

福井平野の微動アレイ地盤モデルの再評価

橋本勇一^{*1}, 安井 譲^{*2}, 野口竜也^{*3}, 香川敬生^{*3}, 中谷英史^{*3}

Reevaluation of soil velocity structure model gained through microtremor array observation in Fukui Plain

Yuichi Hashimoto, Yuzuru Yasui, Tatsuya Noguchi, Takao Kagawa
and
Eiji Nakaya

In order to improve correspondences between ground models based on the microtremor array observation in Fukui Plain, models by the H/V survey method and results of the gravity analysis, the microtremor array ground models were reevaluated. The reevaluation was done by the inverse analysis through GA of observed dispersion curves. The representative of the dispersion curves was selected as to be along a theoretical fundamental mode dispersion curve of the H/V ground model. By using the method of selection, a reasonable evaluation became possible compared with the forward method using prior information. The main results are as follows. In one site it was suggested that the depth of the seismic bedrock of the existing model should be greatly decreased. In another site, by assuming the low frequency region of the dispersion curve as the first mode, and the higher region as the fundamental mode respectively, a more appropriate ground model was able to be obtained. It was concluded that the correspondences between the three models were much improved as a whole.

Keywords: Fukui Plain, soil velocity structure, microtremor array observation, SPAC, dispersion curve, genetic algorithm, H/V spectrum, gravity survey

1. はじめに

著者らは、福井平野の深部地盤速度構造を明らかにするために福井平野とその境界部において微動アレイ観測を行なってきた¹⁾。また、微動 H/V スペクトルから地盤構造を簡便に推定できる微動 H/V 探査法を提案し、上記の微動アレイ観測点に沿う南北および東西の測線において高密度の微動 H/V 探査を行い、福井平野の 2 次元的な地下構造を推定している^{2),3)}。これらの微動アレイ観測に基づく地盤モデルと、微動 H/V 探査によるモデルや別に行った重力解析の結果^{2),3)}との

*1 大学院工学研究科修士課程建設工学専攻院生 (現 第一電機工業㈱) *2 土木環境工学科 *3 鳥取大学大学院工学研究科

間に不整合がみられたので、微動アレイ観測に基づく地盤モデルの再評価を試みることにした。

2. 微動観測と重力解析について

図-1 に既往の微動アレイ観測地点 (▲) と微動 3 成分観測点 (●) を示す。著者らは、図-1 に示す菅谷、山室、春江、東荒井、丸岡および板垣の 6 つの地点において、表層から深部におよぶ地盤構造を推定するために、小アレイ観測と大アレイ観測を行っており、観測により得られた常時微動波形から SPAC 法⁴⁾により分散曲線を計算し、フォワード解析により地盤速度構造モデル (以後、既往モデルと称する) を推定している¹⁾。さらに著者らは、微動アレイ観測地点に沿う南北および東西の測線で高密度な微動 3 成分観測を行い、提案した微動 H/V 探査法により 2 次元的地盤構造 (以後、H/V モデルと称する) の推定を行なっている^{2),3)}。ここに、微動 3 成分観測は、菅谷地点を通る福井平野西縁部の南北の約 20km の A-A'ライン、山室地点と丸岡地点を結ぶ斜め東西の C-C'ライン、C-C'ラインに平行で春江地点を通る B-B'ラインの 3 つの測線に沿って 500m ピッチで行っている。なお、重力解析もこれらの 3 つのラインに沿って同様な密度で実施していて、2 次元的地盤構造 (以後、重力モデルと称する) が推定されている^{2),3)}。

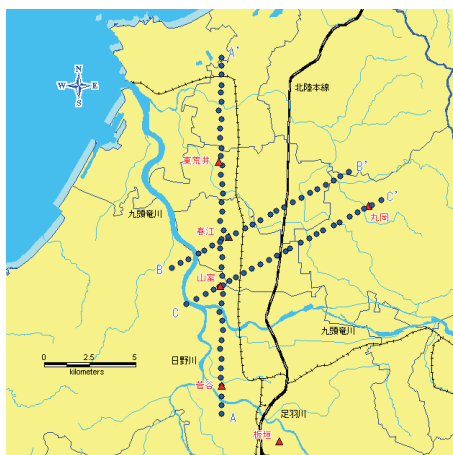


図-1 微動アレイ観測地点 (▲) と微動 3 成分観測点 (●)

