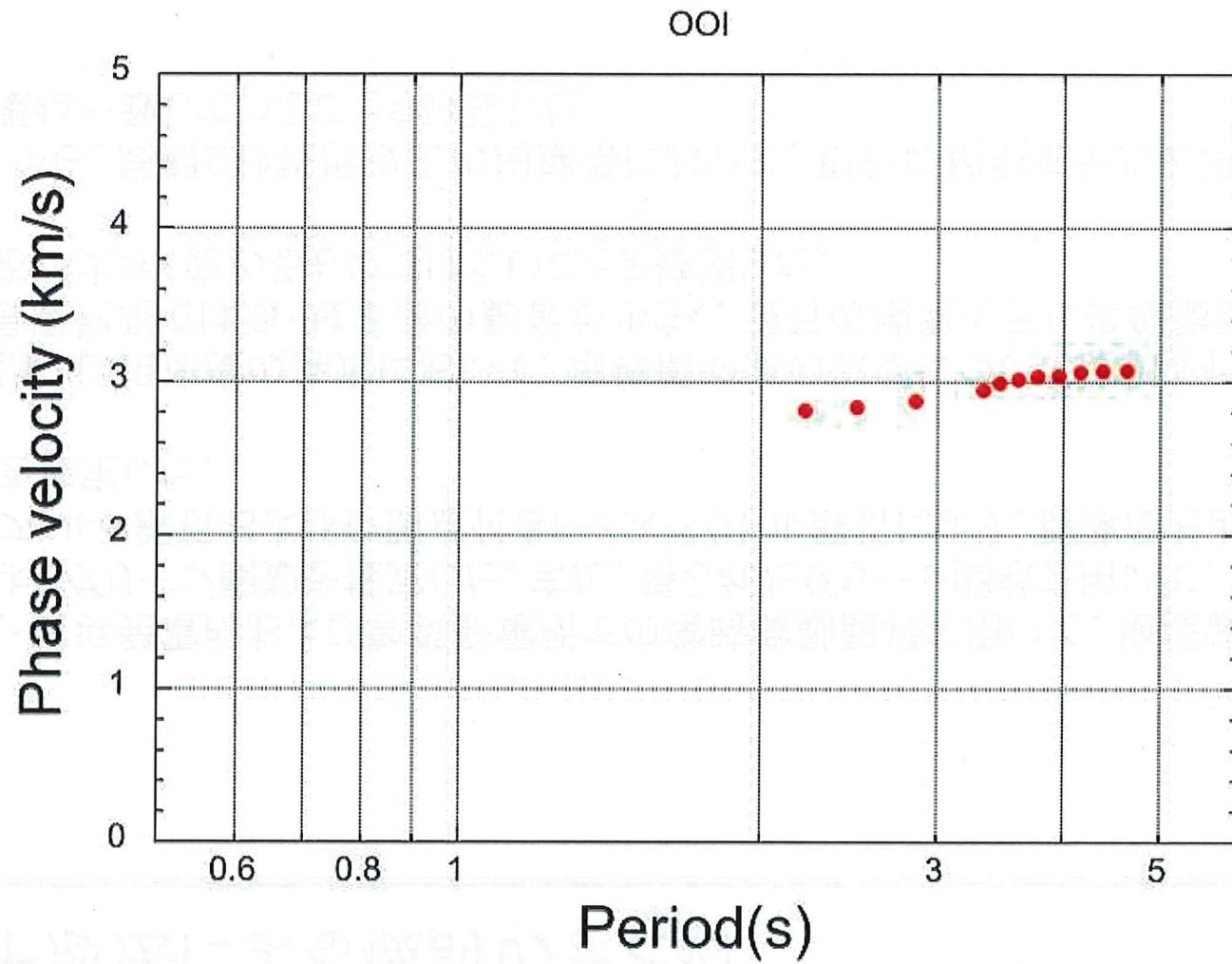


参照点付きF-Kスペクトル解析による位相速度の推定

■参照点付きF-Kスペクトル解析により得られた位相速度は、以下のとおり。



- 大飯・高浜発電所および敦賀発電所での常時微動記録を用いて、地震波干渉法によりグリーン関数を推定した。また、得られたグリーン関数を用いて、マルチプルフィルタ解析および参照点付きF-Kスペクトル解析により、群速度および位相速度を推定した。
- 群速度・位相速度の推定において、堆積層や海の影響について評価を行った結果、長周期側では海・堆積層の影響が小さく、現行の地盤モデルの理論群速度と対応が大きく変わるものではないことを確認した。
- 以上から、周期2秒程度以上の周期帯において、現行の地盤モデルの理論群速度と概ね一致していることを確認した。

2. 大飯発電所周辺の観測データに基づく地盤モデル

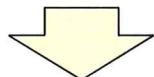
神崎子島の震源の発生

地盤モデルの検討の概要

103-2

地盤モデルの検討方針

- 大飯発電所周辺における観測データ(微動アレイ、地震波干渉法の位相速度)のジョイントインバージョン解析により速度構造を推定する。



短周期・長周期の考え方

<短周期(浅部)検討内容>

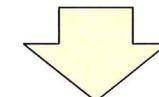
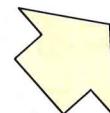
- 微動アレーは短周期(浅部)の説明性が高いことから3秒以下の周期帯の位相速度に基づいて評価

