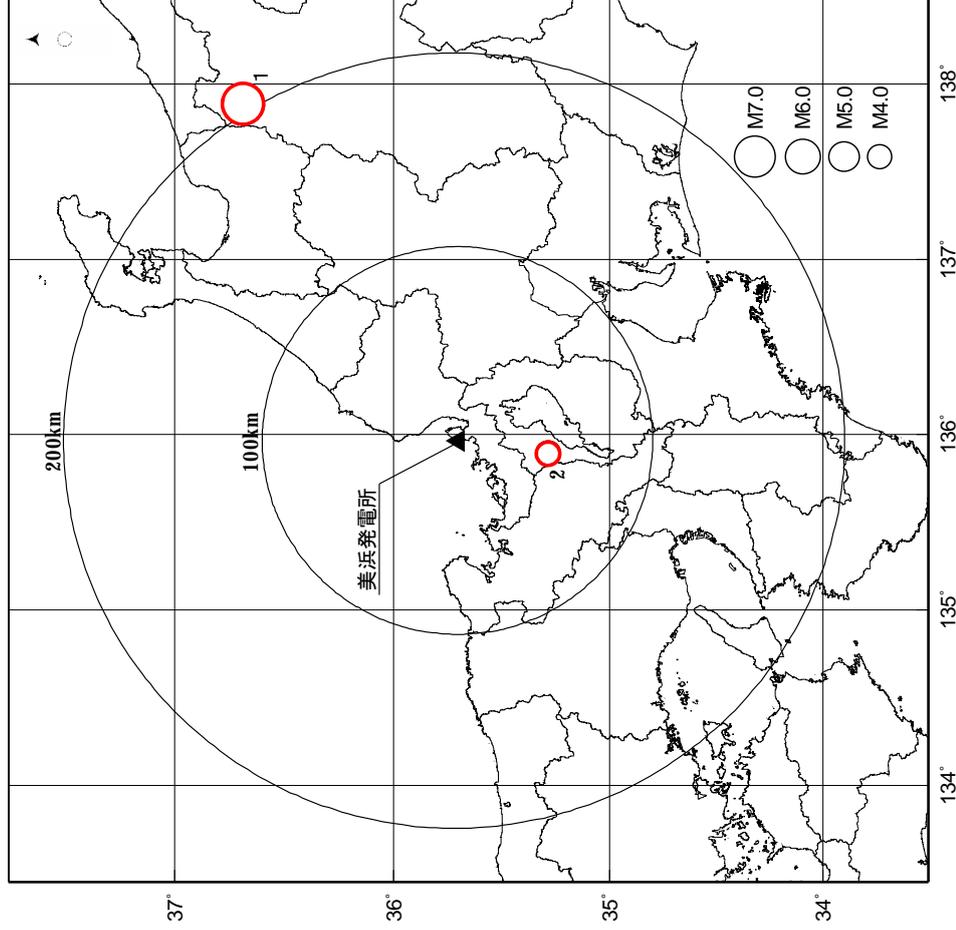


5. 地下構造モデルの策定（地震観測）

第257回審査会合
資料から変更

25

■ 地震観測期間（H26.4～H28.3）における主な地震を抽出



敷地で観測された主な地震の諸元

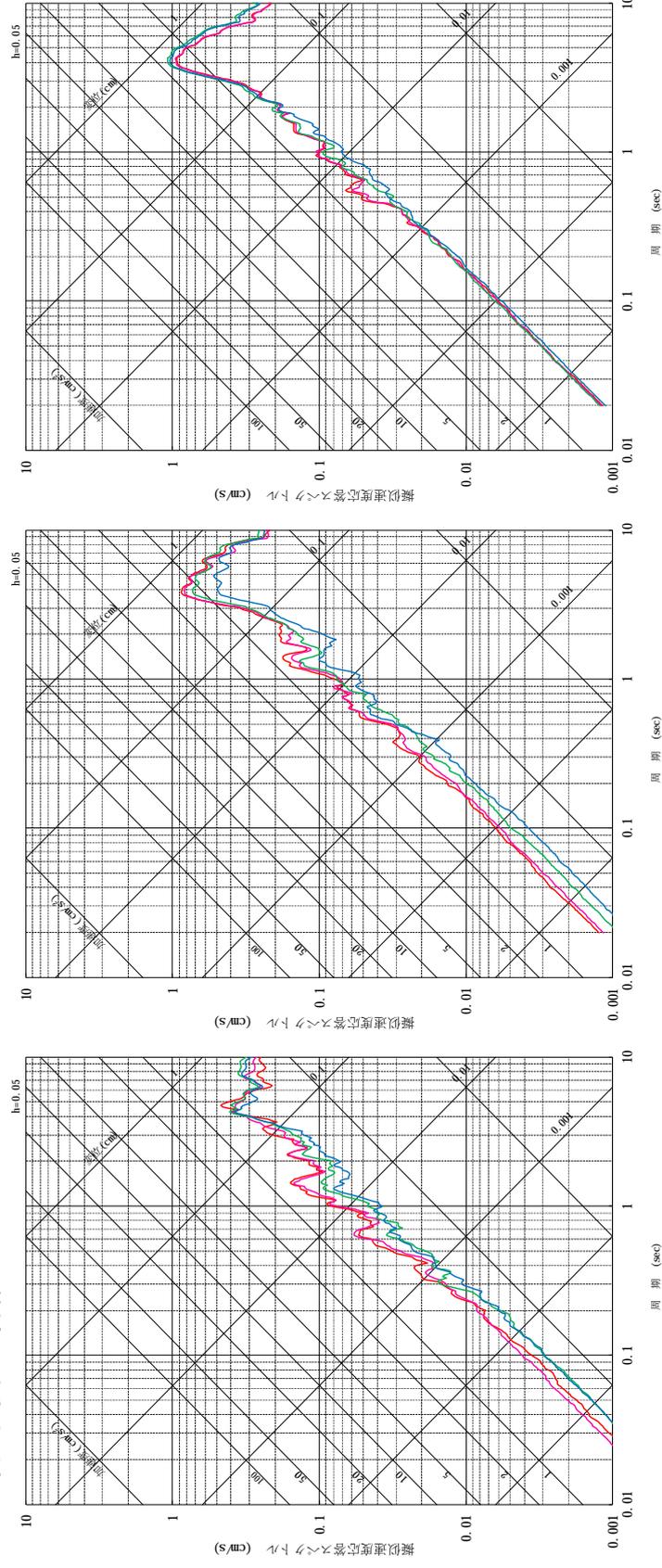
No.	発震日時 震源地又は 地震名	震央位置 緯度 経度	M	震源深さ (km)	震央距離 (km)
1	2014.11.22 22:08:18 長野県北部地震	36° 41.5'N 137° 53.4'E	6.7	5	205
2	2014.12.26 22:30:35 滋賀県北部	35° 17.1'N 135° 53.7'E	4.2	14	47