3. 再評価の必要性について

表-1 に既往モデルの H/V モデルや重力モデルに対する整合度をまとめて示した。ここに、再評価は 6 地点のアレイ観測点のうち板垣を除く 5 地点とした。評価項目は、「H/V スペクトル」、「地震基盤 (H/V モデル)」および「地震基盤 (重力モデル)」である。「H/V スペクトル」の項目では、当該地点の観測による H/V スペクトルの周波数特性が既往モデルのレーリー波の基本モードの理論 H/V スペクトル⁵⁾と近似しているかどうかを評価したものである。また、「地震基盤 (H/V モデル)」では既往モデルの地震基盤深さと H/V モデルの地震基盤深さとの一致度を評価したものである。さらに、「地震基盤 (重力モデル)」では既往モデルの地震基盤深さと重力解析により得られた地震基盤深さとの一致度をみたものである。ここに、地震基盤の深さの既往モデルに対する H/V モデルや重力モデルとの一致度は、その差が 250m 以内のものを「○ (良く一致してい

る)」とし、250m以上のものを「×（一致していない）」としている．表-1 から東荒井を除くすべての地点の既往モデルを再評価する必要があることがわかる．

表-1 既往モデルの整合度

項目	菅谷	山室	春江	東荒井	丸岡
H/Vスペクトル	△	×	×	○	×
地震基盤 (H/Vモデル)	×	○	×	○	○
地震基盤 (重力モデル)	×	○	×	○	×

○:よく一致 △:ほぼ一致 ×:一致していない

4. 分散曲線の逆解析

4.1 逆解析の概要

図-2 に微動アレイ観測により得られた分散曲線の例（丸岡地点）を示した．再評価は分散曲線を遺伝的アルゴリズム（GA）^{6),7)}で逆解析する方法によった．分散曲線の逆解析を行う際、その目標となる分散曲線は各半径で得られたものを編集して一本の連続したものにする必要があるが、同図にみられるごとく一本化の候補は複数考えられる．そこで、分散曲線の一本化は、当該地点の H/V モデルを用いてレーリー波の基本モードの理論分散曲線⁵⁾を計算し、それにできるだけ近い分散曲線を、SPAC 係数⁴⁾等を参照しながら目視により選択する方法とした．その結果、主として先験的情報を頼りに行う従来の方法に比べてより合理的な評価が可能になった．図-3(a)～(e)に、各半径で得られた観測値、H/V モデルの理論分散曲線と一本化する分散曲線（●）を示す．

逆解析は GA を用いて行ったが、解析の対象とする振動数範囲は、深部の地盤構造を重視して再評価することを考えて低振動数域の 5Hz までとした．また、解析に用いる地盤モデルは、その層数、S 波速度 V_s と密度 ρ は既往モデルと同じとし、地震基盤を除く全層の層厚を GA により探索することとした．ここに、沖積層厚の探索範囲は既往の地盤モデルの 0.5～1.5 倍とし、洪積層および新第三紀層の探索範囲はそれぞれ 10～500m、10～2000m と広く設定した．また、GA の探索条件は次のとおりである．ビット数は 6、世代数を 100 とし、交叉確率は 0.7、突然変異確率は 0.01 とし、グレイコード、動的突然変異およびエリート選択を考慮した．なお、個体数については予備解析を行い、5 層地盤モデルでは 50、6 層地盤モデルでは 70 とした．

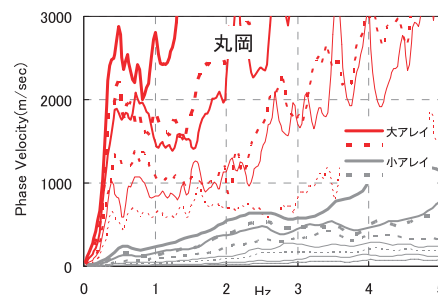


図-2 分散曲線の例(丸岡地点)