<長周期(深部)検討内容>

- 周期3秒より長周期については大飯-高浜間の位相速度に基づいて評価

インバージョン解析による地盤モデルの評価

- 観測データのモデル収束計算を行い、上位50位までの解から平均に一番近いものを地盤モデルとして選定する。

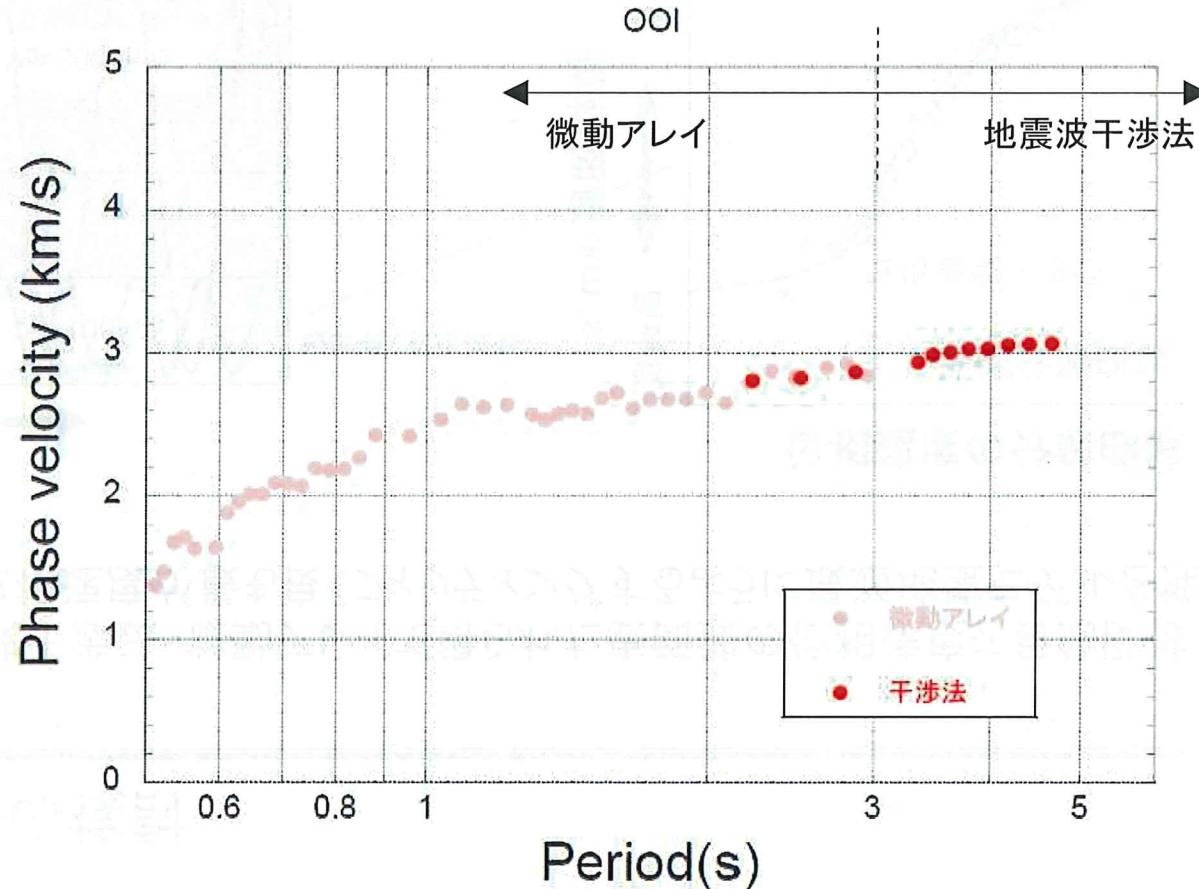


<結果>

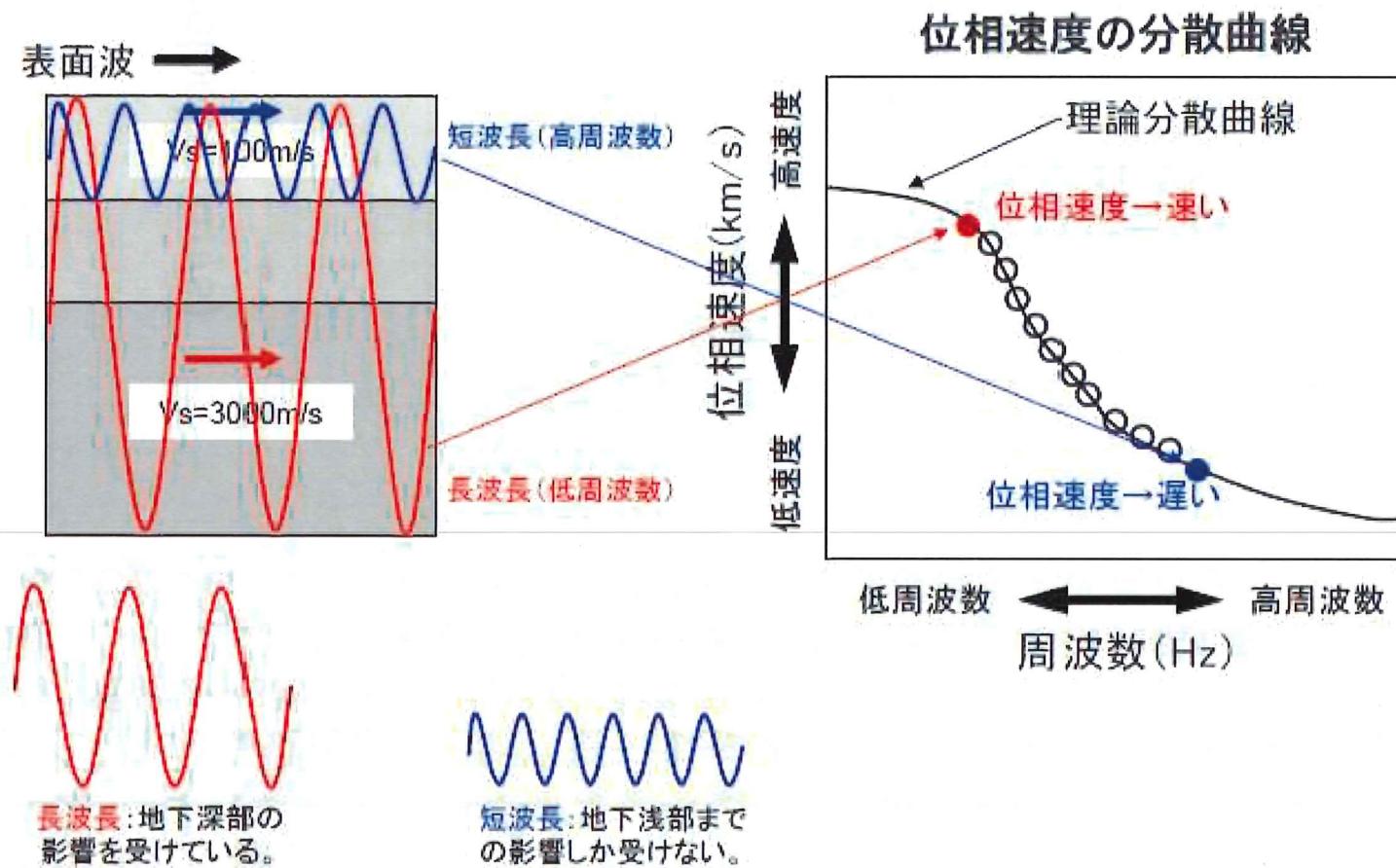
- 大飯発電所周辺における観測データに基づいて地盤モデルを作成し、地震動評価を実施した結果、現行の地盤モデルにより策定した地震動と概ね同等であった。

地盤モデルの検討

- 微動アレイによる位相速度と地震波干渉法(参照点付きF-Kスペクトル解析)による位相速度は、周期2~3秒付近でよい連続性を示す。
⇒微動アレイによる位相速度(3秒以下)と地震波干渉法による位相速度(3秒以上)を目的関数としたジョイントインバージョン解析により、速度構造を推定する。



- 地震波干渉法・微動アレイで得られた表面波の位相速度を目的関数として、理論位相速度が最も良くフィッティングするように最適地盤モデルを推定する。

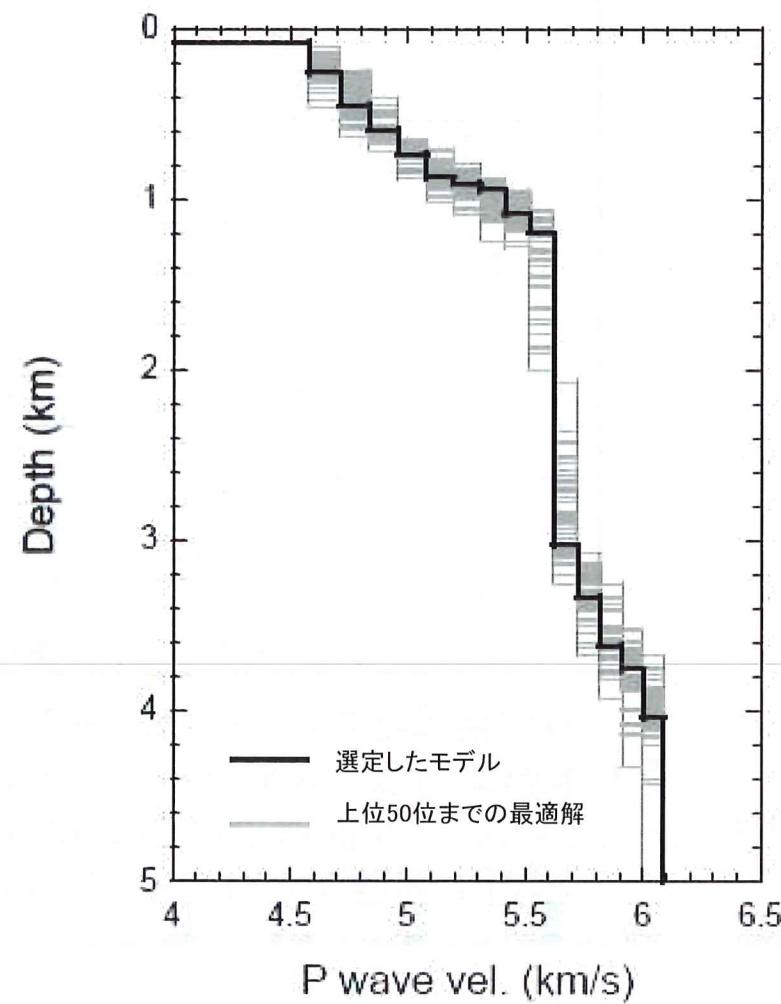
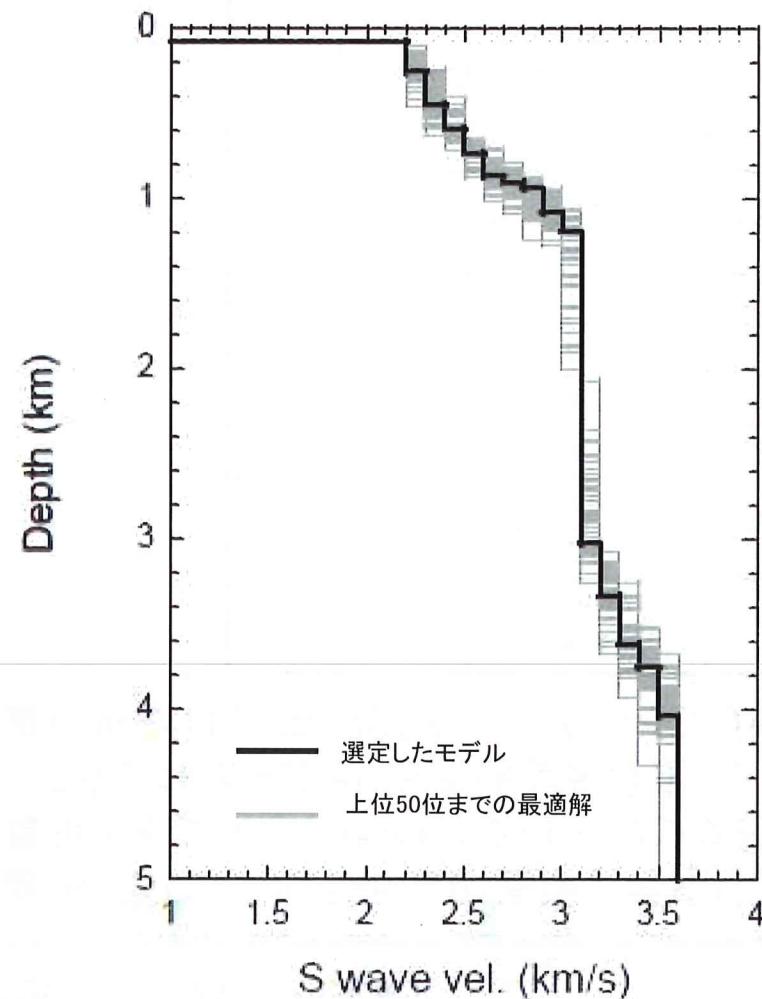


地盤モデルの検討

- 第1層にVs=0.5km/sの表層を考慮し、層厚0.01～0.1kmの範囲で探索する。
- 第2層以深は、サイトでのボーリング結果や既往の分析結果から、Vs=2.2～3.6km/sまでを0.1km/sごとにS波速度を設定し、層厚を0.01～2.0kmの範囲で探索する。
- 逆解析は山中(2007)によるハイブリッドヒューリスティック探索を用いた。

No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)
1	2.0	0.5	0.01 – 0.1	2.08
2	4.8	2.2	0.01 – 2.0	2.7
3	4.7	2.3	0.01 – 2.0	2.7
4	4.8	2.4	0.01 – 2.0	2.7
5	5.0	2.5	0.01 – 2.0	2.7
6	5.1	2.6	0.01 – 2.0	2.7
7	5.2	2.7	0.01 – 2.0	2.7
8	5.3	2.8	0.01 – 2.0	2.7
9	5.4	2.9	0.01 – 2.0	2.7
10	5.5	3.0	0.01 – 2.0	2.7
11	5.6	3.1	0.01 – 2.0	2.7
12	5.7	3.2	0.01 – 2.0	2.7
13	5.8	3.3	0.01 – 2.0	2.7
14	5.9	3.4	0.01 – 2.0	2.7
15	6.0	3.5	0.01 – 2.0	2.7
16	6.1	3.6	-	2.7

