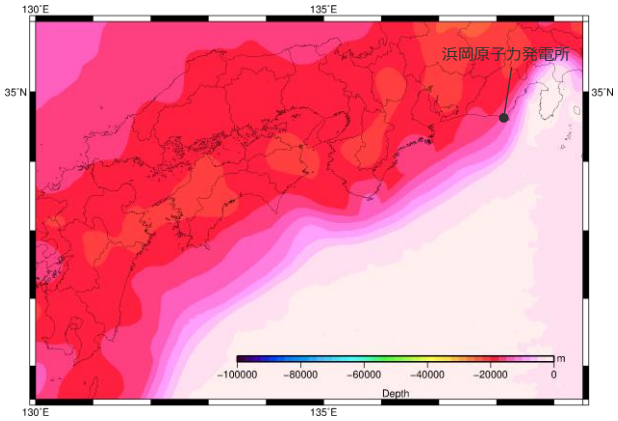


E層（E2層）下面
（L15層下面）

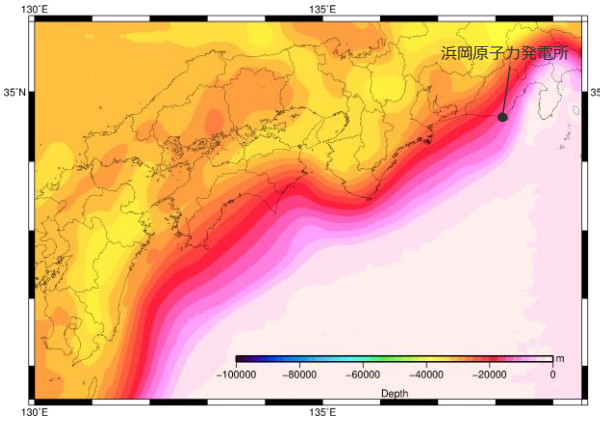
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

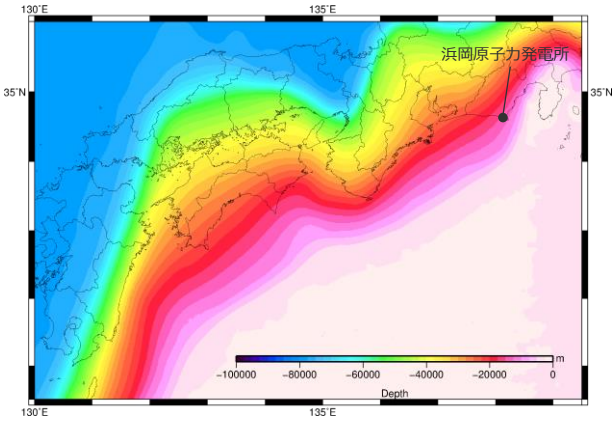
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定
（広域の三次元地下構造モデル（各層境界のコンター））



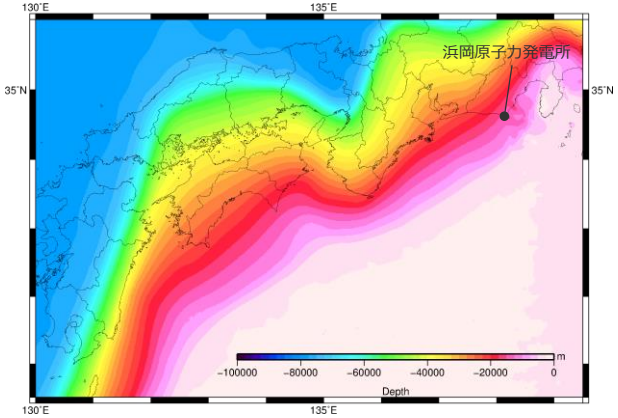
コンラッド面※1
（L16層下面）



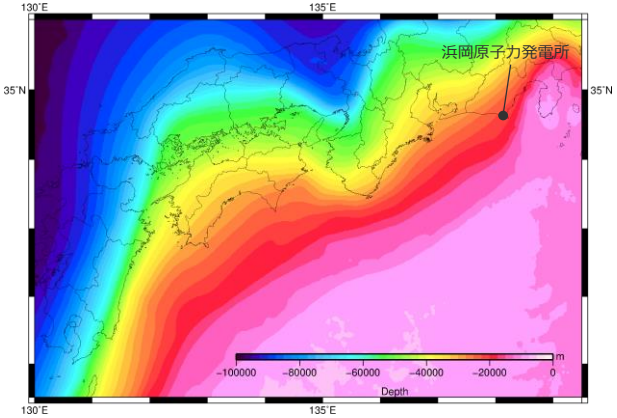
モホ面※2
（L17層下面）



F層（陸域マントル）下面
（L18層下面）
<プレート境界面※3>



G1層下面
（L19層下面）



G2層下面
（L20層下面）

※1：Katsumata(2010)による
※2：Katsumata(2010)による
※3：内閣府(2012)による

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証
（観測記録のシミュレーション解析（概要））

○長周期の地震動が卓越した、2004年紀伊半島南東沖の地震（本震M7.4及び前震M7.1）、2009年駿河湾の地震（本震M6.5）を対象として、三次元有限差分法に基づき、**波数積分法に用いる一次元地下構造モデルと同様のQ値**を用いて、**広域の三次元地下構造モデル（モデル①）及び平行成層地盤モデル（モデル②・③）によるシミュレーション解析**を行い、**観測記録の再現性を検討**する。

○具体的には、まず、敷地やその周辺等の観測点を対象とした、広域の三次元地下構造モデル（モデル①）による観測記録のシミュレーション解析を行い、次に、敷地の観測点を対象とした、平行成層地盤モデル（モデル②・③）による観測記録のシミュレーション解析を行う。

＜解析対象とする地下構造モデル（Q値はいずれもQs=Vs/10、Qp=2Qs）＞
- モデル①：広域の三次元地下構造モデル
- モデル②：モデル①における敷地直下の地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル
- モデル③：波数積分法に用いる地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル

モデル①～③のシミュレーション結果が観測記録を再現できることを確認する。

||

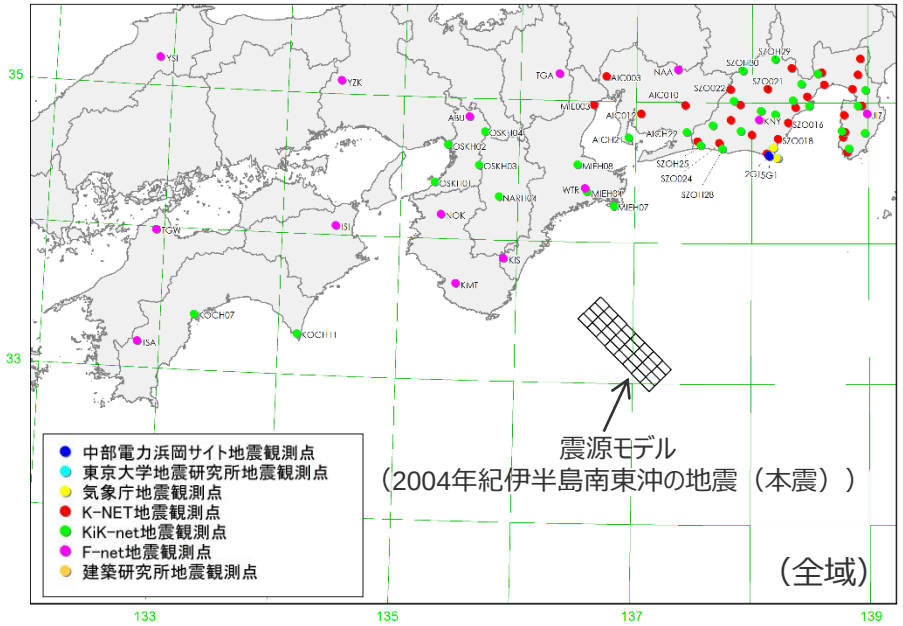
波数積分法に用いる一次元地下構造モデル（Q値や速度構造）の設定の妥当性を確認する。

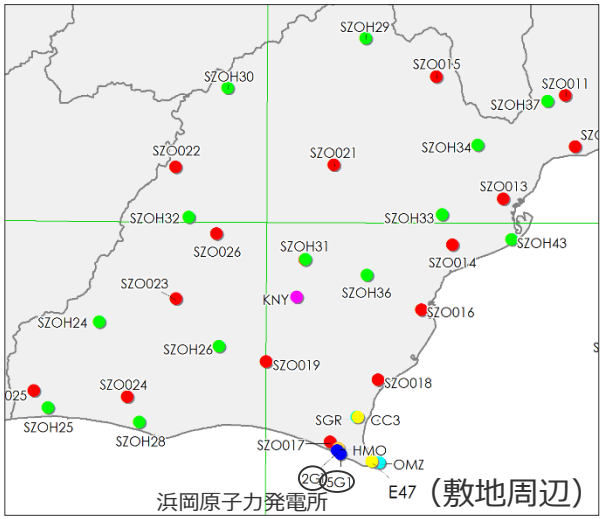
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

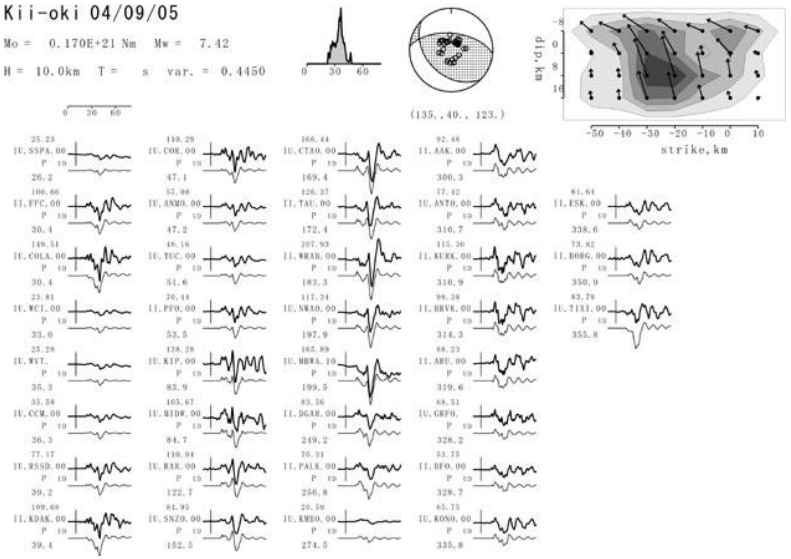
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（広域の三次元地下構造モデル（解析条件）：2004年紀伊半島南東沖の地震（本震））





<観測点と震源モデルとの関係>



<本解析に用いるすべり分布>
（EIC地震学ノートNo.153による）

<解析諸元>

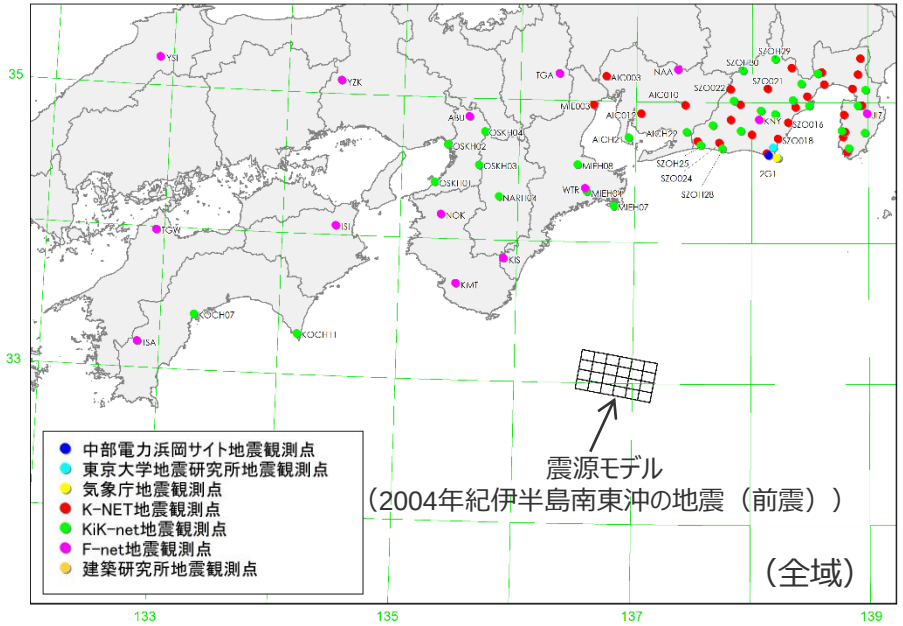
解析手法	三次元有限差分法
解析モデル範囲	東西：650km 南北：460km 鉛直：86.8km
解析対象周波数	0.5Hz以下
メッシュサイズ	水平：140m 鉛直：140m（深さ0.0km～2.8km） 280m（深さ2.8km～8.4km） 560m（深さ8.4km～19.6km） 840m（深さ19.6km～86.8km）

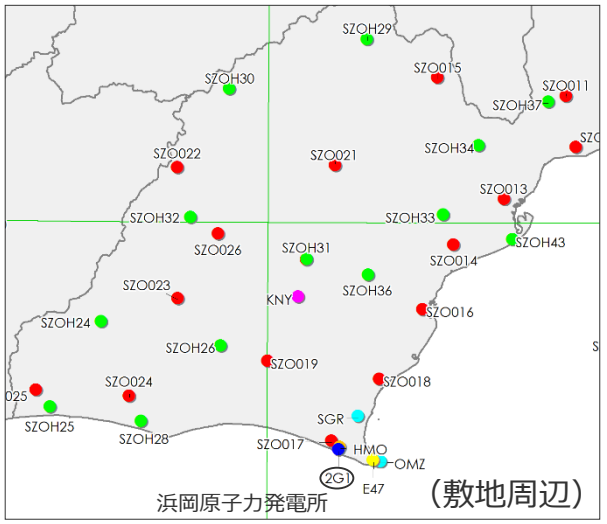
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

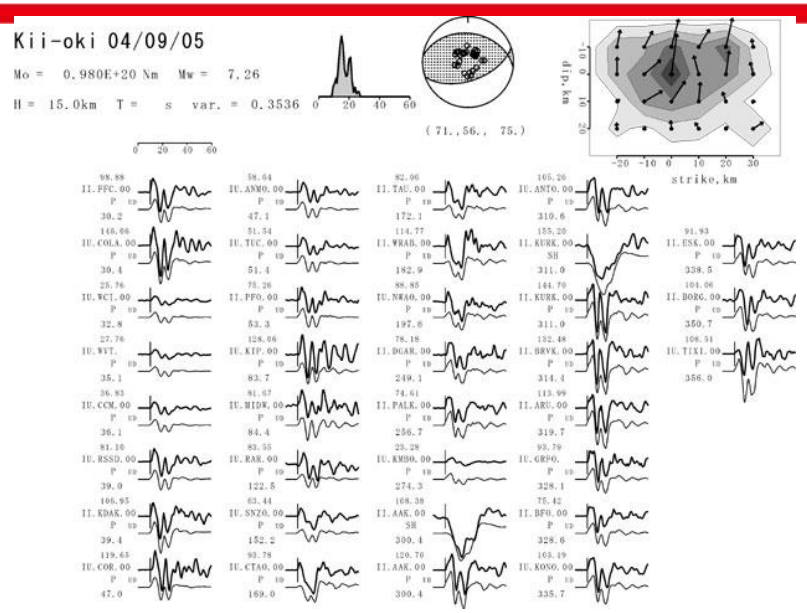
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（広域の三次元地下構造モデル（解析条件）：2004年紀伊半島南東沖の地震（前震））





<観測点と震源モデルとの関係>



<本解析に用いるすべり分布>
（EIC地震学ノートNo.152による）

<解析諸元>

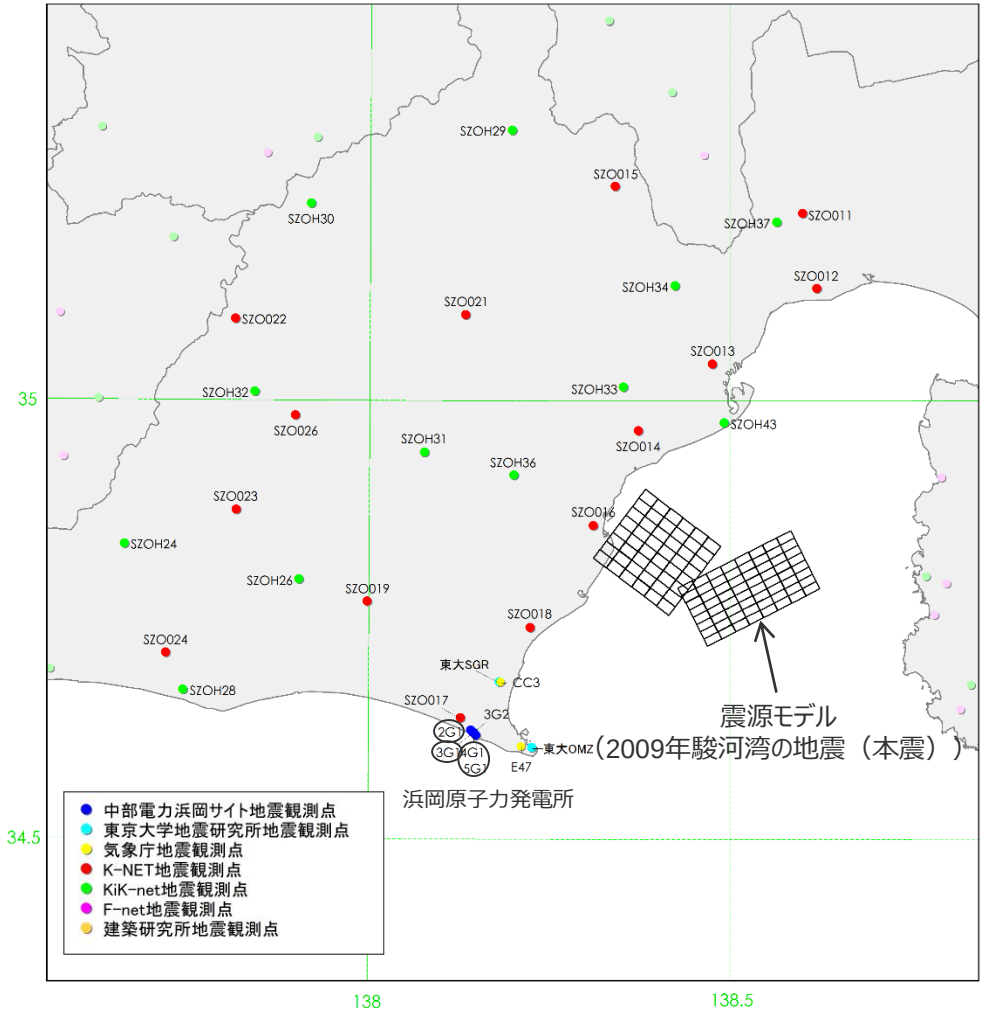
解析手法	三次元有限差分法
解析モデル範囲	東西：650km 南北：460km 鉛直：86.8km
解析対象周波数	0.5Hz以下
メッシュサイズ	水平：140m 鉛直：140m（深さ0.0km～2.8km） 280m（深さ2.8km～8.4km） 560m（深さ8.4km～19.6km） 840m（深さ19.6km～86.8km）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

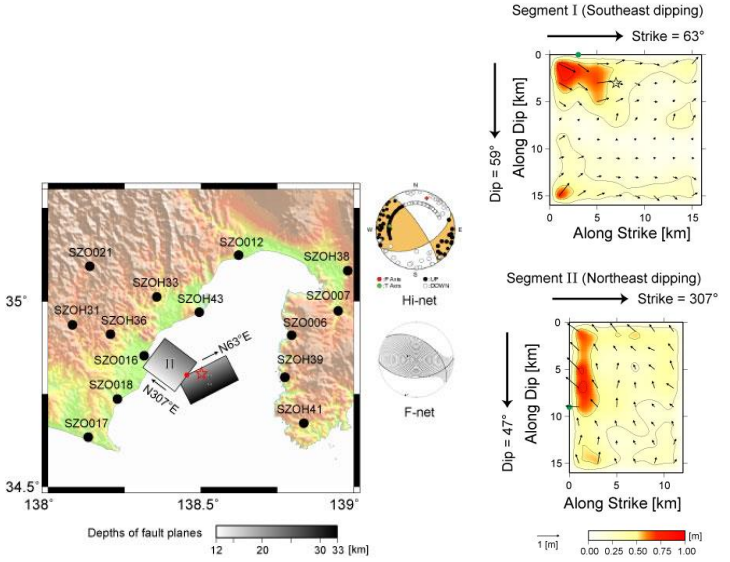
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（広域の三次元地下構造モデル（解析条件）：2009年駿河湾の地震（本震））



<観測点と震源モデルとの関係>



<本解析に用いるすべり分布>
（鈴木・他(2009)による）

<解析諸元>

解析手法	三次元有限差分法
解析モデル範囲	東西：105km 南北：105km 鉛直：78.4km
解析対象周波数	1Hz以下
メッシュサイズ	水平：70m 鉛直：70m（深さ0.0km～2.8km） 140m（深さ2.8km～8.4km） 280m（深さ8.4km～19.6km） 420m（深さ19.6km～86.8km）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

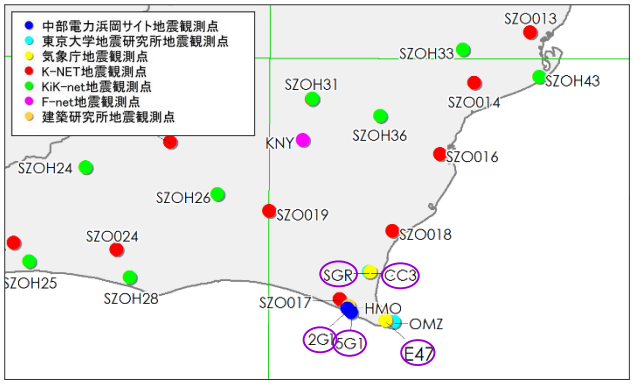
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.196一部修正

