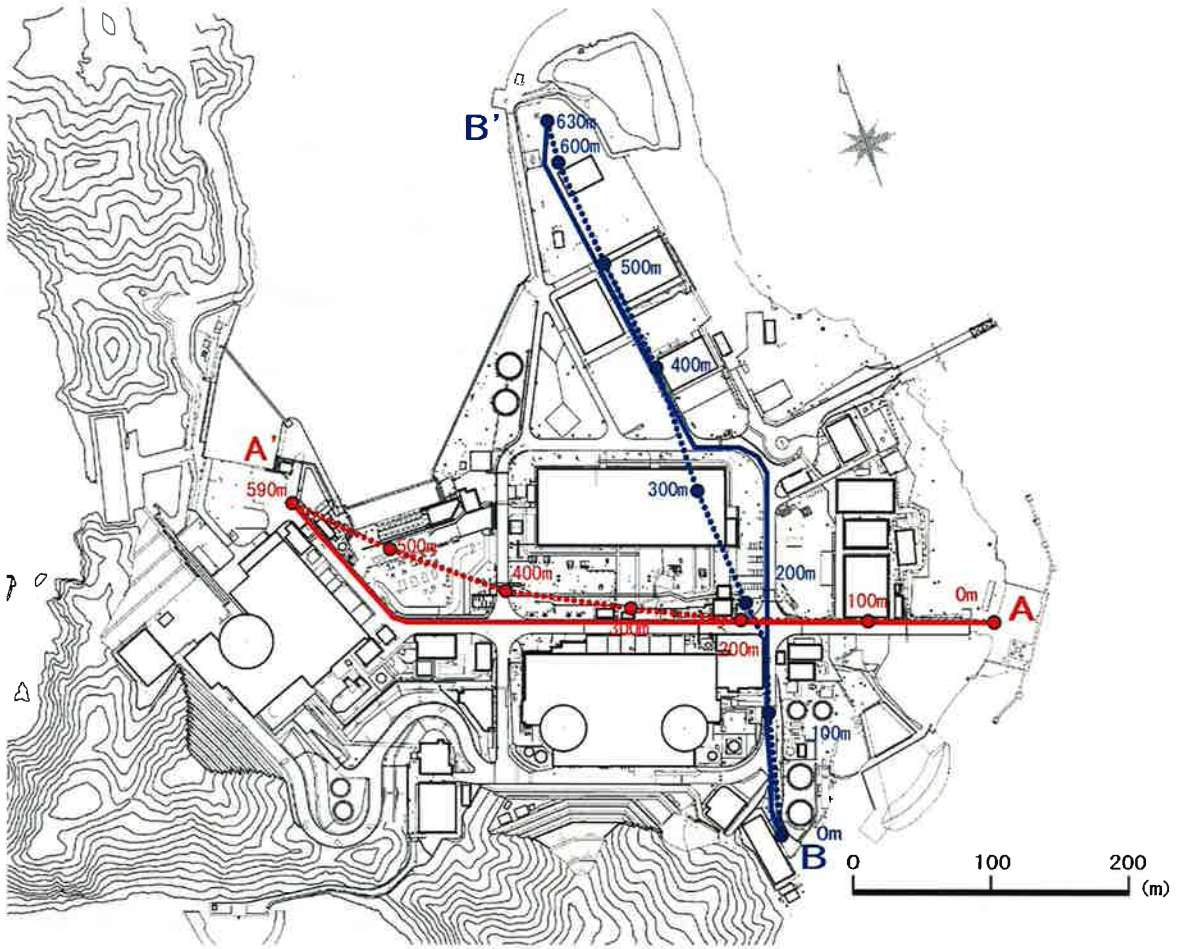
1．2．浅部地下構造の評価（反射法地震探査）

■地下構造を連続的に把握するため、敷地内2方向の反射法地震探査を実施する。

■極力長く測線を確保できる2測線を選定した。

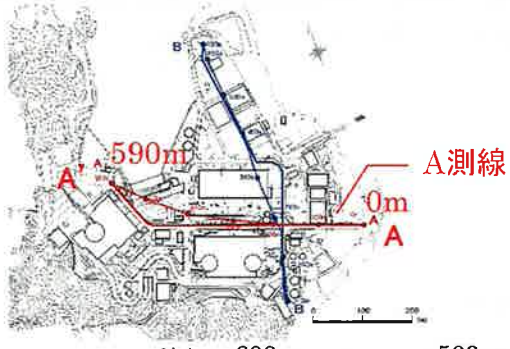
■解析断面については、本調査では一部測線配置が屈曲しているため、反射点分布のほぼ中央付近を通過する解析断面を設定した。