敷地で観測された主な地震の震央分布

5. 地下構造モデルの策定（地震観測）

■2014年長野県北部地震(M6.7)の岩盤内における深度別応答スペクトル

- ・地震観測記録は、最大加速度で水平約0.4ガル程度と小さいものであった
- ・各深度で増幅はほとんどみられなかった



NS方向

EW方向

UD方向

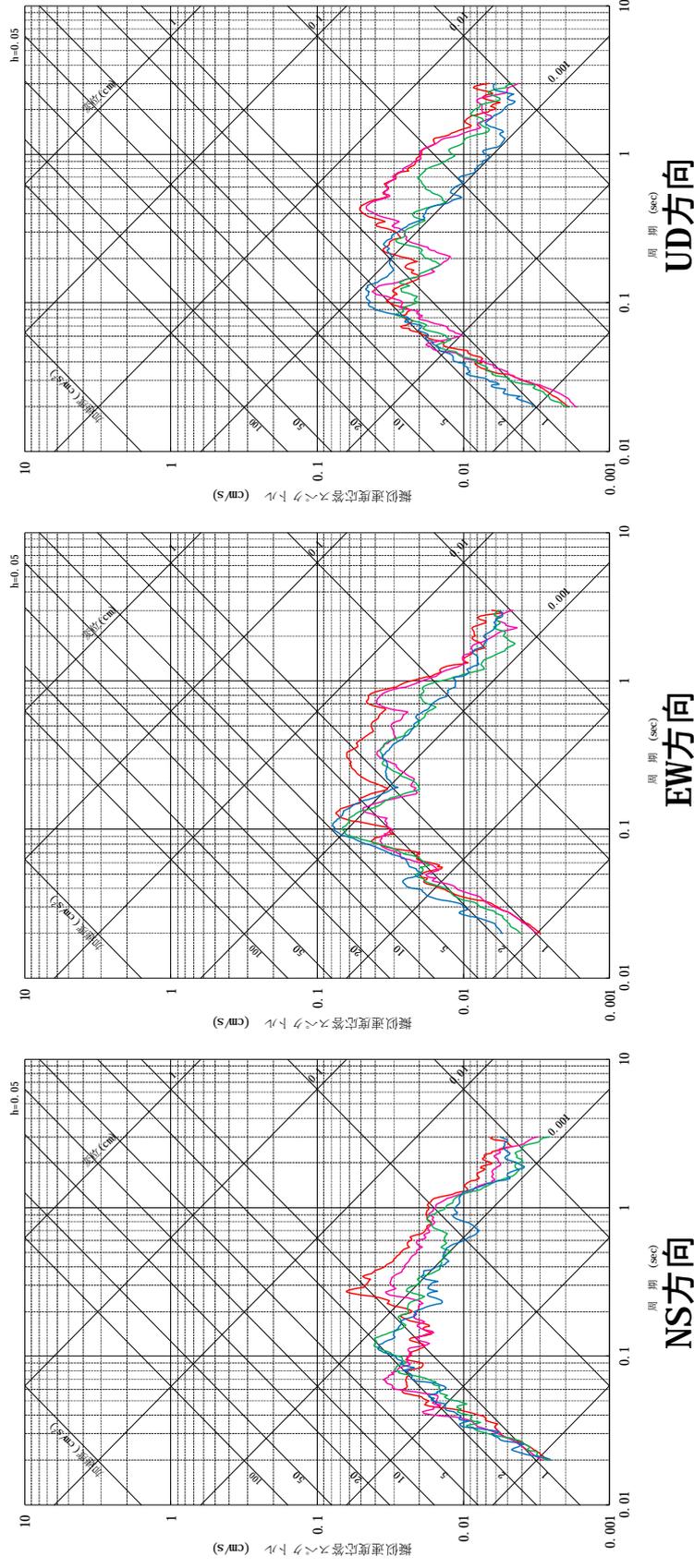


深度別応答スペクトル

5. 地下構造モデルの策定（地震観測）

■2014年滋賀県北部の地震(M4.2)の岩盤内における深度別応答スペクトル

- ・地震観測記録は、最大加速度で水平約1ガル程度と小さいものであった
- ・各深度で増幅はほとんどみられなかった



深度別応答スペクトル

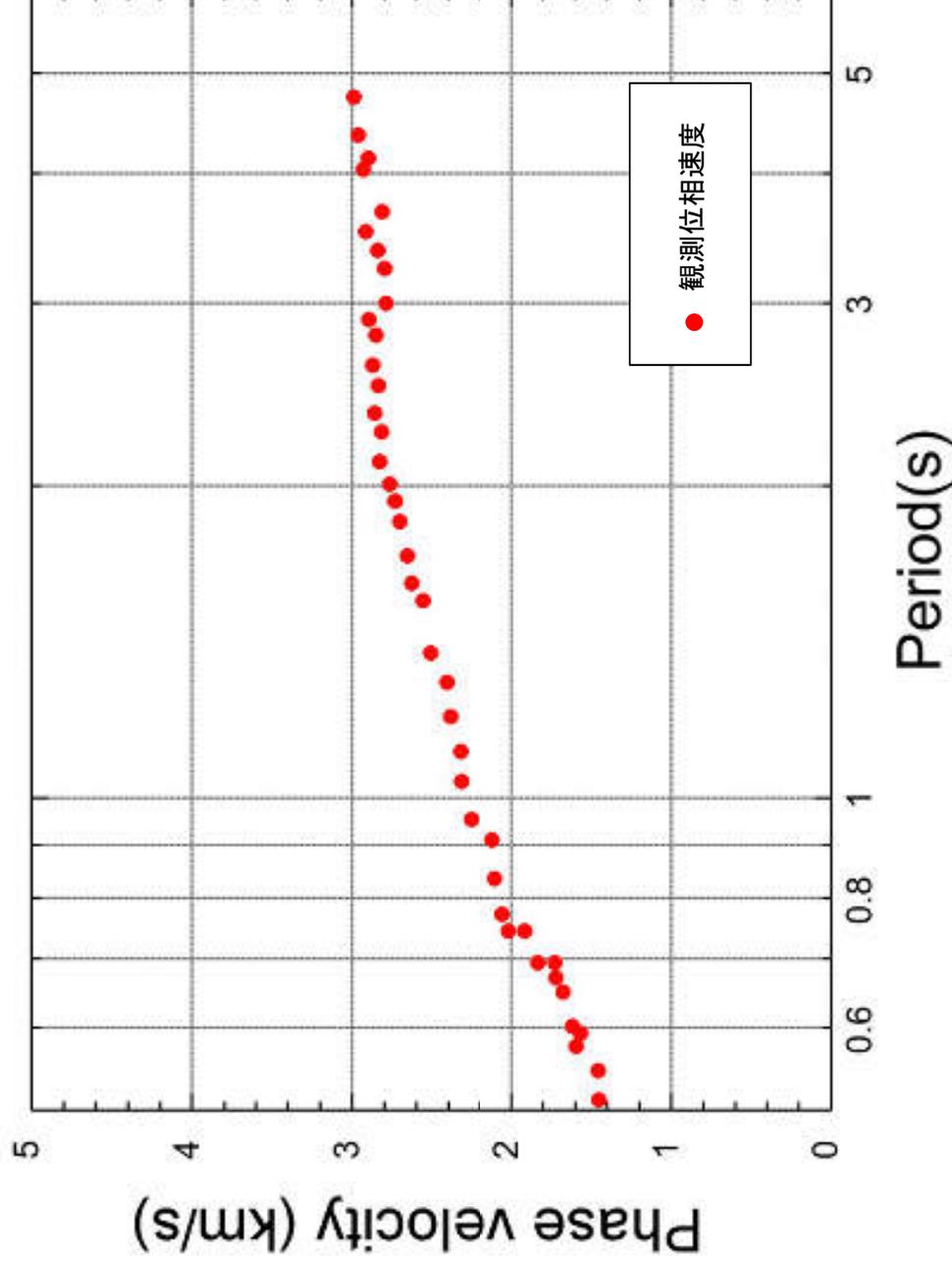
5. 地下構造モデルの策定（微動アレイ観測）

■ 美浜発電所敷地内で半径約500m及び約200mの微動アレイ観測を実施。



5. 地下構造モデルの策定（微動アレイ観測）

- 得られた位相速度は、短周期側で約1.5km/s、長周期側で約3.0km/sとなった。
- 得られた位相速度を目的関数としてインバージョン解析を行い、速度構造を推定する。