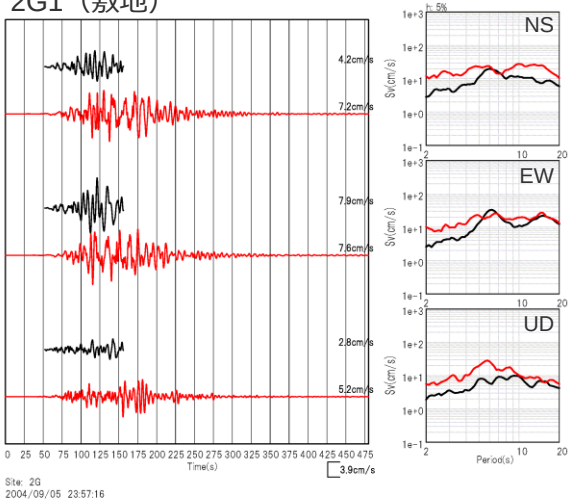
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①）：2004年紀伊半島南東沖の地震（本震）の解析結果（敷地及びその周辺の観測点））

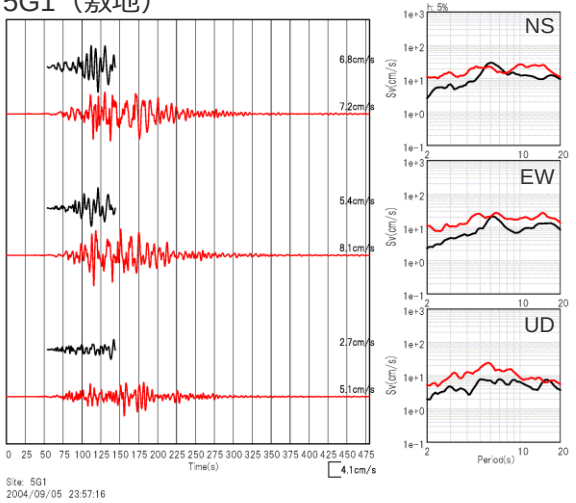
観測記録
シミュレーション結果（モデル①）



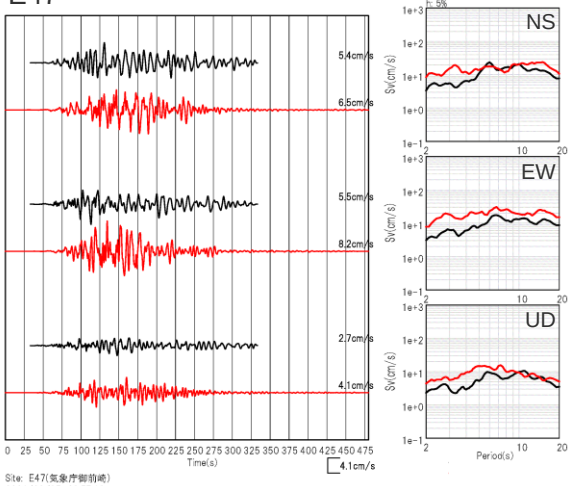
2G1（敷地）



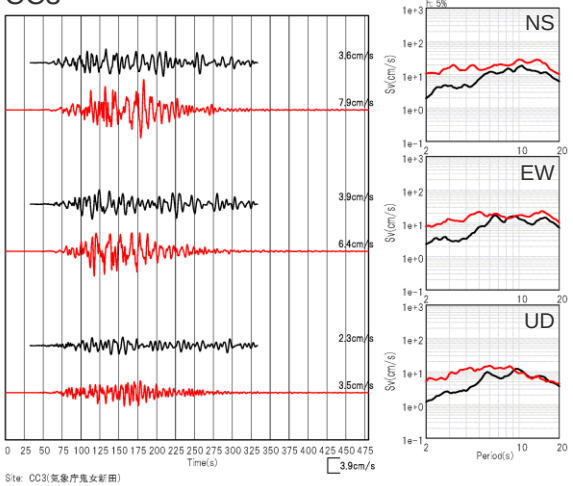
5G1（敷地）



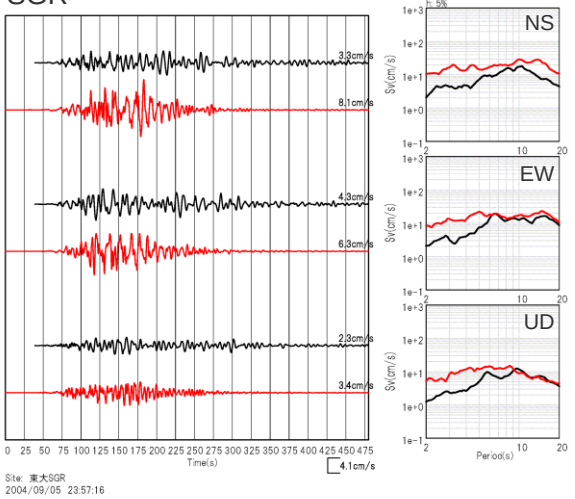
E47



CC3



SGR



○敷地及びその周辺の観測点において、シミュレーション結果（モデル①）は観測記録を大きめに再現している。

<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>
（上から順にNS、EW、UD）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・地震観測点の凡例を追加。

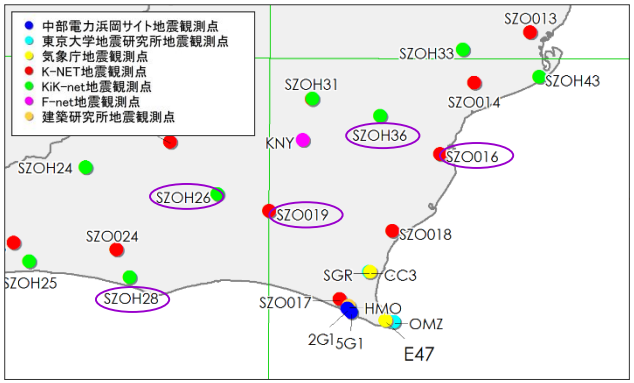
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.197一部修正

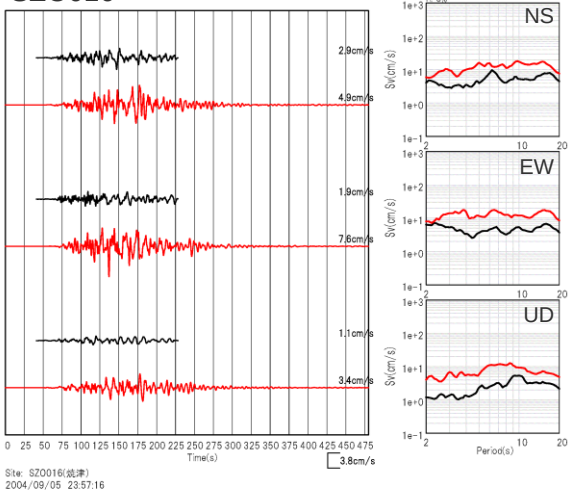
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①）：2004年紀伊半島南東沖の地震（本震）の解析結果（敷地からやや離れた観測点））

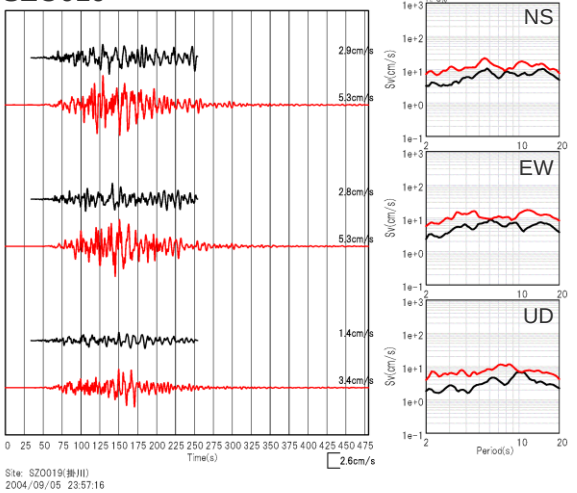
観測記録
シミュレーション結果（モデル①）



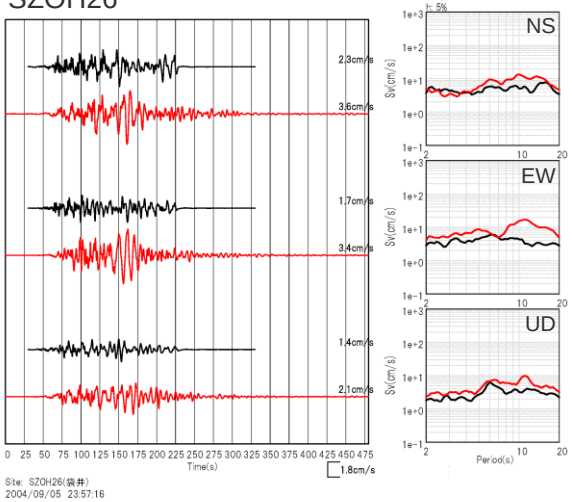
SZO016



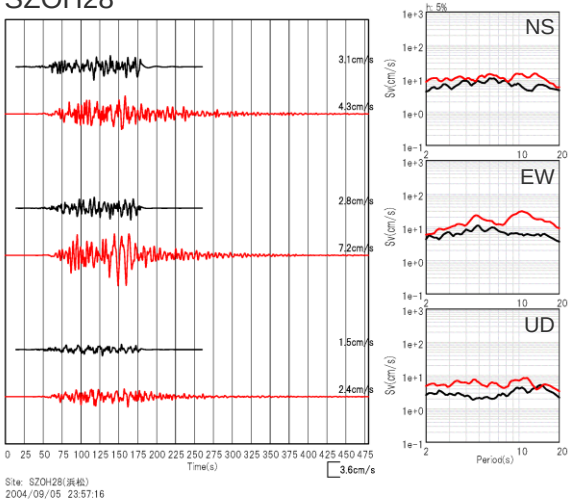
SZO019



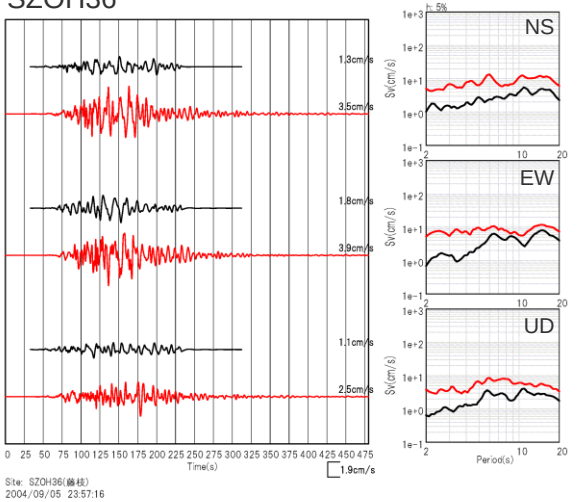
SZOH26



SZOH28



SZOH36



○敷地からやや離れた観測点において、シミュレーション結果（モデル①）は観測記録を大きめに再現している。

<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>
（上から順にNS、EW、UD）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・地震観測点の凡例を追加。

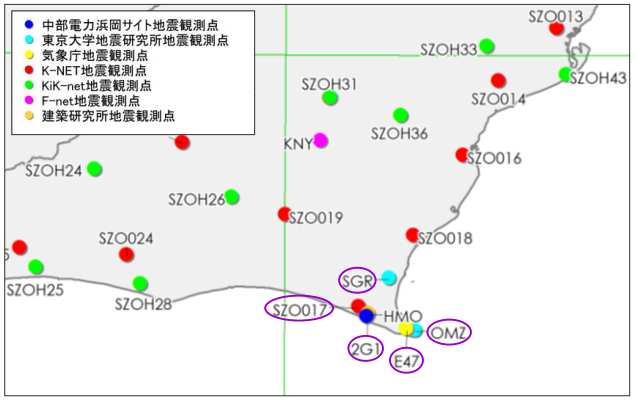
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.198一部修正

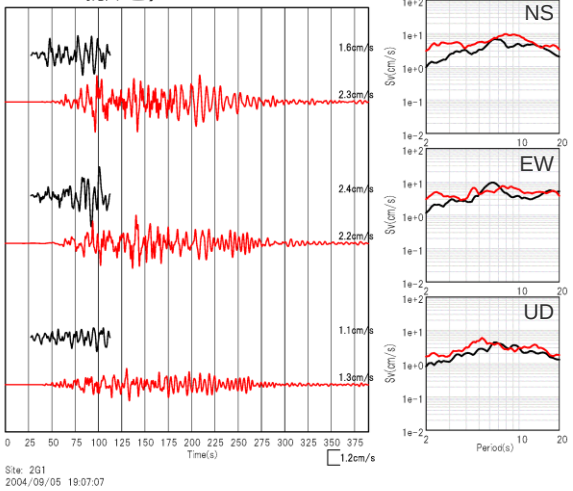
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①）：2004年紀伊半島南東沖の地震（前震）の解析結果（敷地及びその周辺の観測点））

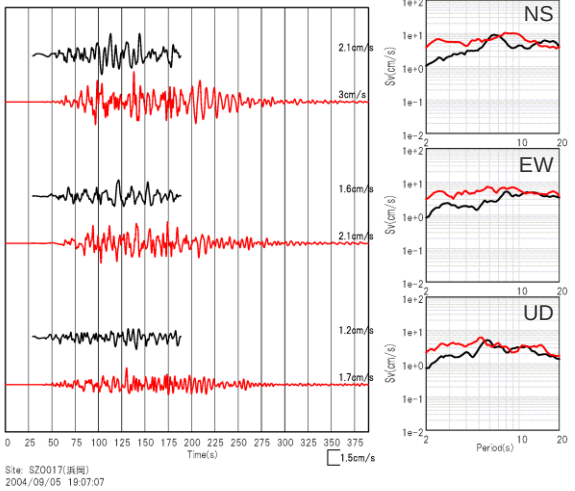
観測記録
シミュレーション結果（モデル①）



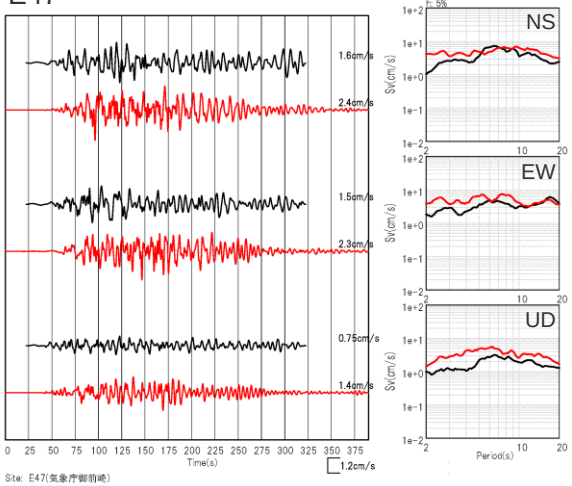
2G1（敷地）



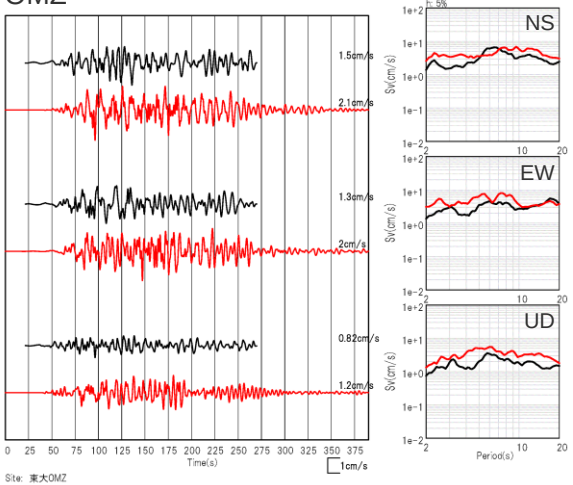
SZO017



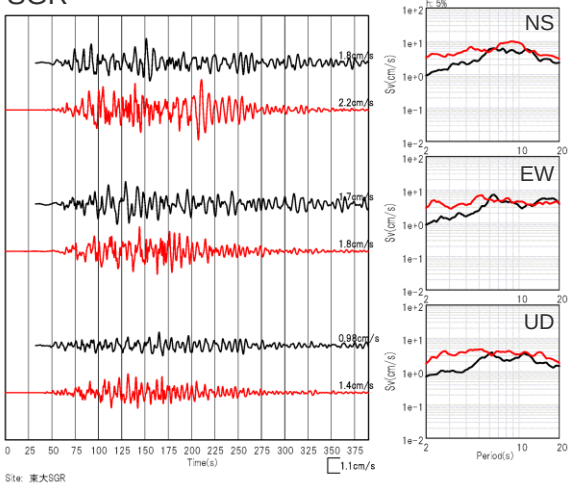
E47



OMZ



SGR



○敷地及びその周辺の観測点において、シミュレーション結果（モデル①）は観測記録を大きめに再現している。

<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>
（上から順にNS、EW、UD）

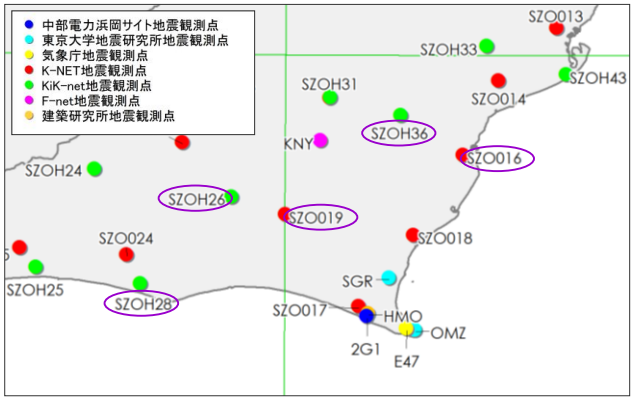
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

第992回
資料1-3 p.199一部修正

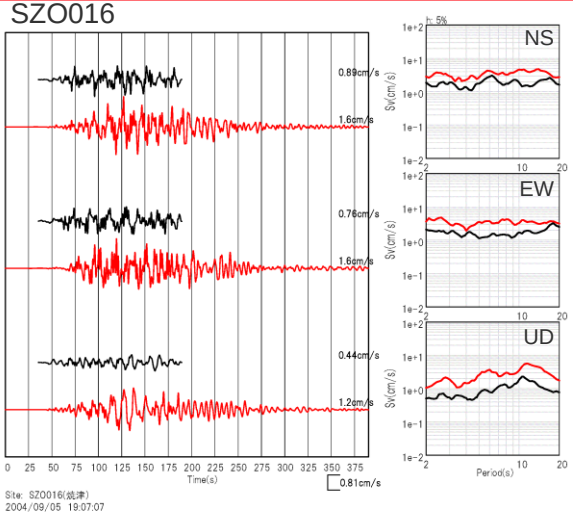
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①）：2004年紀伊半島南東沖の地震（前震）の解析結果（敷地からやや離れた観測点））

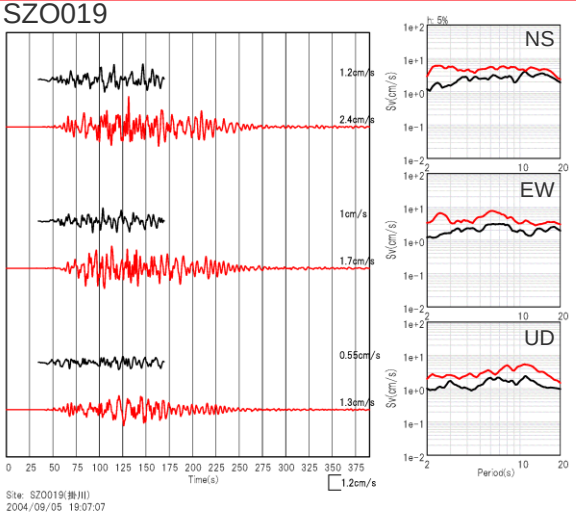
観測記録
シミュレーション結果（モデル①）



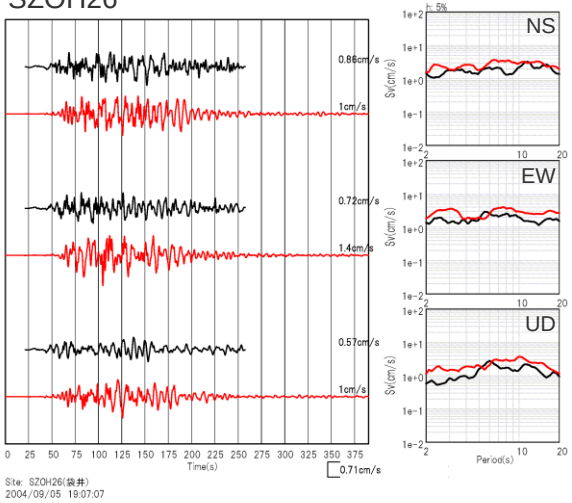
SZO016



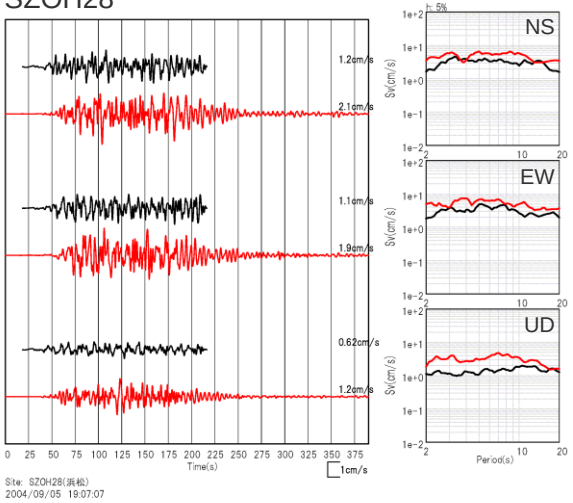
SZO019



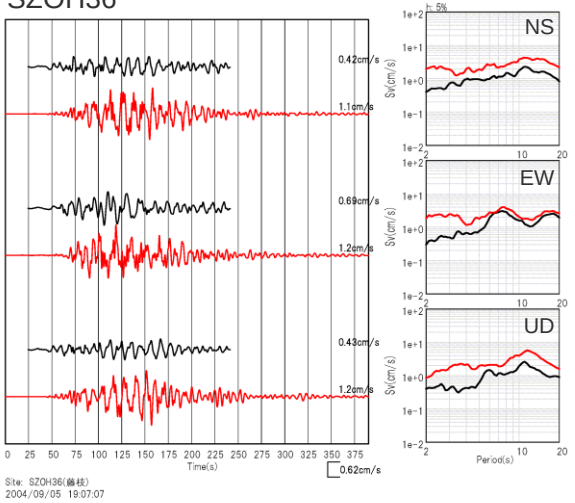
SZOH26



SZOH28



SZOH36



○敷地からやや離れた観測点において、シミュレーション結果（モデル①）は観測記録を大きめに再現している。

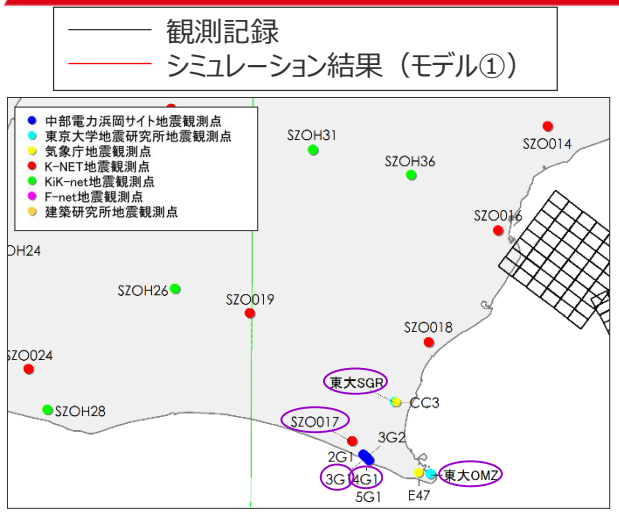
<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>
（上から順にNS、EW、UD）

