

短周期微動アレイ探査法による地盤構造の推定とその有用性に関する研究

荏本研究室 200570158 石井 匠

1. はじめに

兵庫県南部地震を契機に、耐震・防災といった様々な分野で地盤震動特性に関連する研究の重要性が指摘されている。震動構造特性とは地震動特性と密接に関係し、地震の震源特性、伝播経路特性、表層地盤特性の3つから成り立つ、このうち震源特性と伝播経路特性は、実際に地震が発生した後の逆解析等でしか知ることにはできないが、やや長周期地震動を対象とし半経験的あるいは統計的な手法が用いられるケースも多い。一方、地盤構造特性は数多くの建築構造物の動的特性に関する周期帯域の地震動特性に大きく関連しており、特に、表層地盤は地盤調査を行えば知ることができる。本研究では、短周期の地震動特性に深く関連するこの短周期微動アレイ観測を用いて表層地盤構造の解析を行う。

微動アレイ観測は、主に表面波で構成される微動の位相速度の分散性を利用した地盤構造推定法で、微動計を地表面に適切に空間配置し微動を観測し、SPAC法 (Spatial AutoCorrelation Method) などを利用して表面波の周波数ごとの微動の位相速度を推定する手法である。位相速度は地下構造に依存した分散性を示し、分散性は地下構造と密接に関係するため、逆解析により地下のS波速度構造が推定可能となる。S波速度構造は、地震時の地盤の振動特性に支配的な影響をもつ要因の一つであり、これを知ることにより地震時の地盤震動特性を適切に評価することができる。本研究では、複数の微動アレイ観測を行い、SPAC法の適用性を検討した。また、各観測箇所において最適な地盤構造を求め整合性が保証できるようにするためには、どのようなアプローチが必要かパラメトリックスタディを行って、その有用性を評価した。以上の結果に基づき知見を適用して平塚市中心に市街地における地盤構造の推定を行うことを目的として、9地点でアレイ観測を実施し3次元的に地盤構造の推定を行い良好な結果を得た。

2. SPAC法

位相速度は複数点の空間自己相関関数から求めることができる。空間自己相関関数は、各微動観測データから得られたパワースペクトルとクロススペクトルの

実数部を用いて式(1)を求めた。

この空間自己相関関数は、2観測点間の距離 r と周波数 f を変数としており、どちらを横軸に設定してプロットしても第1種0次のベッセル関数と同じ形になることが知られている。空間自己相関係数と第1種0次のベッセル関数から式(2)が導かれる。

$$\rho(f, r) = \frac{\text{real}\{P_{ij}(f, r)\}}{\sqrt{P_{ii}(f) \cdot P_{jj}(f)}} \quad (1)$$

$P_{ij}(f, \theta)$: 微動記録から得られる2観測点*i, j*点間のクロススペクトル

$P_{ii}(f, \theta)$: 基準点*i*の微動記録から得られるパワースペクトル

$P_{jj}(f, \theta)$: 観測点*j*の微動記録から得られるパワースペクトル

$$\rho(f, r) = J_0\left(\frac{2\pi fr}{C(f)}\right) = J_0(x) \quad C(f) = \frac{2\pi fr}{x} \quad (2)$$

$C(f)$: 位相速度

空間自己相関関数の変数を2観測点間の距離とした場合、特定の周波数 f について、(2)式を用いて位相速度を得ることができる。

3. 分散曲線の特性

3-1. レーリー波の理論分散曲線

番号	S波速度	剛性率	密度	厚さ	深度
1	C_1	μ_1	ρ_1	H_1	z_1
2	C_2	μ_2	ρ_2	H_2	z_2
K	C_K	μ_K	ρ_K	H_K	z_K
N	C_N	μ_N	ρ_N	H_N	z_N

図1. 多層構造を表現する各パラメータ

図1に示す多層地盤構造を伝播するレーリー波の理論分散曲線は、レーリー波の位相速度 c を振動数 f の関数として算定するもので、Haskellのマトリックス法により求めることができる。一般に、多層構造中の任意の単層内の変位成分は次の(3)式で表される。