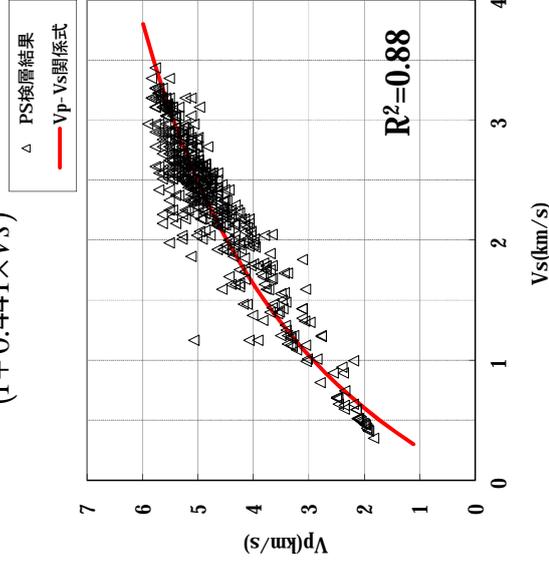


5. 地下構造モデルの策定（微動アレイ観測）

■ 第1層はVs=0.5km/s層、第2層はVs=1.65km/s層、第3層以深はVs=1.7~3.6km/sまでを0.1km/sごとにS波速度を設定し、層厚を下表に示す範囲で探索する。

○ P波速度の設定
PS検層データに基づいて得られた以下の関係式(回帰式)を用いて、S波速度の値から設定

$$Vp = \frac{4.212 \times Vs}{(1 + 0.441 \times Vs)}$$

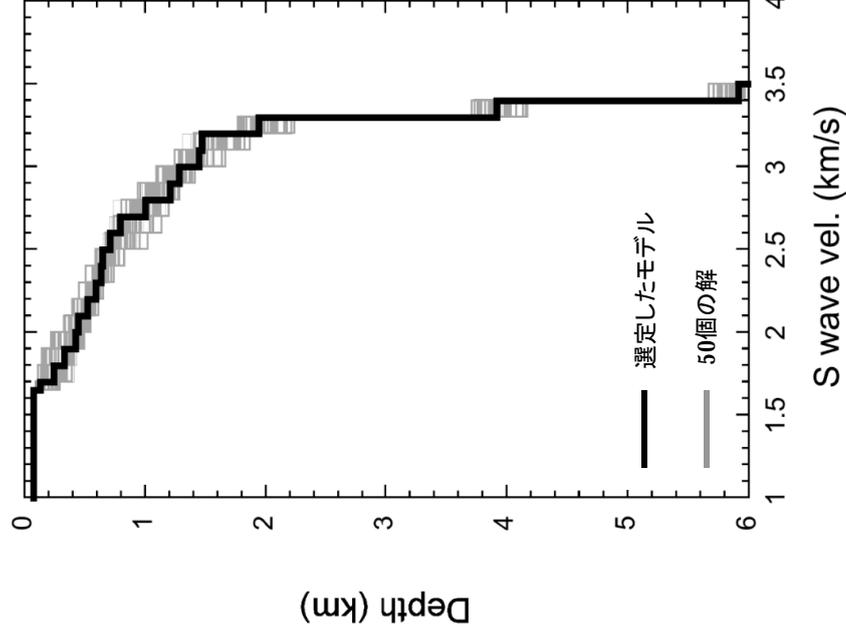
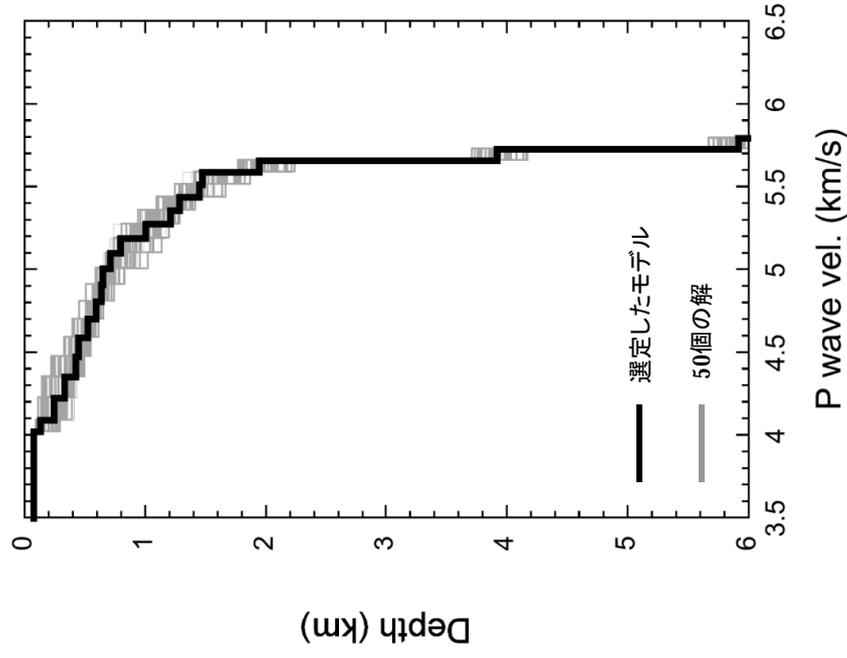


No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)
1	1.7	0.5	0.01 - 0.10	2.0
2	4.0	1.65	0.01 - 0.50	2.6
3	4.1	1.7	0.01 - 0.50	2.6
4	4.2	1.8	0.01 - 0.50	2.6
5	4.4	1.9	0.01 - 0.50	2.6
6	4.5	2.0	0.01 - 0.50	2.6
7	4.6	2.1	0.01 - 0.50	2.6
8	4.7	2.2	0.01 - 1.00	2.6
9	4.8	2.3	0.01 - 1.00	2.6
10	4.9	2.4	0.01 - 1.00	2.6
11	5.0	2.5	0.01 - 1.00	2.6
12	5.1	2.6	0.01 - 2.00	2.6
13	5.2	2.7	0.01 - 2.00	2.6
14	5.3	2.8	0.01 - 2.00	2.6
15	5.4	2.9	0.01 - 2.00	2.6
16	5.4	3.0	0.01 - 2.00	2.6
17	5.5	3.1	0.01 - 2.00	2.6
18	5.6	3.2	0.01 - 2.00	2.6
19	5.7	3.3	0.01 - 2.00	2.6
20	5.7	3.4	0.01 - 2.00	2.6
21	5.8	3.5	0.01 - 2.00	2.6
22	5.9	3.6	—	2.7

5. 地下構造モデルの策定（微動アレイ観測）

■ 速度構造の探索方法

- ・逆解析は、遺伝的アルゴリズムと焼きなまし法という2種類の手法を組み合わせた山中(2007)によるハイブリッドヒューリスティック探索を用いて、初期乱数1個に対し、個体数を20、世代更新回数を800、温度更新回数を5世代ごとに1回として、探索を実施。
- ・以上の探索を50個の初期乱数に対して繰り返し実施し、得られた50個の解から、その平均に最も近いモデルを地下構造モデルとして選定。