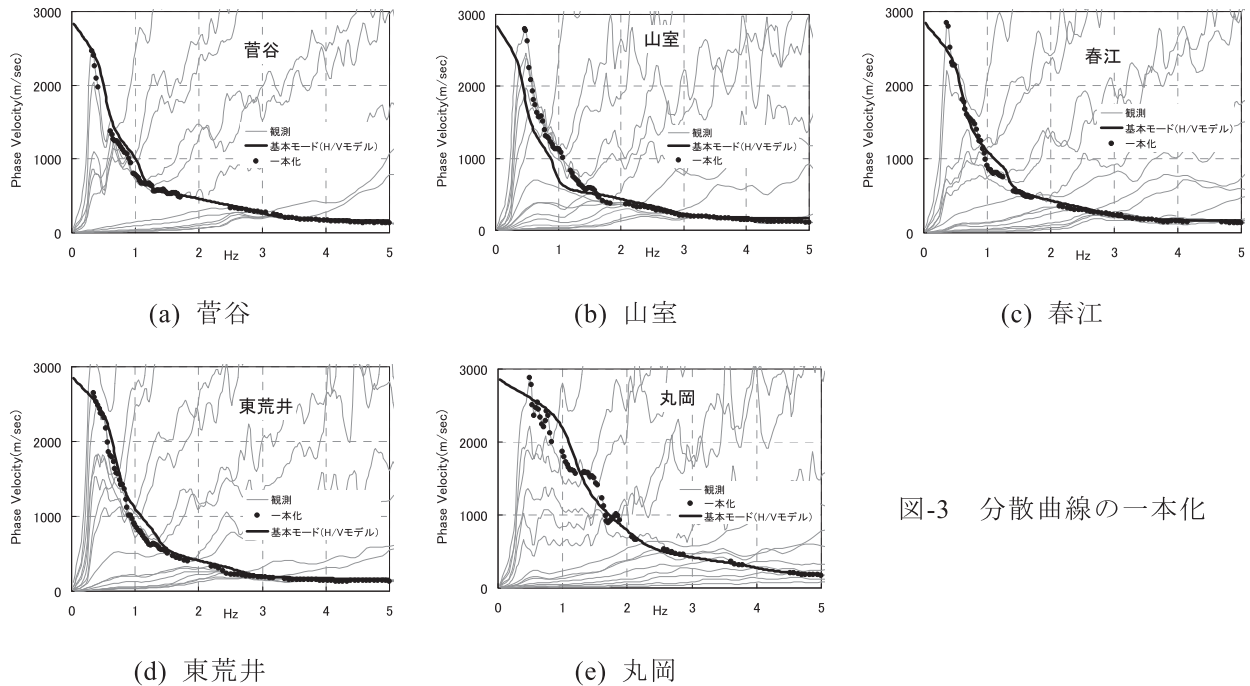


図-3 分散曲線の一本化

4.2 逆解析の結果とその考察

図-4(a)～(e)に対象とした5地点の逆解析結果を示したが、すべての地点において良好に近似できている。図-5に観測によるH/Vスペクトルと逆解析により再評価した地盤モデル（以後、再評価モデルと称する）を用いて計算したH/Vスペクトルを比較して示した。同図には既往モデルのH/Vスペクトルも示してある。また、図-6(a), (b)に再評価モデル（アレイ（再評価））と既往モデル（アレイ（既往））の地震基盤を比較して示した。なお、同図にはH/Vモデルと重力モデルも付記してある。

表-2に再評価モデルの評価をまとめて示した。同表から春江が全項目にわたって改良されていることがわかる。因みに同地点の既往モデルの地震基盤深さは約1,600mであったが、再評価モデルでは約900mと得られている。丸岡は「H/Vスペクトル」が改良されている。また、菅谷は「地震基盤（重力モデル）」が改良されなかったものの「H/Vスペクトル」が改良されていることから再評価モデルはある程度信頼できるものと思われる。なお、菅谷の「地震基盤（H/Vモデル）」は小幅ながら改善されている（図-6(a)参照）。東荒井は再評価モデルについても既往モデルと同様に全項目にわたって良好な近似を得た。一方、山室は「H/Vスペクトル」がやや改良されたものの再評価前に良好だった「地震基盤（H/Vモデル）」と「地震基盤（重力モデル）」の一致度が大きく後退した。そこで、次章で山室地点の再々評価を行うこととした。