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad v = 0, \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3)$$

ただし、 u, v, w は、それぞれ x, y, z 方向の変位成分で、 ϕ, ψ は次式(4)を満たすスカラー関数である。

$$\rho \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \psi$$

式(3) および式(4)を満足する変位成分 u , w および応力成分 σ_{xz} , σ_{zz} が、各単層の上下面で連続するという条件を用いると上下面の変位と応力成分は Haskell のマトリックス法により (4×4) 行に行列を介して関係付けられ漸化式で表示される。したがって、多層構造全体では各単層の漸化式 (行列表示) を掛け合わせるにより変位と応力成分を表現することが可能となる。最終的には、地表面 ($z=0$) で応力 $\sigma_{xz}=\sigma_{zz}=0$ 、地下深部 ($z=\infty$) でレーリー波の条件として変位 $u=w=0$ という条件を導入することにより、式で示される特性方程式を得る。

$$\frac{\dot{u}_0}{\dot{\omega}_0} = \frac{J_{22} - J_{12}}{J_{11} - J_{21}} = \frac{J_{42} - J_{32}}{J_{31} - J_{41}} \quad (5)$$

$$J = N_N^{-1} A_N^{-1} A_N^{-2} \cdots A_1$$

ただし、

J_{ij} : 行列 $J(4 \times 4)$ 行の要素で、地盤の物性値 (c , μ , ρ) と層厚 H の関数

A_K : 単層 K の上下面の変位と応力成分の関係を表す行列 (4×4)

E_N : 最下層 N (半無限弾性地盤) の変位と応力成分の関係を表す行列 (4×4)

(5) 式が多層地盤構造を伝播するレーリー波の特性方程式であり、この式を満足する伝播速度 c と振動数 f の組を求めることにより位相速度分散曲線を求めることが可能となる。

3-2. 理論分散曲線

並行多層地盤モデルの構造 (層厚、密度、P波速度、S波速度) から理論的に位相速度分散曲線を得ることが出来る。既存の研究より、理論分散曲線に大きな影響を持つ変数は1層目の層厚とS波速度 (V_s) であることが明確になった。図2に平行2層モデルにおいて、物性値の影響を示す。

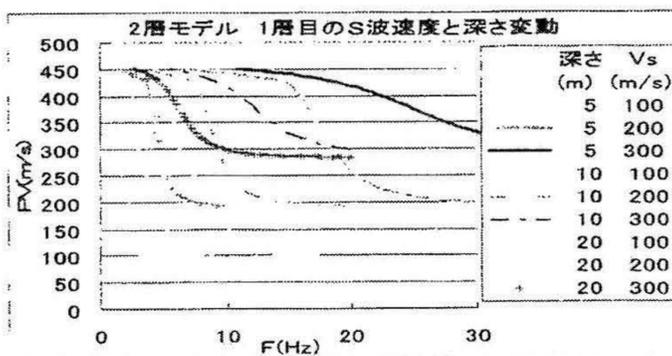


図2. 2層モデルによる理論分散曲線

3-3. 観測結果による分散曲線

2004年度から2006年度に行った横浜・新潟・逗子での微動アレイ観測より、理論分散曲線と観測分散曲線とを比較する手法は、地盤構造を簡易に推定する方法として有用性を確認された。表1、2は、逗子市新潟市・横浜市における地盤モデルを示す。図3、4は、地盤モデルより作成された理論分散曲線と観測で得られた観測分散曲線のフィッティングを示す。図5に地盤モデルより算出される各観測点におけるS波速度構造を示す。

表1. 地盤モデル(左:逗子 右:新潟)

逗子小学校					逗子				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.83	15.0	1339.0	130.0	1	1.80	9.0	1107.0	140.0
2	1.85	2.0	1869.0	587.0	2	1.83	123.0	1522.0	279.0
3	1.84	-	1961.0	735.0	3	2.14	-	2289.0	613.0

表2. 地盤モデル(横浜)