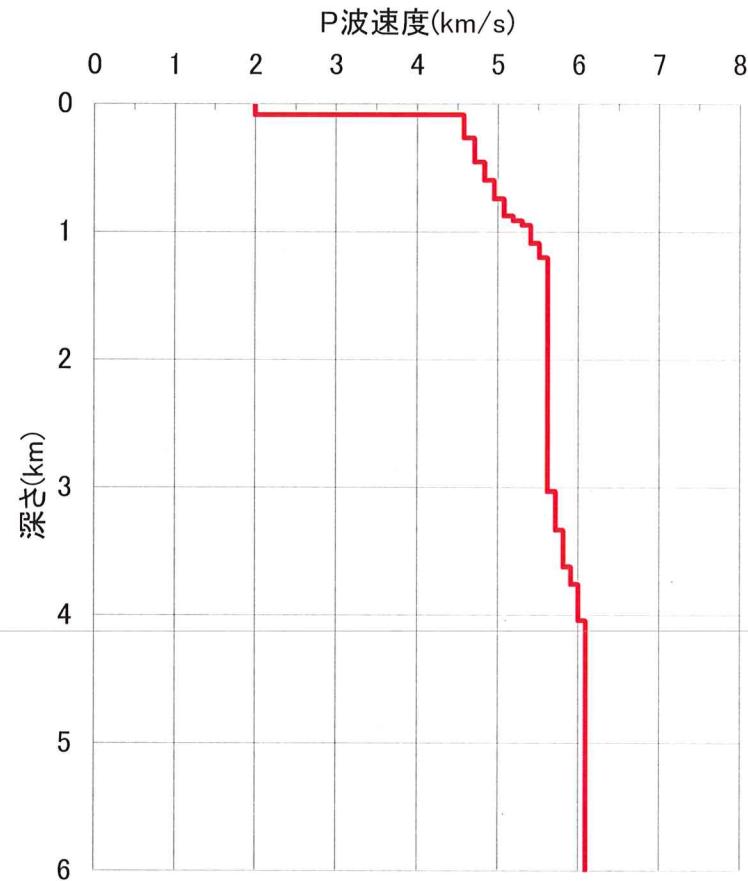
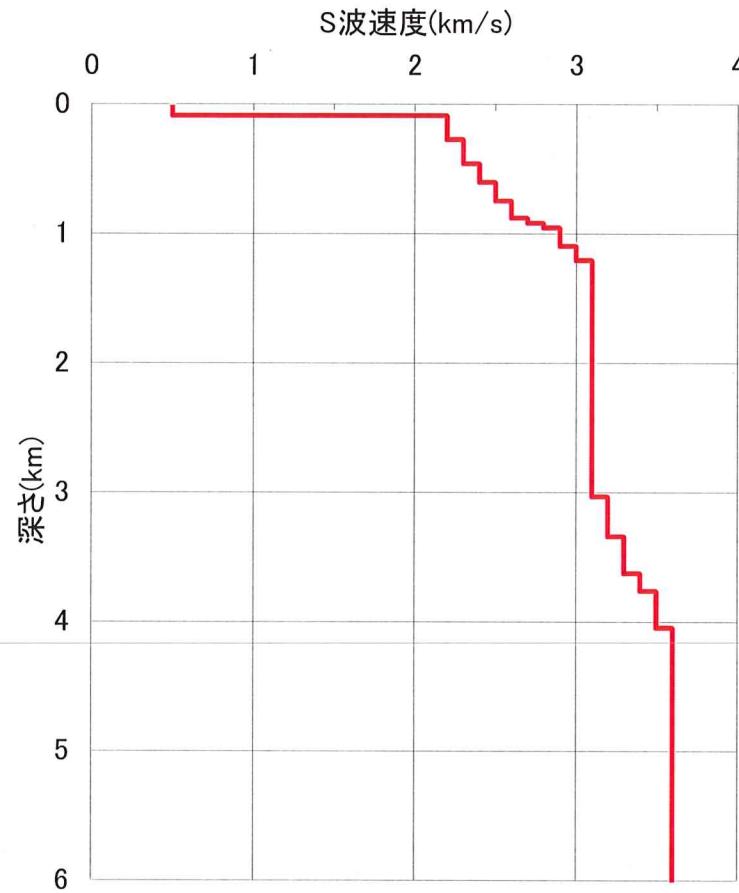
■前ページの条件により得られた上位50個までの最適解から、その平均モデルに最も近いケースを地盤モデルとして選定した。



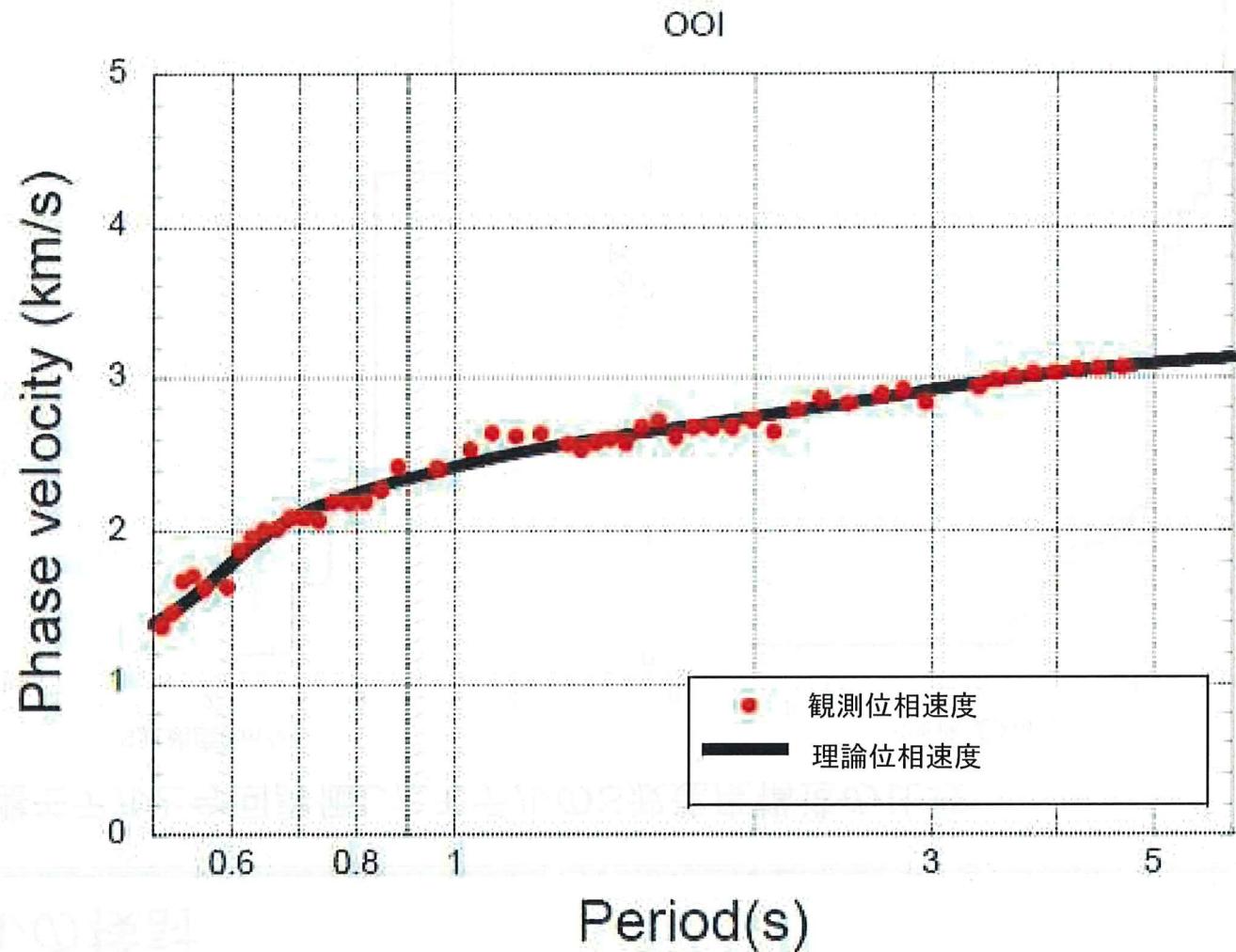
■今回選定された地盤モデルの諸元は以下のとおりであり、Vs=3.6km/s層は深さ4.0kmと評価された。

No	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	層厚 (km)	上面深度 (km)
1	2.0	0.5	2.08	0.08	0
2	4.6	2.2	2.7	0.18	0.1
3	4.7	2.3	2.7	0.19	0.3
4	4.8	2.4	2.7	0.14	0.5
5	5.0	2.5	2.7	0.14	0.6
6	5.1	2.6	2.7	0.13	0.7
7	5.2	2.7	2.7	0.04	0.9
8	5.3	2.8	2.7	0.04	0.9
9	5.4	2.9	2.7	0.14	0.9
10	5.5	3	2.7	0.11	1.1
11	5.6	3.1	2.7	1.83	1.2
12	5.7	3.2	2.7	0.31	3.0
13	5.8	3.3	2.7	0.29	3.3
14	5.9	3.4	2.7	0.14	3.6
15	6.0	3.5	2.7	0.28	3.8
16	6.1	3.6	2.7	-	4.0