表-2 再評価モデルの整合度

項目	菅谷	山室	春江	東荒井	丸岡
H/Vスペクトル	△→○	×→△	×→○	○	×→○
地震基盤 (H/Vモデル)	×	○→×	×→○	○	○
地震基盤 (重力モデル)	×	○→×	×→○	○	×

○:よく一致 △:ほぼ一致 ×:一致していない

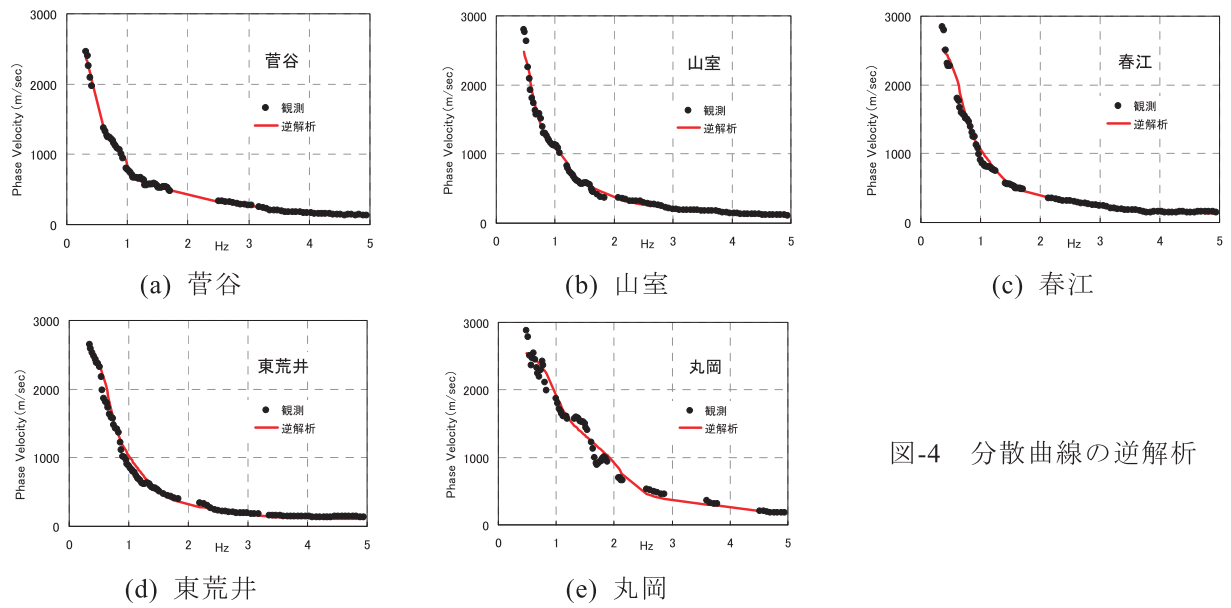


図-4 分散曲線の逆解析

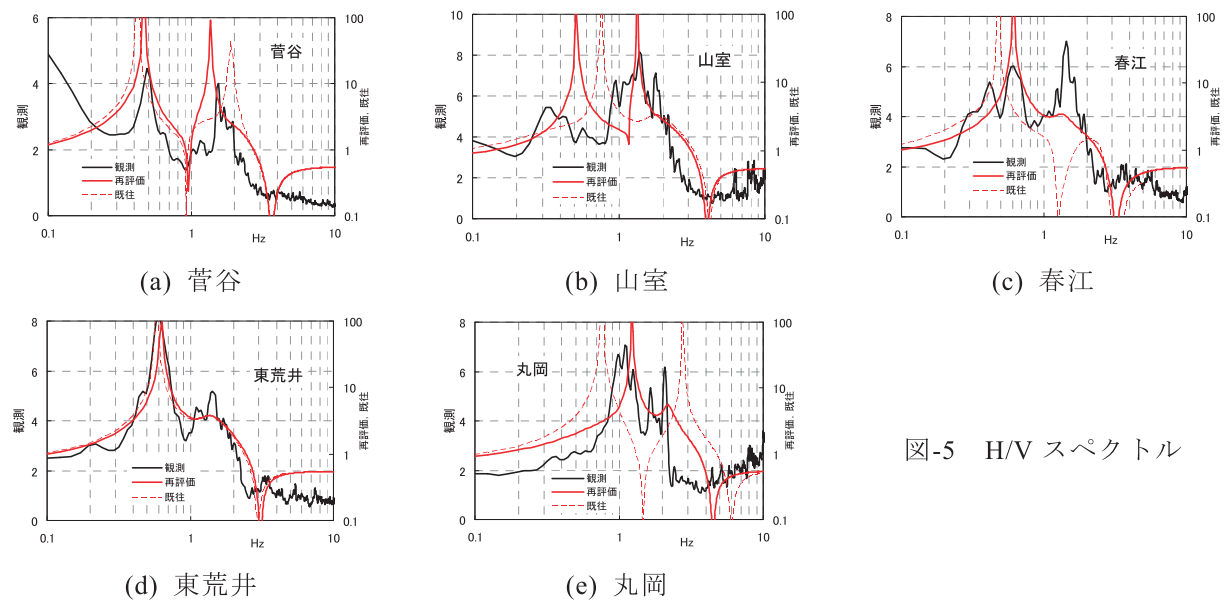


図-5 H/V スペクトル

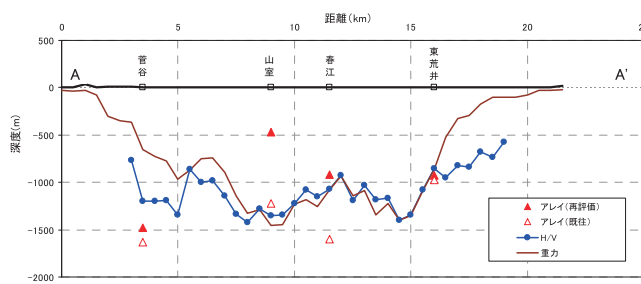


図-6 (a) 推定地盤構造(A-A'ライン)

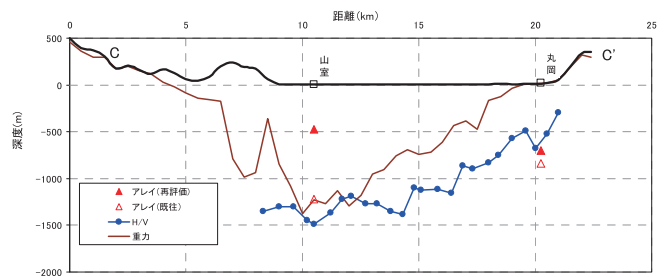


図-6(b) 推定地盤構造(C-C'ライン)

5. 山室地点の再々評価

図-7に、山室地点の観測による分散曲線とH/Vモデルの基本モードと高次モードの理論分散曲線を比較して示した。観測の0.5～1.5Hzの振動数範囲に顕著に現れた分散曲線は理論分散曲線の1次モードに対応している。そこで低振動数域を1次モードとして考え、再検討を試みた。再検討は、4章において一本化した分散曲線の0.5～1.5Hzの振動数範囲のものを1次モードと考えて逆解析を行うこととした。