山田小学校					大島小学校					新吉田小学校				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.57	1.0	125.0	70.0	1	1.78	16.0	1108.0	95.0	1	1.69	3.0	690.0	135.0
2	1.69	15.0	670.0	180.0	2	1.85	-	1404.0	322.0	2	1.78	7.0	1100.0	80.0
3	1.92	-	1720.0	425.0						3	1.78	13.0	1100.0	90.0
										4	1.78	4.0	1100.0	135.0
										5	1.88	-	1550.0	345.0

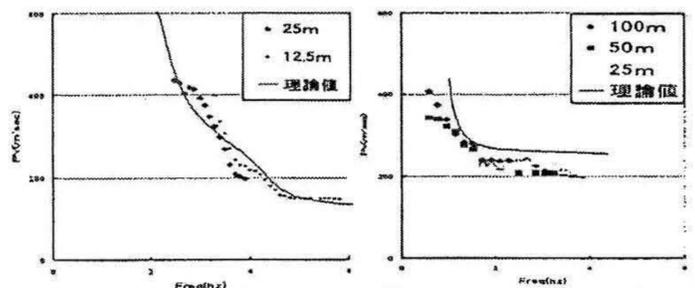


図3. 分散曲線の比較(左:逗子、右:新潟)

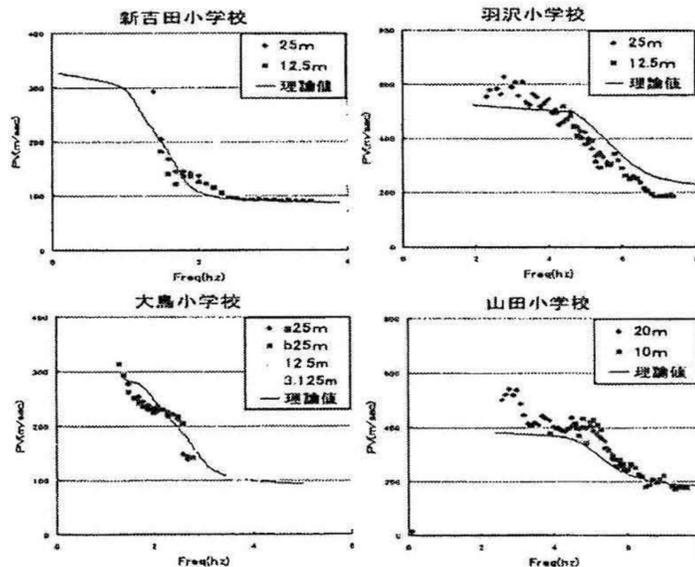


図4. 分散曲線の比較(横浜)

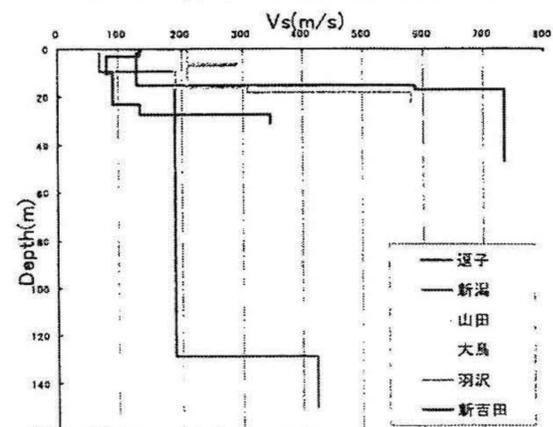


図5. 各観測点におけるS波速度構造

4. 微動アレイ観測

4-1. 観測地点

既存の研究より、地層構造が明らかになっている平塚市南部に観測点を設け、図5に示すように9ヶ所に観測点を選定した。平塚市南部は、主に砂質土が表層に堆積しており、相模川河口付近では約80m沖積層が存在する。沖積低地の北部は相模川・渋田川・鈴川などの河川作用によって形成された自然堤防・後背湿地・旧河道で成り立っている。