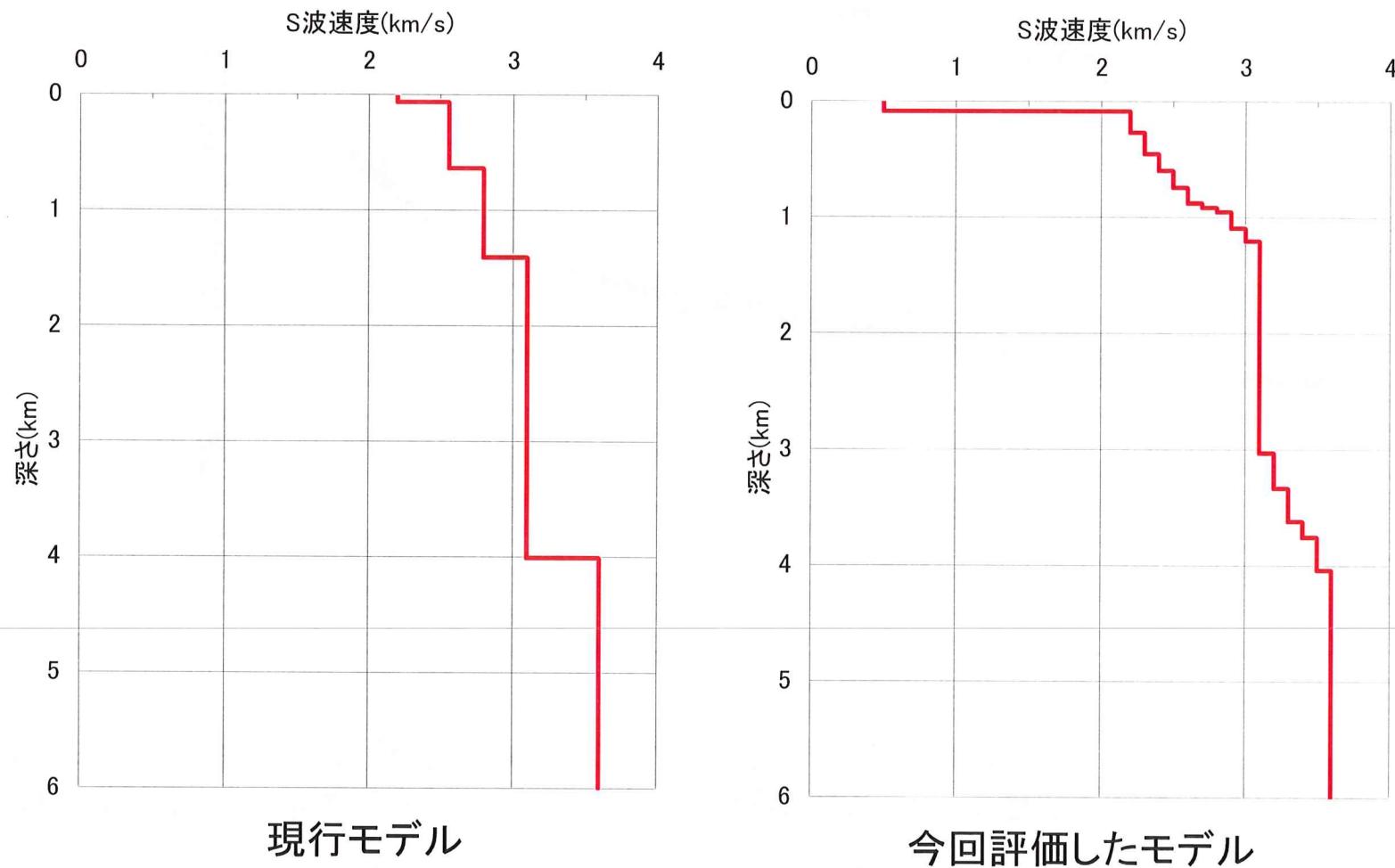
■今回選定された地盤モデルは以下のとおりとなった。



- 今回選定された地盤モデルについて、その物性値を用いて算定される理論位相速度を評価した結果、観測位相速度と良く対応していることを確認した。



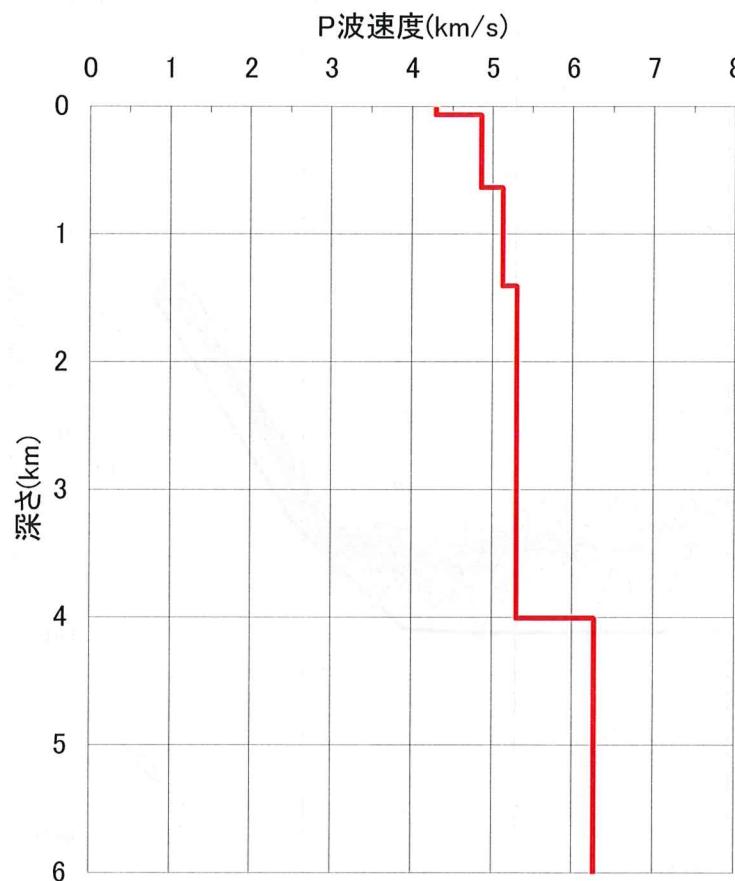
■現行の地盤モデルと今回評価したモデルのS波速度構造の比較



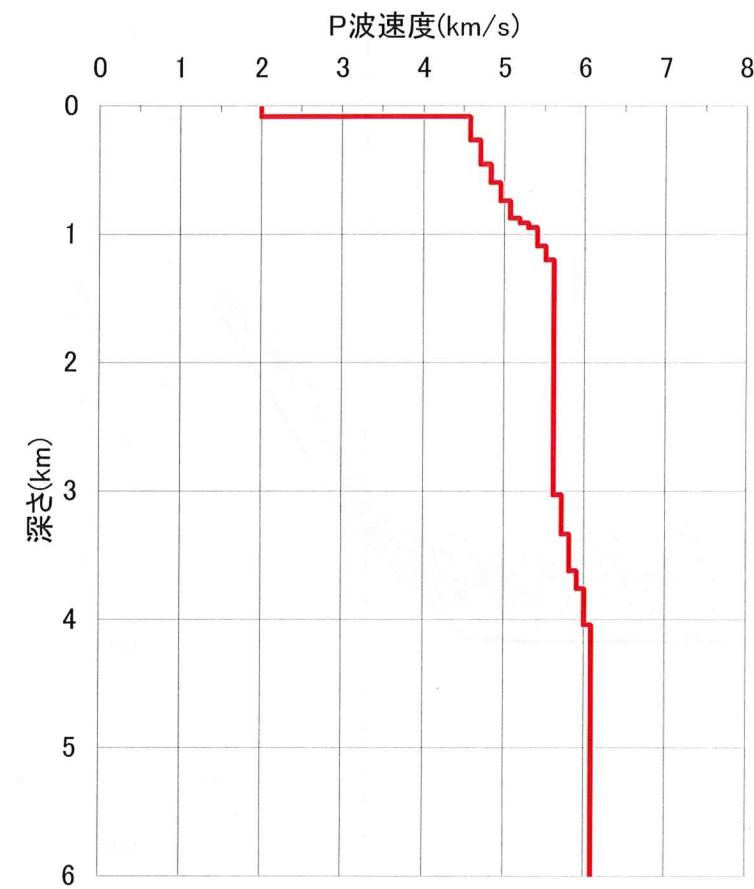
$V_s=3.6\text{km/s}$ ($V_p=6.1\text{km/s}$)層の上面深度は深さ4.0kmとなっている。

地盤モデルの検討

■現行の地盤モデルと今回評価したモデルのP波速度構造の比較



現行モデル

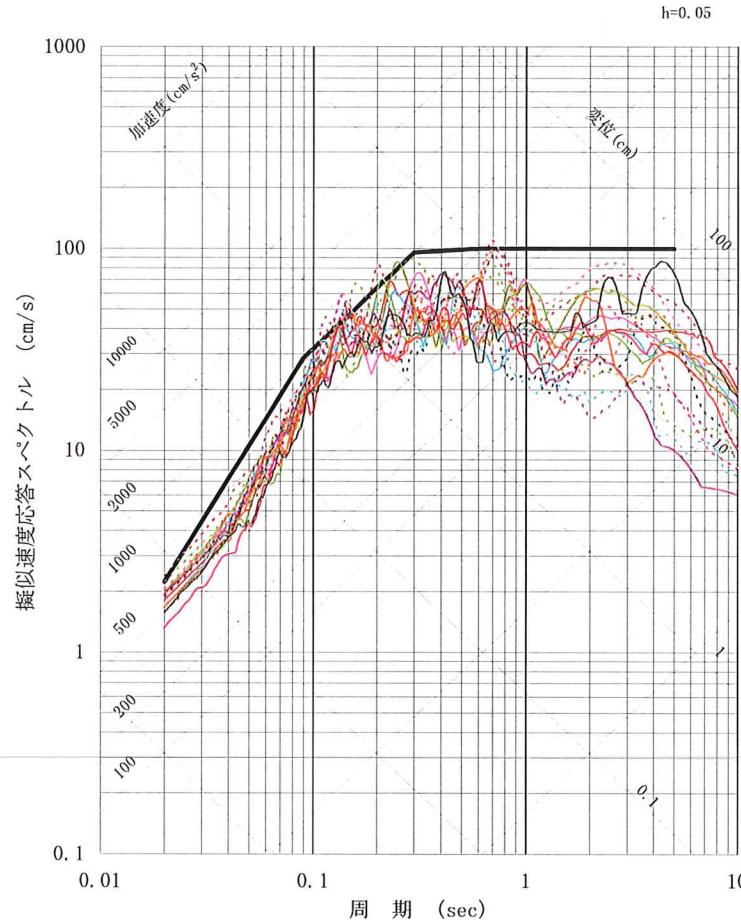


今回評価したモデル

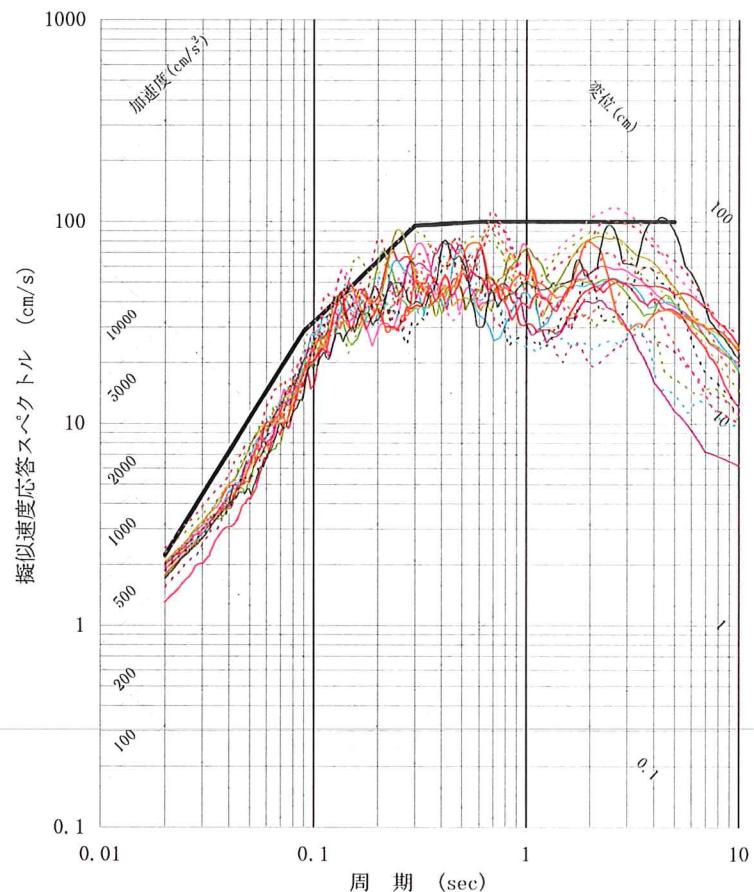
$V_s=3.6\text{km/s}$ ($V_p=6.1\text{km/s}$)層の上面深度は深さ4.0kmとなっている。

今回評価した地盤モデルによる地震動評価

■ FO-A～FO-B～熊川断層による地震動評価結果の比較(上端4km、短周期1.5倍ケース) (水平)