図-8に0.5～1.5Hzの振動数範囲の分散曲線の逆解析結果を観測結果と比較して示したが良好に近似できていることが確認できる。また、図-9にこの逆解析の結果得られた地盤モデル（以後、再々評価モデルと称する）を用いて計算した基本モードと1次モードの理論分散曲線を観測値と比較して示した。0.5～1.5Hzの振動数範囲までは観測値は逆解析値の1次モードにほぼ一致しており、1.5Hz以降は基本モードにほぼ一致していることがわかる。図-10に、H/Vスペクトルの観測値を、既往モデル、再評価モデルおよび再々評価モデルの理論値と比較して示した。観測値と再々評価モデルのピーク振動数の一致度は改善される傾向にあり、再々評価モデルの妥当性が窺われる。また、表-3に山室地点の既往モデルと再評価モデルおよび再々評価モデルの適合度を示した。同表から再々評価モデルが全項目にわたって改良されていることが確認できる。ここに、地震基盤深さは約1,400mと得られている。

図-11(a), (b)に地震基盤の再評価の最終結果（アレイ（最終））を、既往モデル（アレイ（既往））、H/Vモデルおよび重力モデルと比較して示した。ここに、再評価と再々評価結果を総合したものを再評価の最終結果と称している。同図から、菅谷地点を除いた4地点の最終結果とH/Vモデル