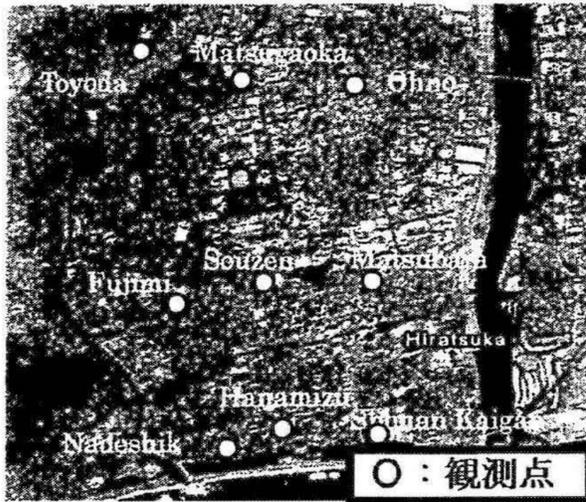


図6.平塚市における観測地点

4-2. 観測方法

図6に示すように、観測地点に二重同心時三角形で構成されるアレイを作り、1setで7台の微動計を配置し同時観測をする。アレイサイズは大きい順にLアレイ、Mアレイ、Sアレイの3つに分け、各アレイ間は周波数が重なるように考慮し設定した。各観測点におけるアレイサイズは表4に示す。SPAC法では常時微動の鉛直成分を解析の対象とするため、鉛直成分のみを観測した。サンプリング周波数は、1000Hzで観測したのち100Hzのリサンプリングを行った。各データは100Hzで解析されたものである。観測時間は各アレイサイズ毎に15分間観測を行った。

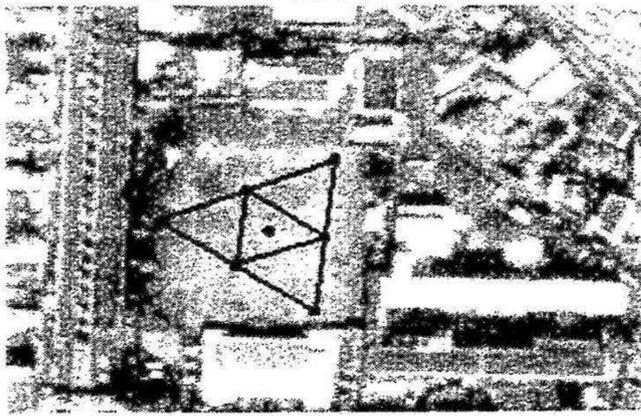


図7. 観測点 Souzen における微動アレイ観測配置例

表3. 各観測点におけるアレイサイズ

観測点名	Lアレイ(m)	Mアレイ(m)	Sアレイ(m)
Toyoda	30.0	15.0	7.5
Matsugaoka	30.0	15.0	7.5
Ohno	30.0	15.0	7.5
Fujimi	30.0	15.0	7.5
Souzen	30.0	15.0	7.5
Matsubara	40.0	20.0	10.0
Nadeshiko	30.0	15.0	7.5
Hanamizu	30.0	15.0	7.5
Shonan kaigan	40.0	20.0	10.0

4-3. 地盤モデルの設定

沖積基盤は既存の文献より、平塚市の西部に位置する大磯丘陵、この地盤を構成する更新統が南東部の沖積層の下層に入り込んでいることがわかる。この層を対象の沖積基盤し、S波速度を500m/secを基準とし地盤のモデリングをおこなった。ボーリングの中には対象の基盤まで十分な深さに達していない資料もあり、これらは参考文献3)より対象の基盤深度を推定した。またボーリングデータより確認されている層厚は固定し、S波速度は参考文献4)を考慮し地盤モデル作成した。各地盤モデルの物性値は表4に示す。

5. 観測結果

図8に各観測点における観測分散曲線と理論分散曲線とのフィッティングを示す。各観測点ともに理論値と観測値がほぼ一致している。図9には理論値より作成されたS波速度構造を最適モデルとし、観測点のボーリングデータに忠実にモデル化初期モデルとの比較を示している。全体的に初期モデルより若干S波速度が低い値で最適モデルが求められたと確認できる。