現行のモデル



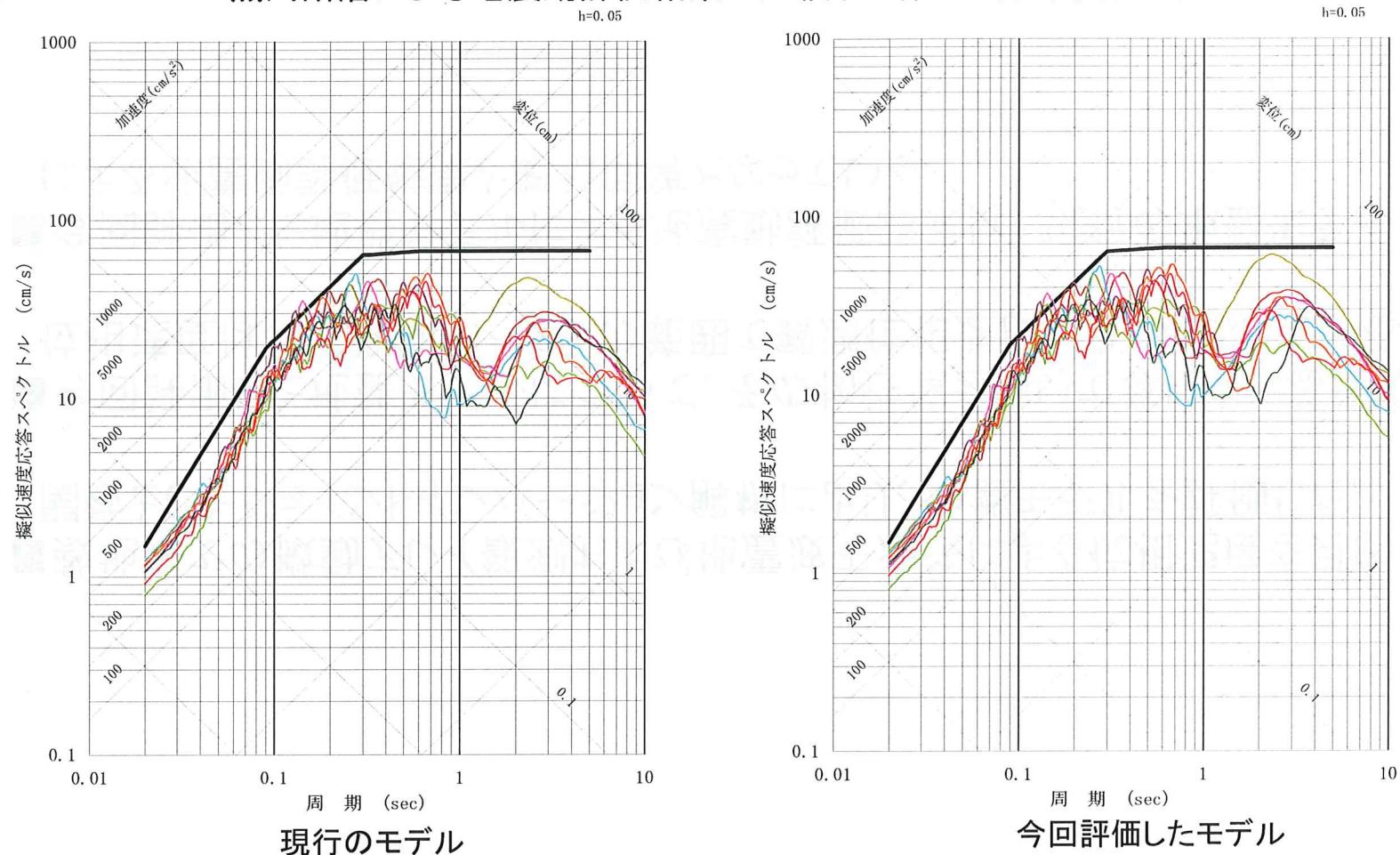
今回評価したモデル

今回評価したモデルによる地震動評価結果は、概ね同等となっている。

- | | | |
|---------|--------|--------|
| 破壊開始点① | 破壊開始点② | 破壊開始点③ |
| 破壊開始点④ | 破壊開始点⑤ | 破壊開始点⑥ |
| 破壊開始点⑦ | 破壊開始点⑧ | 破壊開始点⑨ |
| 基準地震動Ss | | |

今回評価した地盤モデルによる地震動評価

■ FO-A～FO-B～熊川断層による地震動評価結果の比較(上端4km、短周期1.5倍ケース)（上下）



今回評価したモデルによる地震動評価結果は、概ね同等となっている。

- | | | |
|---------|--------|--------|
| 破壊開始点① | 破壊開始点② | 破壊開始点③ |
| 破壊開始点④ | 破壊開始点⑤ | 破壊開始点⑥ |
| 破壊開始点⑦ | 破壊開始点⑧ | 破壊開始点⑨ |
| 基準地震動Ss | | |

- 敷地内での微動アレイ観測および地震波干渉法による位相速度を目的関数としたジョイントインバージョン解析により、地盤モデルを評価した。
- 今回評価した地盤モデルについて、その物性値を用いて算定される理論位相速度は、周期約0.5～5秒の範囲で観測位相速度と良く対応している。
- 今回評価した地盤モデルによる地震動評価結果は、現行の地盤モデルによる地震動評価結果と概ね同等となっている。

3. 地震発生層の評価について

の結果、地震発生層の構造解説

の結果、下層部は100mの厚さで、

50%の断面積の増加が認められ、層間に接する部分

を除くと、(80%の増加)までに逐段的に複数回に亘り、一層ずつ剥離して、その層の高さを算出されており、中層部は層間の差で下層部に比べて常に0.5m以上である。

上層部は逐段に分れて、逐段の層間に0.5m以上の高さがある。

逐段部は逐段層間に下の層との差

を示す層間に21.9mmの層間差がある。

若狭地域における地震発生層の評価

第59回審査会合資料より
抜粋

117

■地盤速度構造による地震発生層の検討

若狭周辺地域において、大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)による大規模な地下構造探査が実施されており、内陸地殻内地震が発生する上部地殻に相当する $V_p=6.0\sim 6.2\text{km/s}$ 層は、深さ約6~16kmであった。また、速度構造断面図に気象庁一元化カタログによる測線に沿う幅20kmの範囲内の震源分布は、 $V_p=6.0\sim 6.2\text{km/s}$ 層に対応している。

○新宮ー舞鶴測線(2004)の探査結果

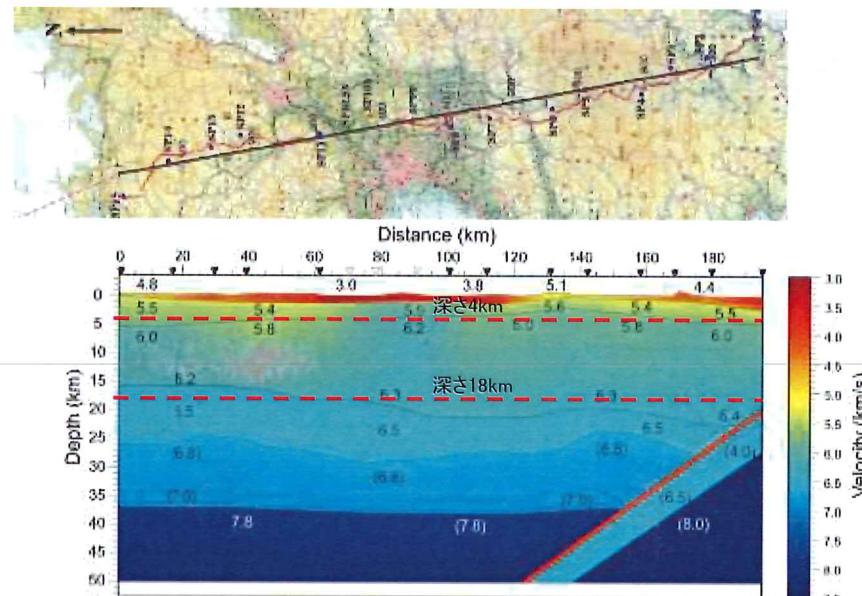


Fig. 9 P-wave velocity structure for the Nagaoka-Miyazu seismic line (2004). The figure consists of two parts: a top map showing the seismic line route across the Nagaoka-Miyazu area, and a bottom cross-section plot. The cross-section plot shows Velocity (km/s) on the vertical axis (0 to 60) versus Distance (km) on the horizontal axis (0 to 180). A color scale indicates velocity from 3.0 to 8.0 km/s. Two dashed red lines mark depths of 4 km and 18 km. Numerical values represent P-wave velocities, with parentheses indicating assumed values. Small black and red dots along the profile indicate earthquake and low-frequency earthquake locations.