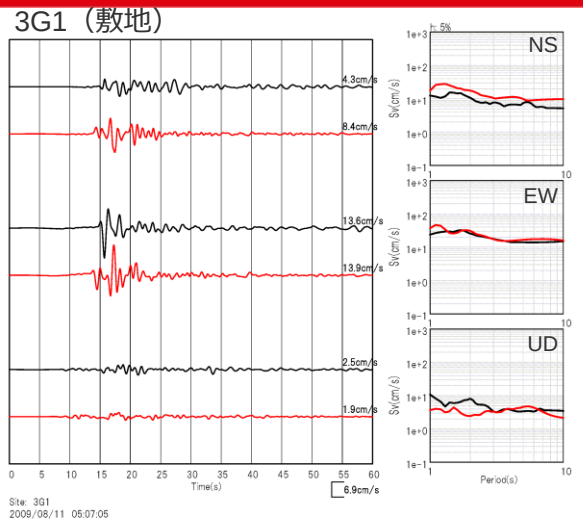
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

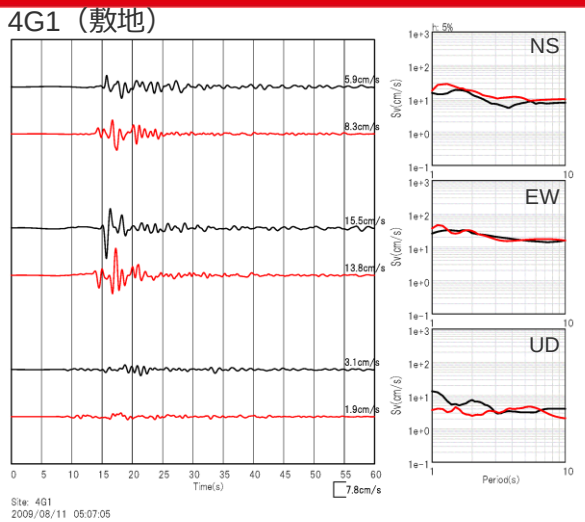
第992回
資料1-3 p.200一部修正

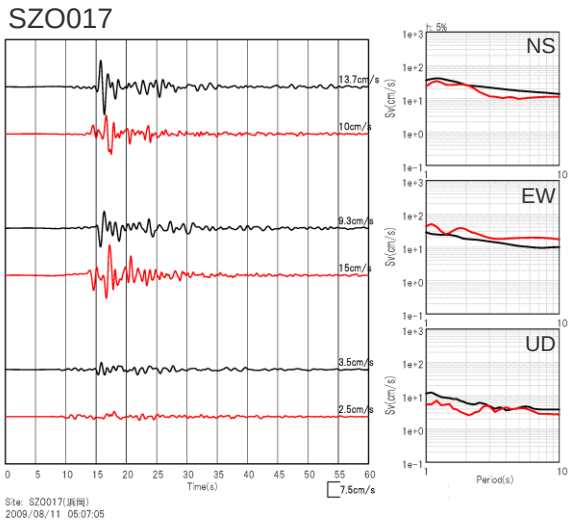
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

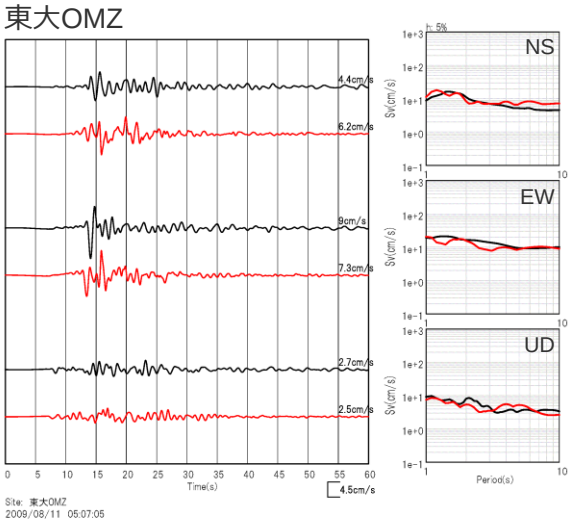
（観測記録のシミュレーション解析（モデル①）：2009年駿河湾の地震（本震）の解析結果（敷地及びその周辺の観測点））

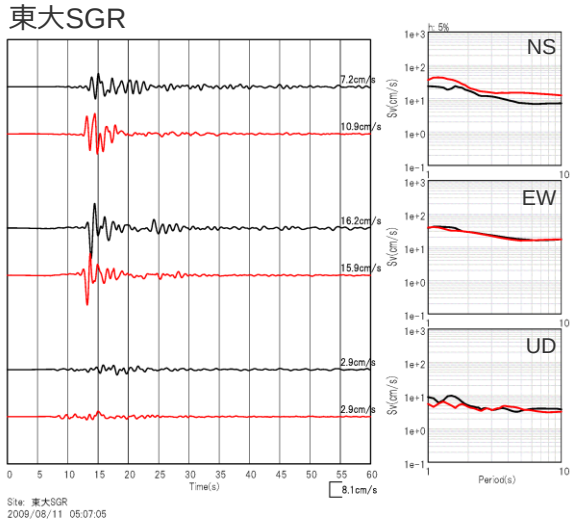












○敷地及びその周辺の観測点において、シミュレーション結果（モデル①）は観測記録を概ね再現している。

<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>
（上から順にNS、EW、UD）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

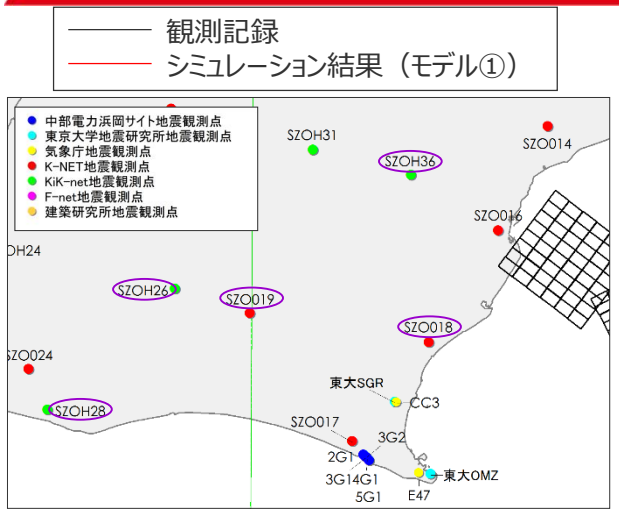
・地震観測点の凡例を追加。

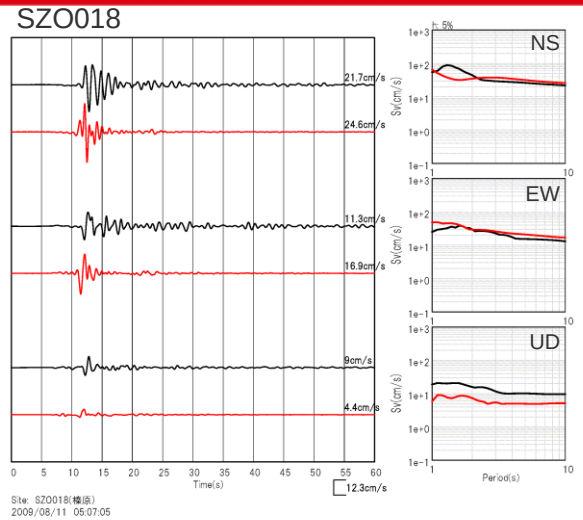
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

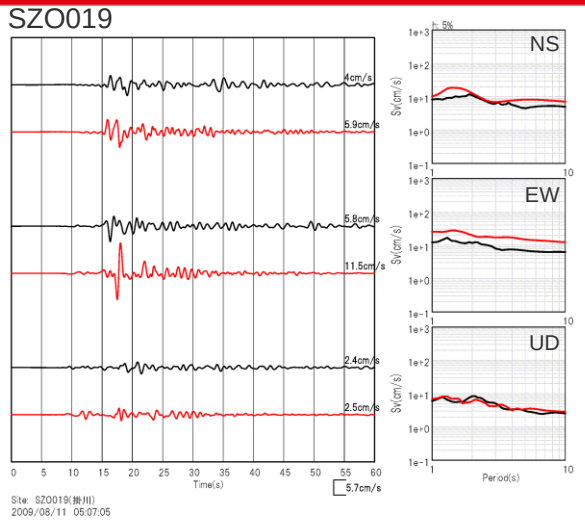
第992回
資料1-3 p.201一部修正

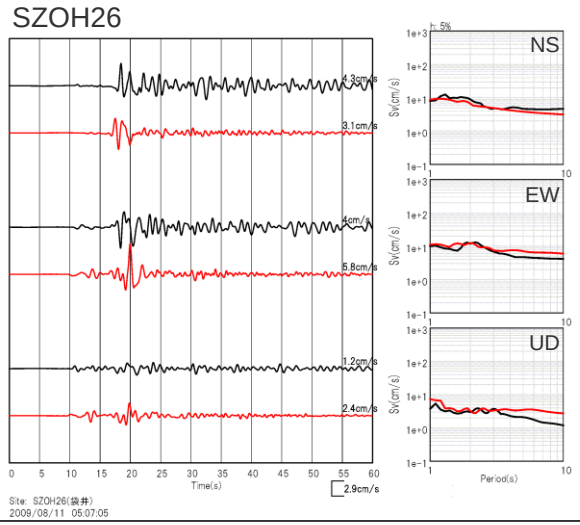
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

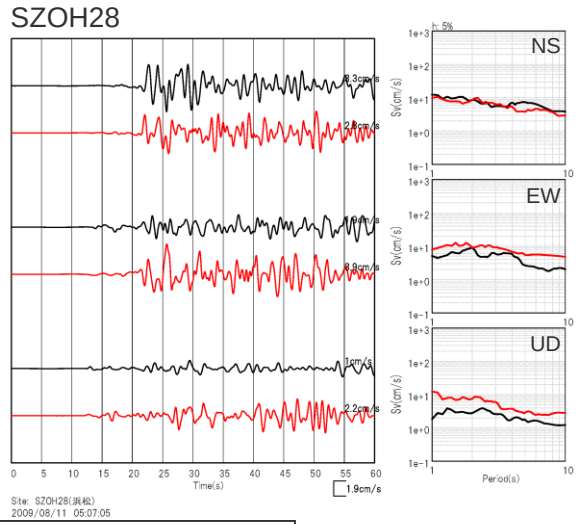
（観測記録のシミュレーション解析（モデル①）：2009年駿河湾の地震（本震）の解析結果（敷地からやや離れた観測点））

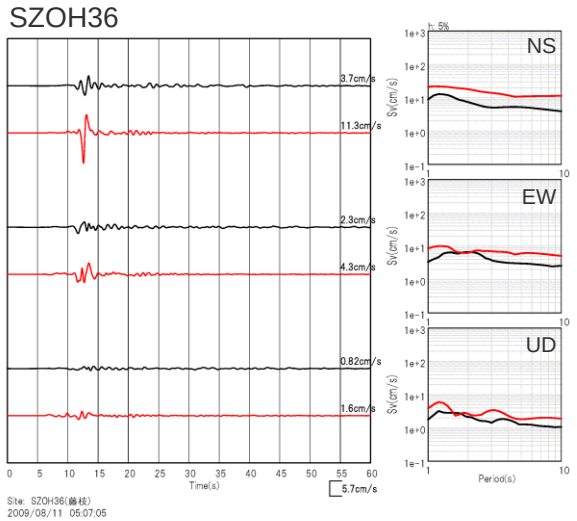












○敷地からやや離れた観測点において、シミュレーション結果（モデル①）は観測記録を概ね再現している。

⇒長周期の地震動が卓越した３地震のシミュレーション解析（モデル①）により、**Q値の設定（Qs=Vs/10、Qp=2Qs）の妥当性を確認**。

<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>
（上から順にNS、EW、UD）

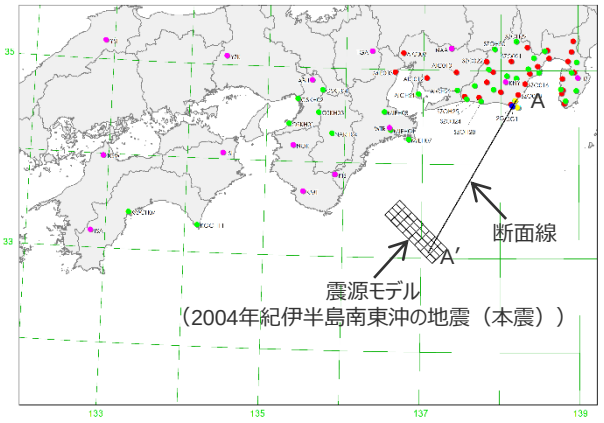
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.
・地震観測点の凡例を追加。

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.202再掲

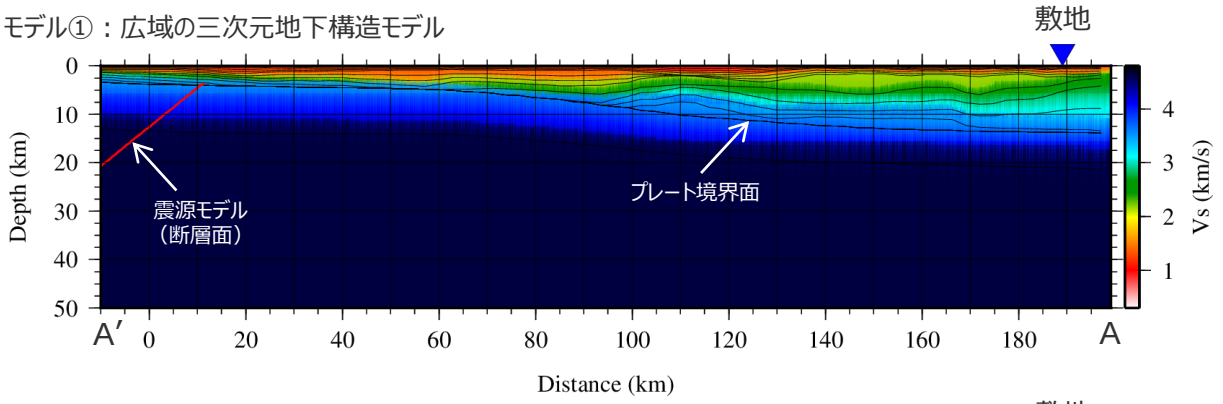
波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①～③）：2004年紀伊半島南東沖の地震（本震）の地下構造モデル）

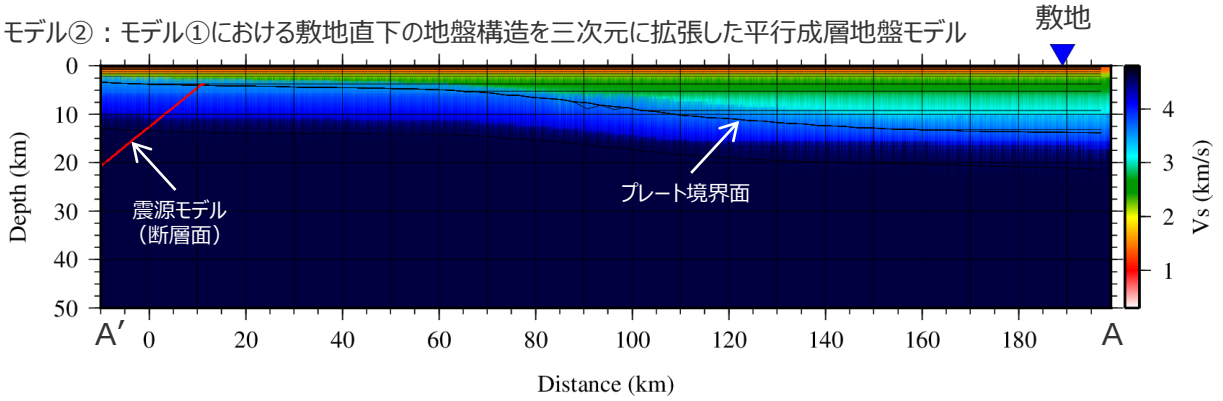


<地下構造モデルの比較>

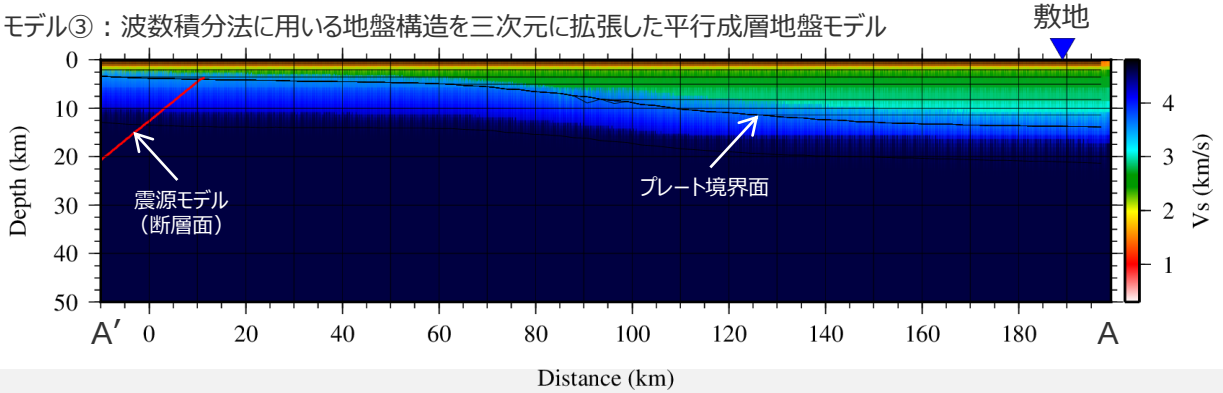
モデル①：広域の三次元地下構造モデル



モデル②：モデル①における敷地直下の地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル



モデル③：波数積分法に用いる地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル



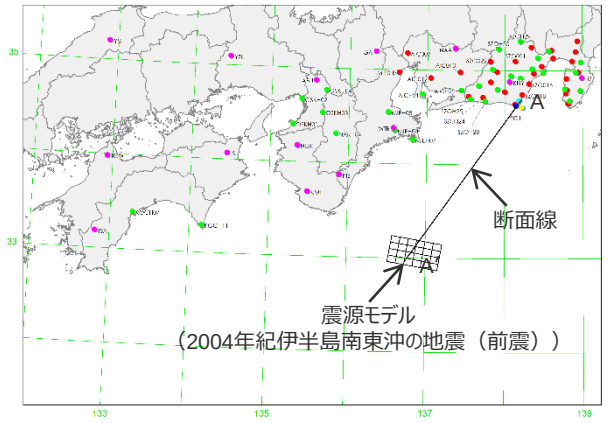
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

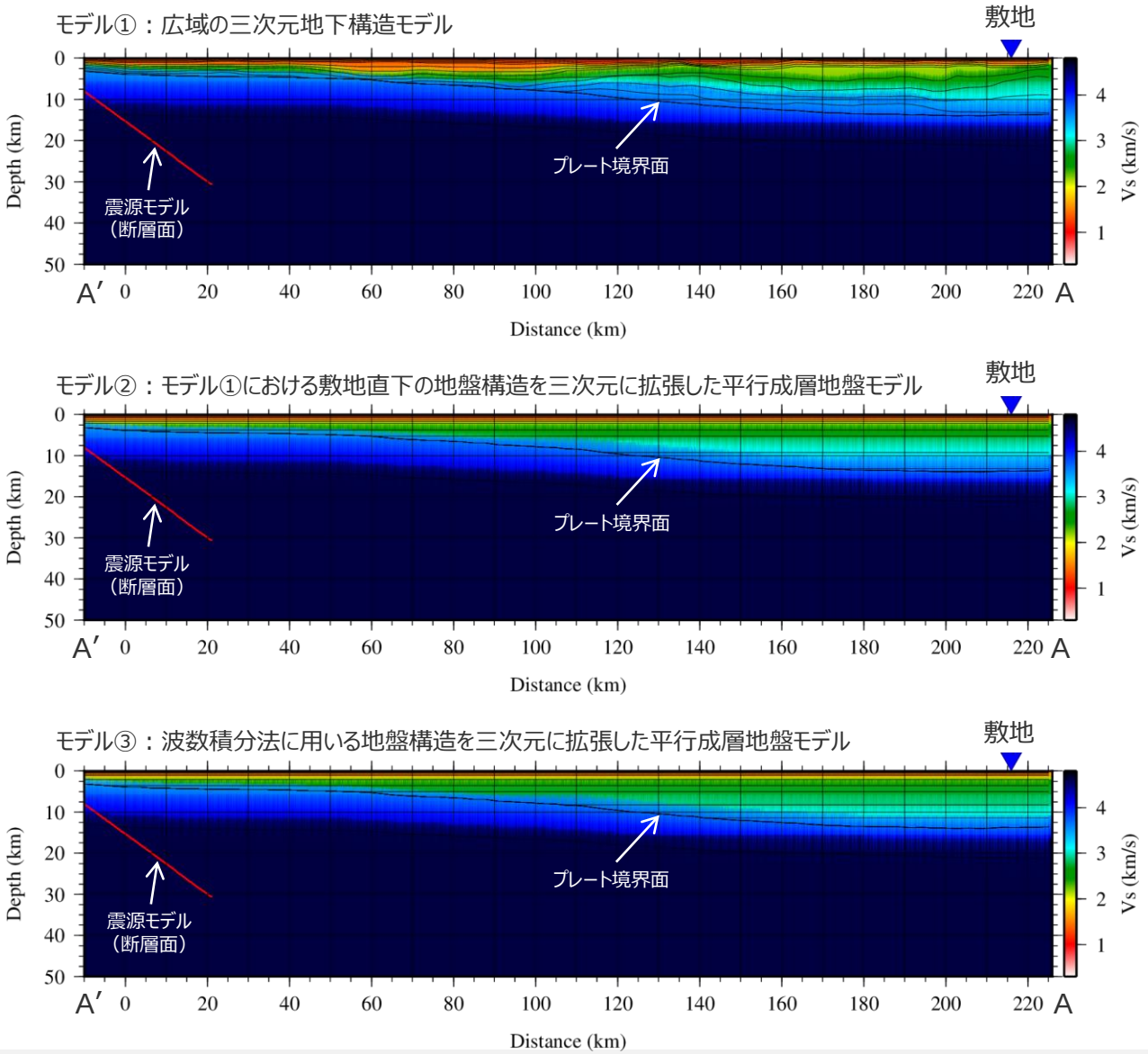
第992回
資料1-3 p.203再掲

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①～③）：2004年紀伊半島南東沖の地震（前震）の地下構造モデル）