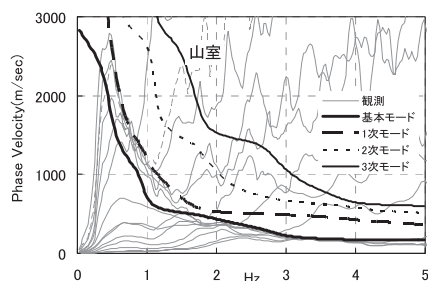


図-7 H/Vモデルの理論分散曲線と観測値との比較

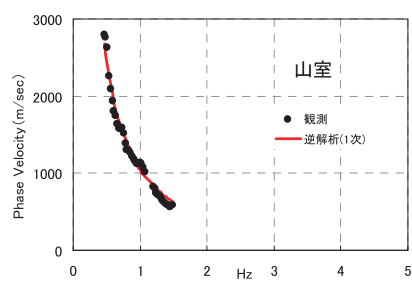


図-8 1次モードの分散曲線の逆解析

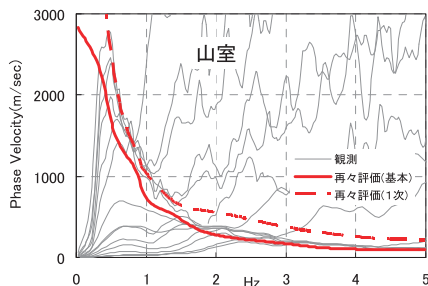


図-9 再々評価モデルの理論分散曲線と観測値との比較

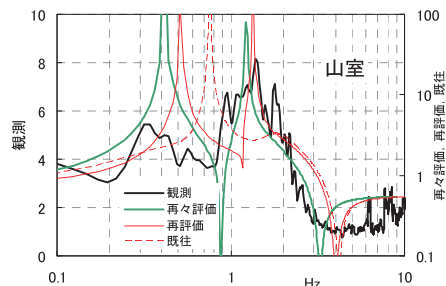


図-10 H/Vスペクトル

表-3 山室地点の地盤モデルの整合度

項目	既往	再評価	再々評価
H/Vスペクトル	×	△	○
地震基盤 (H/Vモデル)	○	×	○
地震基盤 (重力モデル)	○	×	○

○:よく一致 △:ほぼ一致 ×:一致していない

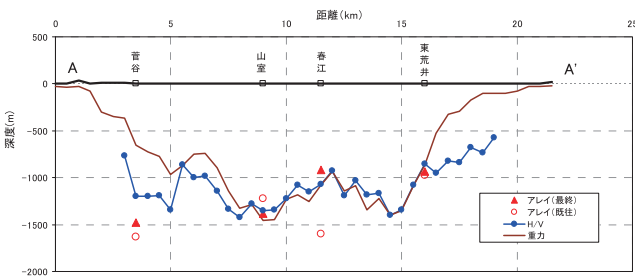


図-11 (a) 再評価の最終結果(A-A'ライン)

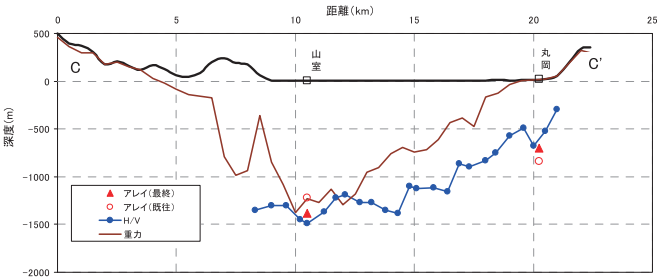


図-11 (b) 再評価の最終結果(C-C'ライン)

表-4 再評価の最終結果

(a) 菅谷

No.	地質	層厚 (m)	深度 (m)	ρ (t/m^3)	V_s (m/sec)
1	沖積層	14	14	1.7	120
2		19	33	1.7	260
3	洪積層	50	84	1.8	400
4		248	332	1.8	670
5	新第三紀層	1,153	1,485	2.0	1,800
6	地震基盤	—	—	2.5	3,200