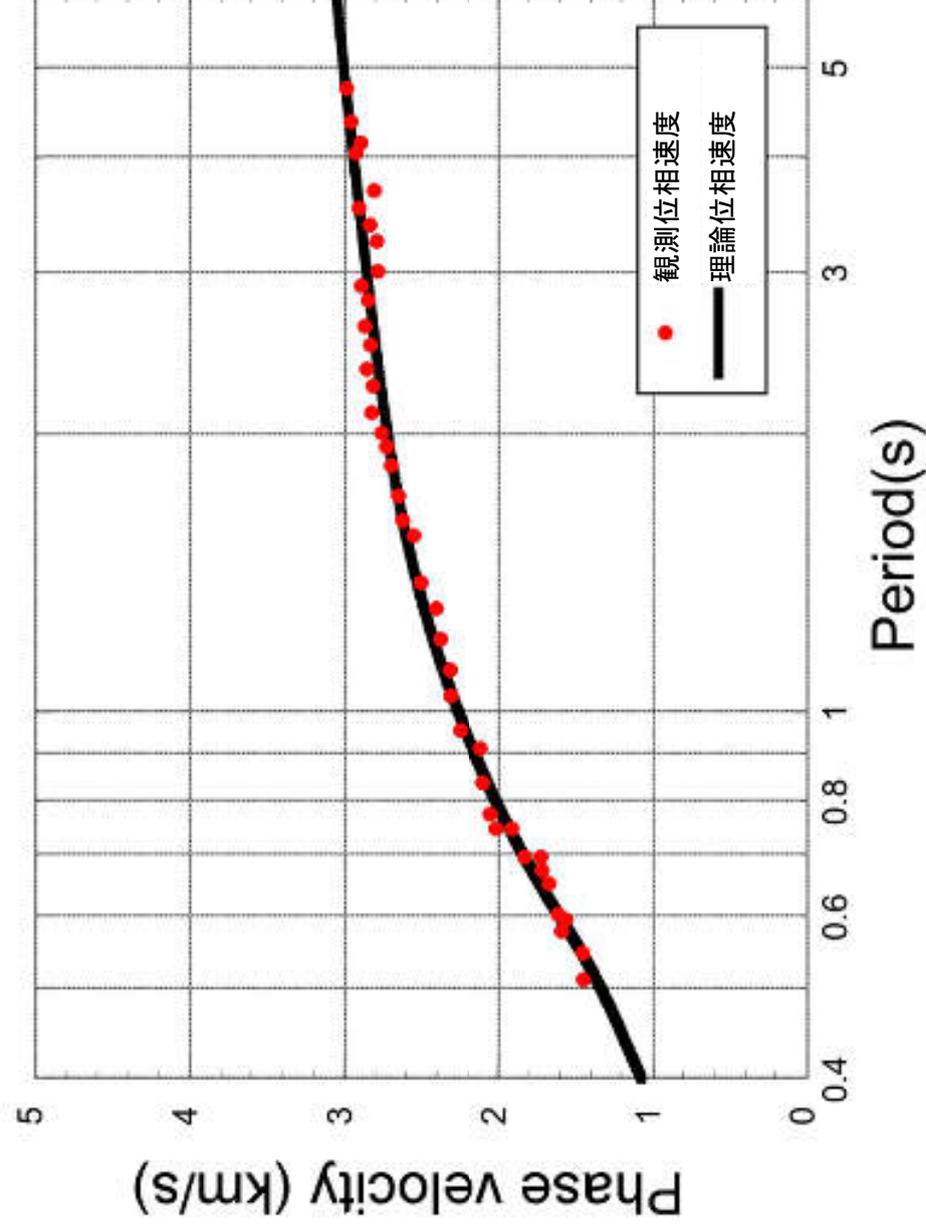
5. 地下構造モデルの策定（微動アレイ観測）

■今回選定された地下構造モデルの諸元は以下のとおりであり、断層上端深さに相当すると考えられる $V_p=5.8\text{km/s}$ 層の上面深度は 5km よりも深く評価された。

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	1.7	0.5	2.0	0.08	0.00
2	4.0	1.65	2.6	0.06	0.08
3	4.1	1.7	2.6	0.11	0.14
4	4.2	1.8	2.6	0.09	0.25
5	4.4	1.9	2.6	0.09	0.34
6	4.5	2.0	2.6	0.02	0.43
7	4.6	2.1	2.6	0.08	0.46
8	4.7	2.2	2.6	0.07	0.53
9	4.8	2.3	2.6	0.05	0.60
10	4.9	2.4	2.6	0.01	0.64
11	5.0	2.5	2.6	0.07	0.65
12	5.1	2.6	2.6	0.08	0.72
13	5.2	2.7	2.6	0.21	0.81
14	5.3	2.8	2.6	0.21	1.01
15	5.4	2.9	2.6	0.08	1.22
16	5.4	3.0	2.6	0.16	1.29
17	5.5	3.1	2.6	0.02	1.46
18	5.6	3.2	2.6	0.47	1.48
19	5.7	3.3	2.6	1.98	1.95
20	5.7	3.4	2.6	2.00	3.93
21	5.8	3.5	2.6	1.98	5.93
22	5.9	3.6	2.7	—	7.90

5. 地下構造モデルの策定（微動アレイ観測）

- 今回選定された地下構造モデルについて、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。



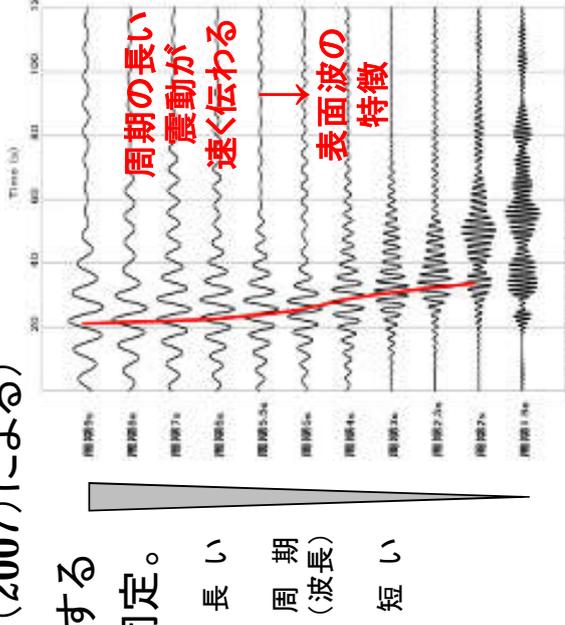
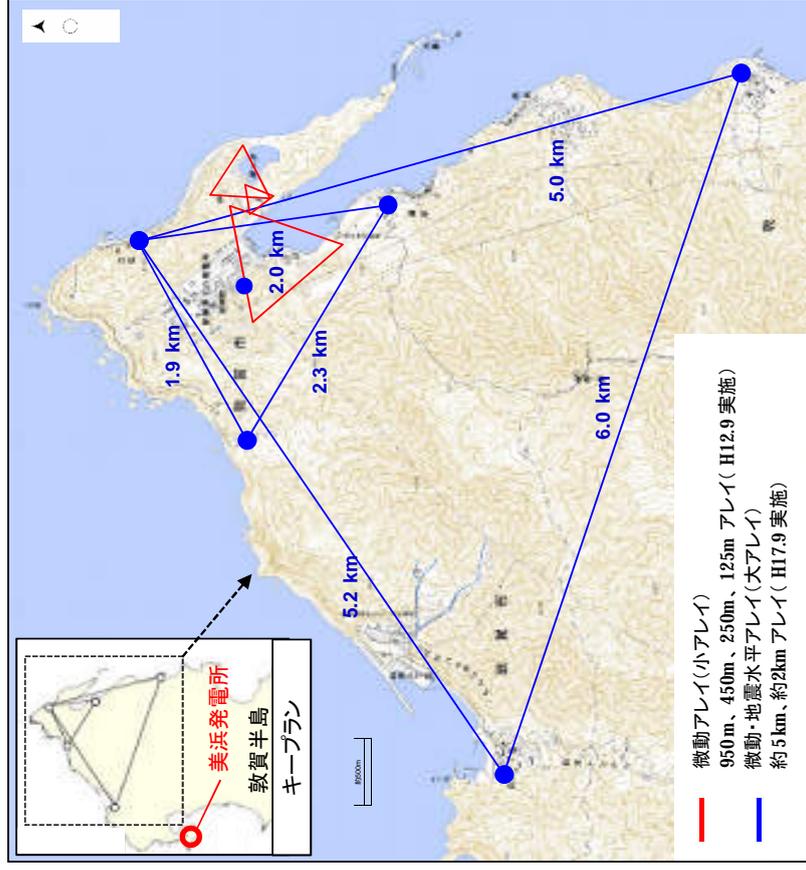
5. 地下構造モデルの策定

(敦賀半島の微動・地震水平アレイ観測)