<地下構造モデルの比較>



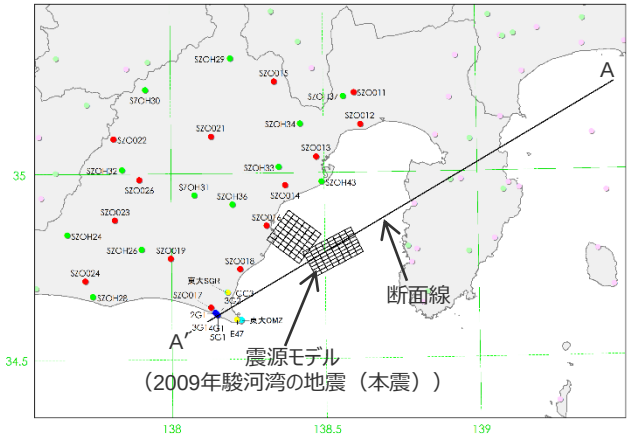
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

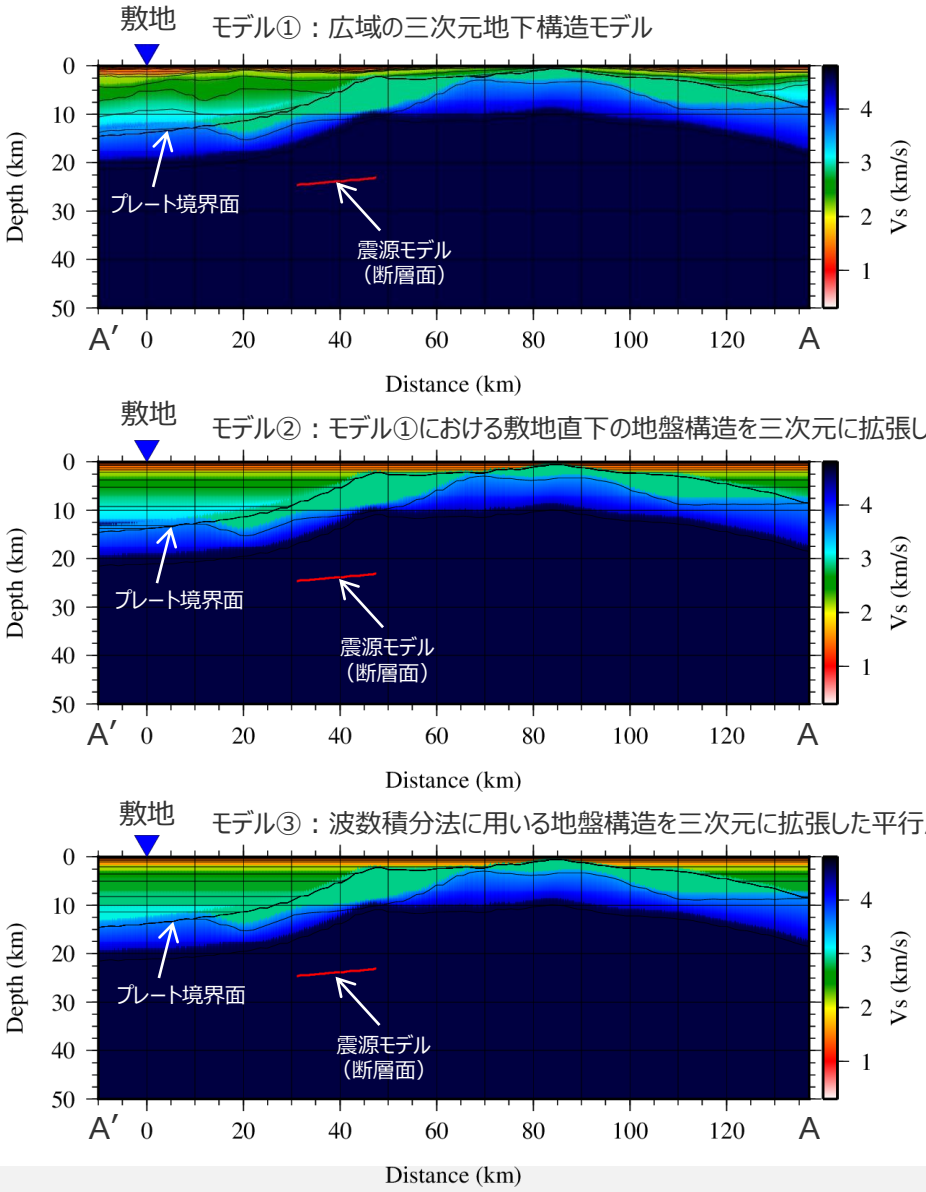
第992回
資料1-3 p.204再掲

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①～③）：2009年駿河湾の地震（本震）の地下構造モデル）



<地下構造モデルの比較>



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

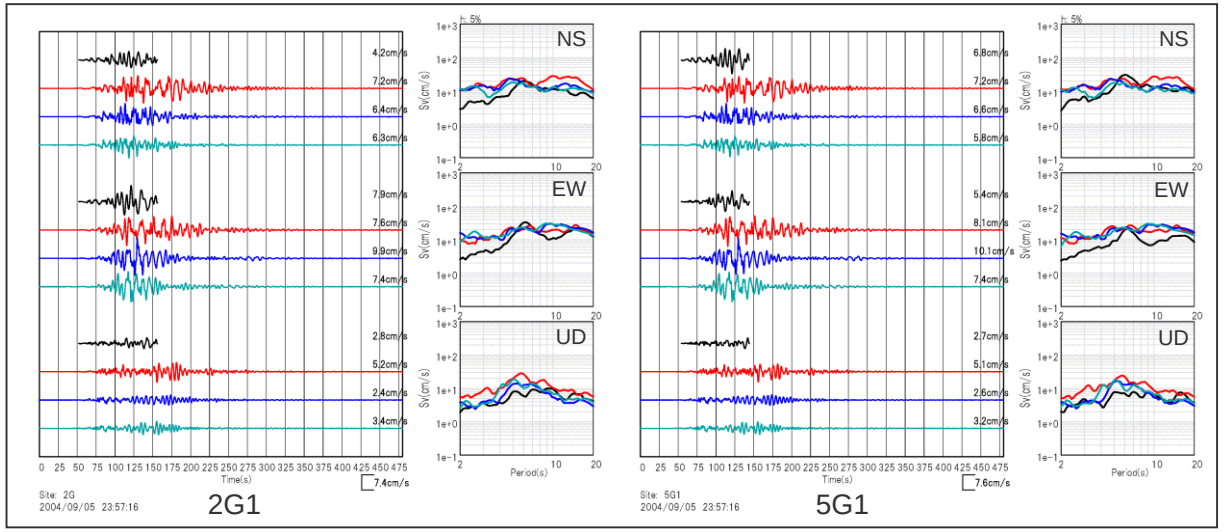
<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

第992回
資料1-3 p.205再掲

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証

（観測記録のシミュレーション解析（モデル①～③）：３地震の解析結果（敷地の観測点））

2004年紀伊半島南東沖の地震（本震）



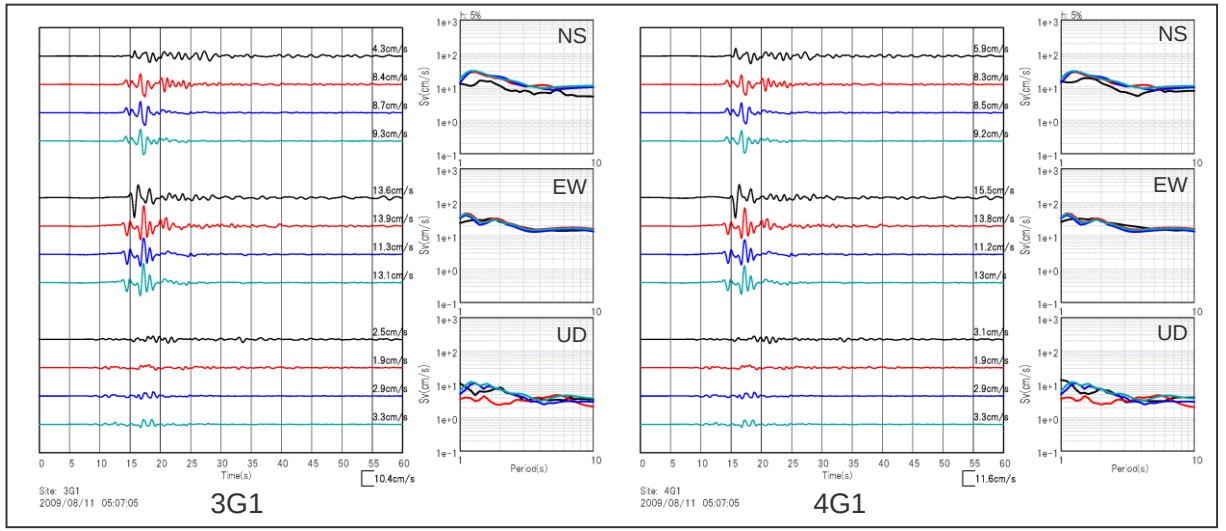
○平行成層地盤であるモデル②・③のシミュレーション結果は、三次元地下構造モデルであるモデル①のシミュレーション結果と同様であり、観測記録を概ね再現している。

⇒**波数積分法に用いる一次元地下構造モデル（Q値や速度構造）の設定の妥当性を確認**。

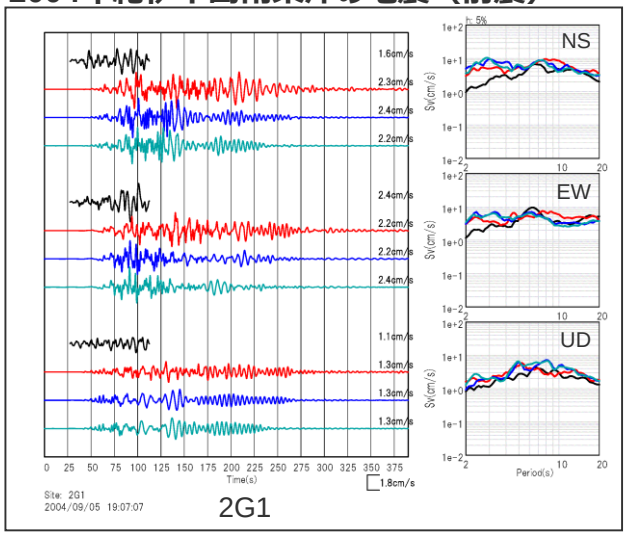
観測記録
シミュレーション結果（モデル①）
シミュレーション結果（モデル②）
シミュレーション結果（モデル③）

モデル①：広域の三次元地下構造モデル
モデル②：敷地直下の地盤構造（モデル①）を三次元に拡張した平行成層地盤モデル
モデル③：波数積分法に用いる地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル

2009年駿河湾の地震（本震）



2004年紀伊半島南東沖の地震（前震）



<左図：速度波形、右図：速度応答スペクトル>（上から順にNS、EW、UD）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-11 波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの設定>

波数積分法に用いる一次元地下構造モデルの検証（まとめ）

○長周期の地震動が卓越した、2004年紀伊半島南東沖の地震（本震M7.4及び前震M7.1）、2009年駿河湾の地震（本震M6.5）を対象として、三次元有限差分法に基づき、**波数積分法に用いる一次元地下構造モデルと同様のQ値**を用いた、**広域の三次元地下構造モデル（モデル①）及び平行成層地盤モデル（モデル②・③）によるシミュレーション解析**を行い、**観測記録の再現性を検討**。

＜解析対象とする地下構造モデル（Q値はいずれもQs=Vs/10、Qp=2Qs ）＞

- モデル①：広域の三次元地下構造モデル
- モデル②：モデル①における敷地直下の地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル
- モデル③：波数積分法に用いる地盤構造を三次元に拡張した平行成層地盤モデル

モデル①～③のシミュレーション結果が観測記録を再現できることを確認した。

||

波数積分法に用いる一次元地下構造モデル（Q値や速度構造）の設定の妥当性を確認した。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

補足説明資料①-12
地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

第992回
資料1-6 p.536修正

方針

【地震観測記録の分析結果で確認された地震動の顕著な増幅の特性（敷地固有の地盤増幅特性）】

○５号炉周辺観測点で見られた地震動の顕著な増幅は、時刻歴波形ではＳ波主要動部のみに見られ、フーリエスペクトルでは周期0.2～0.5秒付近の狭帯域のみに、応答スペクトルでは周期0.5秒以下の短周期側のみに見られ、これ以外の周期帯には見られない。

○５号炉周辺観測点において、地震動の顕著な増幅は、2009年駿河湾の地震の到来方向（N30E～N70E）の地震波のみに見られ、その他の地震波到来方向では見られない。

○地震動の顕著な増幅が見られた到来方向（N30E～N70E）の地震波でも、増幅の程度は一様ではなく、地震波の入射角が鉛直に近づく敷地近傍の地震ほど顕著な増幅は見られない傾向がある。このうち、2009年駿河湾の地震（本震）は増幅の程度が最も大きく信頼性が高い記録が得られた地震である。

【地震動評価手法の特徴】

【応答スペクトルに基づく手法の特徴】

○応答スペクトルに基づく手法は、基本的には、地震規模や震源距離といった巨視的なパラメータにより、震源断層全体による敷地の地震動を評価する手法である。

【断層モデルを用いた手法の特徴】

○断層モデルを用いた手法は、震源断層を複数の小断層に分割し、小断層毎に震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性を考慮して敷地に到来する地震波（グリーン関数）を算定し、それらの地震波（グリーン関数）を敷地への到来時刻を考慮して足し合わせることにより震源断層全体による敷地の地震動を評価する手法である。

【地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法（方針）】

○検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）は、地震観測記録に基づき確認された地震動の顕著な増幅の特性を的確に反映するため、震源断層を小断層に分割し、小断層毎に敷地に到来する地震動を詳細に考慮できる**断層モデルを用いた手法を重視**する。

○断層モデルを用いた手法については、**2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討により検証した方法**（「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の各小断層からの地震動（グリーン関数）に増幅係数を乗じる方法）を用い、地震動の顕著な増幅を考慮する強震動生成域（アスペリティ）の小断層の範囲・増幅の程度を**地震観測記録の分析結果に対し保守的に設定**することにより、**保守的な地震動評価**を行う。

○応答スペクトルに基づく手法については、３つの地震タイプ（内陸地殻内地震、プレート間地震、海洋プレート内地震）の各検討用地震と震源断層面の広がりや地震波の到来方向が同様と見なせ、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が反映された観測記録が得られていないことから、『**断層モデルを用いた手法による保守的な地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響を求めて反映する方法**』により保守的な地震動評価を行う。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.537修正

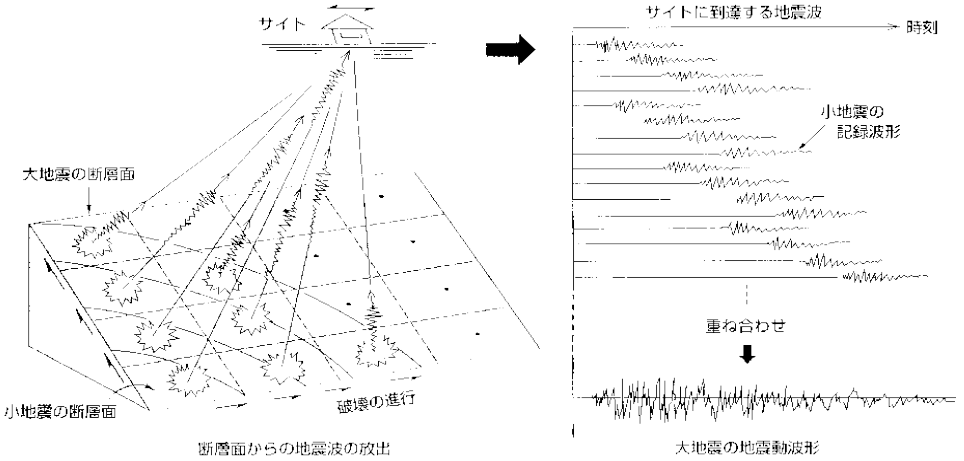
断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（大地震の地震動を用いた分析・評価の考え方等と地震動の顕著な増幅の反映方法（方針））

【大地震の地震動を用いた分析・評価の考え方】

○ 大地震の地震動を用いた震源の破壊過程等の分析では、一般に、大地震の震源断層を小断層に分割し、各小断層から発生し地下構造を通って敷地に到来する地震動を考え、この**小断層による地震動を敷地への地震動の到達時刻の違いを考慮して重ね合わせた地震動が大地震における敷地の地震動になるとの考え方**が用いられており、この考え方で地震動の予測評価が行われている。

【特性化震源モデルの短周期地震動の考え方】

○ 地震動評価で用いる特性化震源モデルは、強震動生成域（アスペリティ）と背景領域とから構成され、実際の大地震の分析や強震動予測レシピ(2020)等に基づく地震動評価では、背景領域からの地震動の短周期への影響は強震動生成域（アスペリティ）に比べて小さいとして検討し、震源断層全体の**短周期の地震動レベルを強震動生成域（アスペリティ）からの地震動のみで評価する考え方**により行われている。【詳細は次ページ参照】

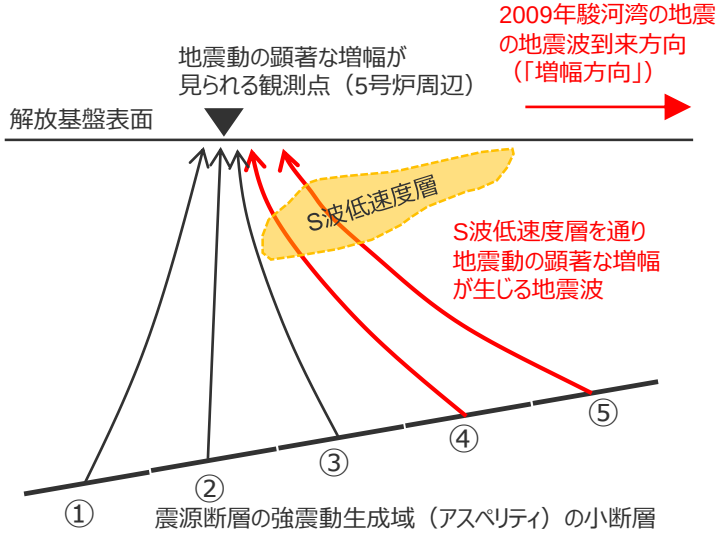


＜大地震と小地震の地震動＞
（電力土木技術協会HPによる）

【地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法（方針）】

○ 以上の考え方を踏まえると、『「地震動の顕著な増幅は、特定の到来方向（N30E～N70E）の地震波のみに、短周期の特定の周期帯（フーリエスペクトルの周期0.2～0.5秒）では見られるが、その他の地震波到来方向では見られない」との地震観測記録の分析結果に基づき確認された地震動の顕著な増幅の特性』から、検討用地震の地震動は、震源断層のうち「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の小断層の面積が広い地震ほど、S波低速度層を通り地震動の顕著な増幅が生じる小断層からの地震動が多く、地震動レベルが大きくなると考えられる。

○ そこで、検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）は、地震観測記録に基づき確認された地震動の顕著な増幅の特性を的確に反映するため、**震源断層を小断層に分割し、小断層毎に敷地に到来する地震動を詳細に考慮できる断層モデルを用いた手法を重視することとし、地震動の顕著な増幅は『「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の各小断層からの地震動（グリーン関数）に増幅係数を乗じる方法』により反映する。**



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（　）は、一部修正箇所を示す。

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（特性化震源モデルの短周期地震動の考え方）

【特性化震源モデルの短周期レベル】

○ 地震動評価で用いる特性化震源モデルは、強震動生成域（アスペリティ）と背景領域とから構成され、壇・他(2001)や入倉・他(2002)によれば、震源断層全体の短周期の地震動の大きさを表す短周期レベルAは、それぞれの領域の短周期レベル（A_a 、A_b）により、下記の式①で表される。

短周期レベル ：$A=(A_a^2+A_b^2)^{1/2}$ ・・・・・・ 式① ： 壇・他(2001)、入倉・他(2002)

ここで、A_a：強震動生成域（アスペリティ）の短周期レベル、A_b：背景領域の短周期レベル

【強震動予測レシピにおける短周期レベル】

○強震動予測レシピ(2020)では、壇・他(2001)による下記の式②を用いて、震源断層全体の短周期レベルAを強震動生成域（アスペリティ）のみで設定し、そのうえで背景領域も設定して短周期の地震動を計算し付加している。

短周期レベル：$A=4\pi \cdot r \cdot \Delta\sigma_a \cdot \beta^2$ ・・・・・・ 式② ： 強震動予測レシピ(2020)

ここで、r：強震動生成域（アスペリティ）の等価半径、$\Delta\sigma_a$：強震動生成域（アスペリティ）の応力降下量、β：S波速度

○ 震源断層全体の短周期レベルAを強震動生成域（アスペリティ）のみで設定していることに関し、入倉・他(2002)は、強震動予測レシピについて、背景領域からの加速度地震動はアスペリティ部に比べて無視できるほど小さいとして検討しており、背景領域からの加速度地震動の寄与を無視すると、上記式②（同論文の(10)式に相当）によりアスペリティの応力降下量を推定できるとしている。

○ また、実際の大地震の強震動の分析では、背景領域を設けず強震動生成域（アスペリティ）のみの震源モデルを用いて、背景領域からの影響も含まれる観測記録の短周期の地震動を再現できるよう、強震動生成域（アスペリティ）のパラメータ推定が行われ、上記の式②を用いて震源断層全体の短周期レベルAが分析されている（佐藤(2010a)、佐藤(2012)等）。