探査測線（A測線）
解析断面（A測線）
探査測線（B測線）
解析断面（B測線）

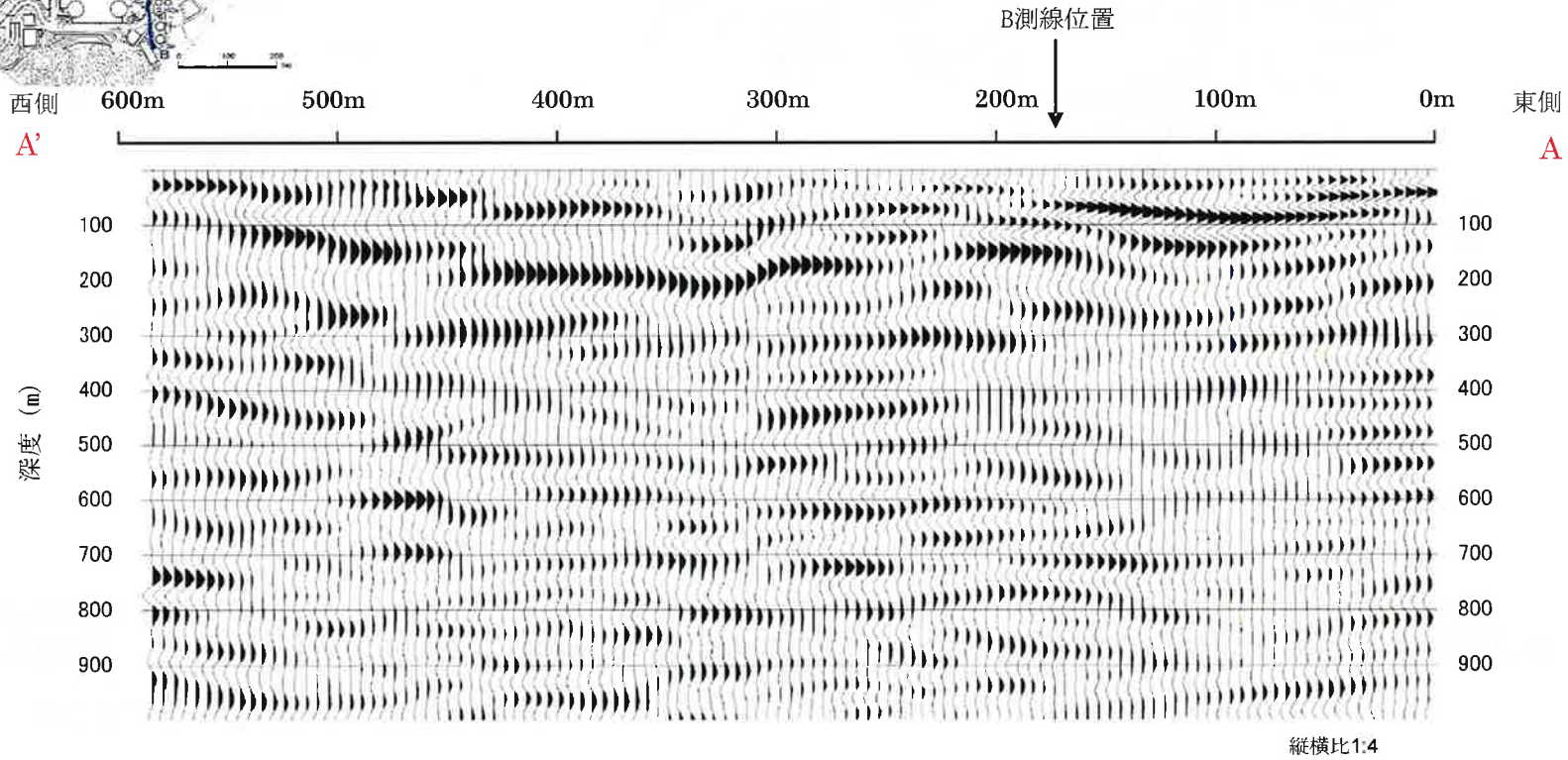


測線	A測線	B測線
調査測線長(m)	610	670
解析断面長(m)	590	630

1．2．浅部地下構造の評価（反射法地震探査）

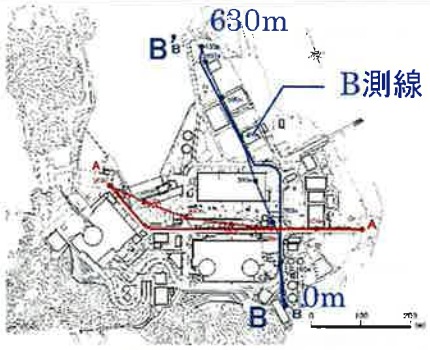


（A測線：深度断面）

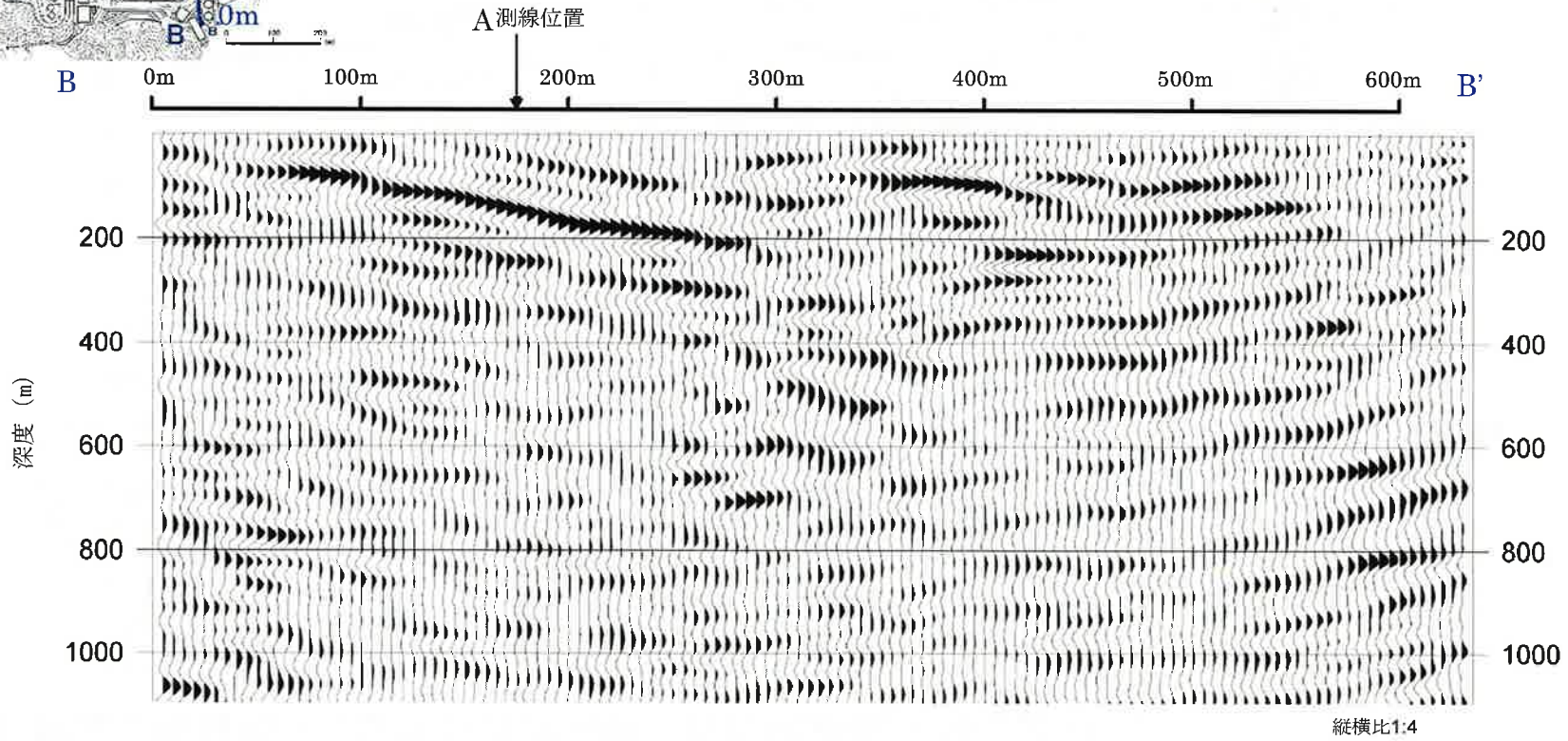


敷地は主として花崗岩からなる地質であり、褶曲構造や極端な落ち込み構造等は確認されず、深さ約300m程度までは特異な構造は認められなかった。

1．2．浅部地下構造の評価（反射法地震探査）



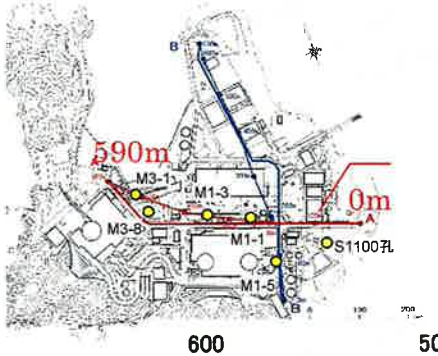
（B測線：深度断面）



敷地は主として花崗岩からなる地質であり、褶曲構造や極端な落ち込み構造等は確認されず、深さ約300m程度までは特異な構造は認められなかった。

1．2．浅部地下構造の評価（反射法地震探査）

■反射面と既往ボーリング調査から得られた岩級区分等との対比

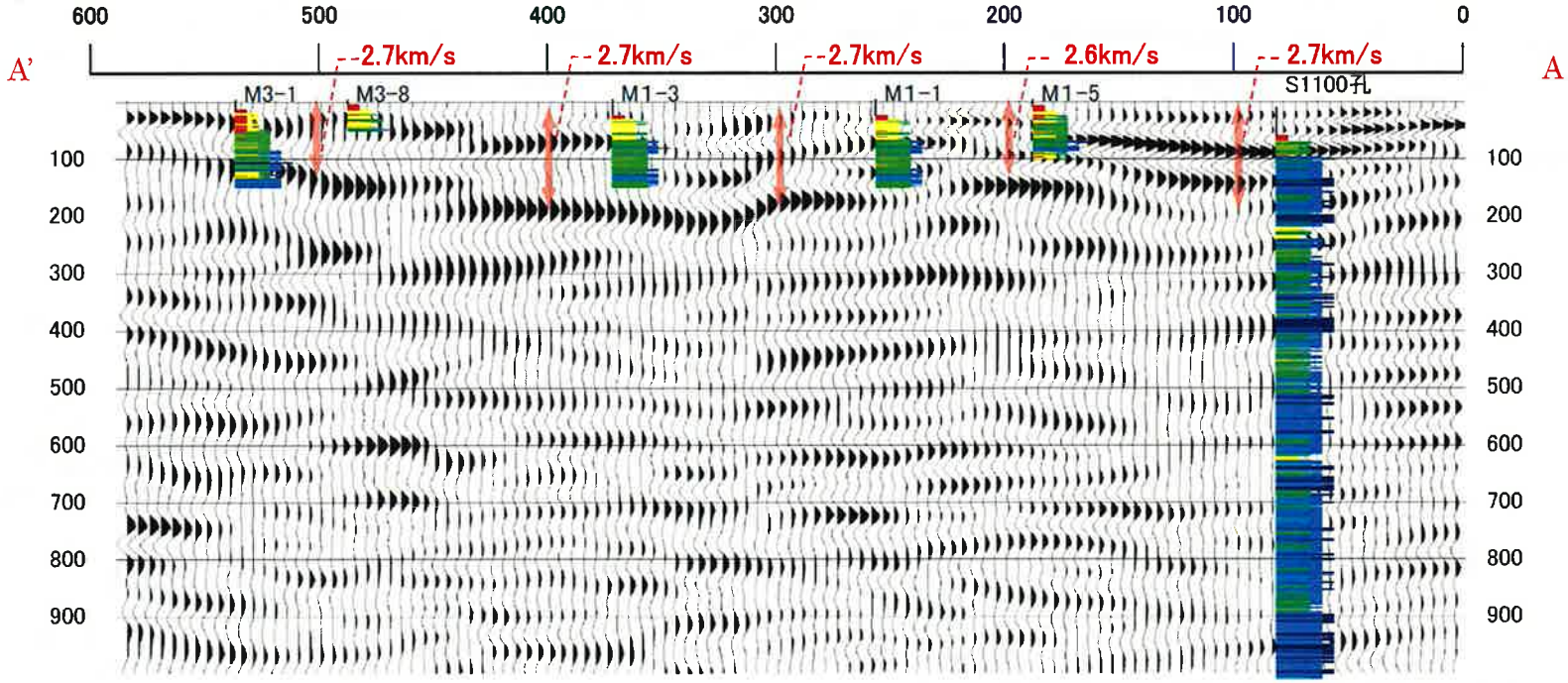


A測線

・美浜発電所は、均質な花崗岩が分布していることから、浅部に認められた反射面の原因を検討するため、ボーリング調査から得られた岩級区分と対比した。
・また、反射法地震探査解析に用いた地表から比較的明瞭な反射面までの平均的なP波速度（重合速度）を明記した。

矢印の範囲内の
平均的なP波速度
（重合速度）

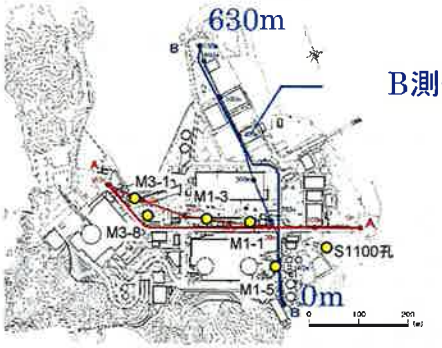
岩級区分　凡例
D
CL
CM
CH
B



■反射面の位置と岩級区分の境界が一致するようにも見えることから、反射面の原因として、風化の影響等による岩級の違いが反射面に現れている可能性があると考えられる。

1．2．浅部地下構造の評価（反射法地震探査）

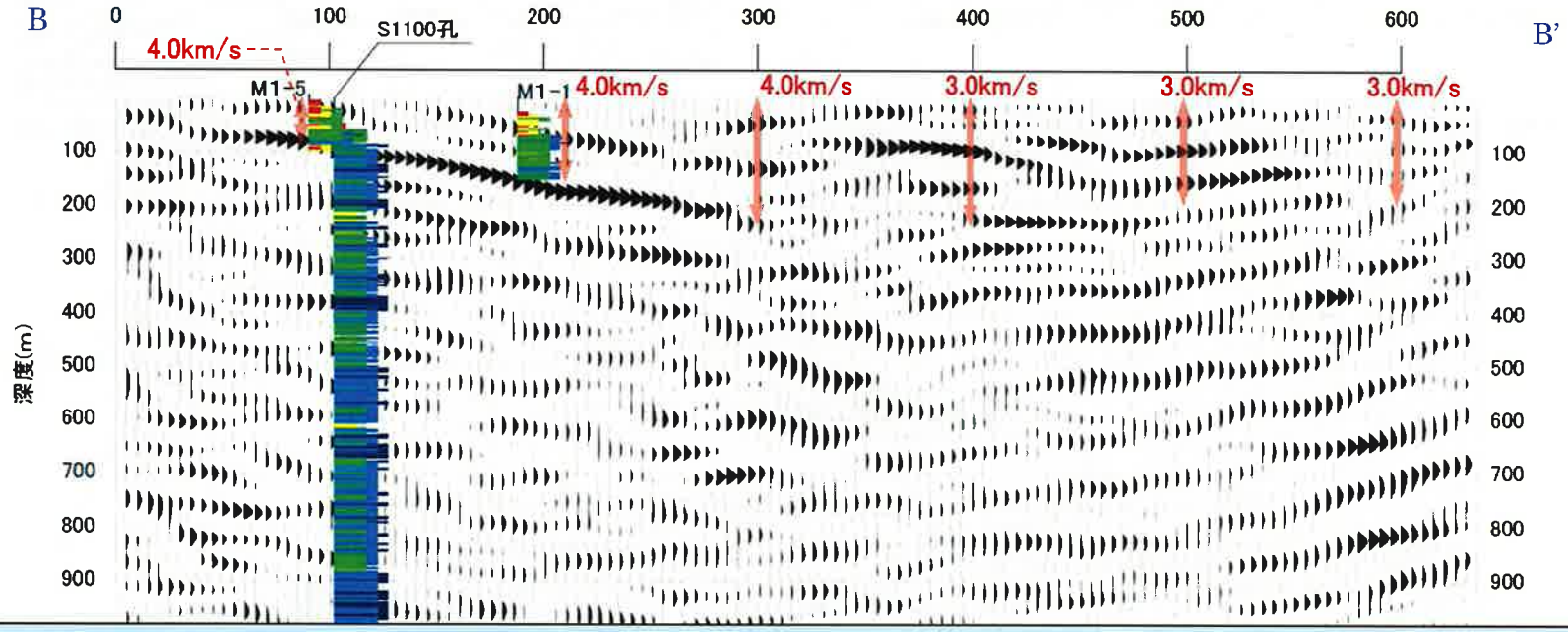
■反射面と既往ボーリング調査から得られた岩級区分等との対比



・美浜発電所は、均質な花崗岩が分布していることから、浅部に認められた反射面の原因を検討するため、ボーリング調査から得られた岩級区分と対比した。
・また、反射法地震探査解析に用いた地表から比較的明瞭な反射面までの平均的なP波速度（重合速度）を明記した。

矢印の範囲内の
平均的なP波速度
（重合速度）

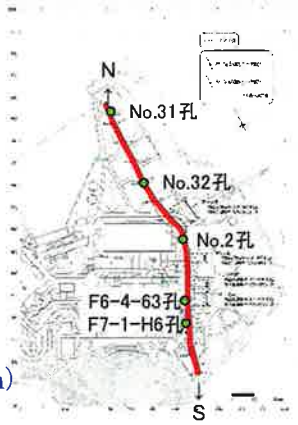
岩級区分　凡例
D
CL
CM
CH
B



■反射面の位置と岩級区分の境界が一致するようにも見えることから、反射面の原因として、風化の影響等による岩級の違いが反射面に現れている可能性があると考えられる。

■距離程300m付近までは、反射面が確認されるが、それ以北においては若干不明瞭で速度も遅くなっている。

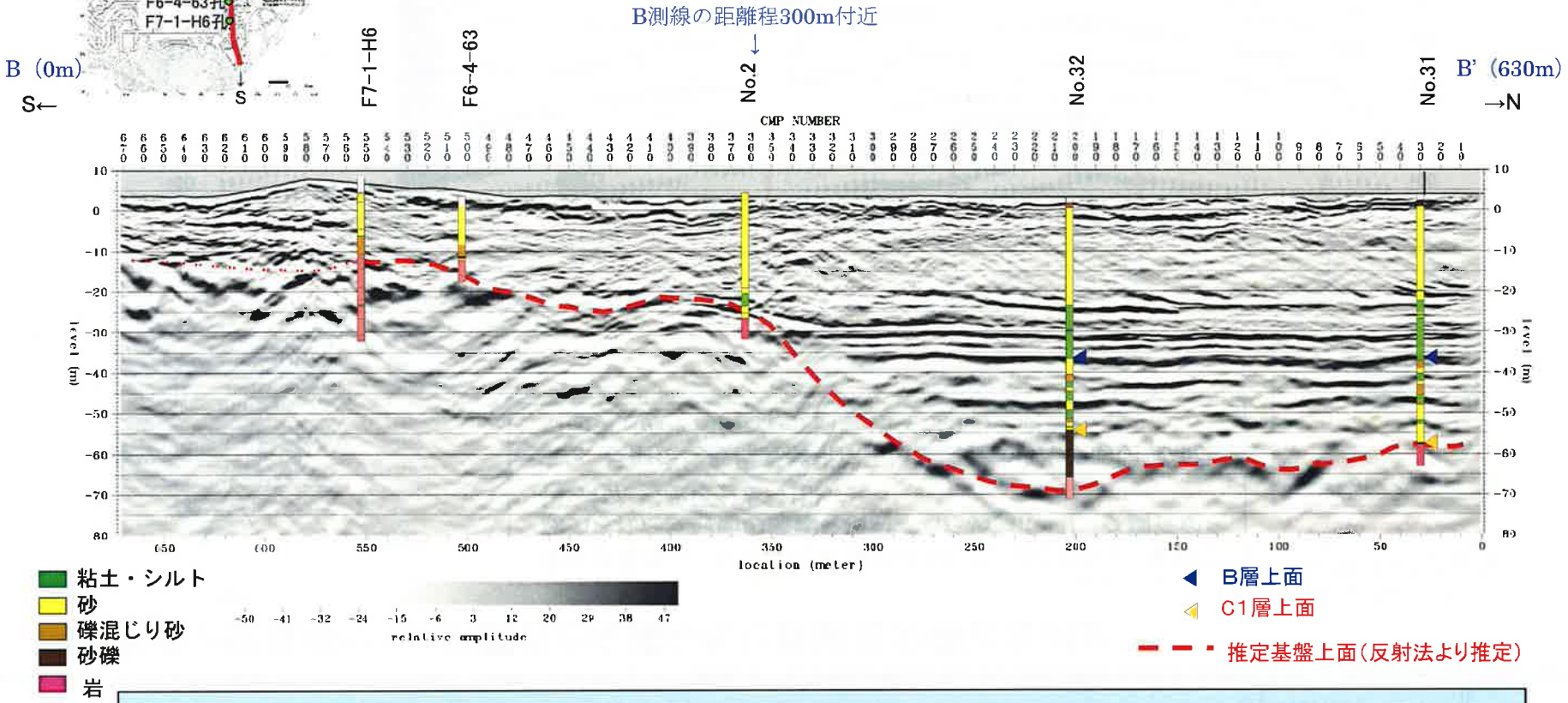
1．2．浅部地下構造の評価（反射法地震探査：S波）



■距離程300m以北において、反射面が若干不明瞭で速度も遅くなっていることを分析するために、美浜の破砕帯調査を目的とした反射法地震探査結果（S波）※を確認した。

※）平成25年9月11日第2回美浜発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合　現調3-1

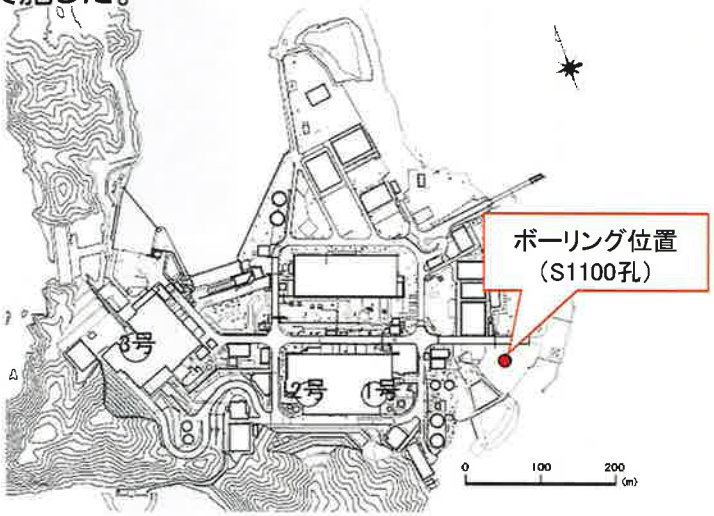
S波探査深度断面図



■S波を用いた反射法地震探査結果を確認した結果、距離程300m以北（No.2ボーリングより北側）において速度が遅くなった理由としては、その範囲は堆積物が厚く堆積しており、その影響が出ていると考えられる。