伊藤、他(2007)に一部加筆

○藤橋ー上郡測線(1989)の再解析結果

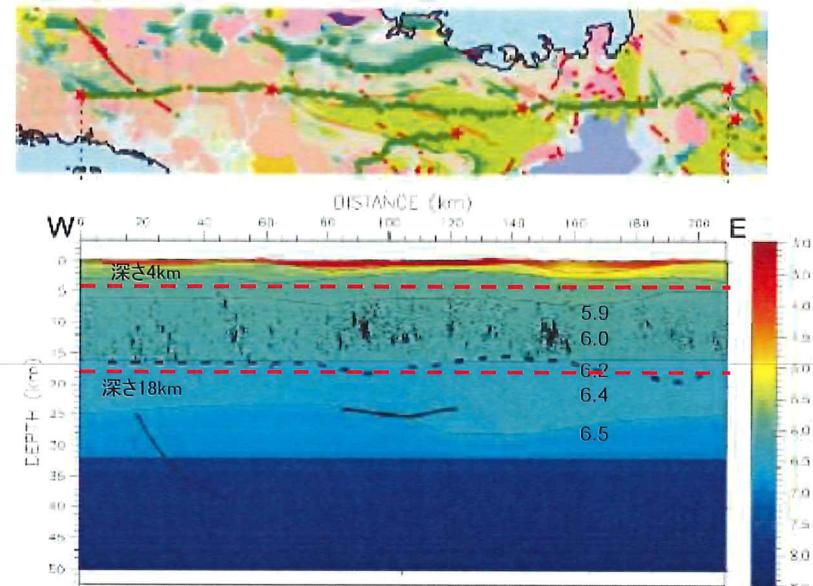


Fig. 16 藤橋ー上郡測線の地震波速度構造に、測線周辺の震源分布と反射法解析によって見出された反射面を重ねた。

伊藤、他(2006)に一部加筆

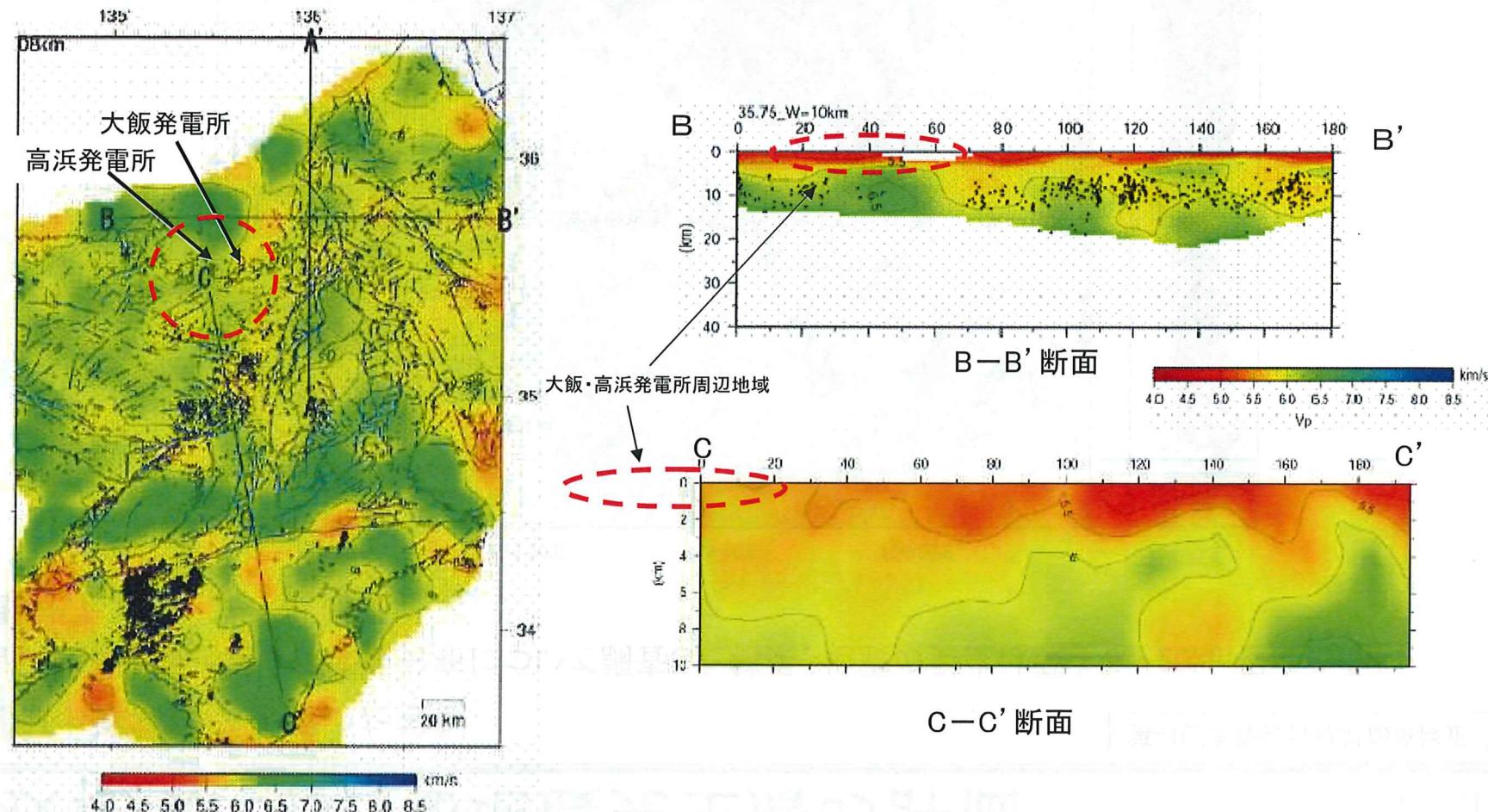
若狭地域における地震発生層の評価

第59回審査会合資料
加筆修正

118

■ 地震波トモグラフィによる検討

地震波トモグラフィ解析によれば、大飯・高浜発電所周辺地域の $V_p=6\text{km/s}$ 層は深さ4~5kmに分布している。また、 $V_p=6\text{km/s}$ 層と地震発生の上限深さが概ね一致している。

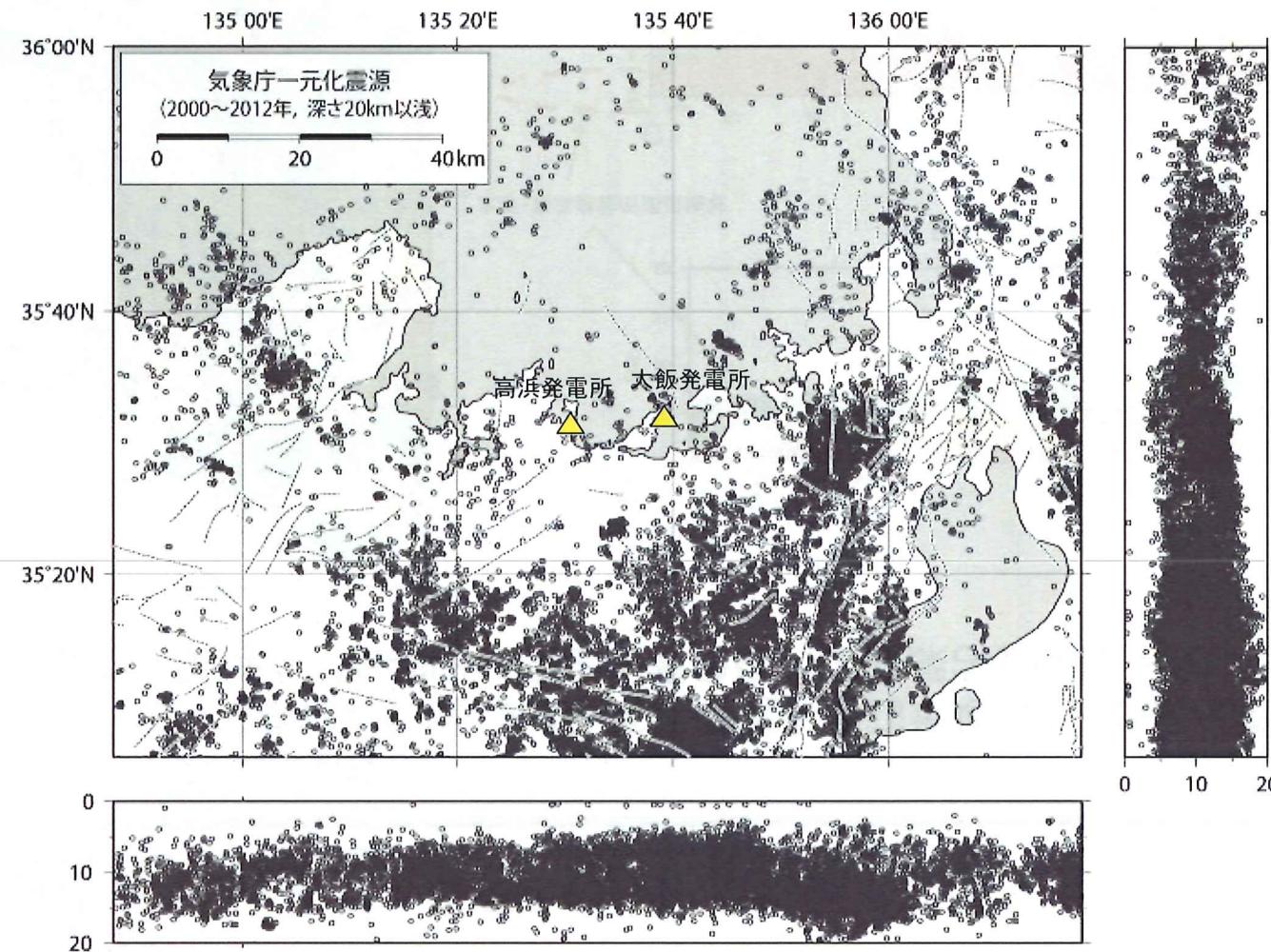


若狭地域における地震発生層の評価

■微小地震記録を用いた検討

第41回審査会合資料加筆修正

若狭地域の微小地震の発生分布について調査した結果、地震の発生は深さ5～20km程度の間に見られた。

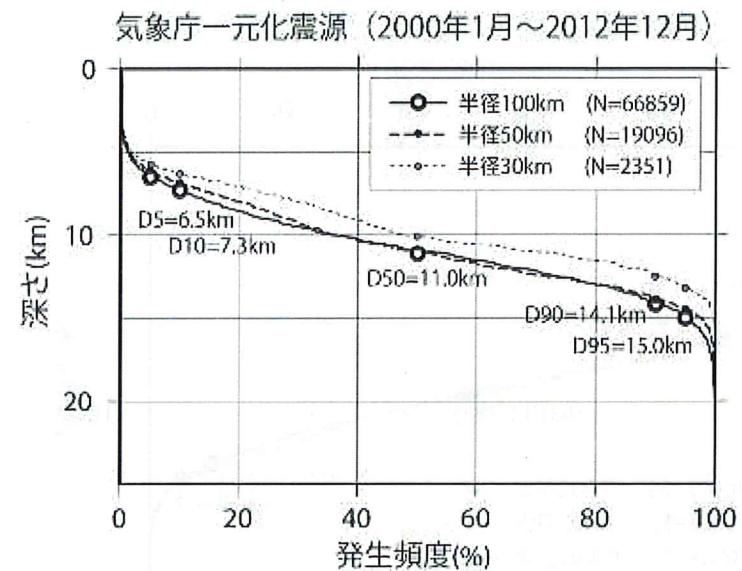
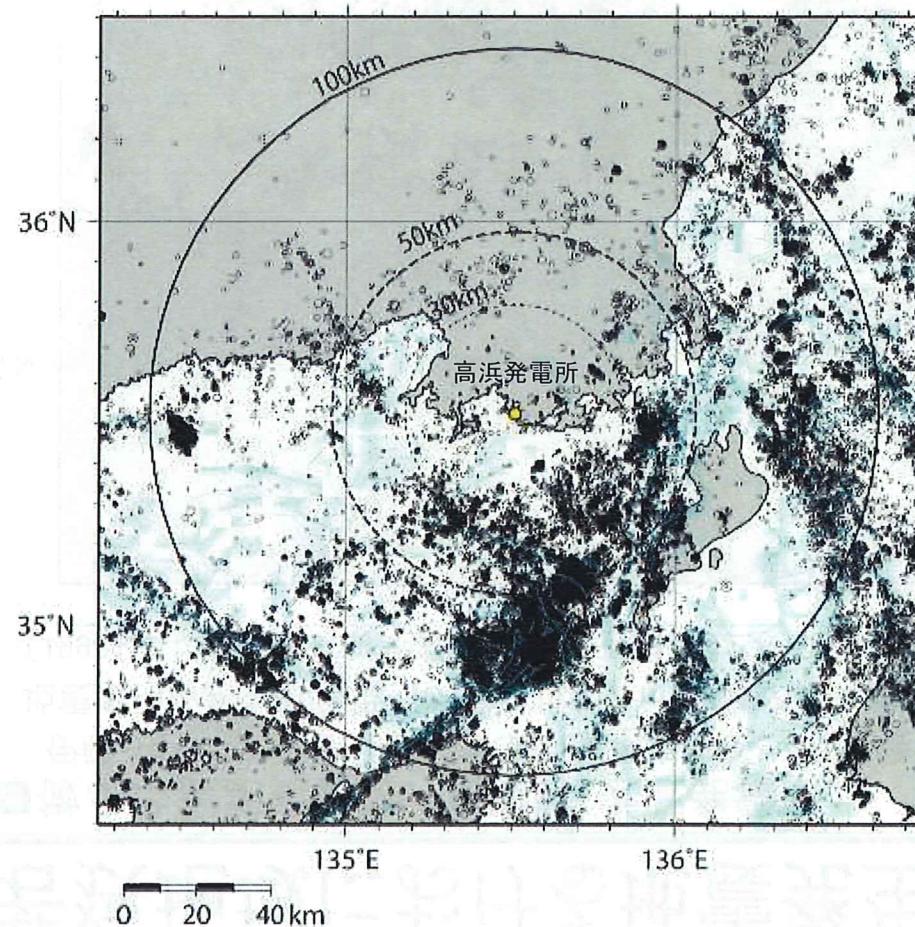