○ 以上のとおり、特性化震源モデルを用いた地震動評価は、背景領域からの地震動の短周期への影響は強震動生成域（アスペリティ）に比べて小さいとして検討し、震源断層全体の**短周期の地震動レベルを強震動生成域（アスペリティ）からの地震動のみで評価する考え方**により行われている。

○ そこで、検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）では、地震動の顕著な増幅は短周期の特定の周期帯（フーリエスペクトルの周期0.2～0.5秒）で見られることを踏まえ、断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映について、**短周期の地震動への影響が支配的な強震動生成域（アスペリティ）の小断層からの地震動に着目して保守的な評価**を行うこととする。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.539修正

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（方針）

【地震観測記録の分析結果（地震動の顕著な増幅の特性）】

○ 地震動の顕著な増幅は、特定の到来方向（N30E～N70E）の地震波のみに、短周期の特定の周期帯（フーリエスペクトルの周期0.2～0.5秒）では見られるが、その他の地震波到来方向では見られない。

【特性化震源モデルの短周期地震動の考え方】

○ 短周期の地震動レベルを強震動生成域（アスペリティ）からの地震動のみで評価（背景領域は、強震動生成域（アスペリティ）のみで震源断層全体の短周期レベルを説明できるように評価したものに対して付加）。

【地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法】

○ 地震動の顕著な増幅が見られた短周期の地震動への影響が支配的な強震動生成域（アスペリティ）に着目し、短周期の地震動評価に一般的に用いられる統計的グリーン関数法において、『**「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の各小断層からの地震動（グリーン関数）に増幅係数を乗じる方法**』を用いることとし、2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討による検証を行ったうえで、検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）を行う。

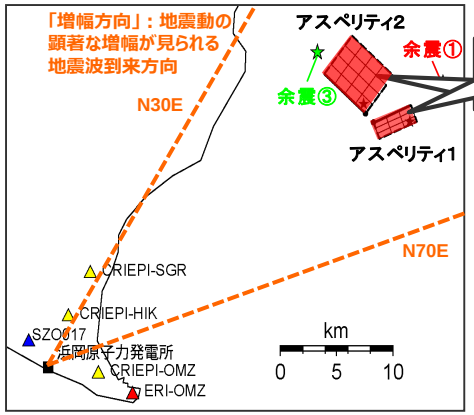
【2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討】

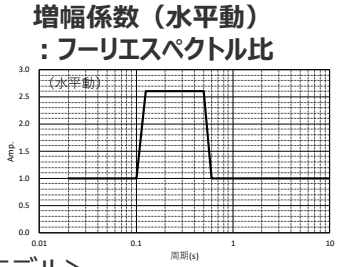
○ **背景領域のない強震動生成域（アスペリティ）のみの震源モデル**を用いて、強震動生成域（アスペリティ）の小断層のグリーン関数に増幅係数を乗じる方法で、地震動の顕著な増幅が見られた観測点（５号炉周辺）の観測記録を概ね再現できることを確認する。

【検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）】

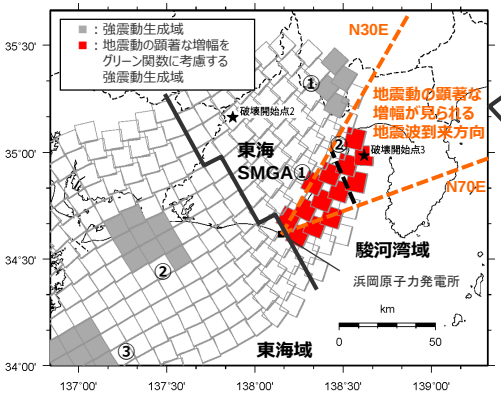
○ **「増幅方向」の敷地近傍に強震動生成域（アスペリティ）を配置したうえで、『「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の小断層のグリーン関数のみに増幅係数を乗じる方法』**で地震動評価を行う。

○ その際、「増幅方向」の敷地近傍に配置した強震動生成域（アスペリティ）について、増幅係数を乗じる小断層の範囲・増幅の程度を**地震観測記録の分析結果に対し保守的に設定**することにより、**保守的な地震動評価**を行う。





<2009年駿河湾の地震（本震）の震源モデル>
（当社作成）



増幅係数を乗じる強震動生成域（アスペリティ）を「増幅方向」の敷地近傍に配置したうえで保守的な評価を行うため、「増幅方向」に位置する背景領域は、敷地から離れており地震動評価結果に及ぼす影響は「増幅方向」の敷地近傍に配置した強震動生成域（アスペリティ）に比べて小さいと考えられる。（→念のため、「増幅方向」に位置する背景領域の小断層にも増幅係数を乗じた場合の影響確認を行う。）

<検討用地震の震源モデルと地震動の増幅を考慮する領域（例）>

・地震動評価結果に考慮された保守性の確認及び「増幅方向」に位置する背景領域の小断層による影響の確認は、補足説明資料③-41参照。

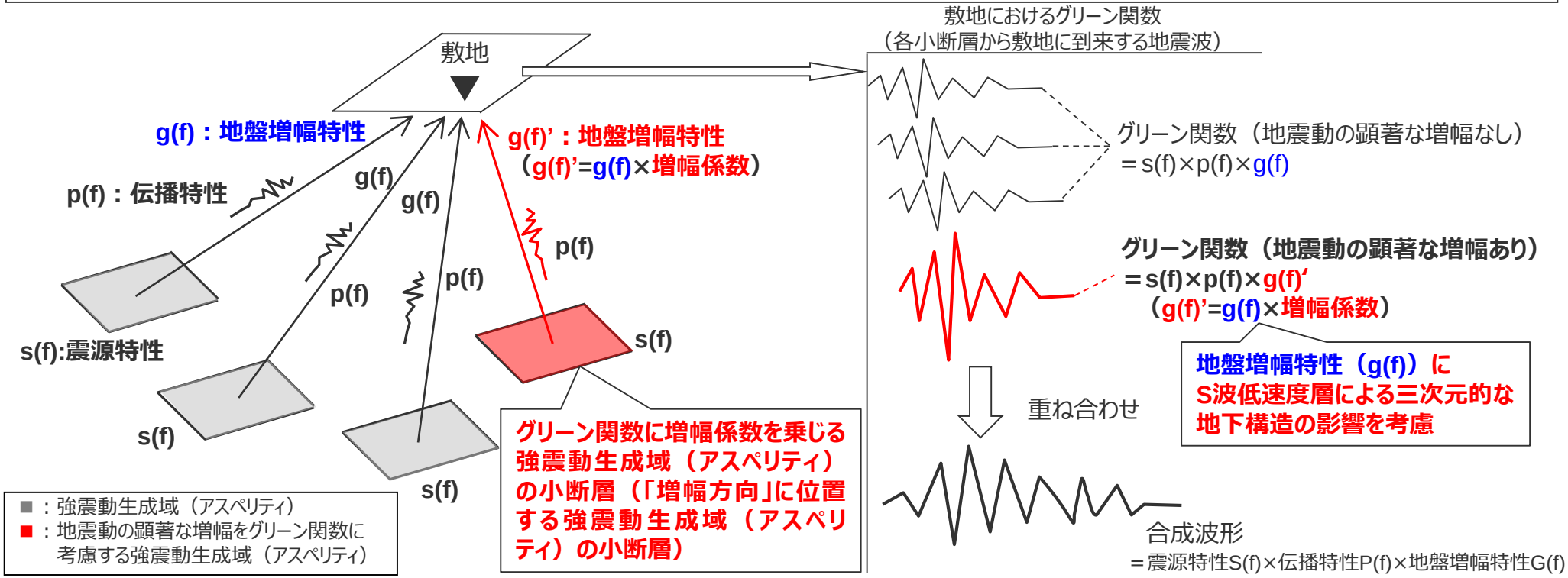
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（概要）

第992回
資料1-6 p.540修正

○ 前述のとおり、検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）は、地震観測記録に基づき確認された地震動の顕著な増幅の特性を的確に反映するため、震源断層を小断層に分割し、小断層毎に敷地に到来する地震動を詳細に考慮できる断層モデルを用いた手法を重視する。
○ 断層モデルを用いた手法では、地震動の顕著な増幅は、「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の各小断層からの地震動（グリーン関数）に増幅係数（次々ページ参照）を乗じることで、短周期の地震動評価に一般的に用いられる統計的グリーン関数法により、地震動の顕著な増幅の特性を反映した地震動評価を行う。このようにグリーン関数（震源特性s(f)×伝播特性p(f)×地盤増幅特性g(f)）に増幅係数を乗じる方法は、一次元地下構造モデルによる地盤増幅特性（g(f)）を補正して、S波低速度層による三次元的な地下構造の影響を考慮することに相当する（g(f)′＝g(f)×増幅係数）。
○ グリーン関数に乗じる増幅係数については、増幅の程度が最も大きい2009年駿河湾の地震（本震）を参考に、その再現検討を踏まえて設定し、グリーン関数に増幅係数を乗じる強震動生成域（アスペリティ）の小断層については、「増幅方向」を踏まえ保守的に設定する。
○ 2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討では、増幅係数の合理性も含め、本反映方法（強震動生成域（アスペリティ）の各小断層のグリーン関数に増幅係数を乗じる方法）による地震動評価結果（波形合成結果）と地震動の顕著な増幅が見られた観測点（５号炉）の観測記録との比較により検証を行う。



<断層モデルを用いた手法による地震動評価（統計的グリーン関数法）における地震動の顕著な増幅の反映方法の概要>

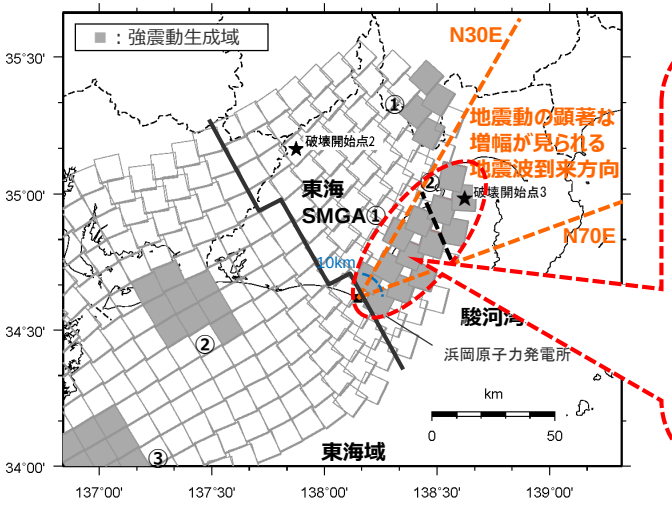
Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.541再掲

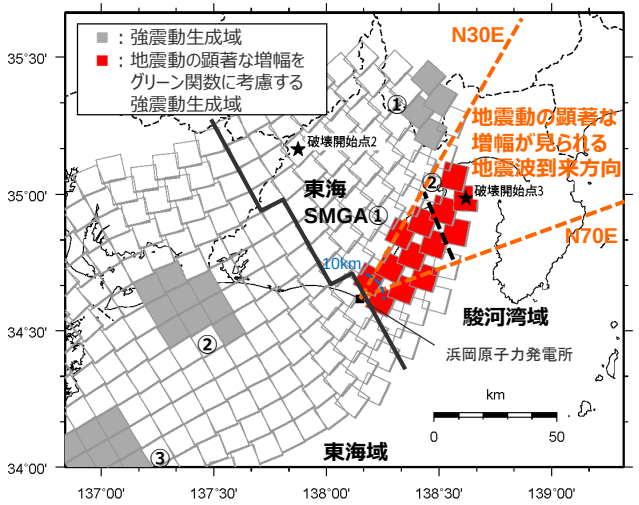
断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（（参考）本資料における震源モデルのモデル図の表現の解説）

○５号炉周辺の増幅要因は、深さ数百mの浅部地盤に局所的に分布するS波低速度層であり、これによる三次元的な地下構造の影響としての地震動の顕著な増幅を、断層モデルを用いた手法による地震動評価に反映する方法として、グリーン関数（震源特性s(f)×伝播特性p(f)×地盤増幅特性g(f)）に増幅係数を乗じる。この方法は、一次元地下構造モデルによる地盤増幅特性（g(f)）を補正して、S波低速度層による三次元的な地下構造の影響を考慮することに相当する（g(f)'＝g(f)×増幅係数）。
○本資料の各震源モデル（地震動の顕著な増幅を考慮）のモデル図においては、地震動の顕著な増幅を考慮する（グリーン関数に増幅係数を乗じる）強震動生成域（アスペリティ）の小断層を、赤色で塗りつぶして表現する。
○これは、便宜的に小断層を赤色で塗りつぶすことで表現しているものであって、震源特性において地震動の顕著な増幅を考慮することを表しているものではなく、上記のとおり、**「増幅方向」に位置する小断層から生じた地震波がS波低速度層を伝播することで生じる地震動の顕著な増幅を、地盤増幅特性において考慮することを表している。**



震源モデル（地震動の顕著な増幅を考慮）の強震動生成域の小断層のうち、グリーン関数（震源特性s(f)×伝播特性p(f)×地盤増幅特性g(f)）に増幅係数を乗じることで、一次元地下構造モデルによる地盤増幅特性（g(f)）を補正して、S波低速度層による三次元的な地下構造の影響を考慮する小断層

<震源モデル（地震動の顕著な増幅を考慮）と地震動の顕著な増幅を考慮する小断層の設定>



<本資料における表現>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（グリーン関数に乗じる増幅係数）

○ 増幅を考慮する周期帯は、2009年駿河湾の地震（本震）で５号炉周辺の顕著な増幅が見られた周期帯0.2～0.5秒を参考としてより広帯域に設定する。
○ 増幅を考慮する程度は、2009年駿河湾の地震（本震）におけるはぎとり波の加速度フーリエスペクトル比（5G1/3G1，5RB/3G1）及び周期別SI値比（周期0.02～0.5秒）を参考として設定する。
○ 2009年駿河湾の地震（本震）は増幅の程度が最も大きく、信頼性の高い記録が得られた地震である。

＜2009年駿河湾の地震（本震）における周期別SI値比※1＞
（周期0.02～0.5秒※2）

	NS	EW	UD
4G1/3G1	0.93	1.08	0.72
5G1/3G1	2.40	1.97	1.42
5RB/3G1	2.47	2.50	1.38

※1　構造物の応答に関連する指標であり、下記により定義される。

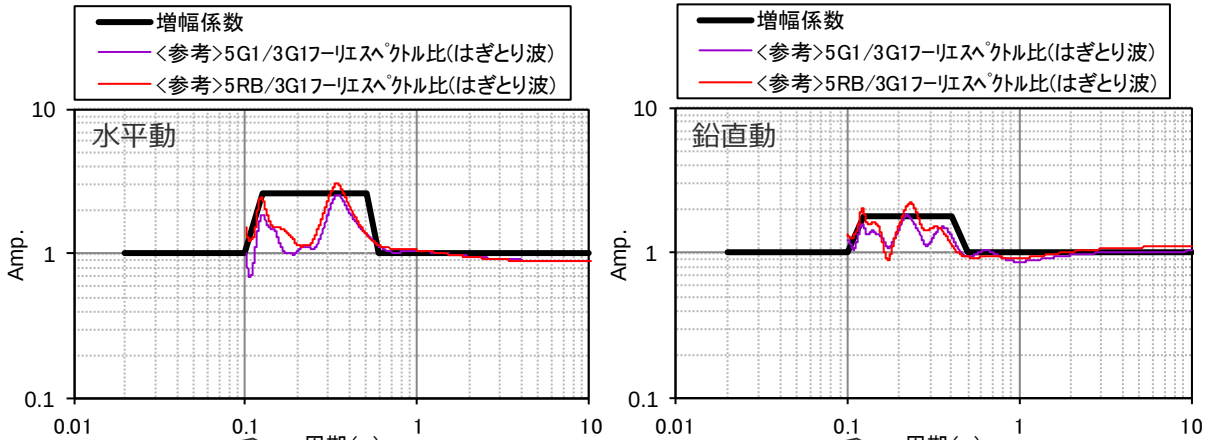
$$\text{周期別SI値} = \int_{T_1}^{T_2} S_v(T,h)dT$$

ここで、Sv：擬似速度応答スペクトル
T：周期
h：減衰定数（5%とする）

※2　2009年駿河湾の地震（本震）の応答スペクトルにおいて５号炉周辺の顕著な増幅が見られた周期帯。

＜グリーン関数に乗じる増幅係数＞

周期(s)	水平動	周期(s)	鉛直動
0.02	1	0.02	1
0.1	1	0.1	1
0.125	2.6	0.125	1.8
0.5	2.6	0.4	1.8
0.6	1	0.5	1
10	1	10	1



増幅係数及びフーリエスペクトル比の積分値に基づき、以下の比率を算出（周期0.1～0.6秒）。
・増幅係数／（5G1/3G1ﾌｰﾘｴｽﾍﾟｸﾄﾙ比）=1.58
・増幅係数／（5RB/3G1ﾌｰﾘｴｽﾍﾟｸﾄﾙ比）=1.39

増幅係数及びフーリエスペクトル比の積分値に基づき、以下の比率を算出（周期0.1～0.5秒）。
・増幅係数／（5G1/3G1ﾌｰﾘｴｽﾍﾟｸﾄﾙ比）=1.28
・増幅係数／（5RB/3G1ﾌｰﾘｴｽﾍﾟｸﾄﾙ比）=1.20

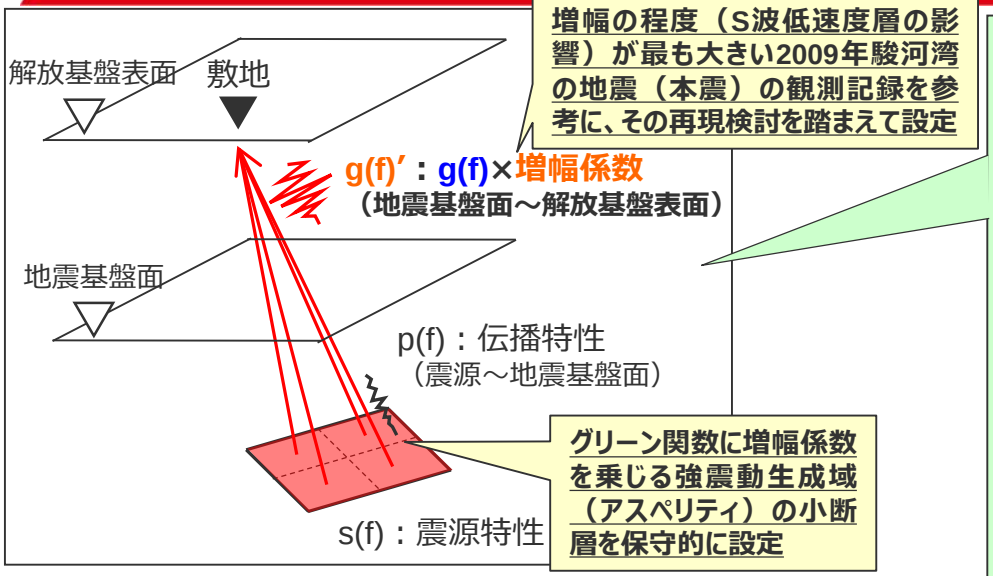
＜グリーン関数に乗じる増幅係数＞

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.543再掲

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（増幅係数を乗じることによる地盤増幅特性の補正）



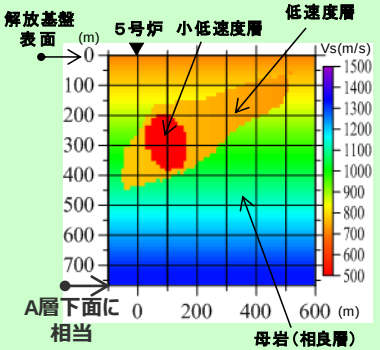
増幅の程度（S波低速度層の影響）が最も大きい2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録を参考に、その再現検討を踏まえて設定

グリーン関数に増幅係数を乗じる強震動生成域（アスペリティ）の小断層を保守的に設定

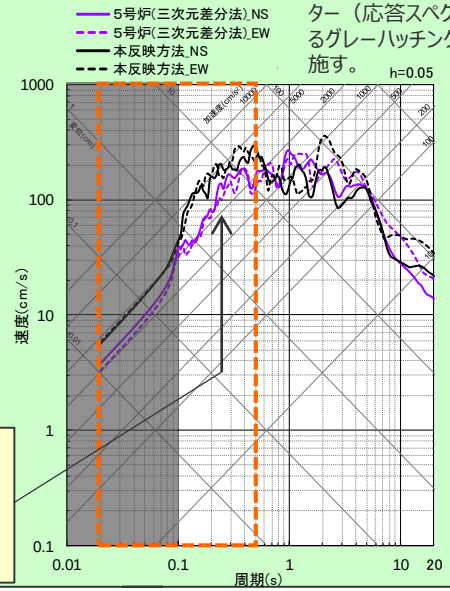
敷地におけるグリーン関数
＝s(f)×p(f)×g(f)′（g(f)×増幅係数）

g(f)′：S波低速度層の影響を考慮した地盤増幅特性

地震動評価への反映方法の検証（浅部三次元地下構造モデルを用いた地震動評価結果との比較検討）



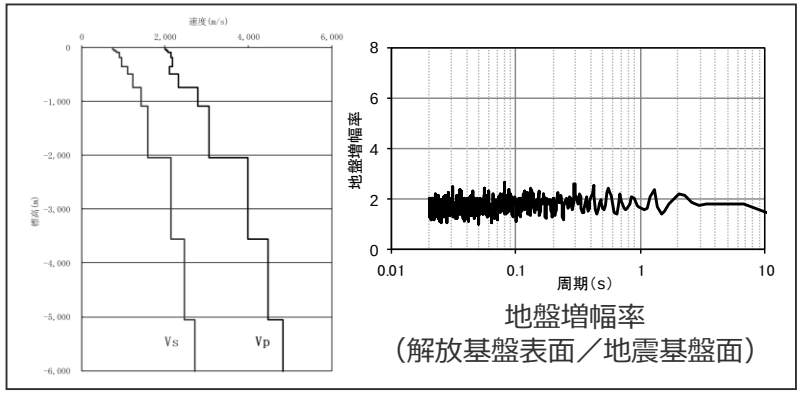
浅部三次元地下構造モデル



地震動の顕著な増幅が見られる周期帯（0.5秒以下）で三次元差分法による地震動評価結果を上回っている

・三次元差分法の対象周波数の上限は10Hzとし、統計的GF法及び三次元差分法の波形には10Hzハイカットフィルター（応答スペクトル図におけるグレーハッチングに相当）を施す。