1．3．深部地下構造の評価（S1100孔ボーリング調査結果）

■地震計の設置とともに地下深部までの地質及び地盤物性を把握するため、ボーリング調査（S1100孔）を実施した。

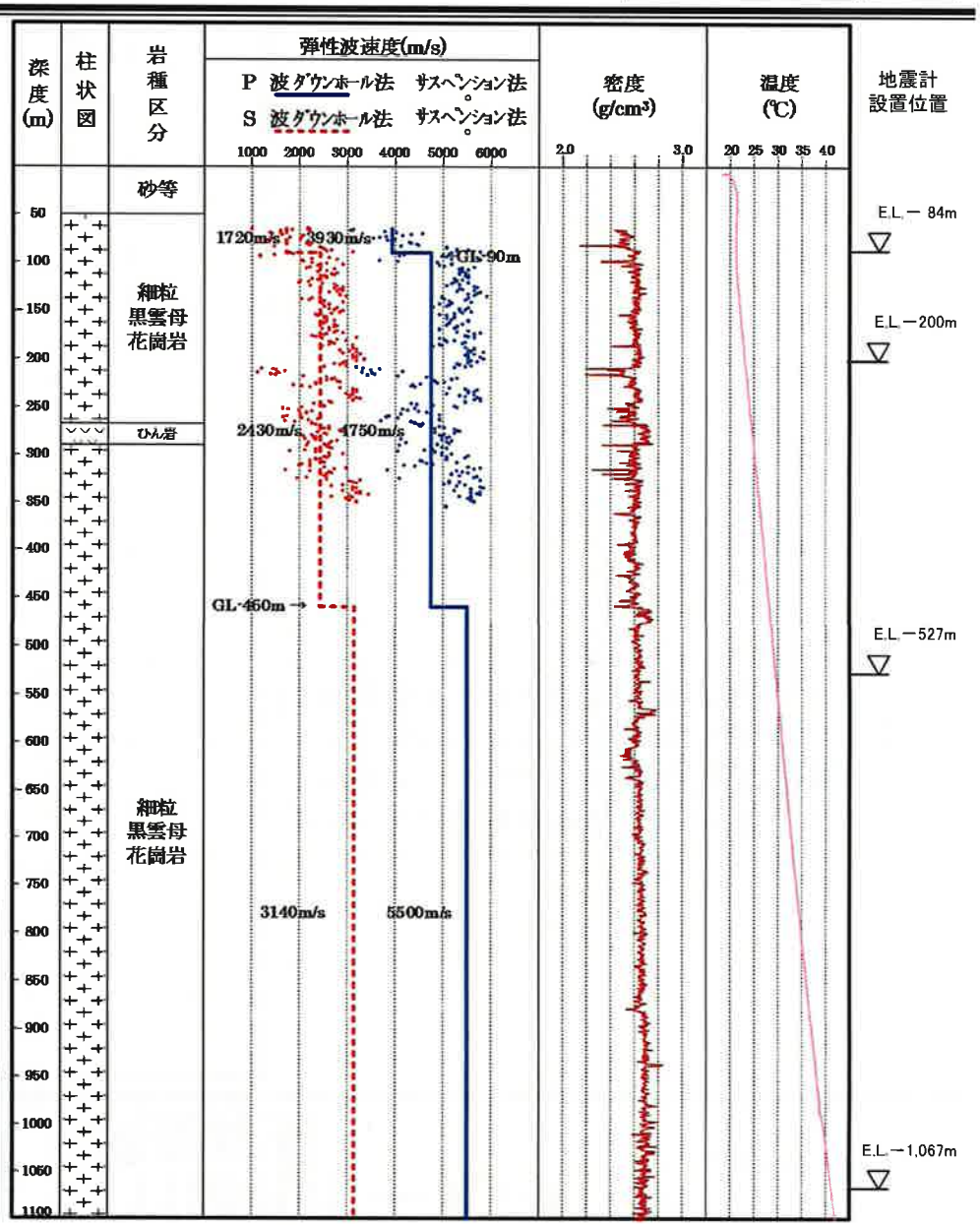


PS検層結果（ダウンホール法）

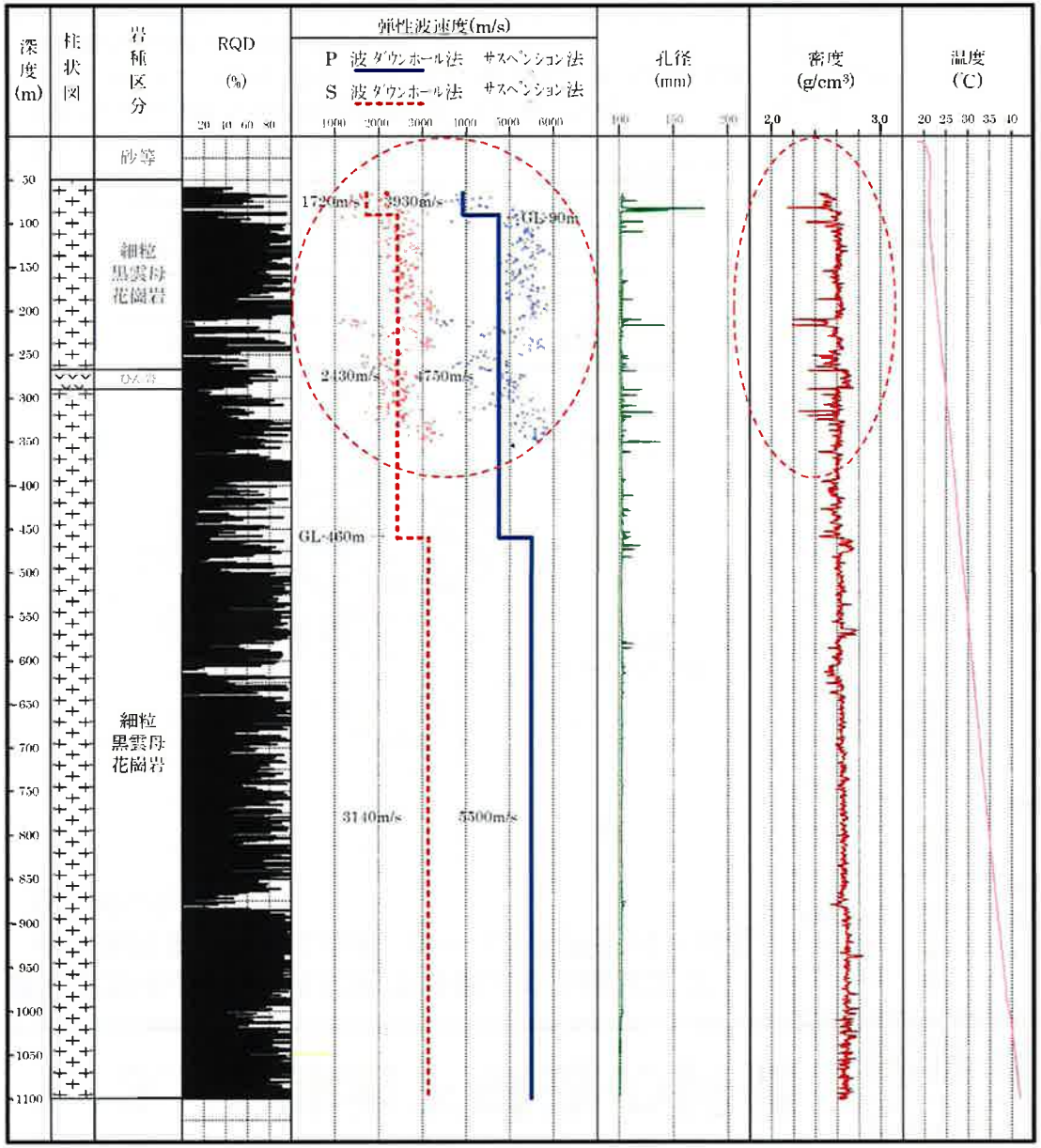
深度	P波速度	S波速度
50～90m	3,930m/s	1,720m/s
90～460m	4,750m/s	2,430m/s
460～1,100m	5,500m/s	3,140m/s

ダウンホール法が平均的な速度構造を示しているのに対し、
サスペンション法は1m区間の局所的な速度を計測している。
従って、サスペンション法で測定された速度の最大値は、ダウンホール法の速度よりも大きくなる傾向がある。

ボーリング調査地点（S1100孔）においては、深度50m程度までは砂等であり、それ以深については、主に花崗岩が分布する。



1．3．深部地下構造の評価〔S1100孔ボーリング調査結果〕



・ボーリング調査地点（S1100孔）における サスペンションデータの速度や密度の低 下について確認するため、RQDや孔径に 関するデータも追加し、分析を実施する。

1．3．深部地下構造の評価〔S1100孔ボーリング調査結果〕

●:Vp　ー:密度※1　■:RQD※2　ー:孔径※1
※1）10cm単位のデータをm単位で平均化
※2）1m区間に得られた10cm以上のコアの総長を百分率で表示したもの

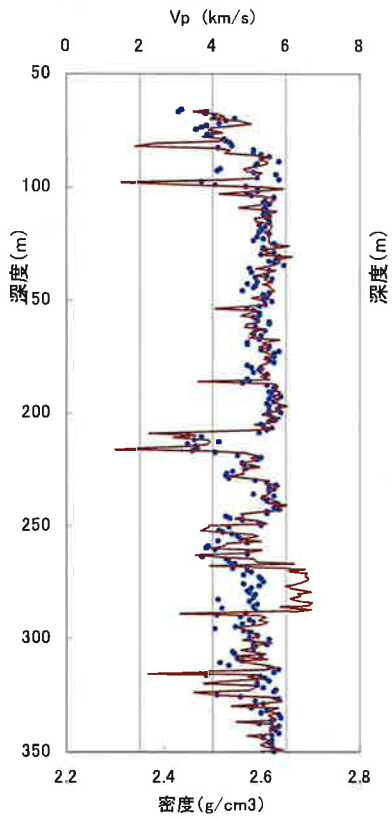


図1．Vpと密度の関係

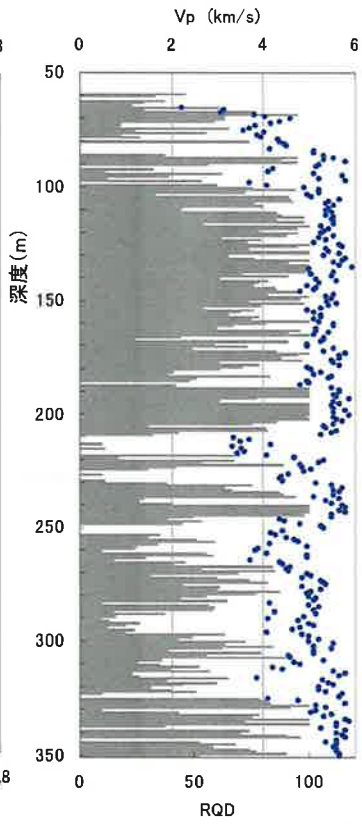


図2(a)．VpとRQDの関係

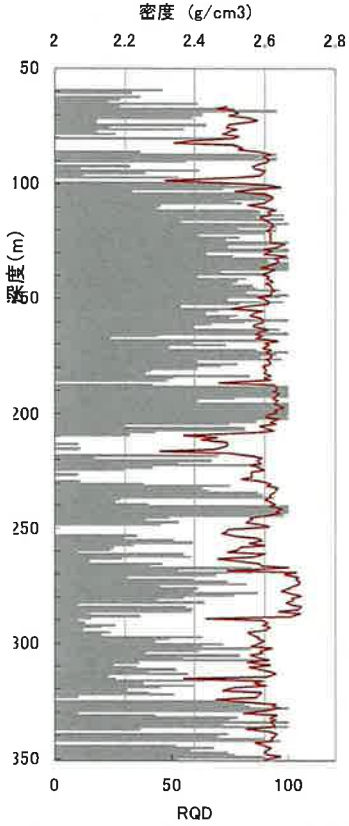


図2(b)．密度とRQDの関係

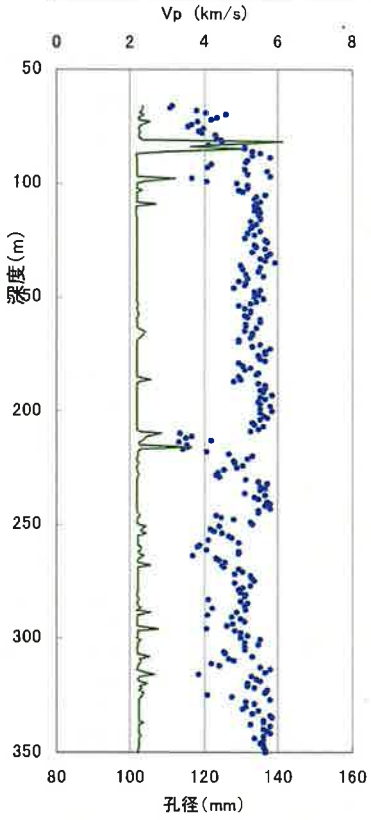


図3(a)．Vpと孔径の関係

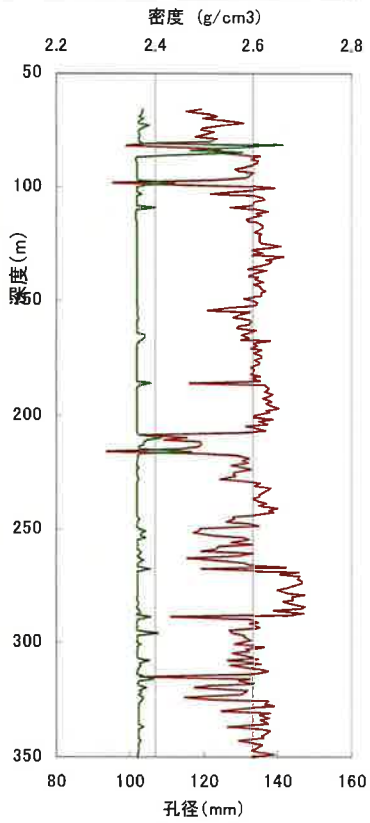
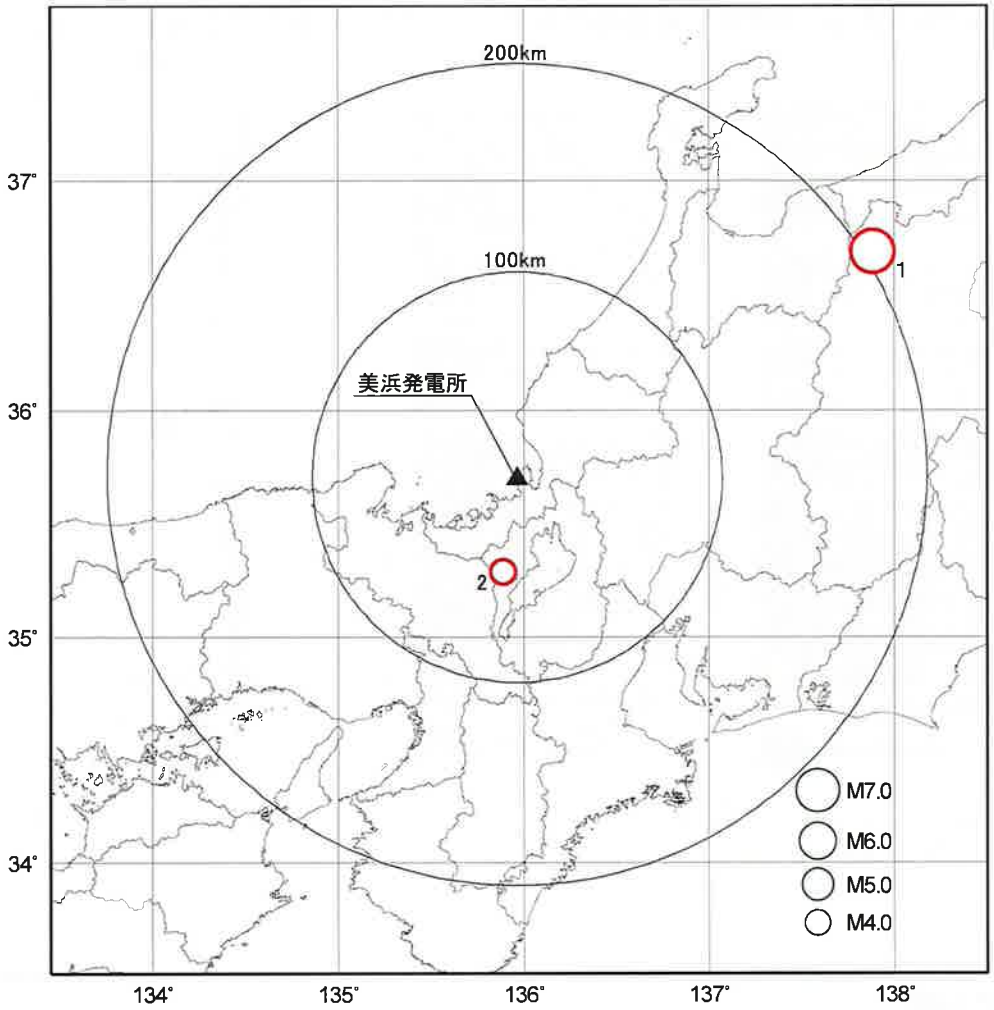