観測点 Toyoda の表層地質は主に粘性土、他の観測点における表層地質は砂質土であるが、地盤構造においては、地表面から数mに硬質の砂層・礫層、またさらに下層にシルト質の粘性土が一様に存在することが確認できた。平塚市南部が相模川の川床であったことより、このシルト質の粘性土はその時期に堆積したものだと考えられる。また過去の文献によると相模川は、蛇行・氾濫を数多くしているため、平塚市南部に多くの砂・礫を堆積したものと考えられる。

表4. 平塚市各観測点における地盤モデル

Toyoda					Matsugaoka				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.83	5.0	1042.8	202.0	1	1.83	5.0	1042.6	180.0
2	1.85	30.0	1383.0	260.0	2	1.85	30.0	1383.0	300.4
3	1.82	10.0	1355.6	250.0	3	1.82	10.0	1355.6	230.5
4	1.87	-	1600.0	500.0	4	1.87	-	1600.0	500.0

Ohno					Fujimi				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.79	3.0	1139.7	111.3	1	1.83	4.0	1320.10	200.1
2	1.85	18.0	1380.5	304.4	2	1.85	18.0	1407.00	280.3
3	1.82	17.0	1355.6	250.5	3	1.84	9.0	1349.60	250.1
4	1.85	15.0	1355.0	320.0	4	1.84	20.0	1398.60	300.0
5	1.85	10.0	1600.0	500.0	5	1.86	-	1600.00	500.0
6	1.86	-	1600.0	500.0					

Souzen					Matsubara				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.83	7.0	1343.5	232.8	1	1.84	7.0	1354.2	223.4
2	1.85	11.0	1402.4	221.9	2	1.84	9.0	1401.8	270.4
3	1.84	40.0	1444.3	305.4	3	1.84	17.0	1372.7	250.0
4	1.84	11.0	1427.1	351.7	4	1.84	25.0	1372	300.0
5	1.86	-	1600.0	500.0	5	1.86	-	1600.3	500.0

Nadeshiko					Hanamizu				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度	層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.8	5	1202.7	162.1	1	1.83	7.0	1333.3	220.7
2	1.85	21	1412.9	330.3	2	1.85	24.0	1401.9	280.5
3	1.85	30	1383.2	306.5	3	1.84	5.0	1352.3	230.8
4	1.86	-	1450.3	500	4	1.85	10.0	1403.6	300.9

Shonan Kaigan				
層	密度(cm/g)	層厚(m)	P波速度	S波速度
1	1.84	16.0	1381.0	235.0
2	1.84	14.0	1372.7	322.0
3	1.84	17.0	1372.7	240.0
4	1.84	20.0	1372.0	400.0
5	1.86	-	1600.3	600.0