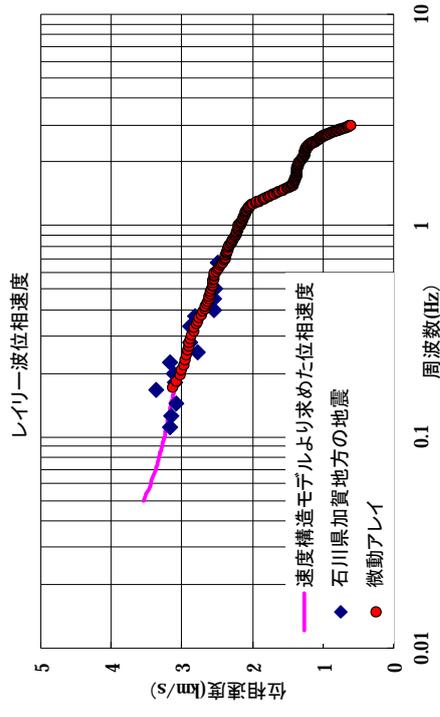
第257回審査会合
資料再掲

■ 微動アレイ探査、地震計水平アレイ観測(川里他(2007)による)

常時微動や自然地震による表面波を観測、分析することにより、表面波が伝播した地盤の速度構造を同定。



地震観測例 石川県加賀地方の地震



微動アレイ及び地震計水平アレイの観測点

速度構造モデル及び観測から求めた位相速度

5. 地下構造モデルの策定

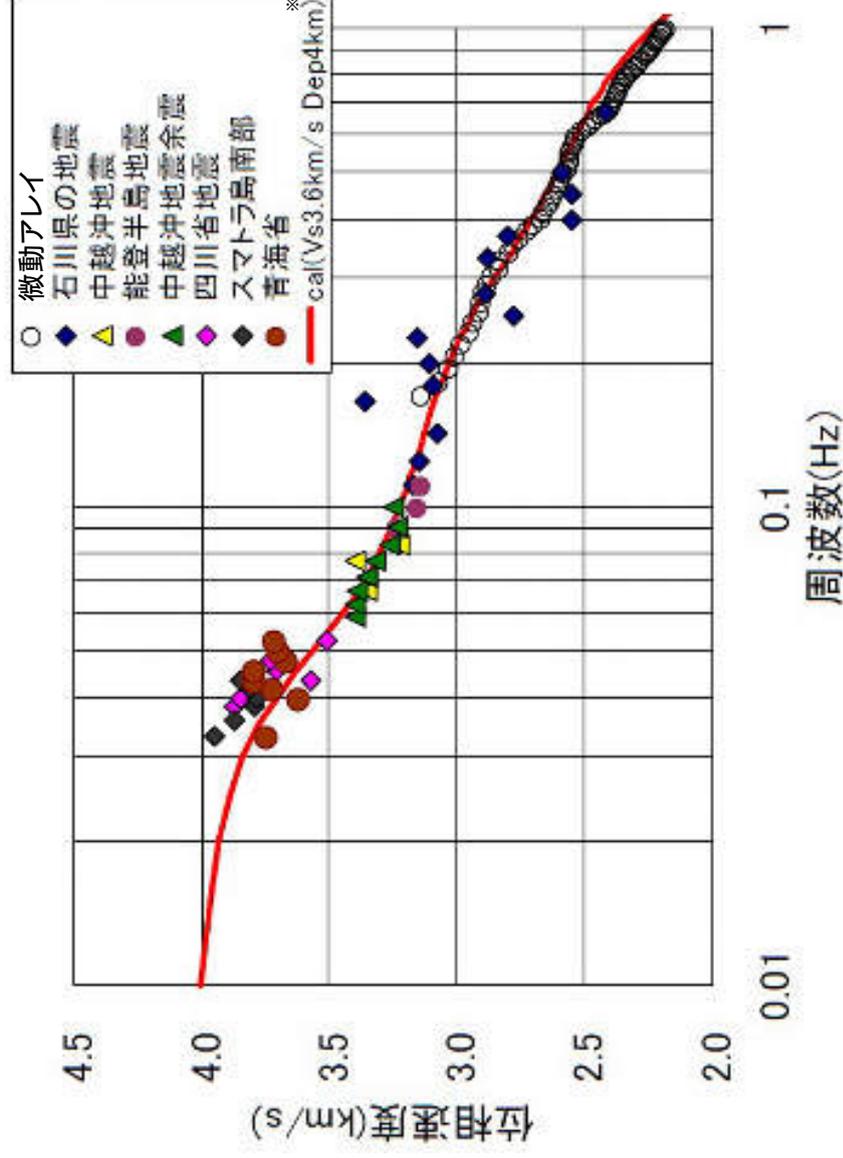
(敦賀半島の微動・地震水平アレイ観測)

第257回審査会合
資料再掲

35

■ 微動アレイ探査、地震計水平アレイ観測(大場他(2010)による)

川里他(2007)に対して、その後の地震観測記録を追加。



レイリー波の位相速度と微動探査による位相速度との比較
※ Cal は速度構造モデルより求めたレイリー波の理論位相速度

5. 地下構造モデルの策定

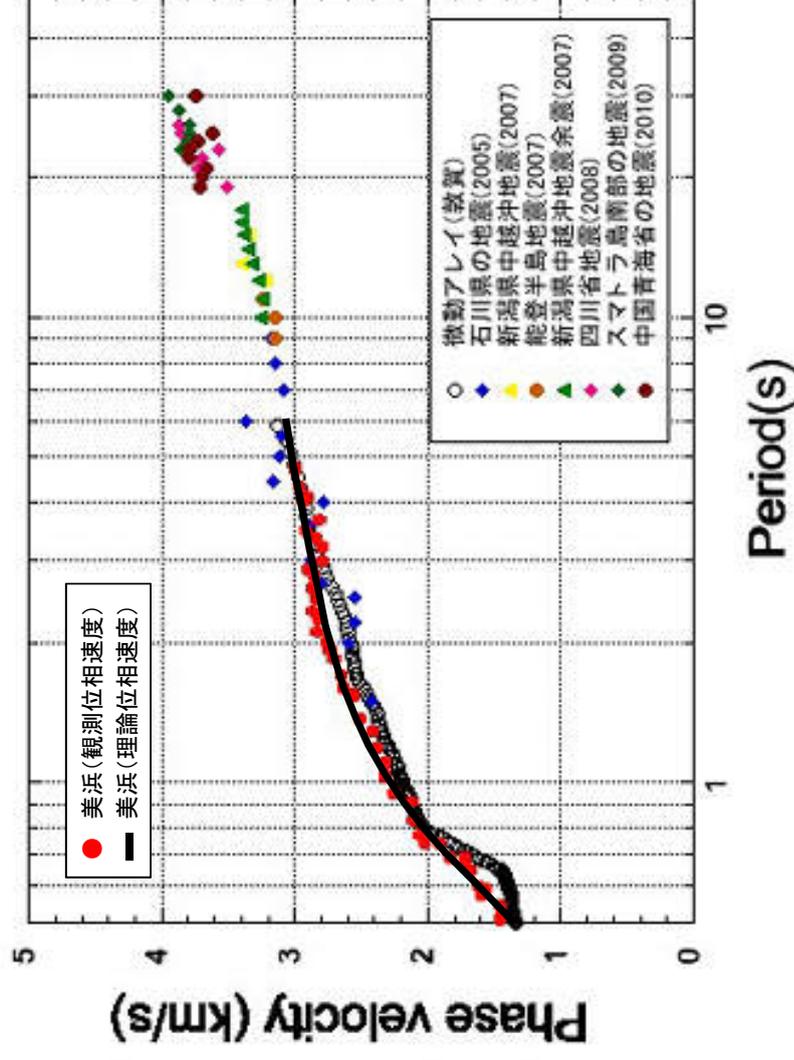
(敦賀半島の微動・地震水平アレイ観測)