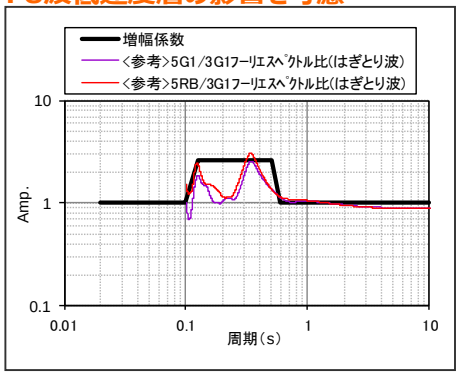
g(f)：一次元地下構造モデルの地盤増幅率



地盤増幅率
（解放基盤表面／地震基盤面）

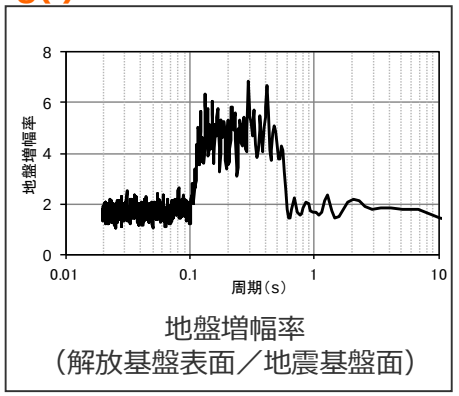
×

グリーン関数に乗じる増幅係数：S波低速度層の影響を考慮



＝

g(f)′



地盤増幅率
（解放基盤表面／地震基盤面）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

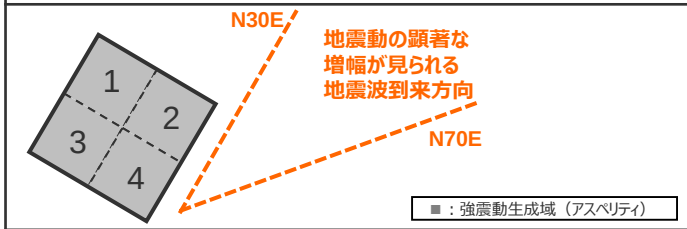
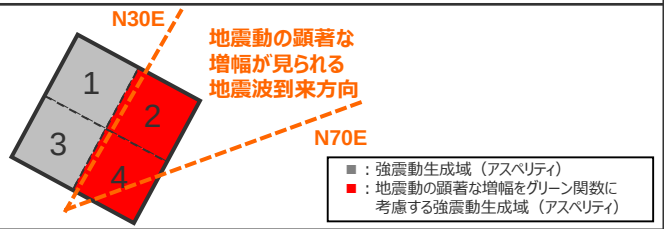
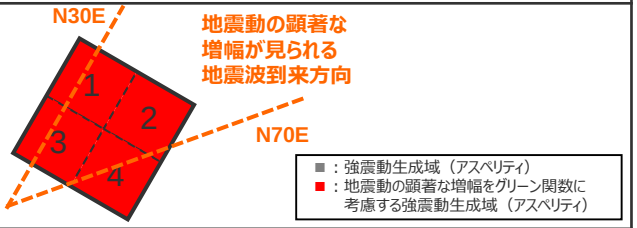
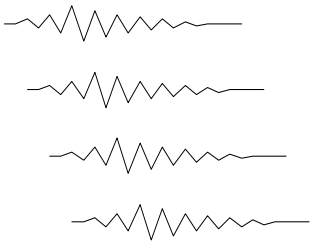
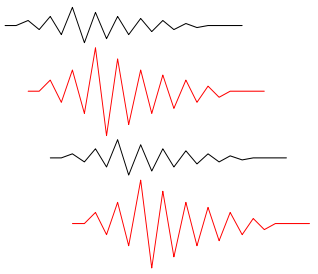
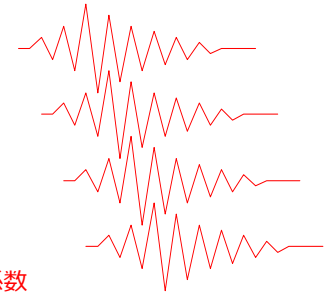
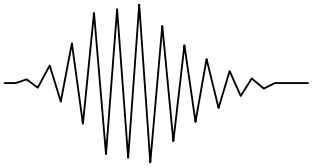
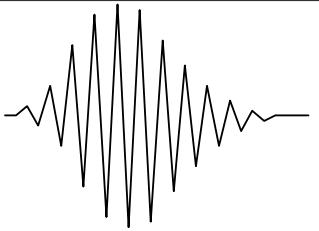
<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.544再掲

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（合成波形における地盤増幅特性）

○ 強震動生成域（アスペリティ）の小断層から敷地に到来する地震波（グリーン関数）に考慮する地盤増幅特性g(f)と増幅係数とを共通とし、地震動の顕著な増幅が見られる地震波到来方向（N30E～N70E）に短周期の地震動に支配的な強震動生成域（アスペリティ）の小断層が位置する割合が異なるケースA、B、Cを考えてみると、ケース毎に地震動の顕著な増幅を考慮する強震動生成域（アスペリティ）の小断層の数が異なることにより、これらを足し合せて作成される合成波形（敷地における地震動）の地震動レベルが結果的に異なる。

○ これは、合成波形（敷地における地震動）の地震動レベルが、強震動生成域（アスペリティ）の小断層が地震動の顕著な増幅が見られる地震波到来方向（N30E～N70E）に位置する割合がケースにより異なることによって、地盤増幅特性（G(f)）が異なることに相当する。

ケースA （すべての強震動生成域（アスペリティ）の小断層に地震動の顕著な増幅の考慮なし）	ケースB （強震動生成域（アスペリティ）の一部の小断層に地震動の顕著な増幅を考慮）	ケースC （すべての強震動生成域（アスペリティ）の小断層に地震動の顕著な増幅を考慮）
		
小断層1のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f) 小断層2のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f) 小断層3のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f) 小断層4のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f) 	小断層1のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f) 小断層2のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f)′ 小断層3のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f) 小断層4のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f)′ g(f)′=g(f)×増幅係数 	小断層1のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f)′ 小断層2のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f)′ 小断層3のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f)′ 小断層4のグリーン関数 =s(f)×p(f)×g(f)′ g(f)′=g(f)×増幅係数 
合成波形 =S(f)×P(f)×G_A(f) 	合成波形 =S(f)×P(f)×G_B(f) 	合成波形 =S(f)×P(f)×G_C(f) 
合成波形における地盤増幅特性G(f)：小	**合成波形における地盤増幅特性G(f)：中**	**合成波形における地盤増幅特性G(f)：大**

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.545修正

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討（概要））

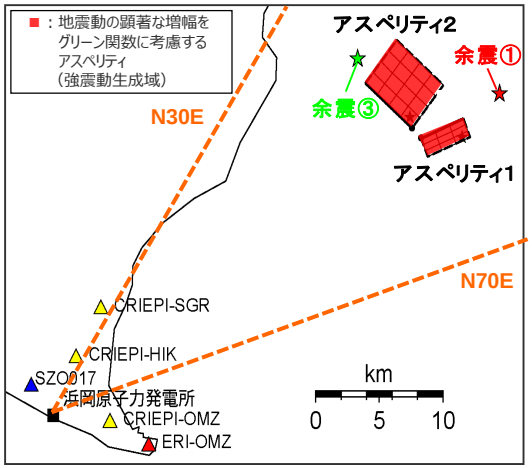
【断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法の検証
（統計的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討）（第194回審査会合で説明）】

○ 振幅レベルが大きく、信頼性の高い記録が得られている2009年駿河湾の地震（本震）を対象として、強震動生成域（アスペリティ）のみの震源モデルを用いて、一次元地下構造モデルを用いた統計的グリーン関数法による地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価を行い、波形合成結果での比較により、地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点（3G1、4G1）の観測記録との比較を行った。

○ また、地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法の検証として、本反映方法（強震動生成域（アスペリティ）の各小断層のグリーン関数に増幅係数を乗じる方法）を用いて統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、波形合成結果での比較により、地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録との比較を行った。

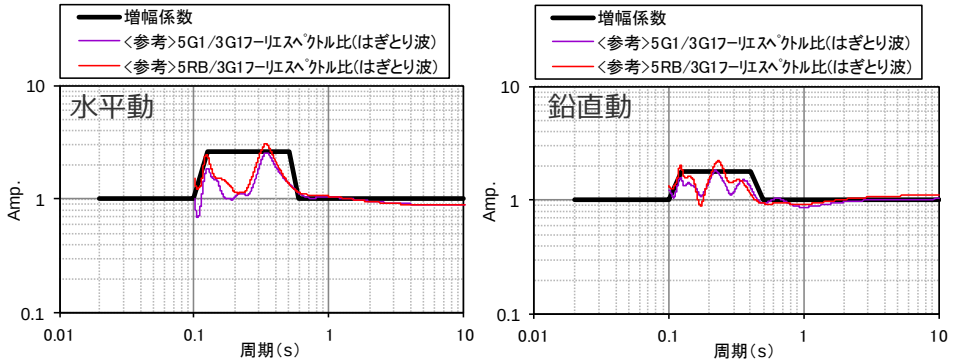
○ なお、各検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）に当たっては、地震動の顕著な増幅を考慮する強震動生成域（アスペリティ）の小断層の範囲・増幅の程度を地震観測記録の分析結果に対し保守的に設定して断層モデルを用いた手法による保守的な地震動評価を行う。

	面積	地震モーメント	応力降下量
アスペリティ１（南部）	13.0km^2	6.80×10^{17}Nm	35.7MPa
アスペリティ２（北部）	23.0km^2	1.20×10^{18}Nm	27.5MPa



<2009年駿河湾の地震（本震）の震源モデル>
（当社作成）

周期(s)	水平動	周期(s)	鉛直動
0.02	1	0.02	1
0.1	1	0.1	1
0.125	2.6	0.125	1.8
0.5	2.6	0.4	1.8
0.6	1	0.5	1
10	1	10	1



<グリーン関数に乗じる増幅係数>

・経験的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の特性化震源モデル（当社作成）は、補足説明資料③-23参照。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

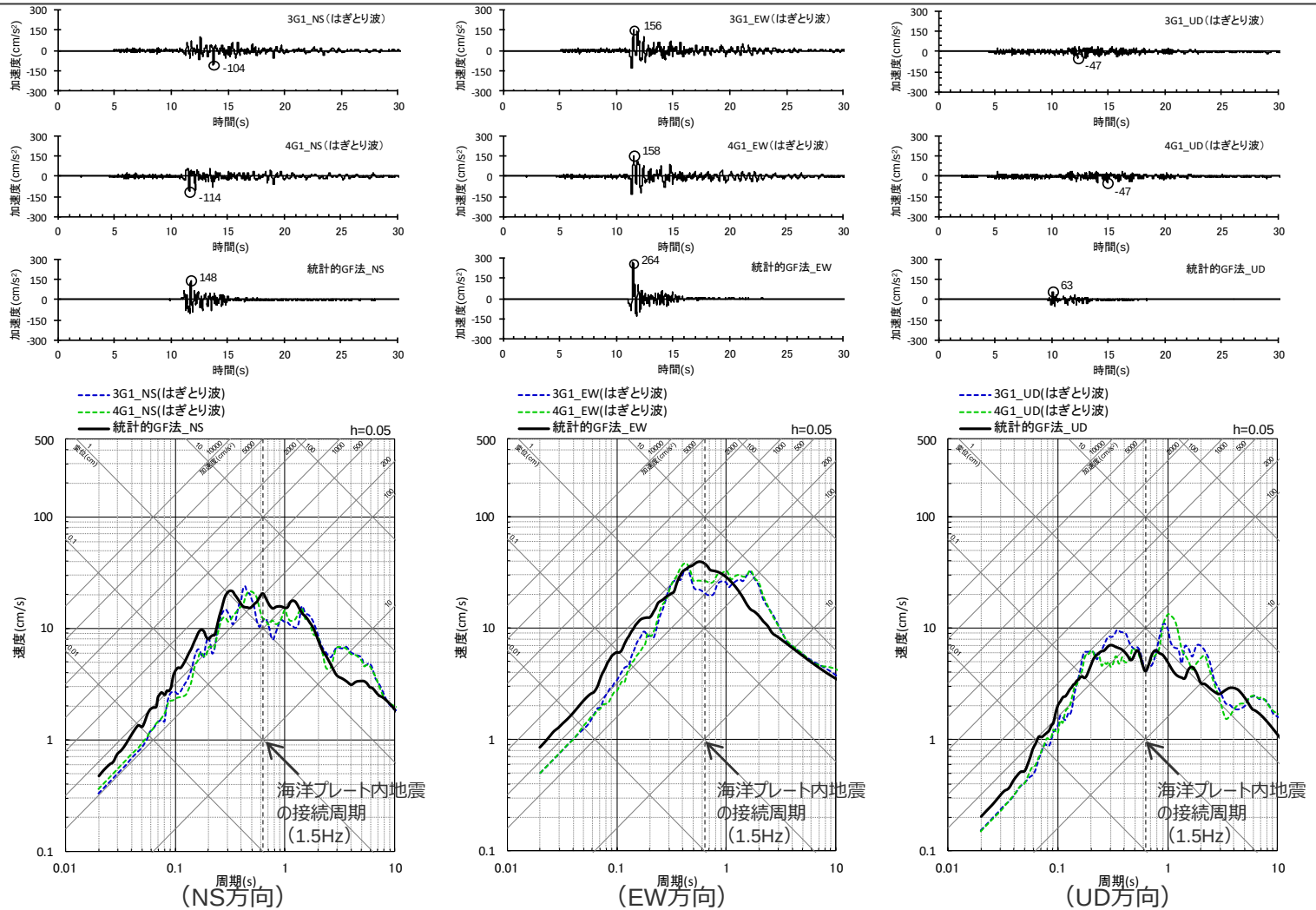
<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.546再掲

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法

（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の再現検討結果と３号炉（3G1）、４号炉（4G1）の観測記録（はぎとり波）との比較）

○統計的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果は、その評価対象周期（短周期）で**３号炉（3G1）、４号炉（4G1）の観測記録（はぎとり波）を概ね再現**している。



（NS方向）　（EW方向）　（UD方向）

<2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果と３号炉（3G1）、４号炉（4G1）の観測記録（はぎとり波）との比較>
（上図：加速度時刻歴波形、下図：応答スペクトル）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

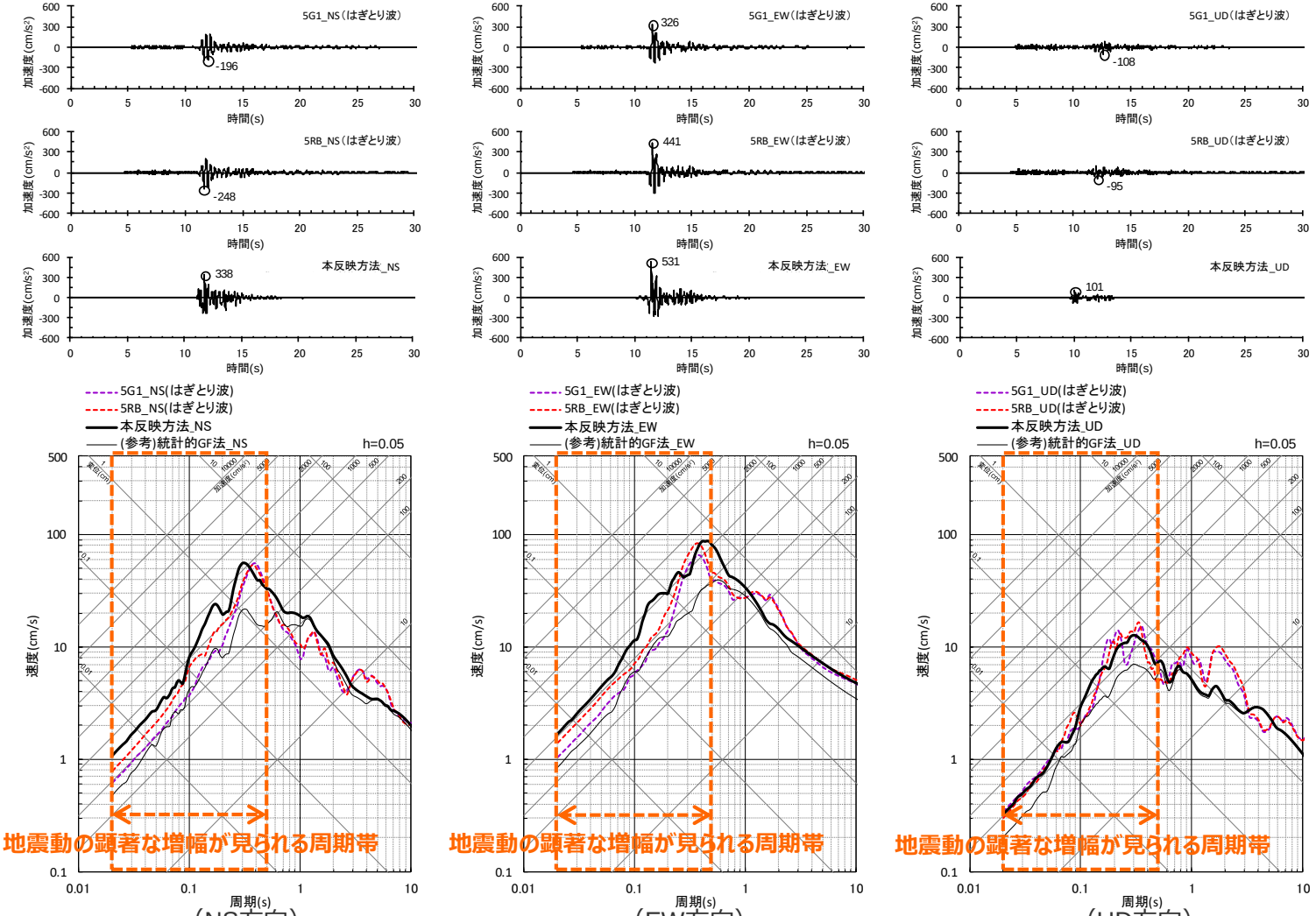
<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.547再掲

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法

（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の再現検討結果と５号炉（5G1, 5RB）の観測記録（はぎとり波）との比較）

○本反映方法を用いた統計的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果は、地震動の顕著な増幅が見られる周期帯（0.5秒以下）で５号炉（5G1, 5RB）の観測記録（はぎとり波）を概ね再現している。



（NS方向）　（EW方向）　（UD方向）

<2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果と５号炉（5G1,5RB）の観測記録（はぎとり波）との比較>
（上図：加速度時刻歴波形、下図：応答スペクトル）

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

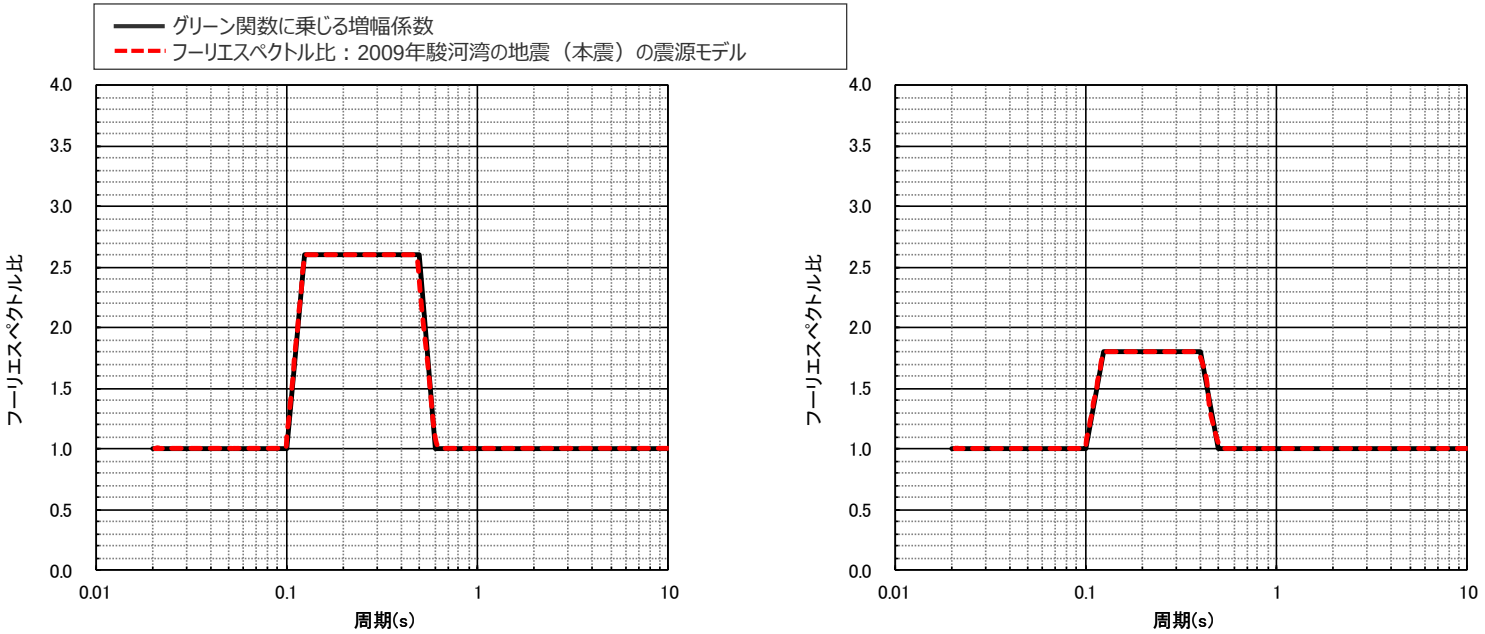
断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の再現検討におけるフーリエスペクトル比の分析）

○統計的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討における、増幅係数を乗じない地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果と増幅係数を乗じる地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果を用いて、波形合成結果のフーリエスペクトル比（地震動の顕著な増幅を考慮する場合／地震動の顕著な増幅を考慮しない場合）を分析した。

⇒2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討における波形合成結果のフーリエスペクトル比（地震動の顕著な増幅を考慮する場合／地震動の顕著な増幅を考慮しない場合）は、各小断層のグリーン関数に乗じた増幅係数と同じとなっている。

フーリエスペクトル比を算出

$$\frac{\text{地震動の顕著な増幅を考慮する場合のフーリエスペクトル※}}{\text{地震動の顕著な増幅を考慮しない場合のフーリエスペクトル※}}$$