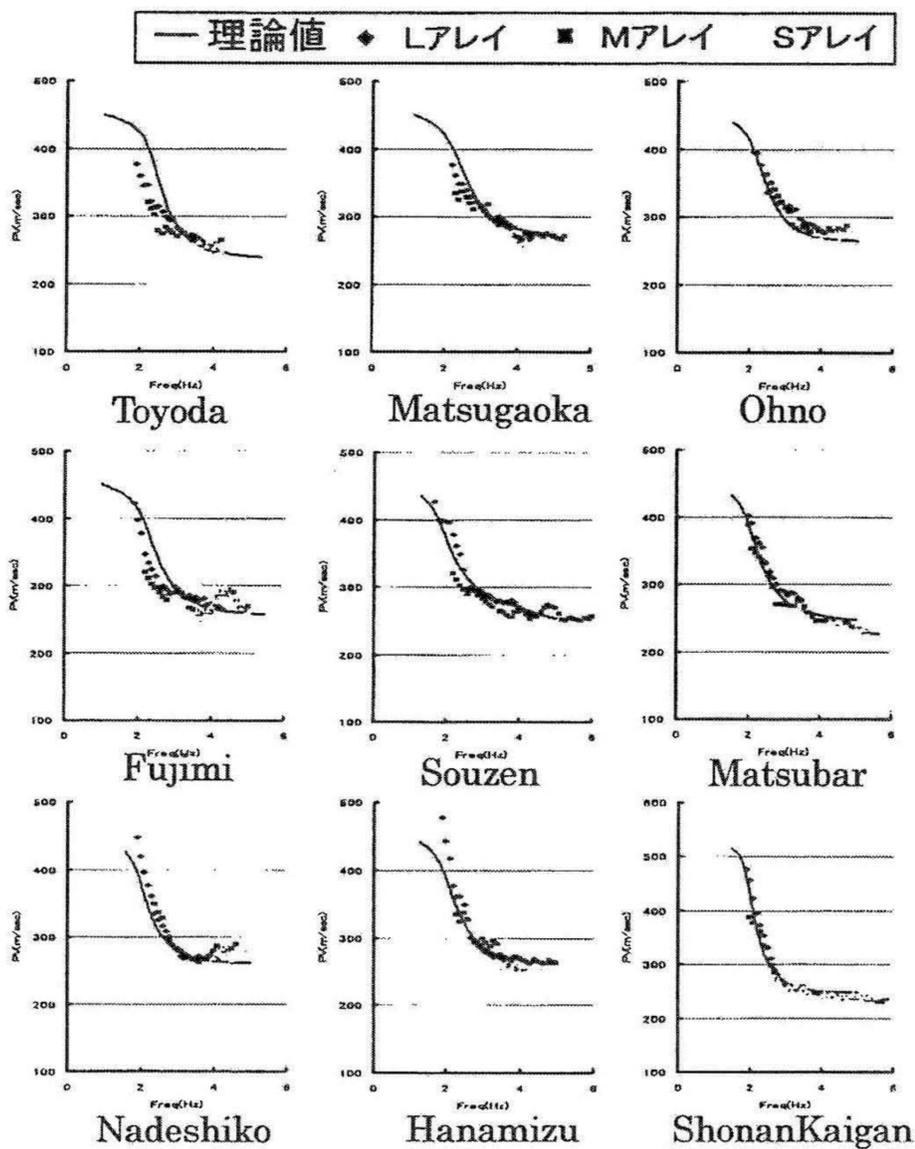


図 8. 平塚市各観測点における分散曲線の比較

6. 地盤構造の推定

左記で求められた S 波速度構造より観測地点における沖積層の厚さの推定が行える。これより平塚市南部における 3 次元地盤構造の推定が可能となった。図 10 に推定沖積層厚のコンター図を示す。

観測点 Souzen から相模川河口付近に向けて沖積層厚深くなっている。これは相模川が現在より西側に蛇行していたことが予測できる。参考文献 7)からも相模川が西側に蛇行していた確認できている。このことより平塚市南部は盆地状の形状を有した特有の基盤構造を形成していることが確認できる。