図3(b)．密度と孔径の関係

・Vpと密度の関係を見ると、Vpと密度の低下が確認された深度が概ね一致している。
・これらについて、RQDや孔径について確認を行った結果、RQDが小さい深度及び孔径が大きい深度において、Vpと密度の低下が確認された。
・以上より、RQDが小さい深度及び孔径が大きい深度、つまり割れ目が多く、地質的に脆弱な深度において、Vpと密度の低下が確認された。

1．3．深部地下構造の評価（地震観測）

■地震観測期間（H26.4～H27.2）における主な地震を抽出



敷地で観測された主な地震の震央分布

敷地で観測された主な地震の諸元

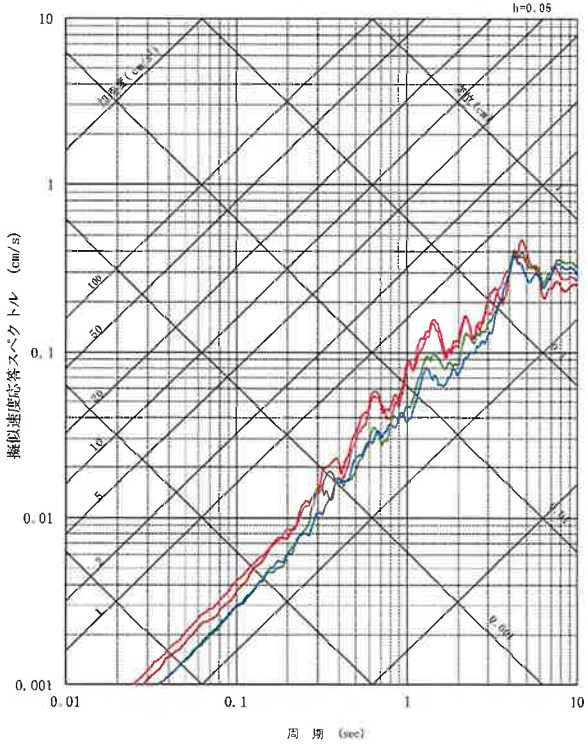
No.	発震日時 震源地又は 地震名	震央位置 緯度 経度	M	震源深さ (km)	震央距離 (km)
1	2014.11.22 22:08:18 長野県北部地震	36° 41.5'N 137° 53.4'E	6.7	5	205
2	2014.12.26 22:30:35 滋賀県北部	35° 17.1'N 135° 53.7'E	4.2	14	47