（水平動※）　　（鉛直動）

<「各小断層のグリーン関数に乗じる増幅係数」と「波形合成結果のフーリエスペクトル比」の比較>
（2009年駿河湾の地震（本震）の震源モデル）

※ 水平動はNS方向とEW方向の平均。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

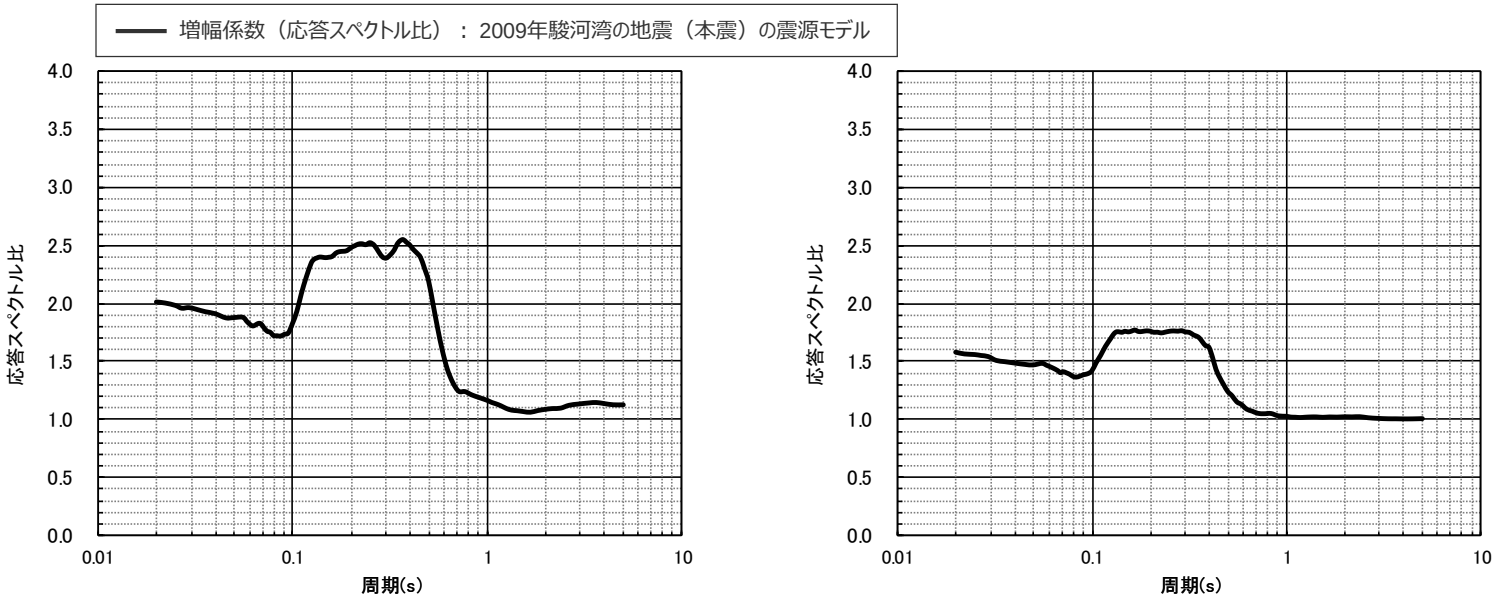
第992回
資料1-6 p.549一部修正

断層モデルを用いた手法による地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の再現検討における応答スペクトル比の分析）

○2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討における波形合成結果のフーリエスペクトル比の分析と同様に、応答スペクトル比（地震動の顕著な増幅を考慮する場合／地震動の顕著な増幅を考慮しない場合）を分析した結果は下図のとおり。
○なお、ある周期の応答スペクトルの値は、当該周期を固有周期に持つ１質点系の最大応答値であり、当該周期の地震動のエネルギー（≒フーリエスペクトル振幅）だけでなく、それ以外の周期成分の地震波のエネルギーの影響も受ける。そのため、地震動の顕著な増幅が見られた周期0.3秒付近の倍率を見ると、地震動の顕著な増幅をする周期成分の地震波だけでなく、地震動の顕著な増幅をしない周期成分の地震波の影響も受けていることにより、応答スペクトル比はフーリエスペクトル比と比べてやや小さい。

応答スペクトル比を算出

$$\frac{\text{地震動の顕著な増幅を考慮する場合の応答スペクトル※}}{\text{地震動の顕著な増幅を考慮しない場合の応答スペクトル※}}$$



（水平動※）　　（鉛直動）

＜応答スペクトル比（地震動の顕著な増幅を考慮する場合／地震動の顕著な増幅を考慮しない場合）＞
（2009年駿河湾の地震（本震）の震源モデル）

※ 水平動はNS方向とEW方向の平均。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（方針）

第992回
資料1-6 p.550修正

【応答スペクトルに基づく手法の概要】

○ 応答スペクトルに基づく手法は、地震規模や震源距離といった巨視的パラメータにより震源断層全体の地震動を評価する手法である。

○ 応答スペクトルに基づく手法では、検討用地震と震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性が同様と見なせる地震の観測記録が得られている場合、その観測記録を用いて、検討用地震と同様の震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性を反映した地震動評価を行うことができる。

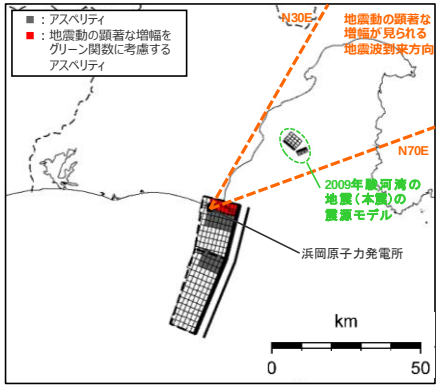
○ その際、三次元的な地下構造の影響により地震動の顕著な増幅が見られるサイトでは、震源断層面の広がりや地震波到来方向の違いによって地盤増幅特性が異なることから、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性（地震動の顕著な増幅特性）を適切に反映するためには、各検討用地震と震源断層面の広がりや地震波到来方向が同様と見なせる観測記録を用いる必要がある。

【浜岡原子力発電所の観測記録】

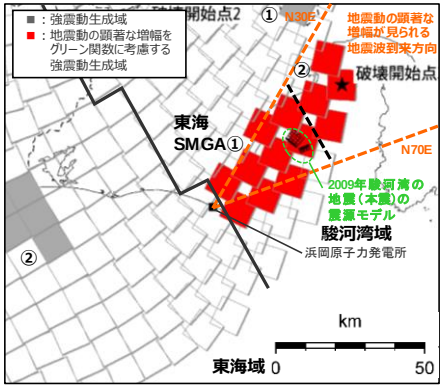
○ 浜岡原子力発電所の検討用地震には、内陸地殻内地震、プレート間地震、海洋プレート内地震の３つの地震タイプがあり、敷地への影響が最も大きい地震タイプはプレート間地震である。敷地における観測地震に関し、３つの地震タイプの各検討用地震と震源断層面の広がりや地震波の到来方向が同様と見なせ、**<u>各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映された観測記録は得られていない</u>**。

【断層モデルを用いた手法による地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果】

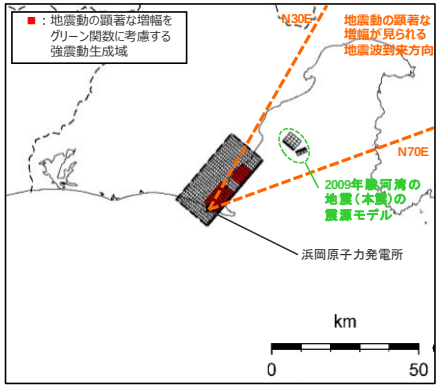
○ 断層モデルを用いた手法は、震源断層を小断層に分割し、小断層毎に敷地に到来する地震動を詳細に考慮できるため、各検討用地震の震源断層面の広がりや地震波到来方向の違いに応じて、地震観測記録に基づき確認された地震動の顕著な増幅の特性を的確に反映できること、当該反映方法の妥当性は2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討により検証されていることから、この地震動評価結果には、**<u>各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映されている</u>**。



内陸地殻内地震（御前崎海脚西部の断層帯による地震）



プレート間地震（南海トラフ沿いの巨大地震）



海洋プレート内地震（敷地直下の想定スラブ内地震）

<u>【応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法】</u>

○ 地震タイプ共通の地震動の顕著な増幅の反映方法として、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映された**<u>『断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響を求めて反映する方法』</u>**により応答スペクトルに基づく地震動評価を行うこととし、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が震源断層全体の地震動の応答スペクトルに与える影響を反映する。

○ 検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）に当たっては、断層モデルを用いた手法による地震動評価に保守性を考慮することで、応答スペクトルに基づく地震動評価にも保守性を考慮する。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.551修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法（概要）

【応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法】

○ 前述のとおり、地震タイプ共通の地震動の顕著な増幅の反映方法として、『各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映された断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響を求めて反映する方法』により応答スペクトルに基づく地震動評価を行うこととし、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が震源断層全体の地震動の応答スペクトルに与える影響を適切に反映する。

○ 各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が震源断層全体の地震動の応答スペクトルに与える影響として、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて増幅係数（応答スペクトル比＝地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果／地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果）を求めることで反映する。

○ 増幅係数（応答スペクトル比）の算出に当たって、「本反映方法により地震動の顕著な増幅を反映した断層モデルを用いた手法による地震動評価結果の応答スペクトル比（地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果／地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果）」はNS方向とEW方向で同程度となること（補足説明資料②p.301,356,415~417参照）、応答スペクトルに基づく手法は震源断層全体の地震動を評価する手法であり、Noda et al.(2002)の方法等を含めて一般に距離減衰式を作成する際には水平動はNS方向の観測記録とEW方向の観測記録とを区別せずに回帰分析が行われていることから、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて求める増幅係数（応答スペクトル比）は各破壊開始点の平均、水平動についてはNS方向とEW方向の平均を用いる。

○ 検討用地震の応答スペクトルに基づく地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）は本反映方法により行うこととし、断層モデルを用いた手法による地震動評価に保守性を考慮することで、応答スペクトルに基づく地震動評価にも保守性を考慮する。

【応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法の検証（2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討）】

○ 断層モデルを用いた手法の検証と同様、2009年駿河湾の地震（本震）を対象に、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響として増幅係数（応答スペクトル比）を求めて反映する方法により、応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価を行い、地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録の応答スペクトルを概ね再現していることを確認する。

【観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数を用いた地震動評価との比較（海洋プレート内地震の検討用地震）】

○ 海洋プレート内地震の検討用地震（敷地下方の想定スラブ内地震）は、2009年駿河湾の地震（本震）と地震タイプが同じではあるが、震源断層面の広がりや震源位置（敷地から40km程度遠方）が異なることから、2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録は、検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が反映された観測記録ではないが、検討用地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）に当たり、保守的に敷地近傍を含めて全ての強震動生成域に地震動の顕著な増幅を考慮することを踏まえて、観測記録から算出したNoda et al.(2002)の方法の補正係数を用いた応答スペクトルに基づく地震動評価結果と本反映方法による地震動評価結果との比較確認を行う。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.552修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（先行サイトと浜岡サイトとの比較）

【応答スペクトルに基づく地震動評価（三次元的な地下構造の影響により地震動の顕著な増幅が見られる場合）】

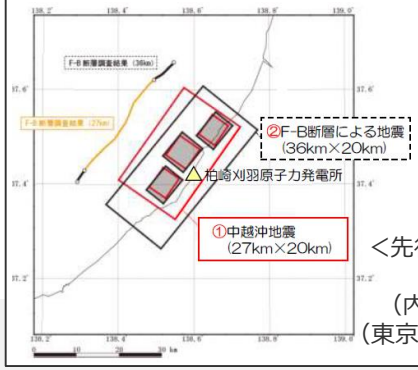
○ 水平成層地盤と見なせるサイトでは、震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性が同様の地震と見なせる同じ地震タイプの敷地の観測記録を用いて検討用地震の地震動評価が行われている。一方、三次元的な地下構造の影響により地震動の顕著な増幅が見られるサイトでは、震源断層面の広がりや地震波到来方向の違いによって地盤増幅特性が異なることから、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性（地震動の顕著な増幅特性）を適切に反映するためには、各検討用地震と震源断層面の広がりや地震波到来方向が同様と見なせる観測記録を用いる必要がある。

【先行サイトの事例（検討用地震と同じ震源断層で発生した規模が近い地震の観測記録が得られている場合の事例）】

○ 三次元的な地下構造（古い褶曲構造及び深部地盤における不整形性）の影響により地震動の顕著な増幅が見られる先行事例として、検討用地震と同じ震源断層で発生した規模が近い地震の観測記録を用いてNoda et al.(2002)の方法の補正係数を算定し、地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価が行われている。

○ この場合、震源断層の広がりや地震波到来方向は観測地震と検討用地震で同様と見なせ、観測記録には検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映されている。

○ また、震源特性に関し、地震タイプが同じだけでなく、同じ震源断層で発生した規模が近い地震であることから、観測記録には震源の破壊過程の影響も含めて検討用地震固有の震源特性が詳細に反映されている。



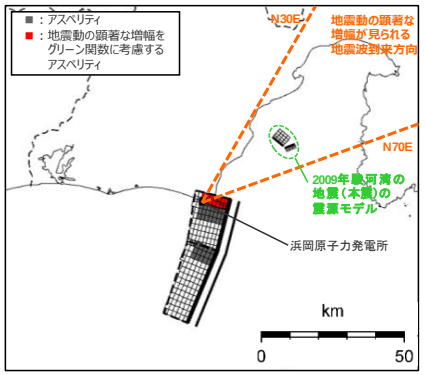
<先行サイトの検討用地震の評価事例（内陸地殻内地震）>
（東京電力HD(2016)による）

【浜岡原子力発電所の場合（検討用地震と同じ震源断層で発生した地震の観測記録が得られていない）】

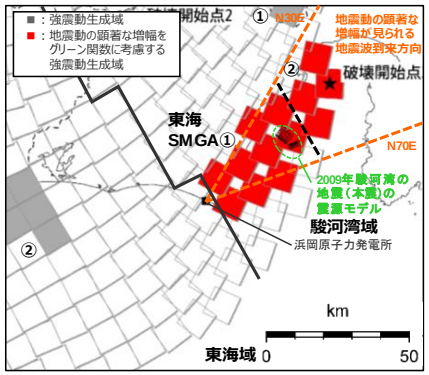
○ 浜岡原子力発電所では、三次元的な地下構造（局所的に分布する浅部地盤のS波低速度層）の影響により、特定の到来方向（N30E～N70E）の地震波のみに、短周期の特定の周期帯（フーリエスペクトルの周期0.2～0.5秒）で地震動の顕著な増幅が見られ（先行サイトの地盤増幅特性と異なる）、敷地において、３つの地震タイプの各検討用地震と震源断層面の広がりや地震波到来方向が同様と見なせ、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が反映された観測記録は得られていない。

○ そこで、地震タイプ共通の地震動の顕著な増幅の反映方法として、『検討用地震の震源断層面の広がりや地震波到来方向の違いに応じて敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映された断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響を求めて反映する方法』により応答スペクトルに基づく地震動評価を行う。

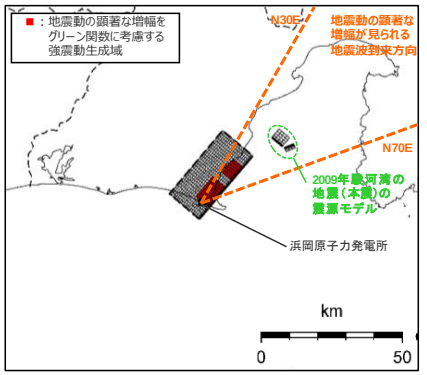
○ ただし、海洋プレート内地震の検討用地震（敷地下方の想定スラブ内地震）は、2009年駿河湾の地震（本震）と地震タイプが同じではあるが、同じ震源断層で発生した地震ではなく、震源断層面の広がりや震源位置、震源の破壊過程の影響が異なることから、2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録は検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が反映された観測記録ではないが、検討用地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）に当たり、保守的に敷地近傍を含めて全ての強震動生成域に地震動の顕著な増幅を考慮することを踏まえて、観測記録から算出したNoda et al.(2002)の方法の補正係数を用いた応答スペクトルに基づく地震動評価結果と本反映方法による地震動評価結果との比較確認を行う。



内陸地殻内地震（御前崎海脚西部の断層帯による地震）



プレート間地震（南海トラフ沿いの巨大地震）



海洋プレート内地震（敷地直下の想定スラブ内地震）

<浜岡サイトの検討用地震の評価（地震動の顕著な増幅を考慮）の事例（内陸地殻内地震、プレート間地震、海洋プレート内地震）>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.553修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（増幅係数（応答スペクトル比）の算出方法）

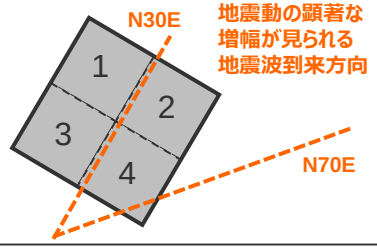
○ 応答スペクトルに基づく地震動評価は、３つの地震タイプ（内陸地殻内地震、プレート間地震、海洋プレート内地震）の各検討用地震と震源断層面の広がりや地震波の到来方向が同様と見なせ、各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が反映された観測記録が得られていないことを踏まえ、地震タイプ共通の地震動の顕著な増幅の反映方法として、『各検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が適切に反映された断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響（地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果／地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果）を求めて反映する方法』により応答スペクトルに基づく地震動評価を行うこととし、各検討地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が震源断層全体の地震動の応答スペクトルに与える影響を反映する。

○ 具体的には、検討用地震の震源モデル毎に、上記の影響を求めるため、地震動の顕著な増幅を考慮する場合と考慮しない場合について、断層モデルを用いた手法による地震動評価を行い、これらの結果による増幅係数（応答スペクトル比：「地震動の顕著な増幅を考慮する場合の平均応答スペクトル（各破壊開始点の平均）」／「地震動の顕著な増幅を考慮しない場合の平均応答スペクトル（各破壊開始点の平均）」※）を水平動・鉛直動それぞれで算出し、応答スペクトルに基づく地震動評価結果（地震動の顕著な増幅を考慮しない）に乗じる。

【地震動の顕著な増幅を考慮しない】

■：強震動生成域（アスペリティ）

合成波形（敷地における地震動）
＝S(f)×P(f)×G(f)

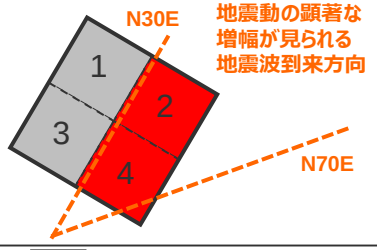


断層モデルを用いた
手法による地震動評価
（地震動の顕著な増幅を
考慮しない）

【地震動の顕著な増幅を考慮】

■：強震動生成域（アスペリティ）
■：地震動の顕著な増幅をグリーン関数に考慮する強震動生成域（アスペリティ）

合成波形（敷地における地震動）
＝S(f)×P(f)×G(f)'



断層モデルを用いた
手法による地震動評価
（地震動の顕著な増幅を
考慮）

増幅係数（応答スペクトル比）を算出

$$\frac{\text{地震動の顕著な増幅を考慮する場合の平均応答スペクトル（各破壊開始点の平均）※}}{\text{地震動の顕著な増幅を考慮しない場合の平均応答スペクトル（各破壊開始点の平均）※}}$$

応答スペクトルに基づく地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）
＝ 応答スペクトルに基づく地震動評価結果（地震動の顕著な増幅を考慮しない）× 増幅係数（応答スペクトル比）

※ 増幅係数（応答スペクトル比）の算出に当たって、「本反映方法により地震動の顕著な増幅を反映した断層モデルを用いた手法による地震動評価結果の応答スペクトル比（地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果／地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果）」はNS方向とEW方向で同程度となること（補足説明資料②p.301,356,415~417参照）、応答スペクトルに基づく手法は震源断層全体の地震動を評価する手法であり、Noda et al.(2002)の方法等を含めて一般に距離減衰式を作成する際には水平動はNS方向の観測記録とEW方向の観測記録とを区別せずに回帰分析が行われていることから、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて求める増幅係数（応答スペクトル比）は各破壊開始点の平均、水平動についてはNS方向とEW方向の平均を用いる。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.554一部修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（各地震タイプの応答スペクトルに基づく地震動評価の概要）

応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価

【内陸地殻内地震※1,4・プレート間地震※2,4】

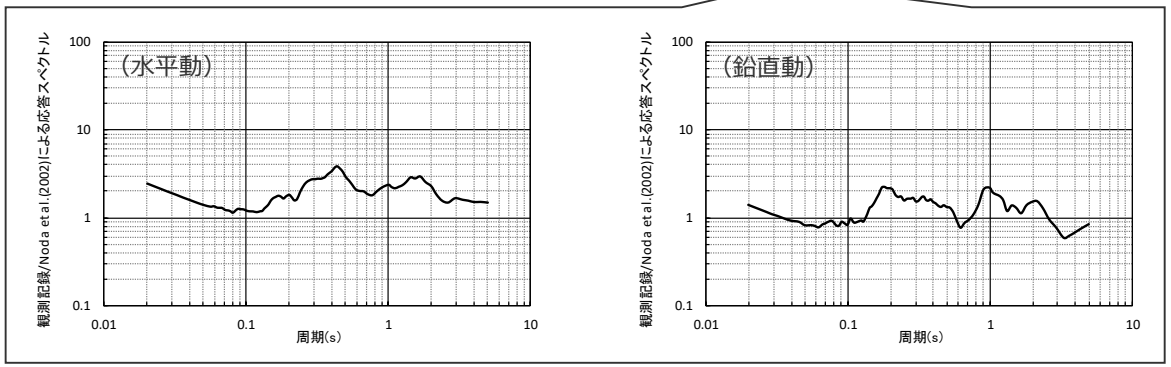
検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価 ＝ 検討用地震の Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトル

【海洋プレート内地震※3】

検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価 ＝ 検討用地震の Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトル × **観測記録に基づく補正係数：地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点の観測記録のNoda et al.(2002)の方法による応答スペクトルとの比※5**

$$\frac{\text{2009年駿河湾の地震（本震M6.5）の地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点（3G1,4G1）の観測記録（応答スペクトル）}}{\text{Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトル（M6.5）}}$$