若狭地域における地震発生層の評価

■微小地震記録を用いた検討(高浜発電所)

第41回審査会合資料再掲

伊藤・中村(1998)を参考に、高浜発電所を中心とする半径100km以内の地震発生状況を統計的に評価すると、地震の10%発生頻度深さ(D10%)は約7km、地震の90%発生頻度深さ(D90%)は約15kmであった。伊藤・中村(1998)によれば、D90は地震発生層の下限より2~3km深いとされている。



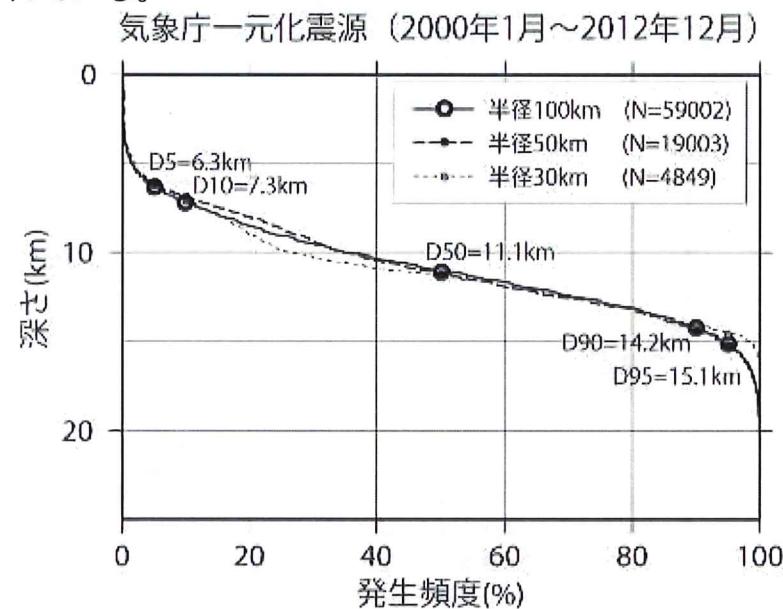
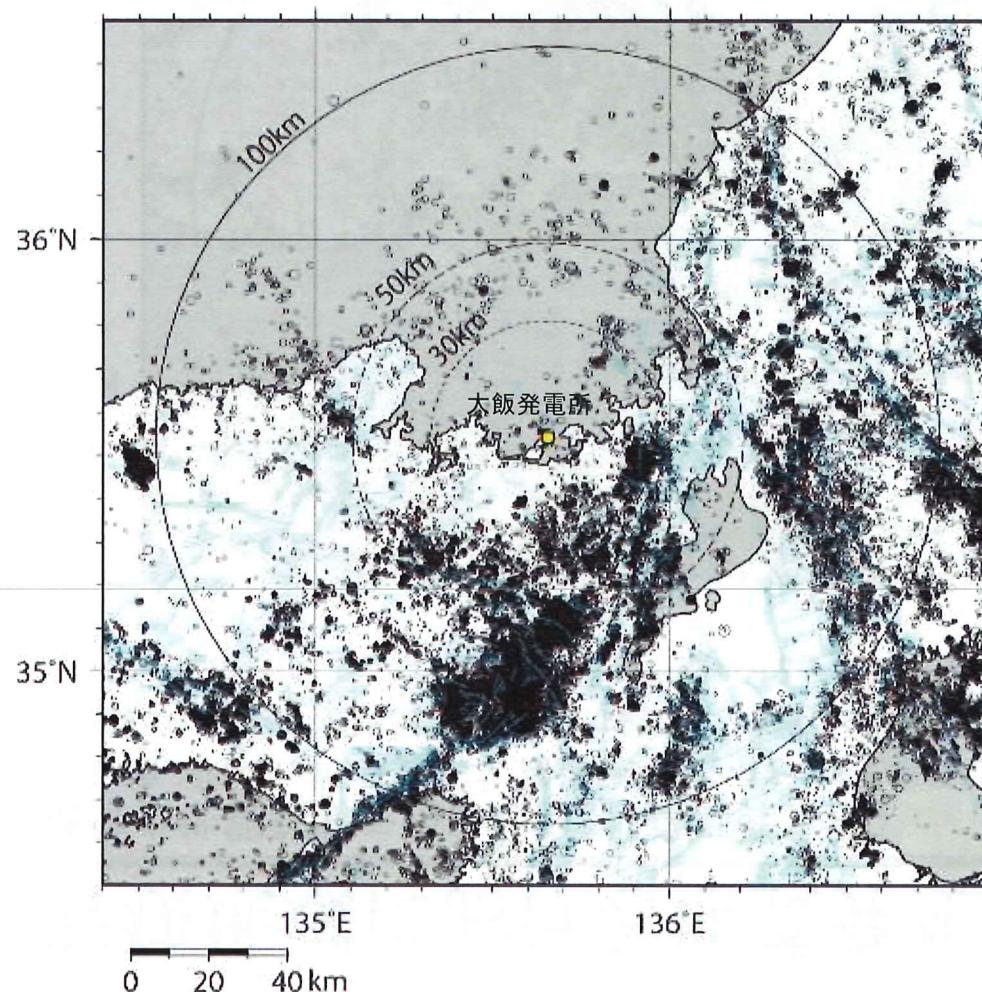
領域半径	100km	50km	30km
D5	6.5km	6.2km	5.8km
D10	7.3km	6.9km	6.3km
D50	11.0km	11.1km	10.1km
D90	14.1km	13.9km	12.5km
D95	15.0km	14.5km	13.2km
地震個数N	66859	19096	2351

若狭地域における地震発生層の評価

■微小地震記録を用いた検討(大飯発電所)

第27回審査会合資料再掲

伊藤・中村(1998)を参考に、大飯発電所を中心とする半径100km以内の地震発生状況を統計的に評価すると、地震の10%発生頻度深さ(D10%)は約7km、地震の90%発生頻度深さ(D90%)は約15kmであった。伊藤・中村(1998)によれば、D90は地震発生層の下限より2~3km深いとされている。



領域半径	100km (N=59002)	50km (N=19003)	30km (N=4849)
D5	6.3km	6.2km	6.1km
D10	7.3km	6.9km	7.1km
D50	11.1km	11.2km	11.4km
D90	14.2km	14.4km	14.1km
D95	15.1km	15.2km	14.6km
地震個数N	59002	19003	4849

若狭地域における地震発生層の評価のまとめ

① 地盤速度構造による検討

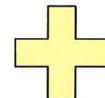
(1) 地盤速度構造による地震発生層の検討

大大特による大規模な地下構造探査によれば、内陸地殻内地震が発生する $V_p=6.0\sim6.2\text{km/s}$ 層は、深さ6~16kmであった。

(2) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

川里・他(2007)によって、対象地点を取り囲むような震源と観測点の観測記録を用いて、地震波の伝播をインバージョンし、速度構造が求められている。

P波速度分布は、 $V_p=6\text{km/s}$ 層が深さ4~5kmに分布している。またP波速度分布に震源分布を重ねると、 $V_p=6\text{km/s}$ 層と地震発生の上限深さが概ね対応して見られる。