第257回審査会合
資料再掲

36

■ 観測位相速度の比較

大場他(2010)による観測位相速度と、美浜発電所における観測位相速度を比較する。

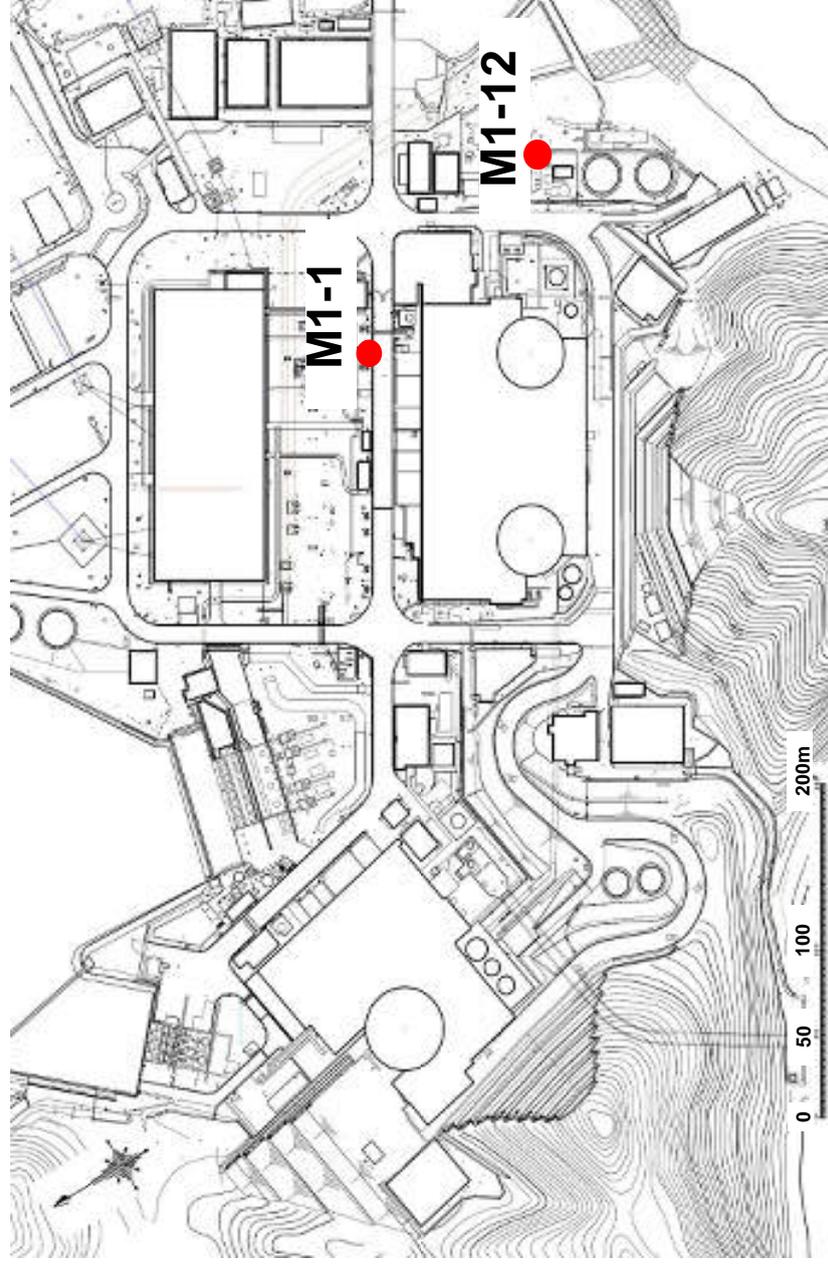


大場他(2010)による観測位相速度と美浜発電所での観測位相速度の比較図

美浜発電所における観測位相速度は、敦賀半島の微動及び地震観測記録を用いて検討された大場他(2010)による観測位相速度と良く対応していることを確認した。

5. 地下構造モデルの策定（減衰定数）

- 敷地内で実施したボーリング孔のPS検層データをを用いて地盤の不均質性を検討し、浅部で考慮すべき減衰定数との関係性を評価。

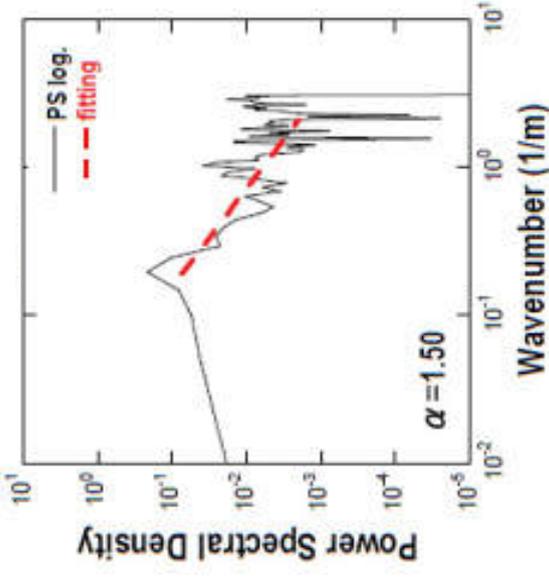
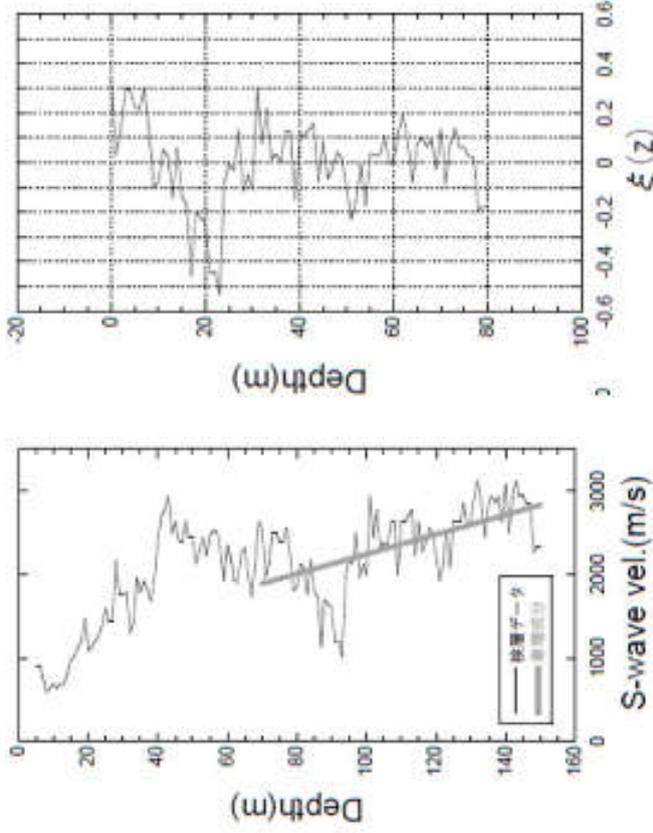


● : 不均質強度検討に使用したPS検層孔

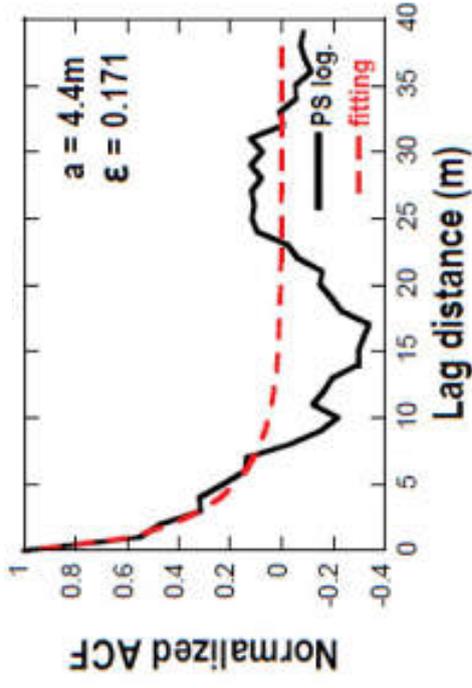
5. 地下構造モデルの策定 (減衰定数)