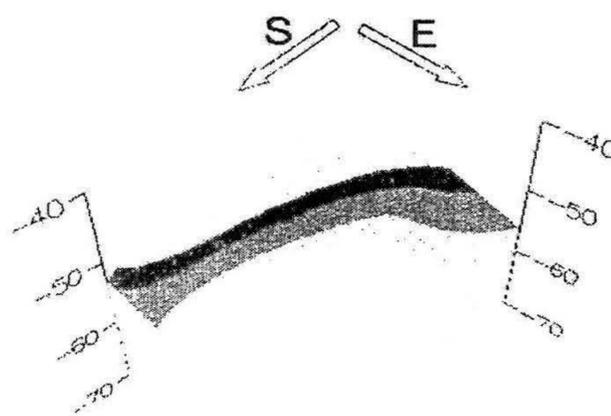


図 10. 平塚市南部の推定沖積層厚

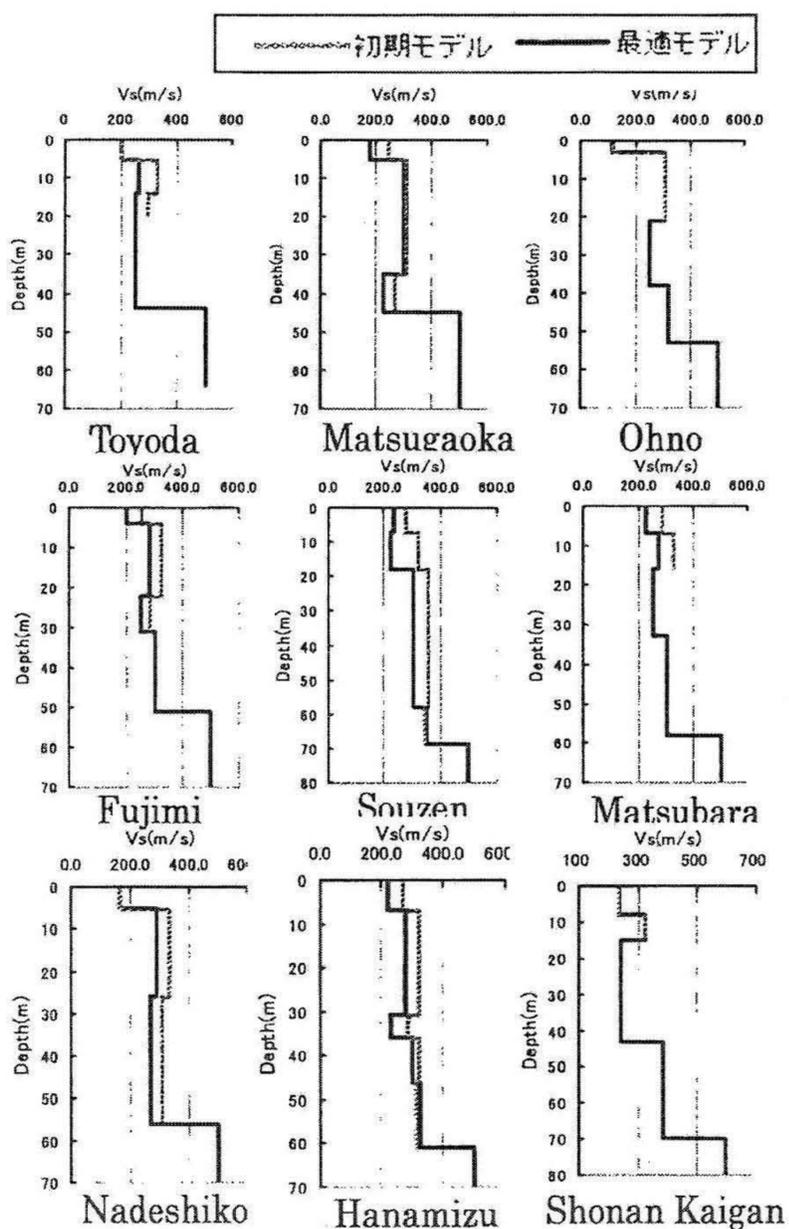


図 9. 各観測点における S 波速度構

7. おわりに

本研究では様々な地盤条件において微動アレイ観測を実施し、SPAC 法による解析を行った。分散曲線のフッティングにおいて、若干地盤構造を修正することによって、ほぼ一致することがわかった。しかしながらアレイ範囲内において地盤構造が急激な変化をもつ場合、SPAC 法の仮定である成層地盤構造ではなくなるため理論値とのフィッティングを行う際に問題が生じる場合がある。このことを避けるために観測点付近において 3 成分微動観測を複数行い地盤構造の変化を確かめることより推定の精度を高める必要性があることがわかった。

- 【参考文献】
- 1) 2000 日本建築学会：地盤震動-現象と理論-7.5 微動による地盤増幅特性の評価 p283-295, 2005
 - 2) 竹内均：地球科学における諸問題 1972
 - 3) 森慎一、鈴木茂る：相模川沖積低地から産出した軟体動物化石 自然と文化第 27 号 2004
 - 4) 落合努：高密度微動観測を用いた相模平野の次元地盤構造の推定と地震動伝播特性に関する研究, 神奈川大学修士論文
 - 5) 日野幹雄：「スペクトル解析」、朝倉書店、2002
 - 6) 北野栄二郎：「SPAC 法による地盤構造推定に関する研究」早稲大学修士論文、2003
 - 7) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門(1998 年)；鹿島出版会
 - 8) 共立出版株式会社：日本の地質 3「関東地方」 1986