1．3．深部地下構造の評価（地震観測）

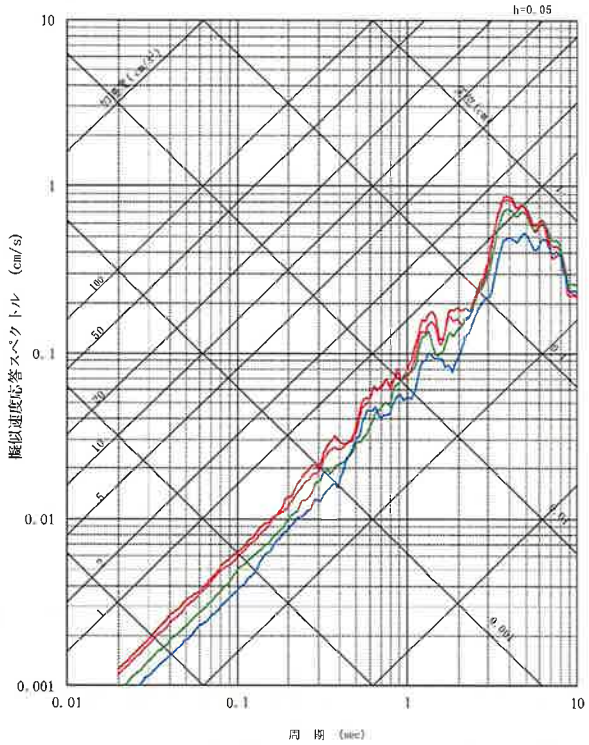
■2014年長野県北部地震（M6.7）の岩盤内における深度別応答スペクトル

・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

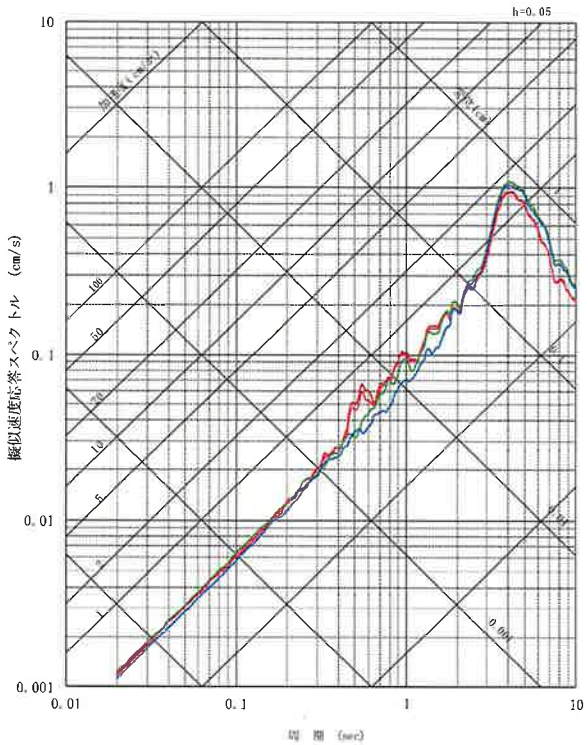
・各深度で増幅はほとんどみられなかった



NS方向



EW方向



UD方向

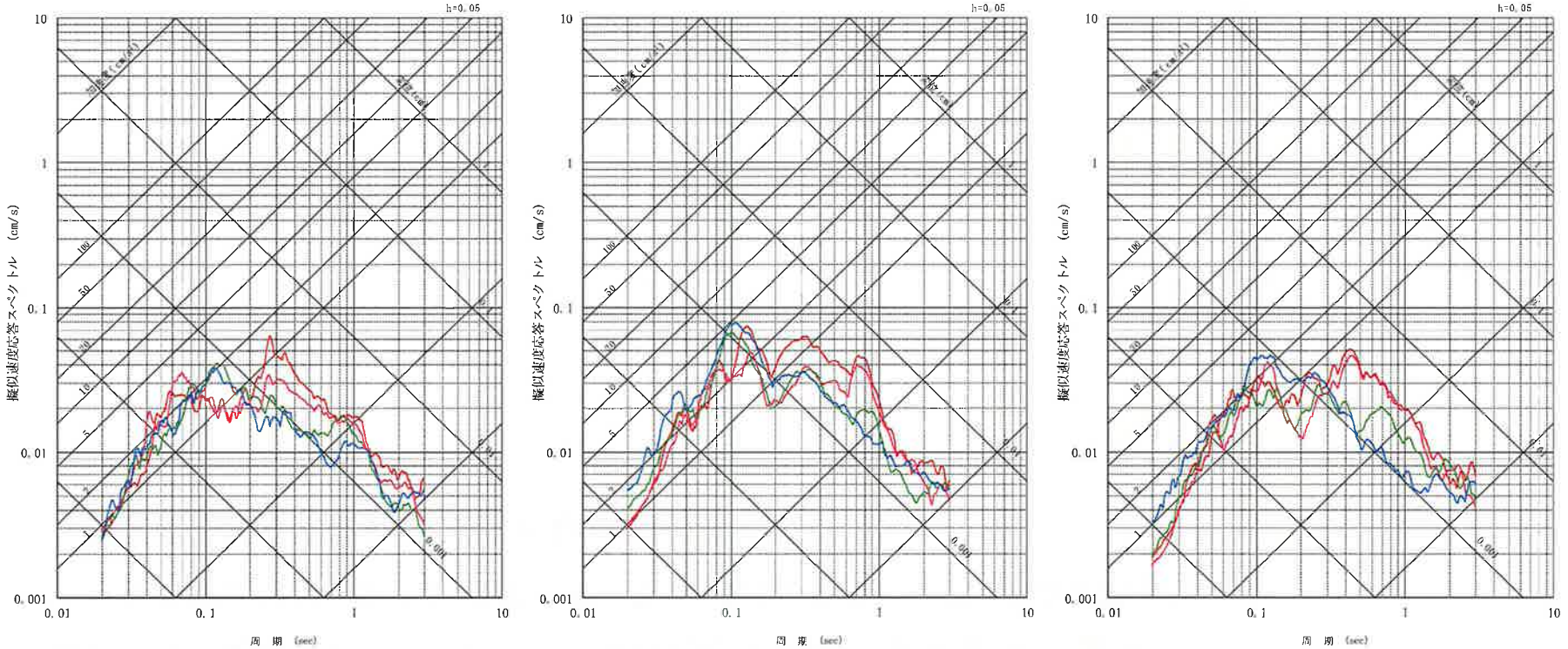
深度別応答スペクトル

- E.L.－ 84m
- E.L.－ 200m
- E.L.－ 527m
- E.L.－ 1,067m

1．3．深部地下構造の評価（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



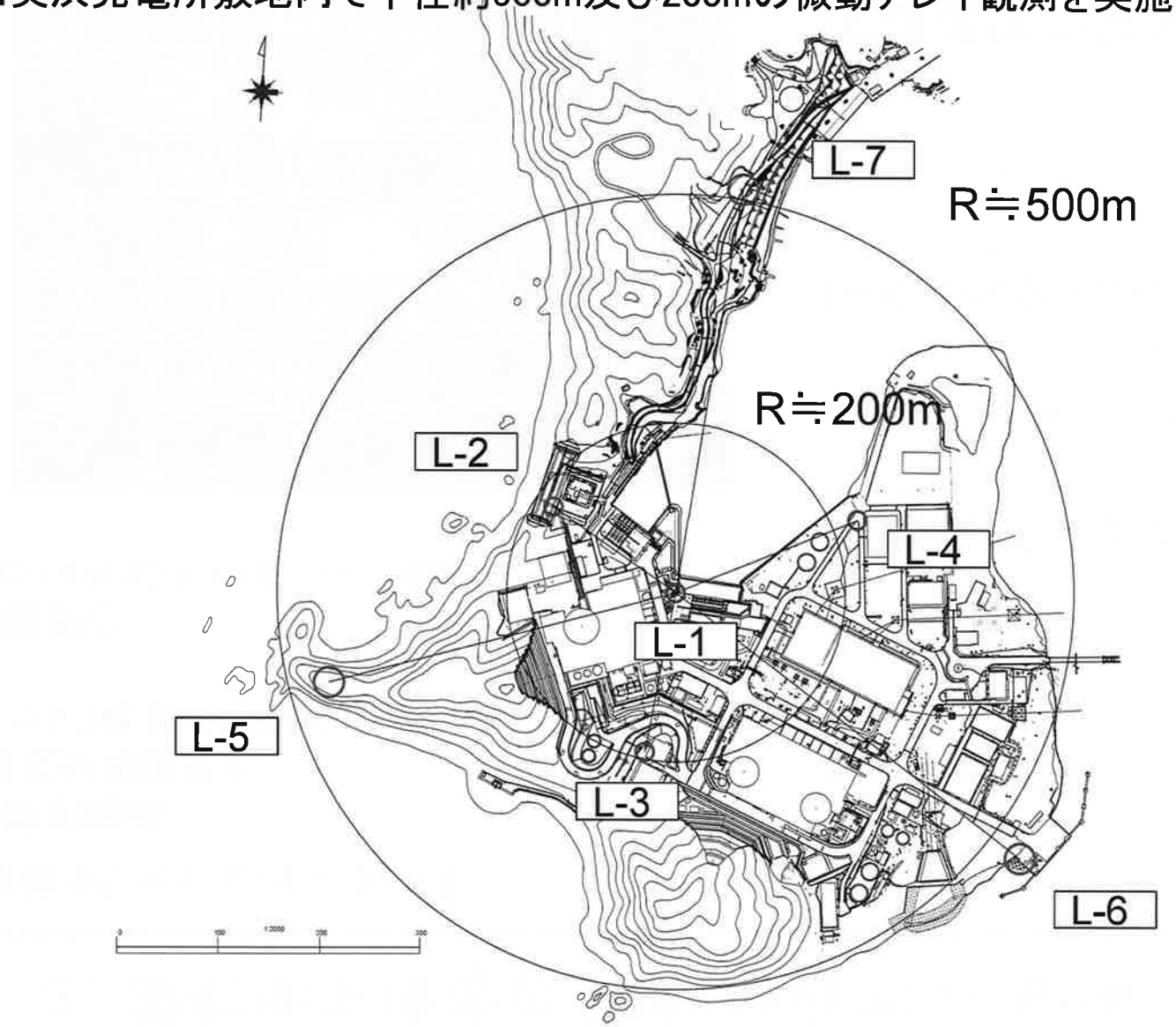
NS方向　　EW方向　　UD方向

深度別応答スペクトル

E.L.－ 84m	E.L.－ 200m
E.L.－ 527m	E.L.－1,067m

1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

■美浜発電所敷地内で半径約500m及び200mの微動アレイ観測を実施。



1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

■観測システム・データ処理

○使用機器
3成分加速度計
（ミツトヨ社製（旧アカシ社製）、GPL）

○観測日
2014年10月14日　～　16日

設置状況の例

○データ処理

観測データ

↓ ノイズの除去、リサンプリング等

処理用データの作成

↓ 各地点のスペクトル算定

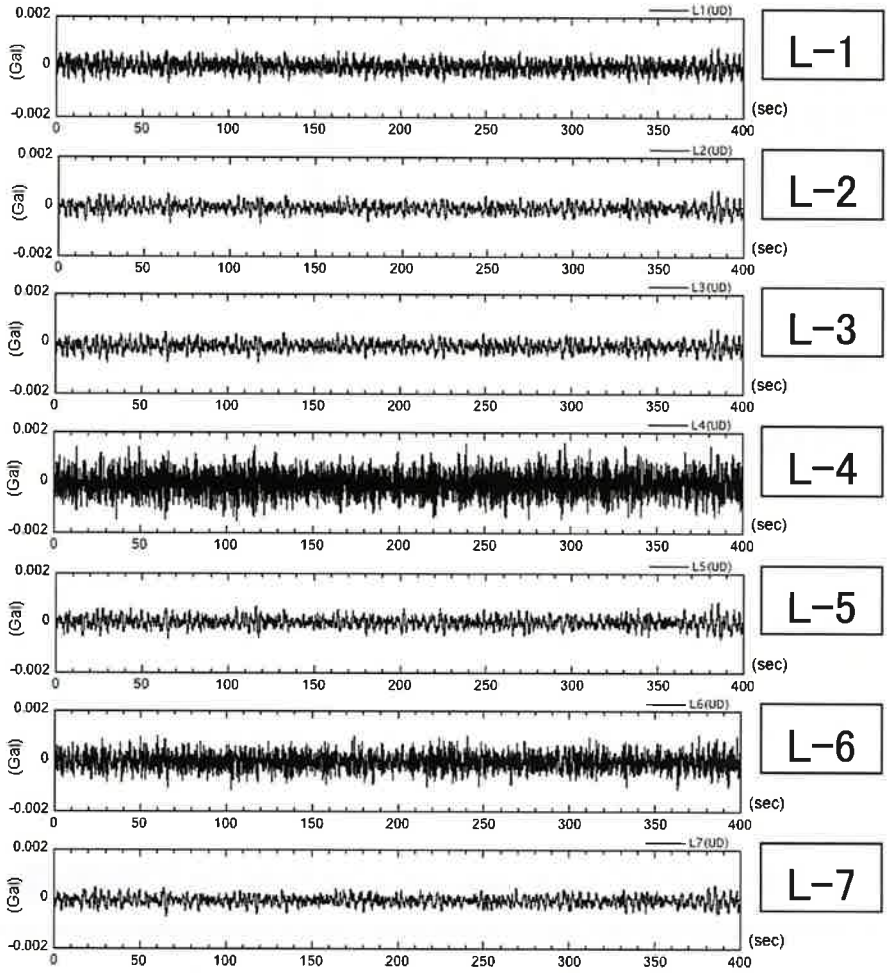
F-Kスペクトルの算定

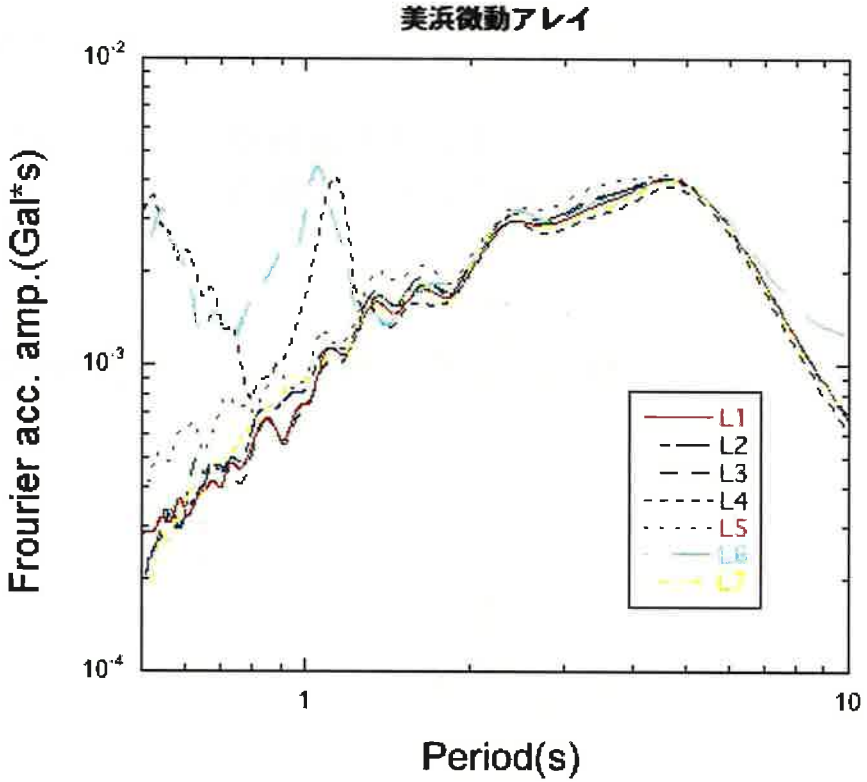
↓ F-K法

位相速度の算定

1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

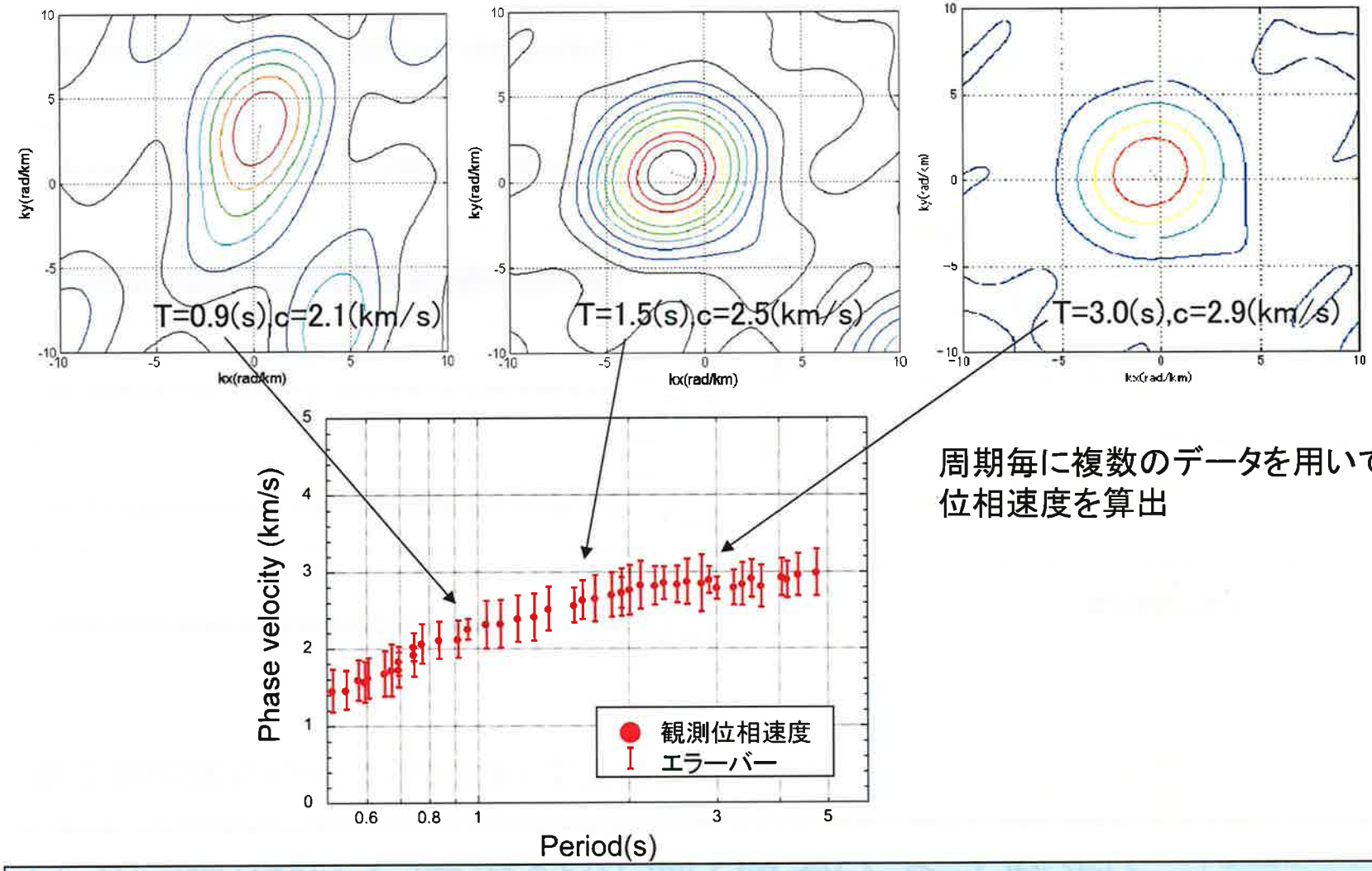
■微動の波形・スペクトルの例（上下動成分）





1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

■微動から得られたF－Kスペクトルの例

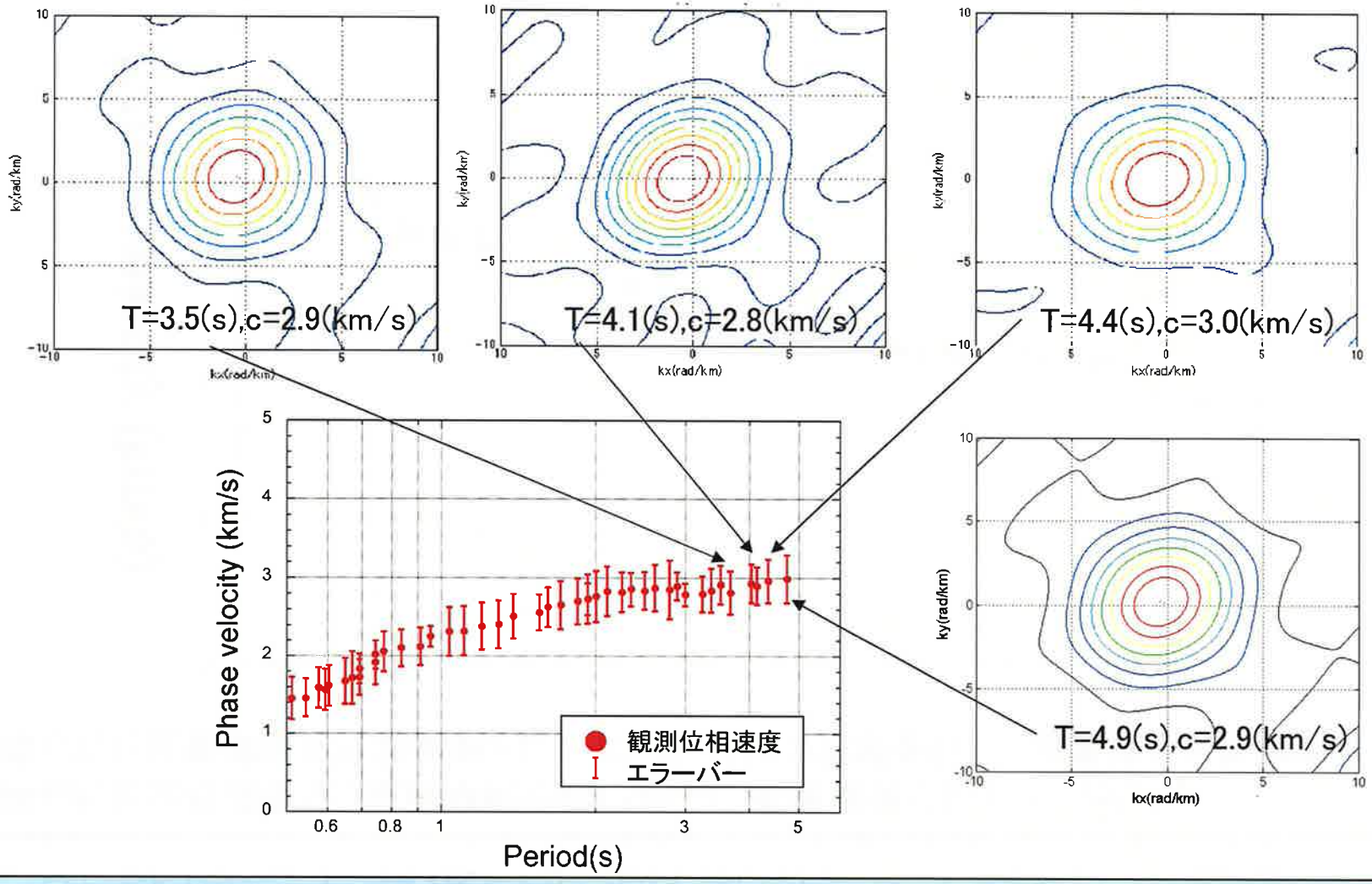


周期毎に複数のデータを用いて
位相速度を算出

短周期領域においてF-Kスペクトルが求まっていることを確認。

1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

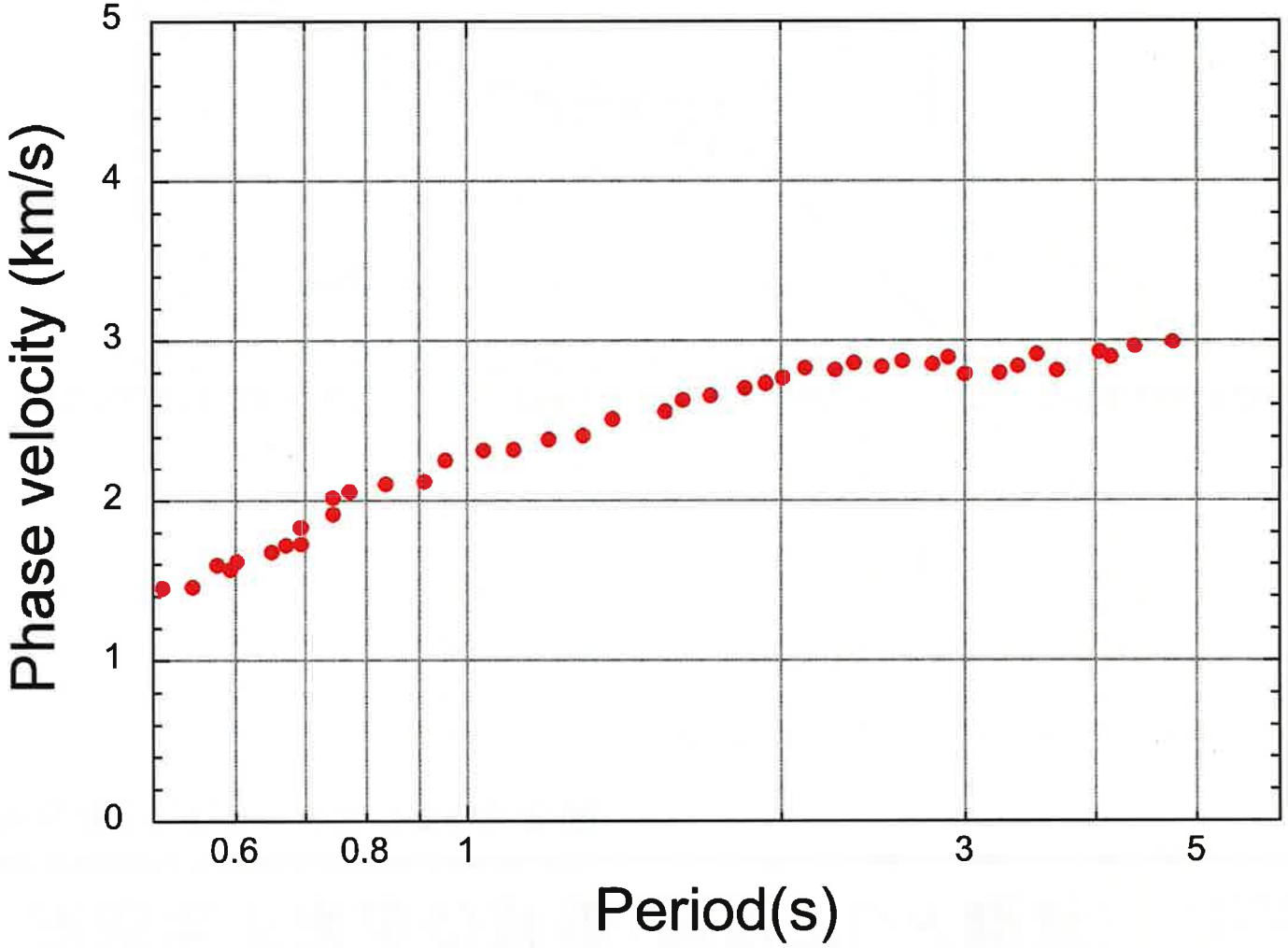
■微動から得られたF－Kスペクトルの例



周期5秒程度でもF-Kスペクトルが求まっており、位相速度の変動は周期毎にあまり違いがない。

1．3．深部地下構造の評価（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3km/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。