美浜発電所(M1-1孔)のPS検層(S波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

対象データ範囲(m)	平均S波速度(km/s)	漸増成分の傾き(1/s)	相関距離a(m)	Hurst指数 ν	標準偏差 ϵ
G.L.-70 ~-150	2.36	11.80	4.4	0.27	0.171



不均質データのパワースペクトルとフィッティング結果

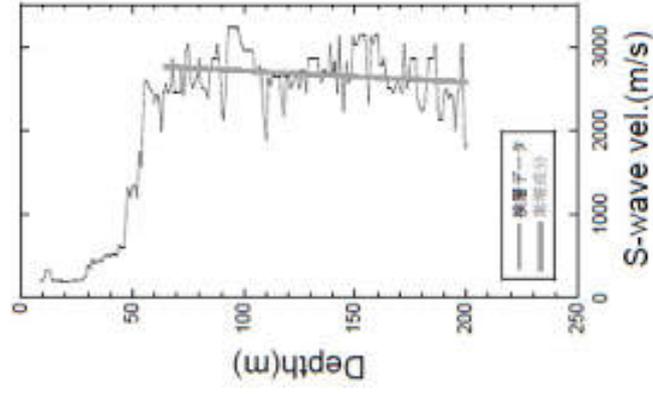


不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

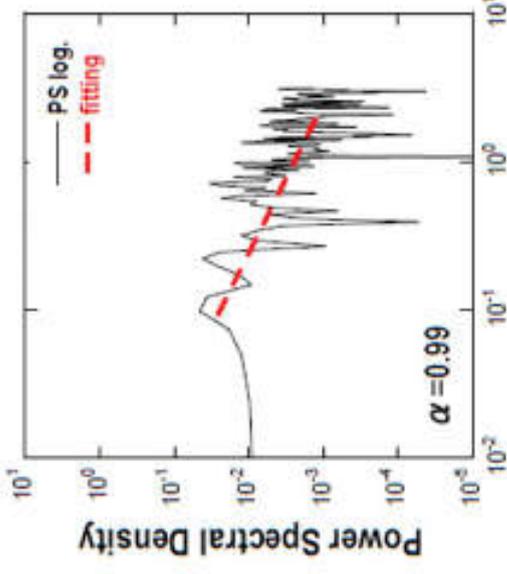
5. 地下構造モデルの策定 (減衰定数)

美浜発電所(M1-12孔)のPS検層(S波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

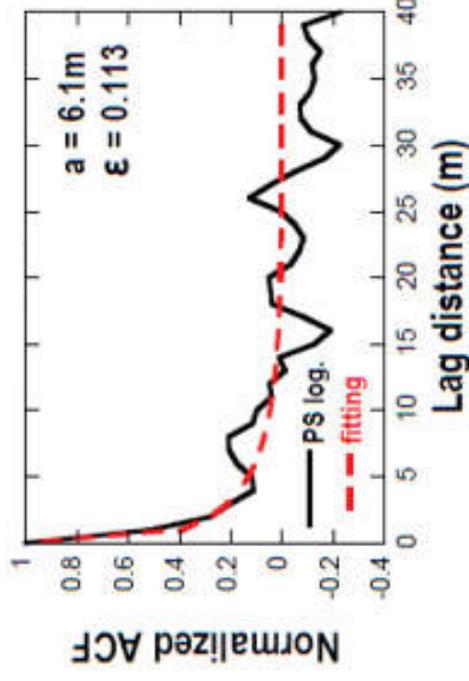
対象データ範囲(m)	平均S波速度(km/s)	漸増成分の傾き(1/s)	相関距離a(m)	Hurst指数 ν	標準偏差 ϵ
G.L.-65 ~-200	2.65	-0.44	6.1	0.13	0.113



検層データに対するフィッティング結果(左)と抽出された不均質データ $\xi(z)$ (右)



不均質データのパワースペクトルとフィッティング結果



不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

5. 地下構造モデルの策定（減衰定数）

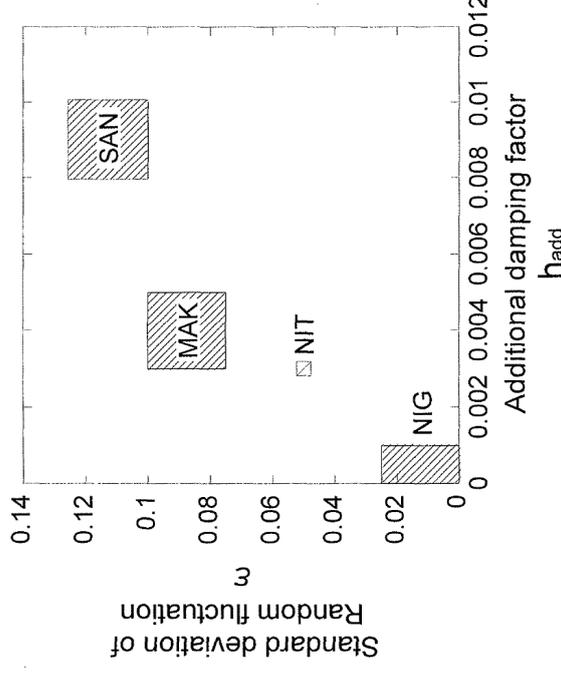
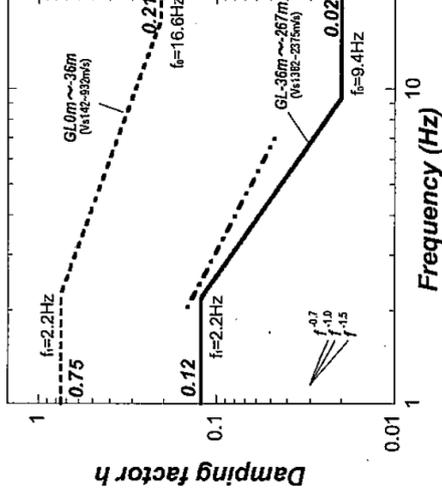
- 速度構造の不均質性と付加減衰に関する考察
 - 不均質強度（標準偏差）は0.11～0.17程度であり、佐藤・山中（2010）の指標を参考にすると、大きめの数字である。
 - 佐藤他（2007）による同等の速度構造の減衰定数の下限値と併せて考えて考えると表層の減衰定数は3%程度と考えられる。

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
不均質性の標準偏差（強度）の目安

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Standard deviation	0 ~ 0.025	0.05	0.075 ~ 0.1	0.1 ~ 0.125

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
減衰定数の付加量

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Additional damping factor	0 ~ 0.001	0.003	0.003 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01