(3) 発電所周辺のデータによる地盤モデル検討

大飯発電所周辺で取得したデータに基づく地盤モデル検討の結果、 $V_p=6.0\sim6.1\text{km/s}$ 層の上面深度は深さ4km程度であった。

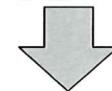
② 微小地震記録を用いた検討

(1) 周辺地域における地震発生状況の調査

若狭地域の微小地震の発生分布について調査すると、地震の発生は深さ5~20kmに見られた。

(2) 地震発生状況の統計的評価

伊藤・中村(1998)を参考に、若狭地域の地震の10%発生頻度深さ(D10%)は約7km、地震の90%発生頻度深さ(D90%)は約15kmであった。



若狭地域における断層上端・下端深さは、以下のとおり設定する。

上端 下端
4km 18km

地震発生層に関するコメント回答

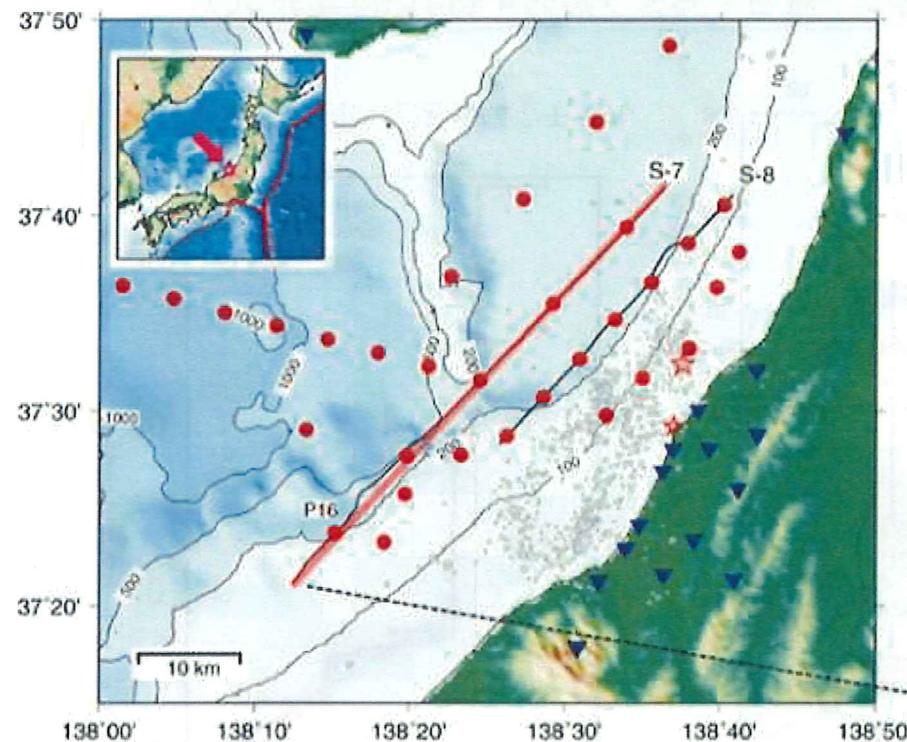
123

コメント内容

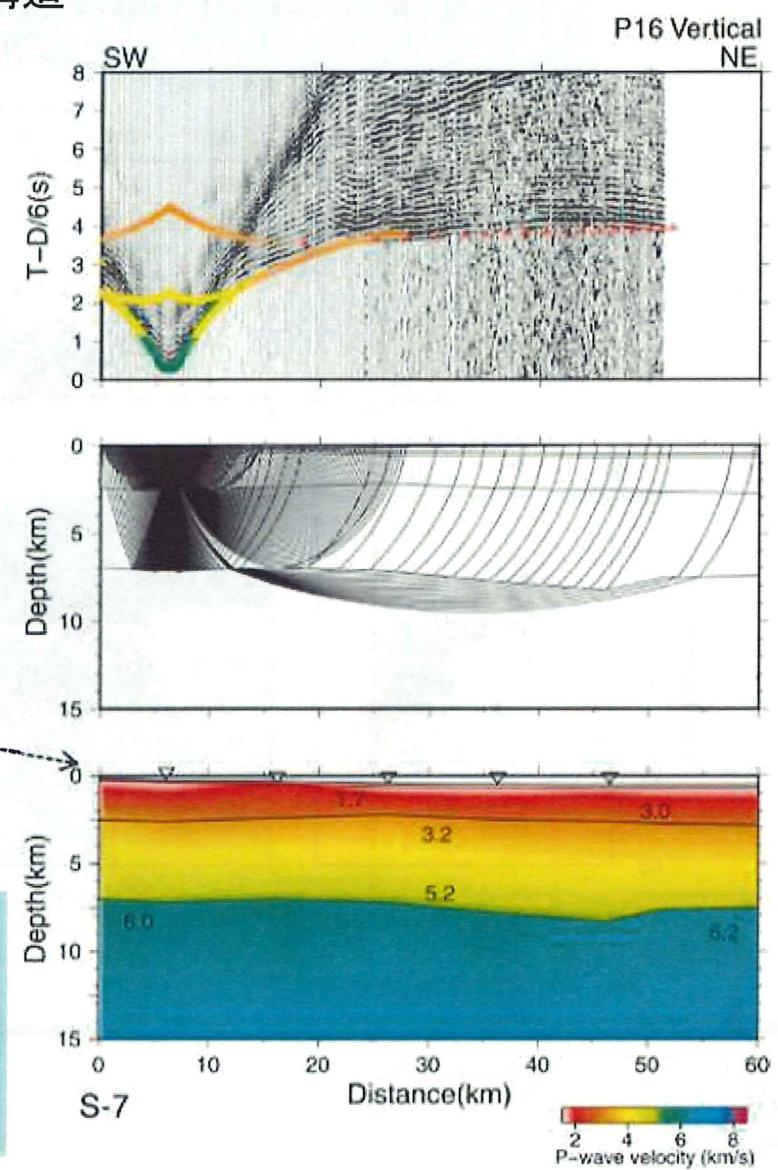
地震発生層上限と速度構造との対応を示した事例について検討すること

地震発生層の評価事例

■2007年新潟県中越沖地震の震源域のP波速度構造

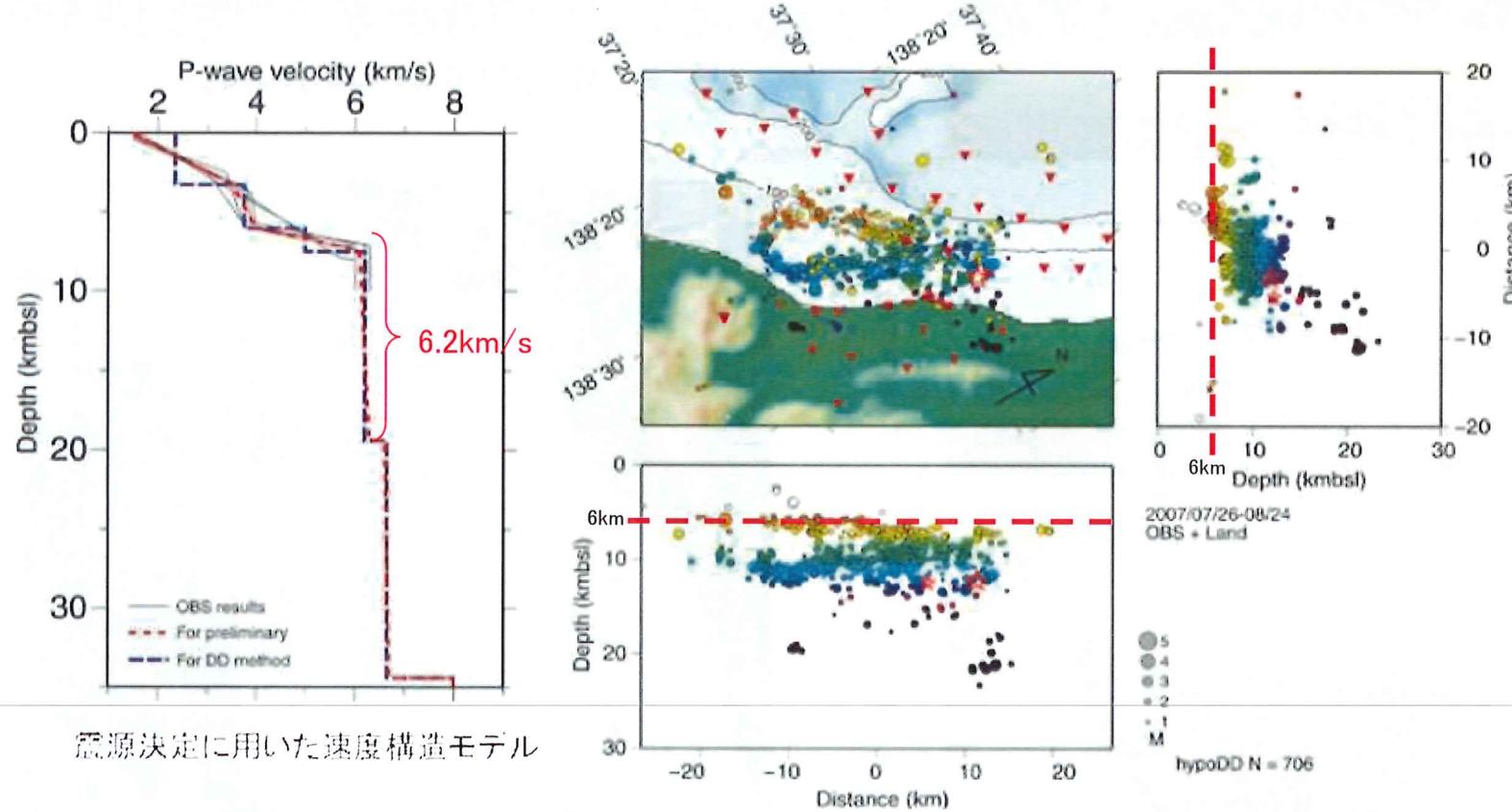


- 震源域(海域)にOBSを展開(32点)
- エアガン発震による屈折法探査
→ 震源域のP波速度構造
 - ・表層～深さ7km: 速度勾配の大きな低速度層
 - ・深さ7km以深: 比較的均質な $V_p=6.2\text{km/s}$ 層



地震発生層の評価事例

■P波速度構造と余震の深さ分布の関係



○OBS観測網と陸上観測点を併合処理して震源決定

このときに仮定したP波速度構造モデルは、屈折法で得られた結果に基づく。

→ DD法で得られた震源の深さは、多くが6~15km(誤差は1km以内)。

「大半の震源は6km以深であるため、活発な余震活動は $V_p=6\text{km/s}$ 層内で発生」

地震発生層の評価

近畿地方北部の地震波速度構造と地震発生層

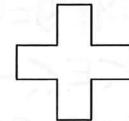
吉井弘治・伊藤潔, 2001, 地球惑星科学連合学会2001年合同大会

1989年に実施された岐阜県藤橋村から兵庫県上郡町における人工地震探査データをもとに、波線追跡法によって地殻の詳細な速度構造を求め、得られた速度構造モデルと、地震活動の深さ断面とを比較し、地震発生層の上限は速度構造が 6km/s となるところにおおむね一致していることが分かった。

広角反射法および屈折法解析による近畿地方の地殻構造の推定

廣瀬一聖・伊藤潔, 2006, 京都大学防災研究所年報, 第49号B, pp275–288

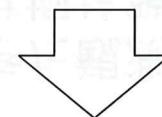
浅い地殻内で発生する微小地震は、P波速度が $5.8\sim6.4\text{km/s}$ の層に集中しており、その上下には地震波速度境界が存在する。



Precise aftershock distribution of the 2007 Chuetsu-oki Earthquake obtained by using an ocean bottom seismometer network

Shinohara et.al., 2008, Earth Planets Space, 60, 1121–1126

2007年新潟県中越沖地震のP波速度構造と地震発生層の関係から、大半の震源は、6km以深であるため、活発な余震活動は $V_p=6\text{km/s}$ 層内(速度構造モデルでは 6.2km/s)で発生している。



地震発生層上限と速度構造との対応について検討した結果、地震発生層の上限は、P波速度が約 $6\sim6.2\text{km/s}$ となる深さに対応することを確認した。

4. まとめ

127

- これまで敷地内外で蓄積してきた観測データをすべて利用して、
 - 敷地内で実施したPS検層・試掘坑弹性波探査・Q値測定・単点微動観測・反射法地震探査・屈折法解析により、敷地に特異な構造は見られないことを確認した。
 - 敷地内での微動アレイ観測および地震波干渉法による位相速度を目的関数としたジョイントインバージョン解析により、地盤モデルを評価した。その結果、 $V_s=3.6\text{km/s}$ ($V_p=6.1\text{km/s}$) の層が深さ4.0kmであり、従来のモデルと整合することを確認した。地震動評価結果も同等であったことから、現行モデルを用いる。
- 地震発生層について、地盤速度構造および微小地震分布に基づき評価を行い、断層上端深さを4km、断層下端深さを18kmと設定した。
- なお、今後、ラブ波を用いた検討や、さらに観測データを蓄積して地震波干渉法による検討の精度を上げていくとともに、関係する各分野の学識者からなる組織体(委員会)を設け、その指導のもとに地盤モデルの精度向上に努めていく。

「地盤モデル検討委員会(仮称)の設置」について

1. 委員会の目的

観測データの蓄積、地震波干渉法等による検討精度向上に向け、関係する各分野の学識者による指導をもとに地盤モデルの精度向上に努める。

2. 地盤モデル検証のための検討項目

- ①地震波干渉法精度向上のための微動データ・地震観測データの分離、解析
- ②微動データのうちラブ波(水平成分)を用いた検討
- ③大深度鉛直アレイ地震観測の実施、地震観測データを蓄積して解析検討

3. 体制(委員会)

①学識者

上記検討項目に關係する各分野の学識者から構成する。

- ・地震学分野
- ・地震動分野
- ・物理探査分野
- ・地質構造分野
- ・地震工学分野

②社内

土木建築室、原子力事業本部、総合企画本部(原子力・安全品質推進部門)他 他部門を含む

4. 運営

検討推進にあたっての工程、品質などについては、監査部門が関与する。