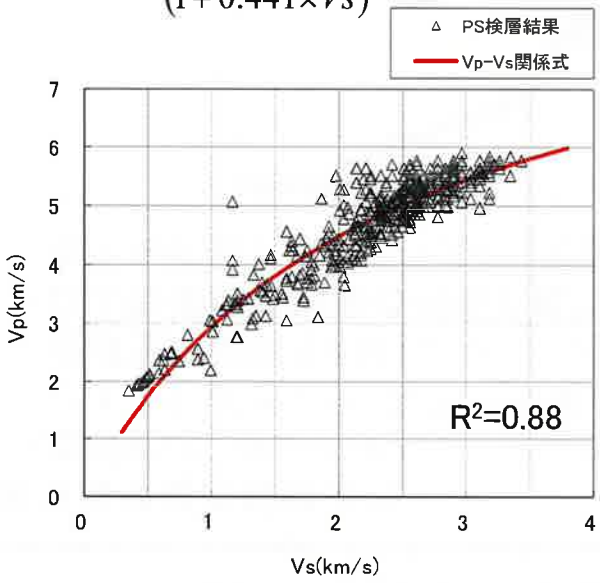


1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

■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

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



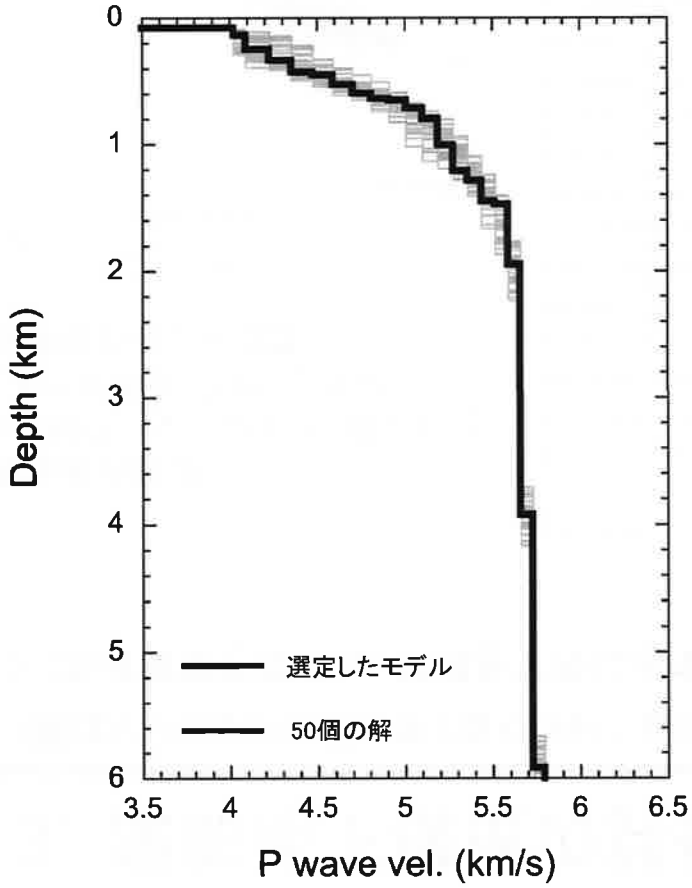
No.	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	層厚 (km)	密度 (g/cm^3)
1	1.7	0.5	0.01 – 0.10	2.0
2	4.0	1.65	0.01 – 0.50	2.6
3	4.1	1.7	0.01 – 0.50	2.6
4	4.2	1.8	0.01 – 0.50	2.6
5	4.4	1.9	0.01 – 0.50	2.6
6	4.5	2.0	0.01 – 0.50	2.6
7	4.6	2.1	0.01 – 0.50	2.6
8	4.7	2.2	0.01 – 1.00	2.6
9	4.8	2.3	0.01 – 1.00	2.6
10	4.9	2.4	0.01 – 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

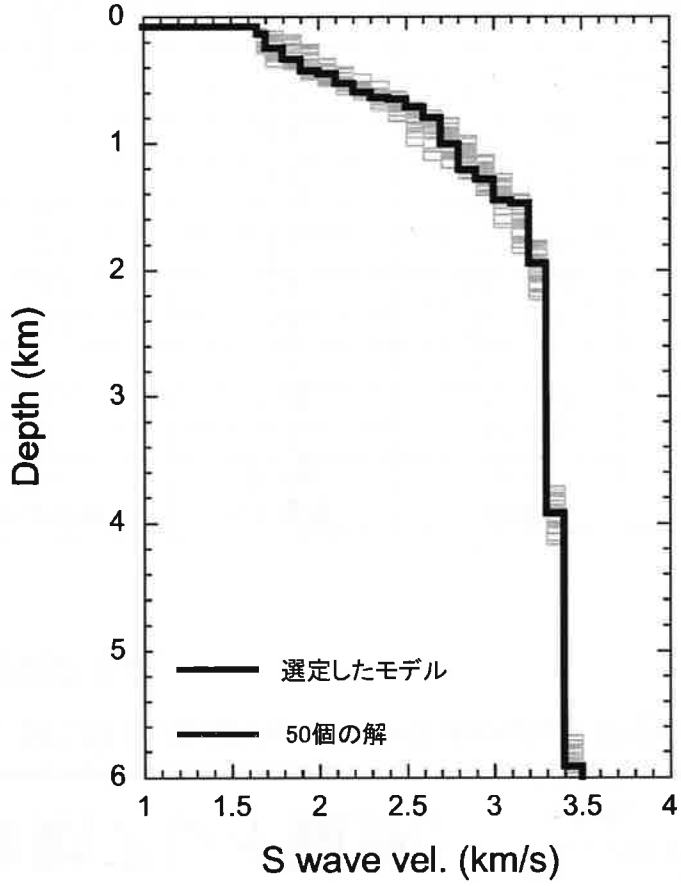
1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

■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。





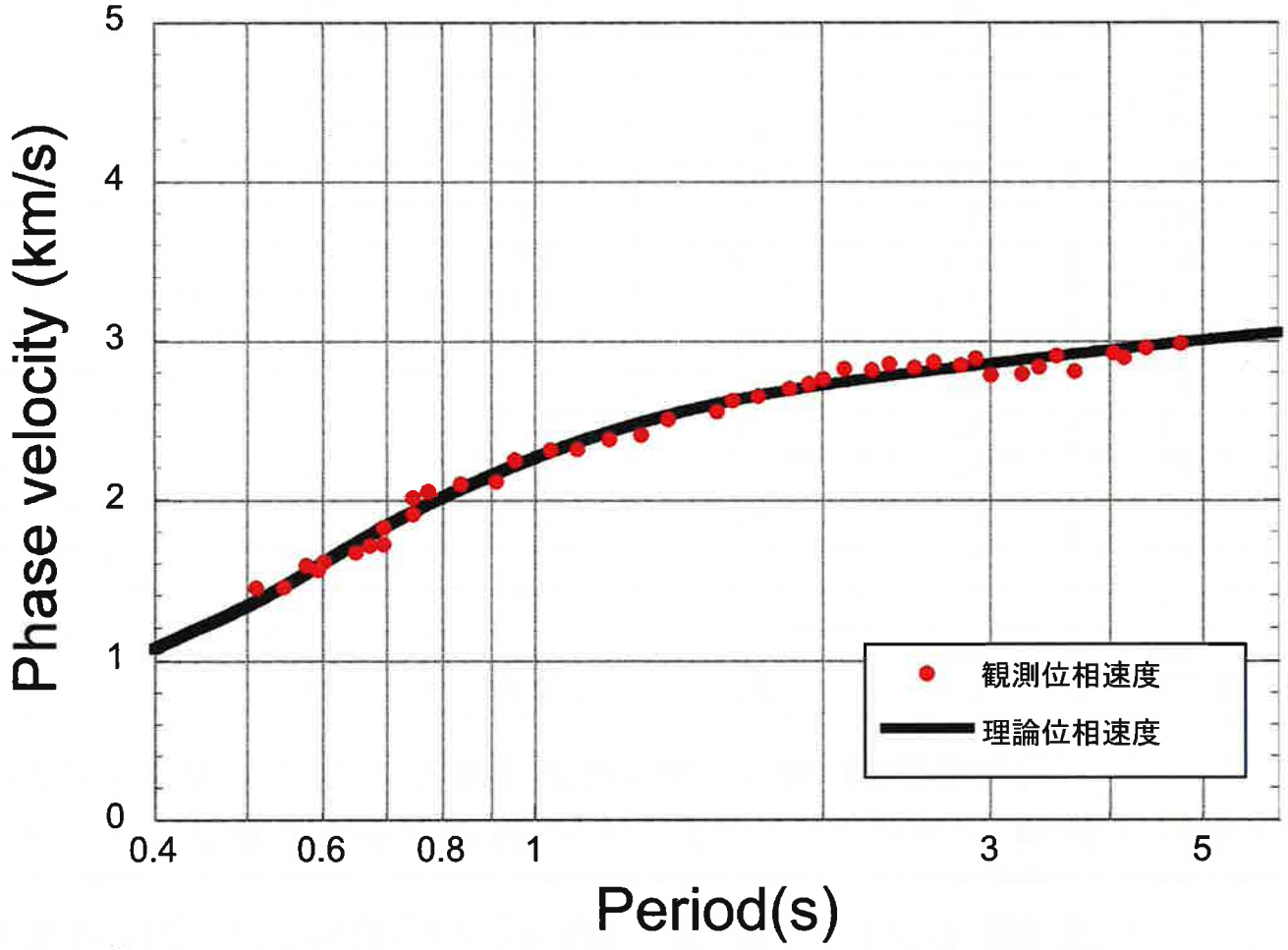
1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測）

■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Vp=5.8km/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

1．3．深部地下構造の評価（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。



1．3．深部地下構造の評価〔微動アレイ観測結果の妥当性確認〕

■地下構造モデルにおける深さ1km以深での密度を2.7g/cm^{3}として設定した場合の理論位相速度を算定する。

地下構造モデル

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

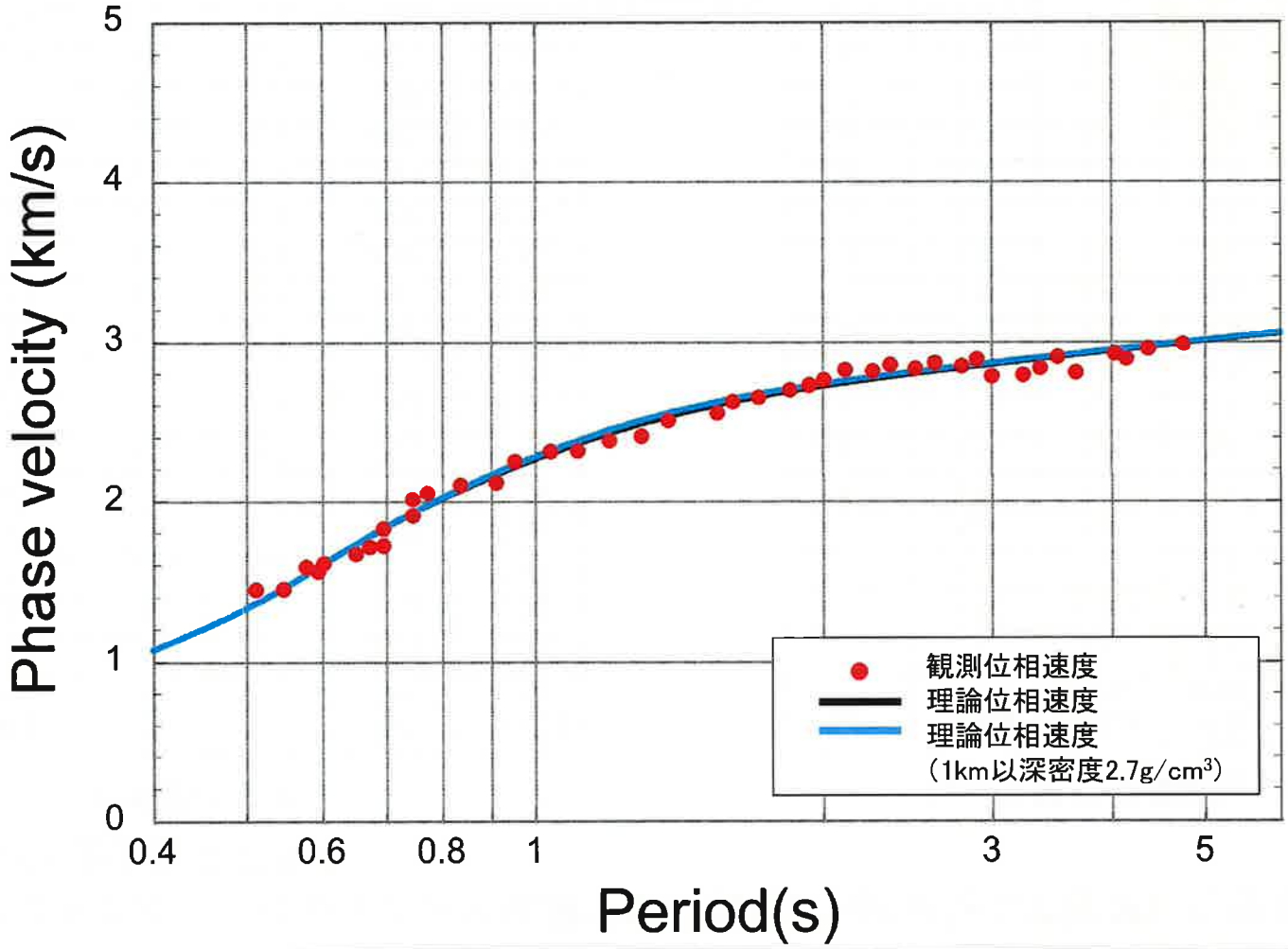
深さ1km以深の密度のみ変更

1km以深の密度2.7g/cm^{3}モデル

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	2.7	0.21	1.01
15	5.4	2.9	2.7	0.08	1.22
16	5.4	3.0	2.7	0.16	1.29
17	5.5	3.1	2.7	0.02	1.46
18	5.6	3.2	2.7	0.47	1.48
19	5.7	3.3	2.7	1.98	1.95
20	5.7	3.4	2.7	2.00	3.93
21	5.8	3.5	2.7	1.98	5.93
22	5.9	3.6	2.7	—	7.90