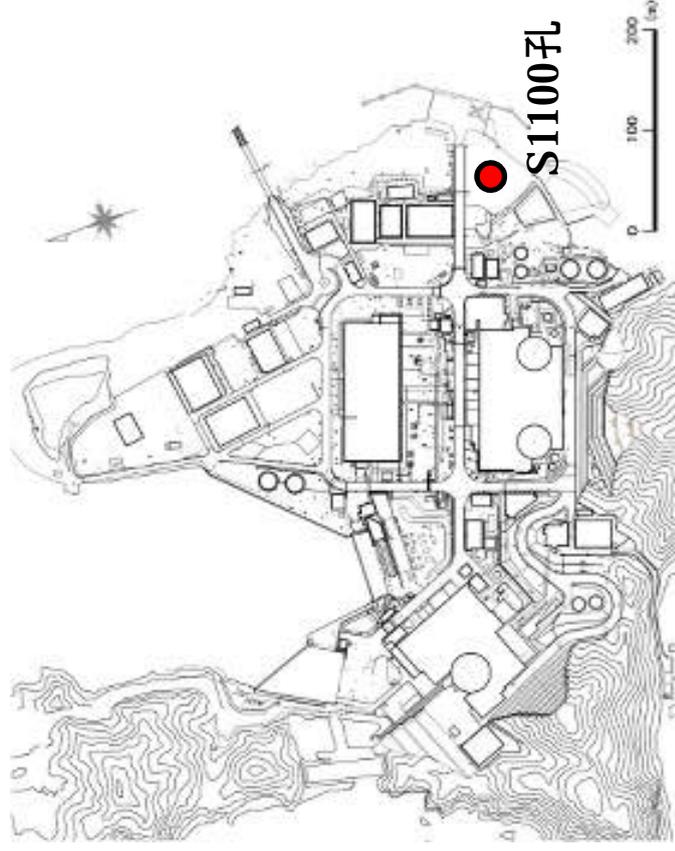
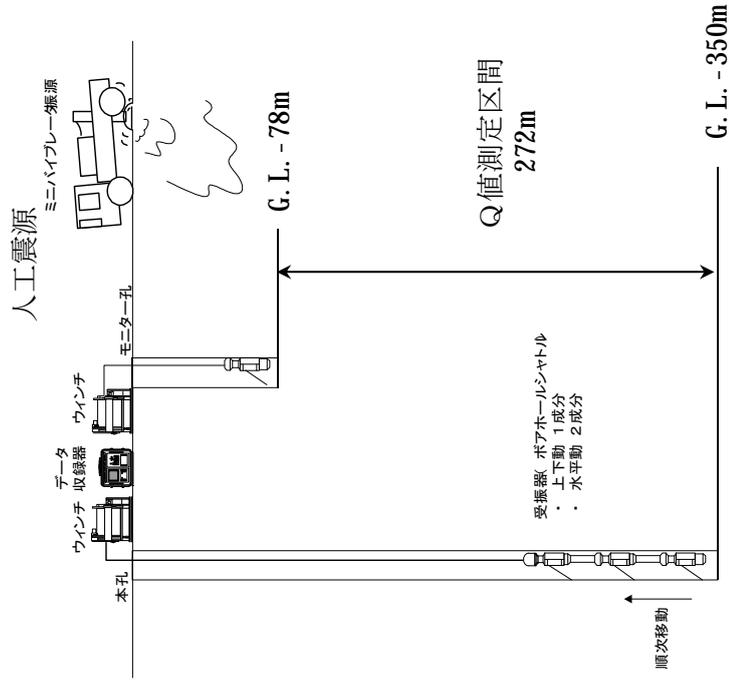


新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、考慮すべき深部地盤の不均質性強度（標準偏差 ϵ ）とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

5. 地下構造モデルの策定（減衰定数）

■敷地浅部の地下構造について（ボーリング孔を用いたQ値測定）

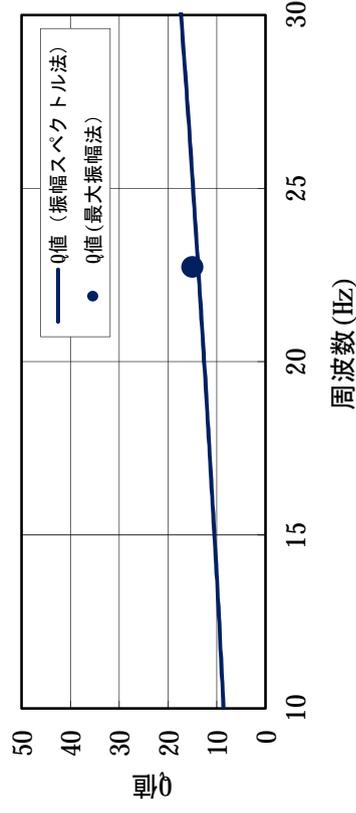
発電所構内のボーリング孔を用いて、ミニバイブレータ及び板たたき起振によるQ値測定を実施。



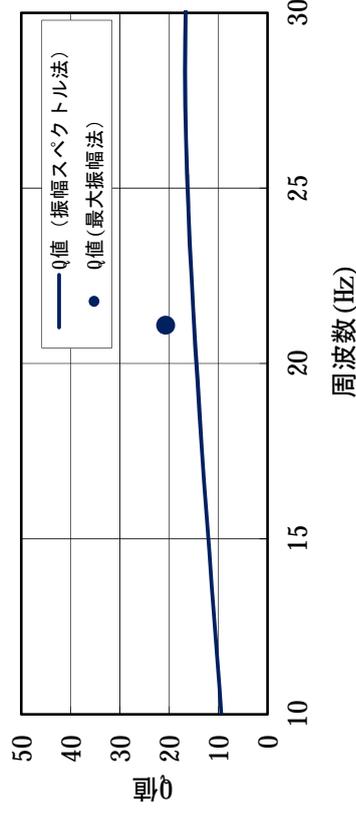
測定位置

5. 地下構造モデルの策定（減衰定数）

敷地浅部の地下構造について(Q値測定結果)



S波・ミニバイブレータ



S波・板たたき

波種	起振源	解析深度区間 (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値 (減衰定数(%))
S波	ミニバイブレータ	78 ~ 350	22.7	15.08(3.32)
	板たたき	78 ~ 350	21.1	20.70(2.42)

5. 地下構造モデルの策定（減衰定数）

- 佐藤他(2007)及び佐藤・山中(2010)の知見を基に、敷地内のPS検層結果から速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目して不均質強度を評価した結果、減衰定数は3%程度と判断した。
 - 敷地内でQ値測定を実施した結果、減衰定数は3%程度であった。
- ⇒浅部の減衰定数を3%とする。

5. 地下構造モデルの策定（まとめ）

■ 以上より、調査結果に基づく地下構造モデルを以下のとおり策定した。

調査結果に基づき策定した地下構造モデル

No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	密度※1 (g/cm ³)	層厚 (km)	上面深度 (km)	Qs※2	減衰定数 (%)
1	4.0	1.65	2.6	0.06	0.00	16.67	3.0
2	4.1	1.7	2.6	0.11	0.06	16.67	3.0
3	4.2	1.8	2.6	0.03	0.17	16.67	3.0
3'	4.2	1.8	2.6	0.06	0.20	100.00	0.5
4	4.4	1.9	2.6	0.09	0.26	100.00	0.5
5	4.5	2.0	2.6	0.02	0.35	100.00	0.5
6	4.6	2.1	2.6	0.08	0.37	100.00	0.5
7	4.7	2.2	2.6	0.07	0.45	100.00	0.5
8	4.8	2.3	2.6	0.05	0.52	100.00	0.5
9	4.9	2.4	2.6	0.01	0.56	100.00	0.5
10	5.0	2.5	2.6	0.07	0.57	100.00	0.5
11	5.1	2.6	2.6	0.08	0.64	100.00	0.5
12	5.2	2.7	2.6	0.21	0.72	100.00	0.5
13	5.3	2.8	2.6	0.21	0.93	100.00	0.5
14	5.4	2.9	2.6	0.08	1.13	100.00	0.5
15	5.4	3.0	2.6	0.16	1.21	100.00	0.5
16	5.5	3.1	2.6	0.02	1.37	100.00	0.5
17	5.6	3.2	2.6	0.47	1.40	100.00	0.5
18	5.7	3.3	2.6	1.98	1.87	100.00	0.5
19	5.7	3.4	2.6	0.15	3.85	100.00	0.5
20	5.9	3.6	2.7	—	4.00	100.00	0.5

※1: 浅部は敷地内でのボーリング調査結果から2.6g/cm³として設定し、地質調査結果から浅部と同質の花崗岩が深部まで分布していることから、深部も浅部と同等とみなして設定

2.7g/cm³は「琵琶湖西岸断層帯の地震を想定した強震動評価(地震調査研究推進本部平成16年6月21日)」等でも用いられている値を採用

※2: 深さ200m以浅は、地盤の不均質性の評価及びQ値測定の結果を総合的に踏まえてQs=16.67(減衰定数3%)とし、200m以深はQs=100(減衰定数0.5%)として設定