地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点の観測記録に基づく補正係数を考慮



応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価（本反映方法）

【内陸地殻内地震・プレート間地震・海洋プレート内地震】

検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価 ＝ **検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価** × **増幅係数（応答スペクトル比）：地震動の顕著な増幅が見られた観測点と見られなかった観測点の地盤増幅特性の比**

検討用地震の
断層モデルを用いた手法による地震動評価結果に基づく
増幅係数（応答スペクトル比）

※1 Noda et al.(2002)の方法の適用範囲外の場合は、適用範囲内のNGA等の距離減衰式による。
※2 強震動生成域の応力降下量の不確かさの影響を反映する地震動評価は、中央防災会議モデル（既往地震）のM_0-A関係に対する基本震源モデルのM_0-A関係の比率を乗じる。
※3 短周期レベルの不確かさを考慮した震源モデルの地震動評価は、片岡・他(2006)による。
※4 内陸地殻内地震及びプレート間地震については、敷地において観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数の算出に用いることのできる観測記録は得られていない。
※5 御前崎沖の想定沈み込む海洋プレート内地震の場合は、2004年紀伊半島南東沖の地震（本震）の観測記録とNoda et al.(2002)の方法による応答スペクトルとの比を用いる。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録との比較（概要））

【応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法の検証（2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討）】

○断層モデルを用いた手法の検証と同様、2009年駿河湾の地震（本震）を対象に、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響として増幅係数（応答スペクトル比）を求めて反映する方法により、応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価を行い、地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録との比較を行った。

○増幅係数（応答スペクトル比）は、統計的グリーン関数法による2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討における、一次元地下構造モデルを用いた「地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果」と、強震動生成域（アスペリティ）の各小断層のグリーン関数に増幅係数を乗じる方法による「地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果」を用いて算出した。

○増幅係数（応答スペクトル比）を乗じる応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価結果は、2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点（3G1、4G1）の観測記録に基づく補正係数を用いてNoda et al.(2002)の方法により求めた（結果として、当該評価結果は2009年駿河湾の地震（本震M6.5）の地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点（3G1、4G1）の観測記録（応答スペクトル）となる）。

本反映方法

2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価

＝

2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価

×

増幅係数（応答スペクトル比）：地震動の顕著な増幅が見られた観測点と見られなかった観測点の地盤増幅特性の比

2009年駿河湾の地震（本震）の
断層モデルを用いた手法による地震動評価結果に基づく
増幅係数（応答スペクトル比）

Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトルに地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点の観測記録に基づく補正係数を考慮

＝

2009年駿河湾の地震（本震M6.5）の地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点（3G1,4G1）の観測記録（応答スペクトル）

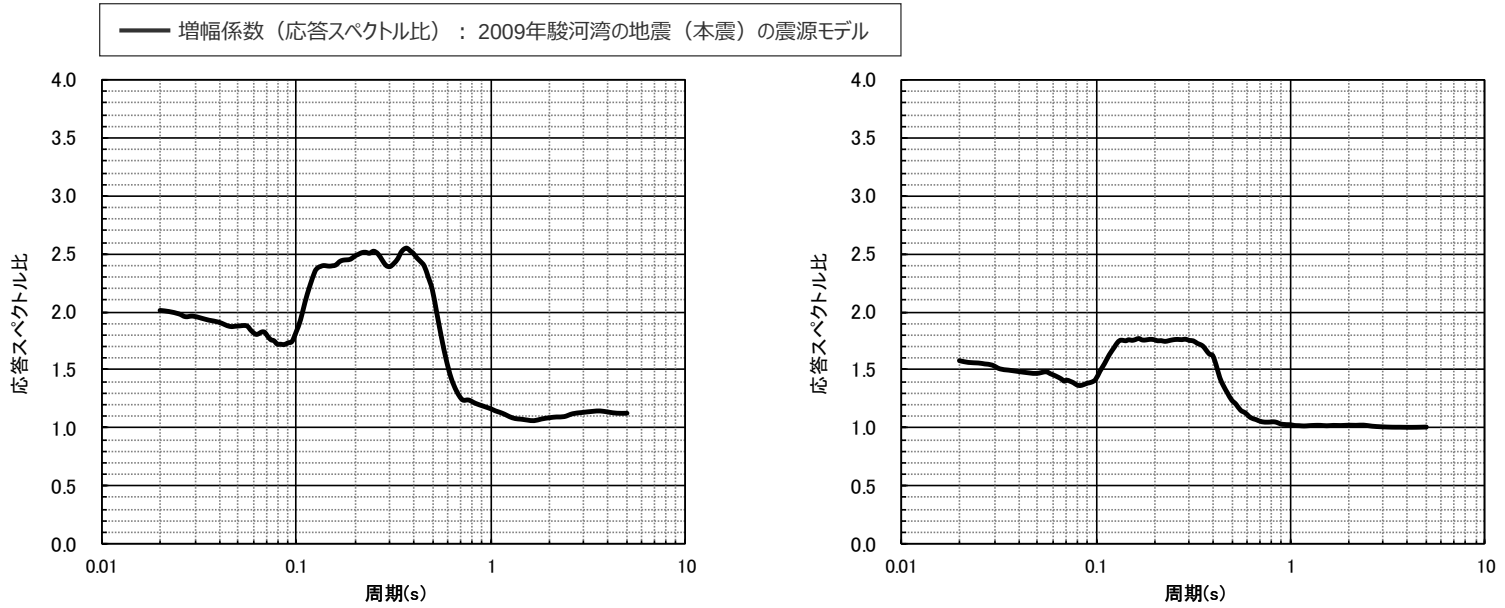
比較

2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1,5RB）の観測記録

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法
（検証：2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録との比較（概要））



（水平動※）　　（鉛直動）

<増幅係数（応答スペクトル比）（地震動の顕著な増幅を考慮する場合／地震動の顕著な増幅を考慮しない場合）>
（2009年駿河湾の地震（本震）の震源モデル）

※ 水平動はNS方向とEW方向の平均。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.557修正

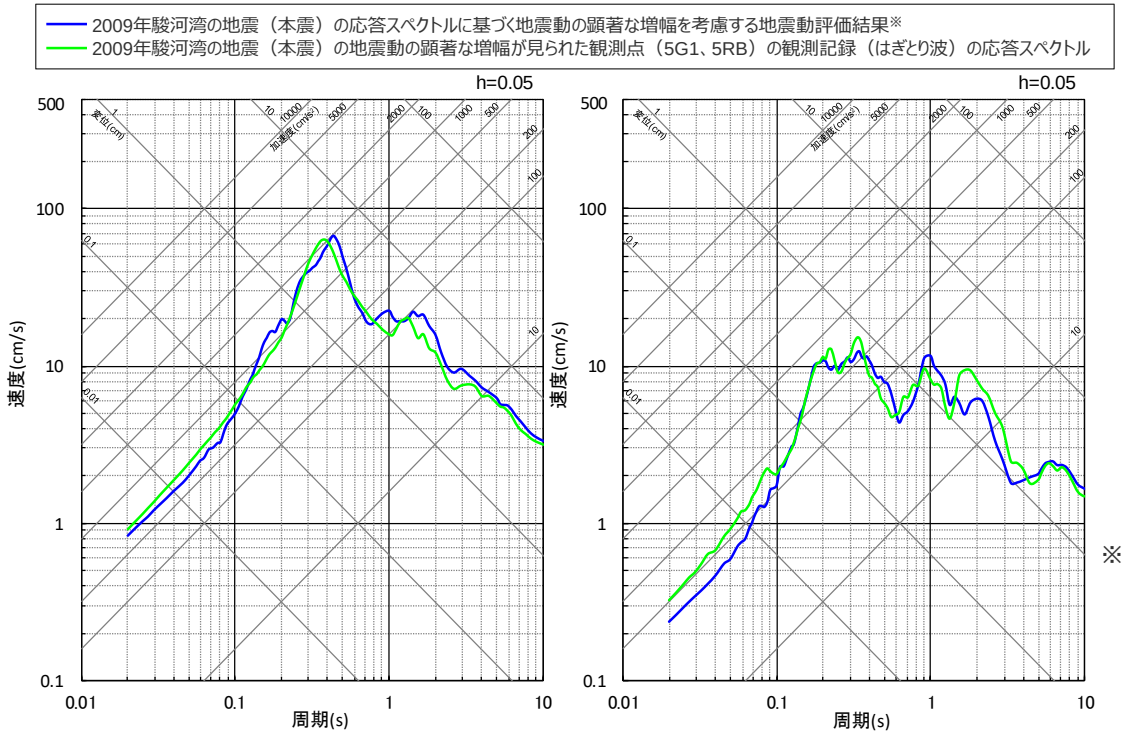
応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法

（検証：応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果と観測記録との比較）

【応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法の検証（2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討）】

○本反映方法を用いた2009年駿河湾の地震（本震）の応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果は、地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録（はぎとり波）の応答スペクトルを概ね再現している。

○なお、各検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）に当たっては、地震動の顕著な増幅を考慮する強震動生成域（アスペリティ）の小断層の範囲・増幅の程度を地震観測記録の分析結果に対し保守的に設定して断層モデルを用いた手法による保守的な地震動評価を行い、その保守的な断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を反映することにより、応答スペクトルに基づく手法についても保守的な地震動評価を行う。



（水平動）　（鉛直動）

※ 2009年駿河湾の地震（本震）の地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点（3G1、4G1）の観測記録（はぎとり波）の応答スペクトルに、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果に基づく増幅係数（応答スペクトル比）を乗じて算出。

<2009年駿河湾の地震（本震）の応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価結果と地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録（はぎとり波）の応答スペクトルとの比較>

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.558修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法

（確認：本反映方法の地震動評価と観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数を用いた地震動評価との比較）

【本反映方法の地震動評価と観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数を用いた地震動評価との比較】

○ 検討用地震における３つの地震タイプのうち、海洋プレート内地震については、地震動の顕著な増幅が見られた地震として、2009年駿河湾の地震（本震M6.5）の観測記録が敷地で得られており、Noda et al.(2002)の方法の適用範囲内である。

○ 一方、海洋プレート内地震の検討用地震（敷地下方の想定スラブ内地震（Mj7.0、Mj7.4））は保守的に敷地下方に想定しており、敷地から40km程度離れた位置で発生した2009年駿河湾の地震（本震）とは震源断層面の広がりや震源位置が異なることから、地震波の到来方向や入射角によって地震動の顕著な増幅特性が異なる等の敷地固有の地盤増幅特性を踏まえると、2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録は、海洋プレート内地震の検討用地震に応じた敷地固有の地盤増幅特性が反映された観測記録ではない。

○ ただし、海洋プレート内地震の検討用地震における断層モデルを用いた手法による地震動評価では、保守的に敷地近傍を含めて全ての強震動生成域に地震動の顕著な増幅を考慮していることを踏まえて、検討用地震の震源モデル（地震動の顕著な増幅を考慮）のうち、2009年駿河湾の地震（本震）と地震規模が異なるMj7.0とMj7.4の震源モデルを代表として、観測記録から算出したNoda et al.(2002)の方法の補正係数を用いた応答スペクトルに基づく地震動評価結果と本反映方法による地震動評価結果との比較確認を行う。

【海洋プレート内地震】

本反映方法

検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価 ＝ **検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮しない地震動評価** × 検討用地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価結果に基づく増幅係数（応答スペクトル比）

増幅係数（応答スペクトル比）：地震動の顕著な増幅が見られた観測点と見られなかった観測点の地盤増幅特性の比

Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトルに地震動の顕著な増幅が見られなかった観測点の観測記録に基づく補正係数を考慮

比較

観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数を用いる方法

検討用地震の地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価 ＝ 検討用地震のNoda et al.(2002)の方法による応答スペクトル × $\dfrac{\text{2009年駿河湾の地震（本震M6.5）の地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1,5RB）の観測記録（応答スペクトル）}}{\text{Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトル（M6.5）}}$

観測記録に基づく補正係数：地震動の顕著な増幅が見られた観測点の観測記録のNoda et al.(2002)の方法による応答スペクトルとの比

Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトルに地震動の顕著な増幅が見られた観測点の観測記録に基づく補正係数を考慮

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

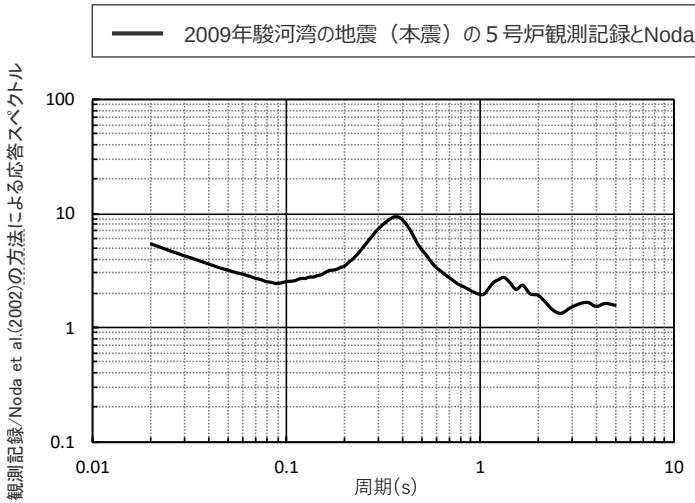
・下線（＿）は、一部修正箇所を示す。

<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

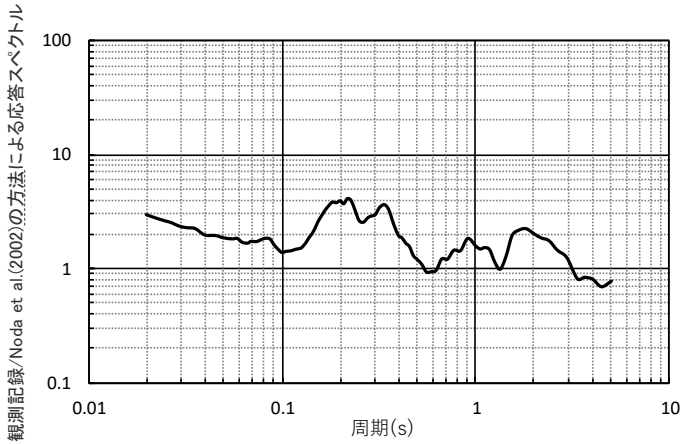
第992回
資料1-6 p.559一部修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法

（確認：本反映方法の地震動評価と観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数を用いた地震動評価との比較）



（水平動※）



（鉛直動）

<観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数：2009年駿河湾の地震（本震）の5号炉観測記録／Noda et al.(2002)の方法による応答スペクトル>

※ 水平動はNS方向とEW方向の平均。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

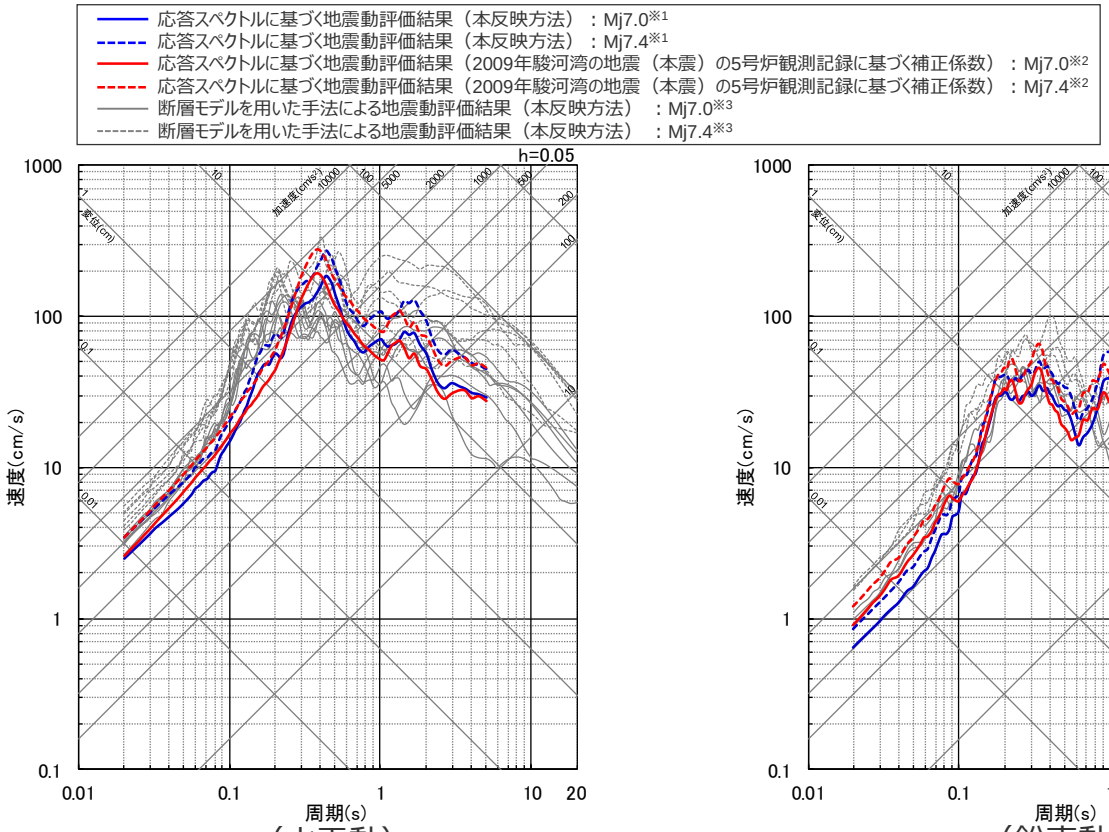
<補足説明資料①-12 地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法>

第992回
資料1-6 p.560修正

応答スペクトルに基づく地震動評価への地震動の顕著な増幅の反映方法

（確認：本反映方法の地震動評価と観測記録に基づくNoda et al.(2002)の補正係数を用いた地震動評価との比較）

○ 海洋プレート内地震の検討用地震（敷地下方の想定スラブ内地震）のMj7.0とMj7.4の震源モデルにおける地震動評価結果の比較結果は下図のとおり。
○ 本反映方法により地震動の顕著な増幅を考慮した応答スペクトルに基づく地震動評価結果は、2009年駿河湾の地震（本震）の5号炉観測記録に基づき算出した補正係数を用いた地震動評価結果と地震動レベルが概ね同程度である。この比較からも、本反映方法は妥当なものと考えられる。
○ また、地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価において重視する断層モデルを用いた手法による地震動評価結果は、2009年駿河湾の地震（本震）の5号炉観測記録に基づき算出した補正係数を用いた地震動評価結果と地震動レベルが概ね同程度であり、短周期側では大きめの結果となっている。



（水平動）　（鉛直動）

＜応答スペクトルの比較（海洋プレート内地震の検討用地震の震源モデル（地震動の顕著な増幅を考慮））＞
（Mj7.0の震源モデル（基本震源モデル）及びMj7.4の震源モデル（地震規模の不確かさを考慮した震源モデル））

※1　地震動の顕著な増幅を、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて増幅係数（応答スペクトル比）を求めて反映する方法

※2　2009年駿河湾の地震（本震）の5号炉観測記録に基づき算出した補正係数を用いたNoda et al.(2002)の方法

※3　地震動の顕著な増幅を、「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の各小断層からの地震動（グリーン関数）に増幅係数（フーリエスペクトル比）を乗じることで反映する統計的グリーン関数法

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

・下線（＿＿）は、一部修正箇所を示す。

第992回
資料1-6 p.561修正

まとめ

【地震観測記録の分析結果で確認された地震動の顕著な増幅の特性（敷地固有の地盤増幅特性）】再掲

○ ５号炉周辺観測点で見られた地震動の顕著な増幅は、時刻歴波形ではＳ波主要動部のみに見られ、フーリエスペクトルでは周期0.2～0.5秒付近の狭帯域のみに、応答スペクトルでは周期0.5秒以下の短周期側のみに見られ、これ以外の周期帯には見られない。

○ ５号炉周辺観測点において、地震動の顕著な増幅は、2009年駿河湾の地震の到来方向（N30E～N70E）の地震波のみに見られ、その他の地震波到来方向では見られない。

○ 地震動の顕著な増幅が見られた到来方向（N30E～N70E）の地震波でも、増幅の程度は一様ではなく、地震波の入射角が鉛直に近づく敷地近傍の地震ほど顕著な増幅は見られない傾向がある。このうち、2009年駿河湾の地震（本震）は増幅の程度が最も大きく信頼性が高い記録が得られた地震である。

【地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法（方針）】再掲

○ 地震観測記録の分析結果で確認された地震動の顕著な増幅の特性を的確に反映するため、この敷地固有の地盤増幅特性を詳細に考慮できる**断層モデルを用いた手法を重視し、2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討により検証した方法**（「増幅方向」に位置する強震動生成域（アスペリティ）の各小断層からの地震動（グリーン関数）に増幅係数を乗じる方法）を用いて、地震動の顕著な増幅を反映する。応答ペクトルに基づく手法は、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響を求めて反映する。

【地震の顕著な増幅の地震動評価への反映方法の検証（2009年駿河湾の地震（本震）の観測記録の再現検討）】

○ 断層モデルを用いた手法について、地震動の顕著な増幅の地震動評価への反映方法の検証として、振幅レベルが大きく、信頼性の高い記録が得られている2009年駿河湾の地震（本震）を対象として、強震動生成域（アスペリティ）のみの震源モデルに基づき、強震動生成域（アスペリティ）の各小断層のグリーン関数に増幅係数を乗じる方法を用いて統計的グリーン関数法による地震動評価を行い、その波形合成結果との比較により、敷地における地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録が概ね再現されることを確認した。

○ また、応答スペクトルに基づく手法についても、断層モデルを用いた手法と同様に、2009年駿河湾の地震（本震）を対象として、断層モデルを用いた手法による地震動評価結果を用いて応答スペクトルに与える影響として増幅係数（応答スペクトル比）を求めて反映する方法により、応答スペクトルに基づく地震動の顕著な増幅を考慮する地震動評価を行い、敷地における地震動の顕著な増幅が見られた観測点（5G1、5RB）の観測記録が概ね再現されることを確認した。

【各検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）（方針）】

○ 各検討用地震の地震動評価（地震動の顕著な増幅を考慮）は、断層モデルを用いた手法において、地震動の顕著な増幅を考慮する強震動生成域（アスペリティ）の小断層の範囲・増幅の程度を**地震観測記録の分析結果に対し保守的に設定**することにより、**保守的な地震動評価**を行う。応答スペクトルに基づく手法は、断層モデルを用いた手法による保守的な地震動評価結果を反映することにより、保守的な地震動評価を行う。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

参考文献

・参考文献は、本編参照。

Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.



Copyright © Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.