1．3．深部地下構造の評価〔微動アレイ観測結果の妥当性確認〕

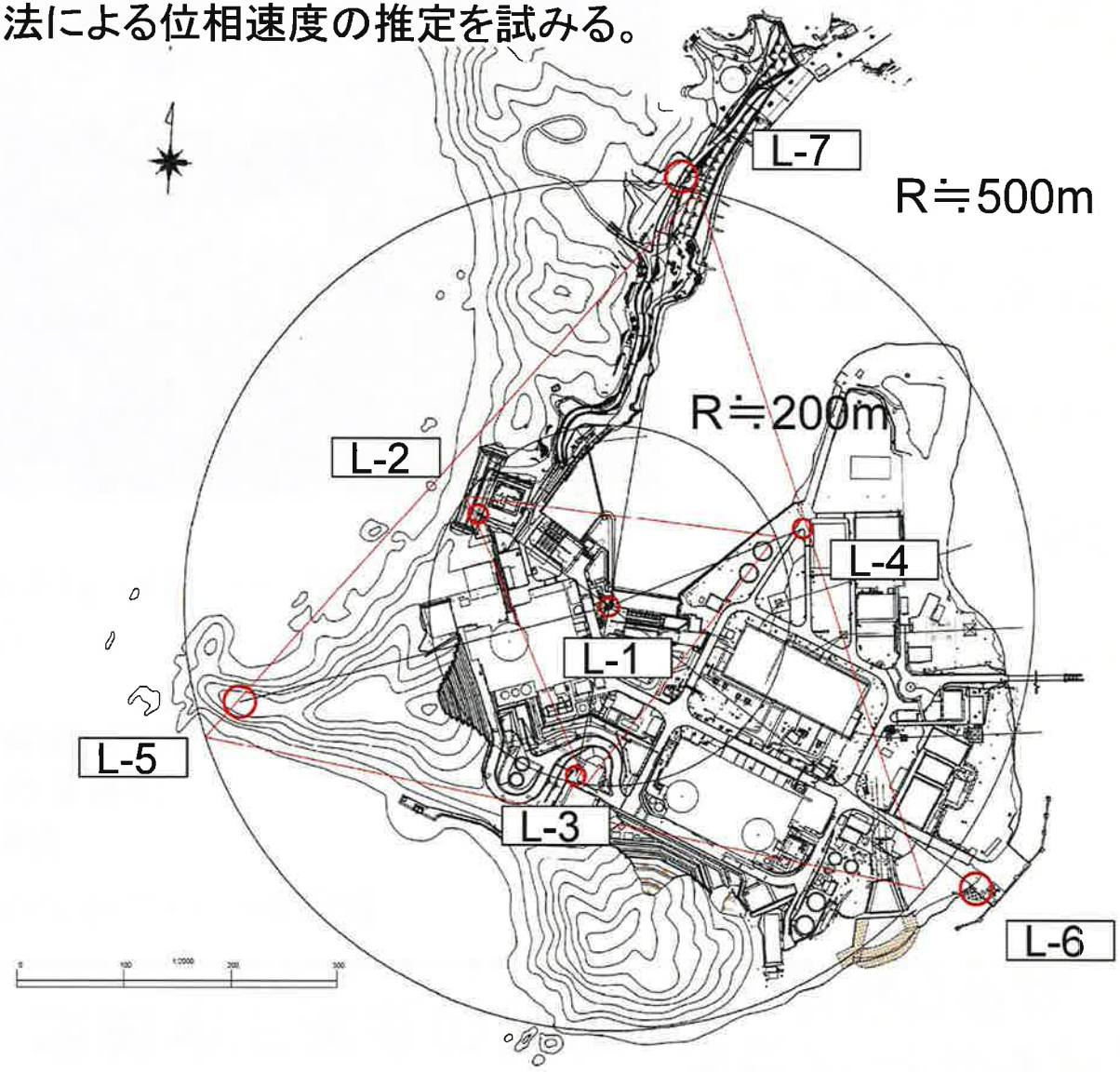
■密度の異なる地下構造モデルによる理論位相速度の比較



密度を変化させた場合の理論位相速度はほとんど変化していないことから、地下構造モデルへ及ぼす影響がないことを確認した。

1．3．深部地下構造の評価〔微動アレイ観測結果の妥当性確認〕

■実施した微動アレイ観測の地震計配置は、正三角形に近い配置で行っているため、SPAC法による位相速度の推定を試みる。



1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測結果の妥当性確認）

■観測システム・データ処理

○使用機器
3成分加速度計
（ミツトヨ社製（旧アカシ社製）、GPL）

○観測日
2014年10月14日　～　16日

設置状況の例

○データ処理

観測データ

↓ ノイズの除去、リサンプリング等

処理用データの作成

↓ 各地点のスペクトル算定

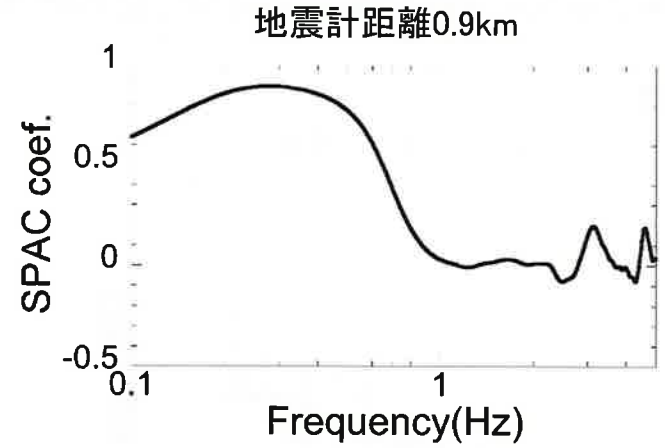
空間自己相関係数の算定

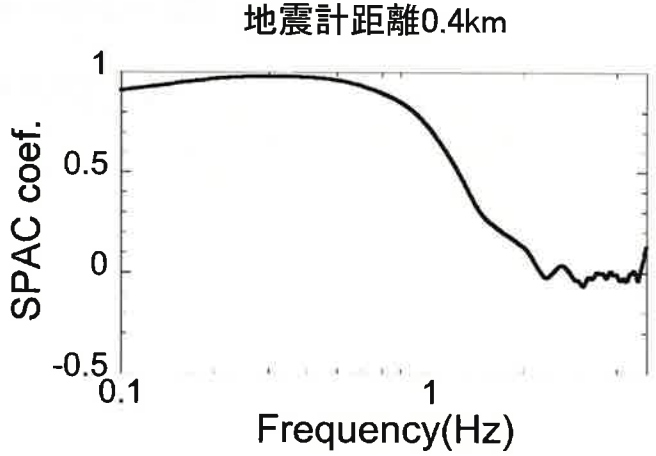
↓ SPAC法

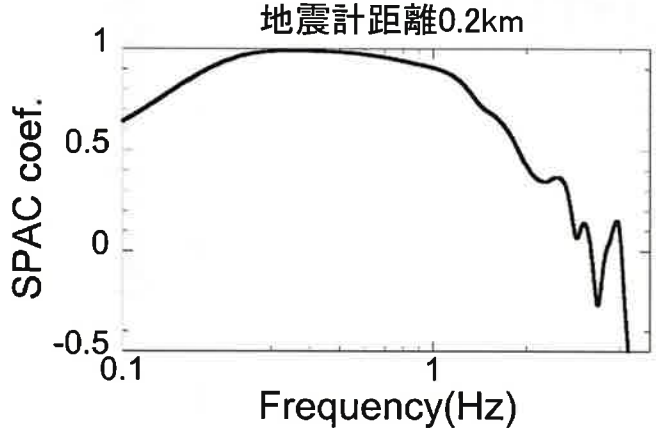
位相速度の算定

1．3．深部地下構造の評価〔微動アレイ観測結果の妥当性確認〕

■SPAC係数



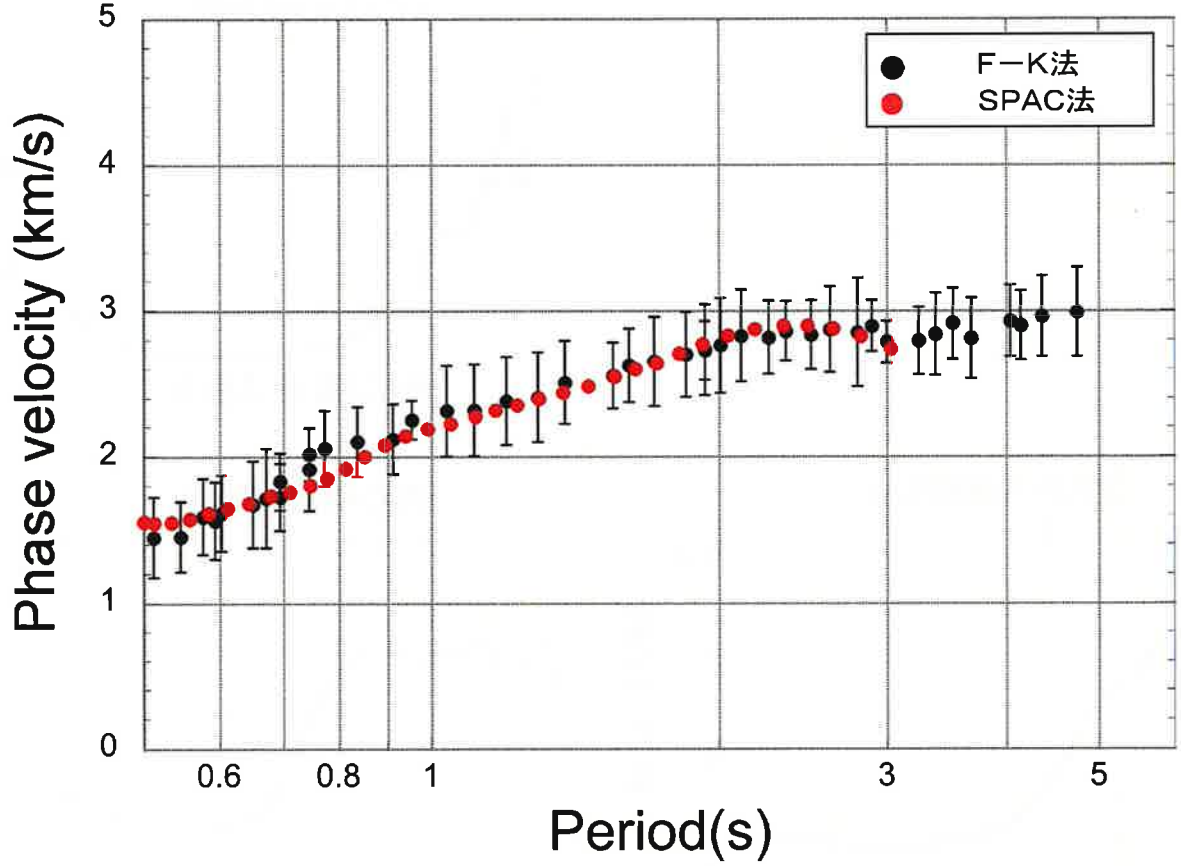




・低周波数側については、0.3Hz程度以下から低下が見られ、位相速度が求まらない。

1．3．深部地下構造の評価〔微動アレイ観測結果の妥当性確認〕

■F－K法及びSPAC法により得られた位相速度を比較する。

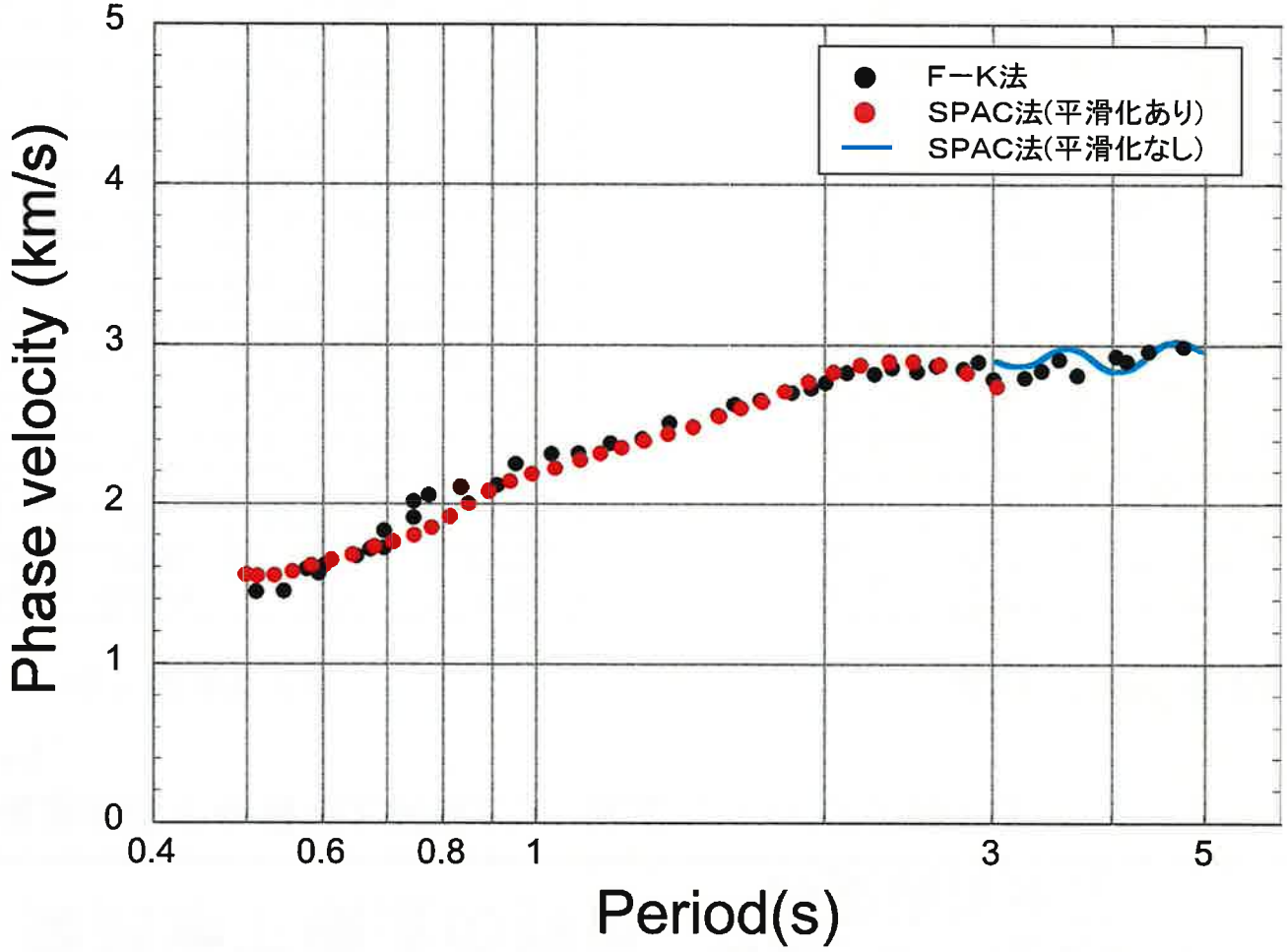


・SPAC法により得られた位相速度はF－K法の結果と良く一致している。

・コヒーレンスの絶対値に依存するSPAC法は、周期3秒程度まで位相速度が求められたが、F－K法はコヒーレンスの相対値に依存することから、より長周期まで位相速度が求められた。

1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測結果の妥当性確認）

■微動記録の平滑化処理を行わずにSPAC法を適用し、位相速度を算定した結果を示す。
平滑化処理を行っていない結果ではあるものの、F－K法による結果との
間に大きな差異は見られないことから、F－K法による結果の妥当性を確認した。



1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測結果の妥当性確認）

■深部の構造を高浜発電所と同様として設定し、ハイブリッドヒューリスティック法による探索を行う。

地下構造モデル

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

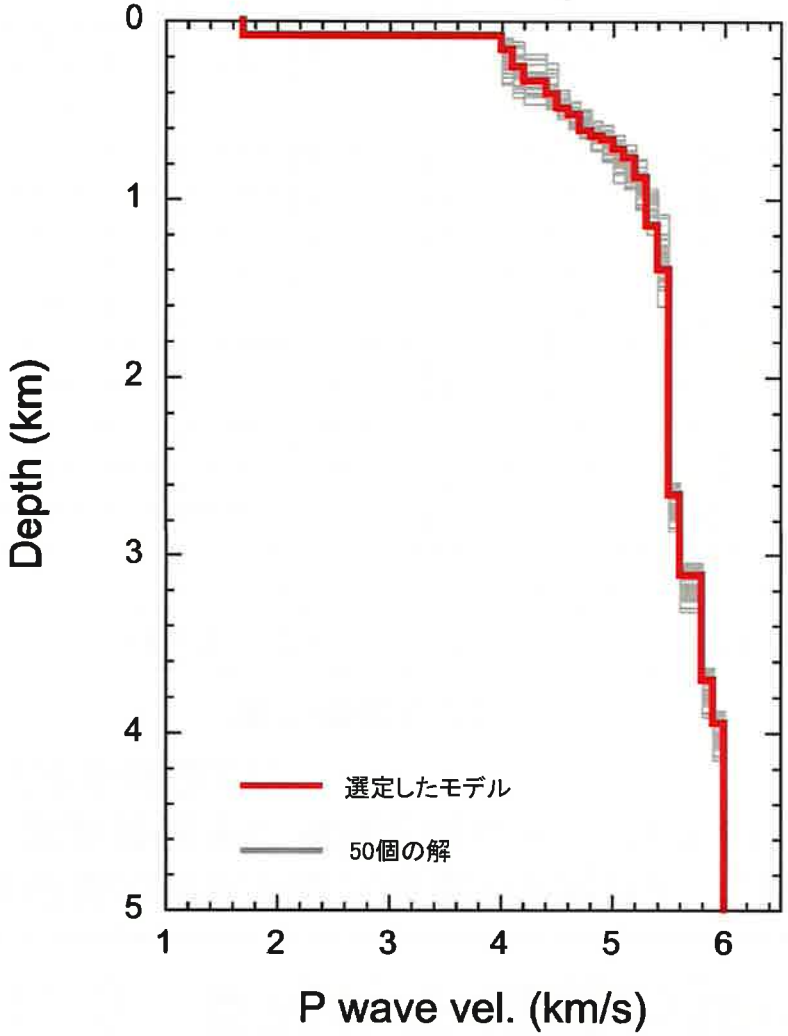
深部の構造を高浜発電所のモデルに変更

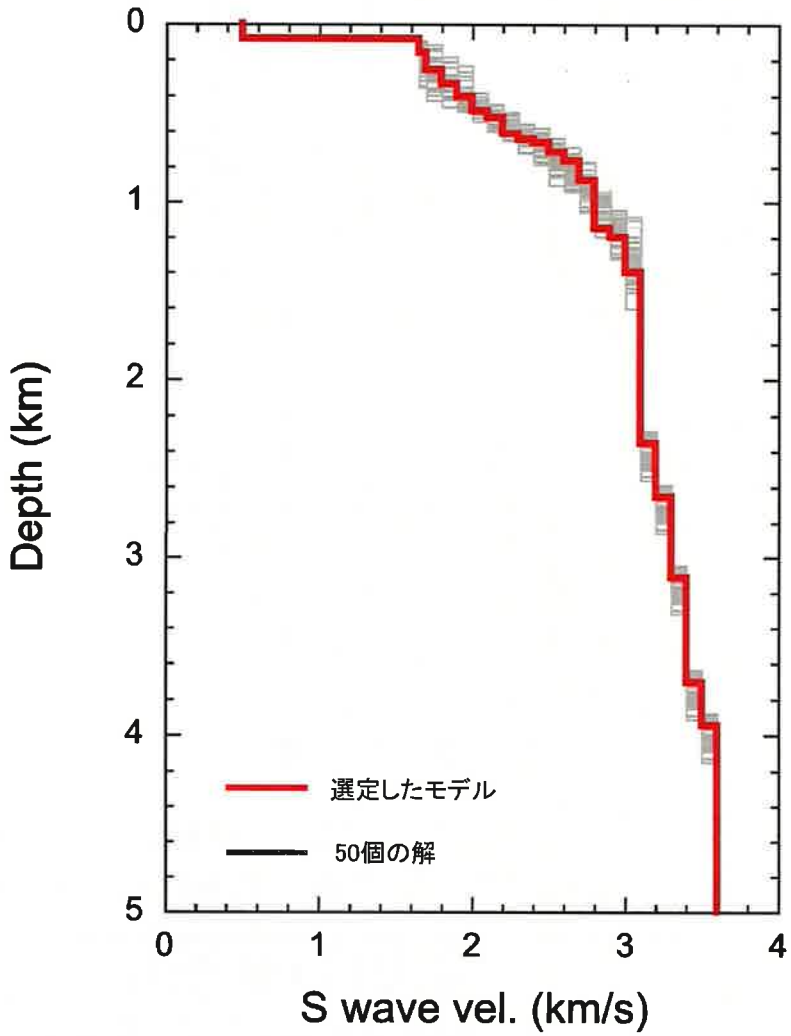
深部のみ高浜発電所モデル

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	5.5	3.2	0.30	2.7
19	5.6	3.3	0.46	2.7
20	5.8	3.4	0.59	2.7
21	5.9	3.5	0.24	2.7
22	6.0	3.6	–	2.7

1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測結果の妥当性確認）

■得られた50個の解から、その平均に最も近い地下構造モデルを選定する。





1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測結果の妥当性確認）

■深部の構造を高浜発電所と同様として探索を行った結果、得られた地下構造モデルを示す。高浜発電所の構造と同様とした深さよりも浅い地下構造についてはほとんど変化していないことを確認した。

地下構造モデル

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

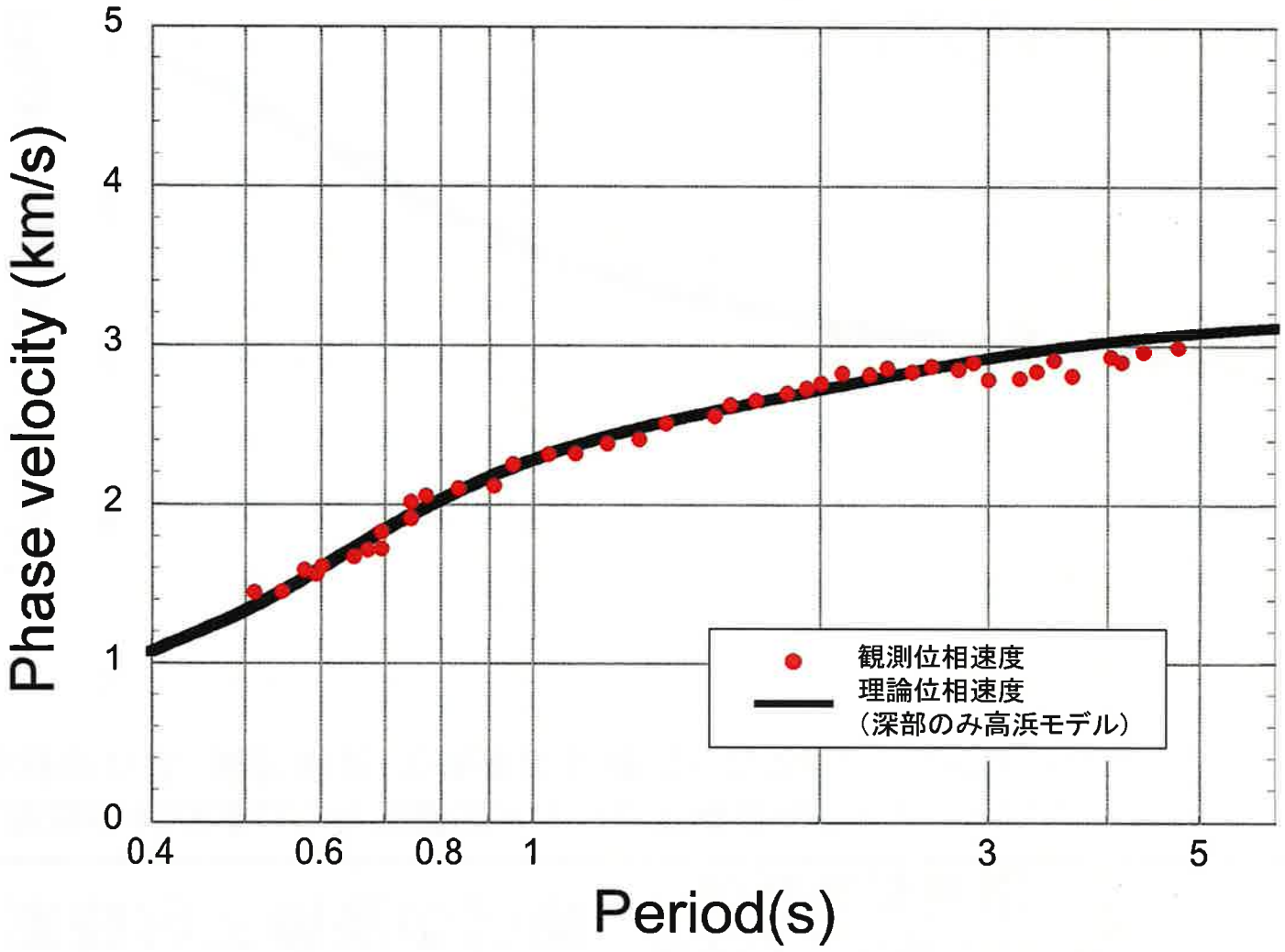
高浜モデル
探索結果

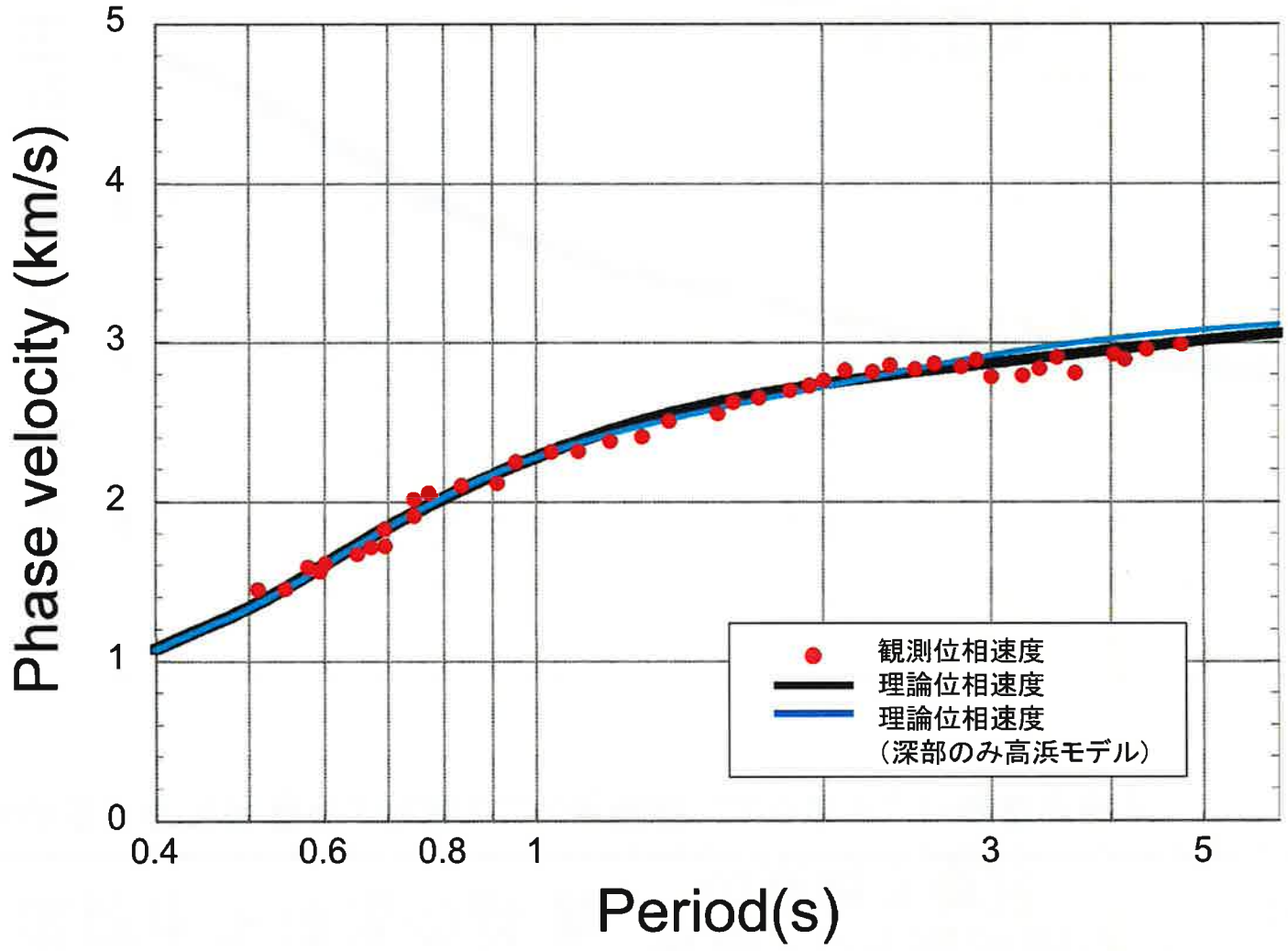
深部のみ高浜発電所モデルとして得られた地下構造モデル

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	0.08	0.08
3	4.1	1.7	2.6	0.10	0.16
4	4.2	1.8	2.6	0.08	0.26
5	4.4	1.9	2.6	0.07	0.34
6	4.5	2.0	2.6	0.08	0.41
7	4.6	2.1	2.6	0.04	0.49
8	4.7	2.2	2.6	0.09	0.52
9	4.8	2.3	2.6	0.03	0.61
10	4.9	2.4	2.6	0.02	0.64
11	5.0	2.5	2.6	0.05	0.66
12	5.1	2.6	2.6	0.05	0.72
13	5.2	2.7	2.6	0.11	0.77
14	5.3	2.8	2.6	0.27	0.88
15	5.4	2.9	2.6	0.05	1.15
16	5.4	3.0	2.6	0.20	1.20
17	5.5	3.1	2.6	0.96	1.40
18	5.5	3.2	2.7	0.30	2.36
19	5.6	3.3	2.7	0.46	2.66
20	5.8	3.4	2.7	0.59	3.12
21	5.9	3.5	2.7	0.24	3.71
22	6.0	3.6	2.7	—	3.95

1．3．深部地下構造の評価（微動アレイ観測結果の妥当性確認）

■深部の構造を高浜発電所と同様とした逆解析により算定した結果を示す。



1．3．深部地下構造の評価〔微動アレイ観測結果の妥当性確認〕

■求めた理論位相速度は、今回選定された地下構造モデルとして比較して周期3秒程度以降（深部構造）で観測位相速度とのフィッティングが悪くなる。