(b) 山室

No.	地質	H (m)	Depth (m)	ρ (t/m^3)	V_s (m/sec)
1	沖積層	13	13	1.7	90
2		15	28	1.7	240
3	洪積層	43	71	1.8	400
4		281	352	1.8	670
5	第3紀層	1,037	1,389	2.0	1,800
6	地震基盤	—	—	2.5	3,200

(c) 春江

No.	地質	層厚 (m)	深度 (m)	ρ (t/m^3)	V_s (m/sec)
1	沖積層	14	14	1.7	127
2		12	26	1.7	200
3	洪積層	39	65	1.7	360
4		158	223	1.8	670
5	新第三紀層	699	921	2.0	1,800
6	地震基盤	—	—	2.5	3,200

(d) 東荒井

No.	地質	層厚 (m)	深度 (m)	ρ (t/m^3)	V_s (m/sec)
1	沖積層	17	17	1.7	110
2		56	73	1.7	370
3	洪積層	141	214	1.8	670
4	新第三紀層	724	938	2.0	1,800
5	地震基盤	—	—	2.5	3,200

(e) 丸岡

No.	地質	層厚 (m)	深度 (m)	ρ (t/m^3)	V_s (m/sec)
1	沖積層	14	14	1.7	133
2		7	21	1.7	300
3	洪積層	104	125	1.8	630
4	新第三紀層	591	716	2.0	1,800
5	地震基盤	—	—	2.5	3,200

の間の整合性が向上していることが確認できる。一方、菅谷地点と丸岡地点では重力モデルとの不整合性は改善されなかった。表-4(a)～(e)には、再評価の最終結果に対応する推定地盤構造の諸元を示した。

最後に、新第三紀層の深さについては言及しなかったが、最終結果の地盤モデルと H/V モデルとはほぼ一致した結果が得られていることを付記しておきたい。

6. まとめ

既存の微動アレイ観測に基づく地盤モデル(既往モデル)と、微動 H/V 探査法によるモデル(H/V モデル) および重力解析の結果(重力モデル) との整合性を改善するために、既往モデルの再評

価を行った。その結果、得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 再評価は分散曲線を GA で逆解析する方法によった。その逆解析の対象とする分散曲線の一本化にあたり、H/V モデルの理論基本モードにできるだけ沿うように選択することとした。その結果、主として先験的情報を頼りに行う従来の方法に比べてより合理的な評価が可能になった。
- 2) 春江地点の再評価モデルの地震基盤深さは、H/V モデルと重力モデルの地震基盤深さとほぼ一致した。また、H/V スペクトルについても観測値と計算値は良好に近似した。ここに、既往モデルの地震基盤深さは約 1,600m であったが、再評価モデルでは約 900m と得られた。
- 3) 丸岡地点の再評価モデルの H/V スペクトルは観測値と良好に近似した。地震基盤深さは、H/V モデルと概ね一致したが、重力モデルとは相違がみられた。
- 4) 菅谷地点の再評価モデルの地震基盤深さは、H/V モデルおよび重力モデルと有意な差がみられた。その原因について今後の検討が必要である。
- 5) 東荒井地点の再評価モデルは、既往モデルと同様に全ての評価項目において良好な近似が得られた。ここに、当該地点の地震基盤深さは約 900m である。
- 6) 山室地点については、その再評価モデルの地震基盤深さの整合度が大きく後退したため、再々評価を実施した。再々評価は低振動数域を 1 次モードと考えて逆解析を行った。逆解析の結果、地震基盤深さは H/V モデルおよび重力モデルとほぼ一致し、H/V スペクトルも良好に近似した。ここに、再々評価モデルの地震基盤深さは約 1,400m と得られた。
- 7) 以上の結果を総合すると、菅谷地点を除く 4 つの地点について、既往モデルと H/V モデルとの整合性が向上したと言える。一方、重力モデルとの対応では菅谷と丸岡において不整合がみられた。菅谷地点の速度構造の再検討と併せて今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 安井譲，野口竜也：微動アレイ観測に基づく福井平野の深部地盤速度構造の照査・検討，福井地震 60 周年・I，月刊地球 2008 年 11 月号，通巻 350 号，Vol.30，No.9，pp.444-452，2008。
- 2) 安井譲，野口竜也，橋本勇一，中谷英史，香川敬生：微動 H/V と重力探査による福井平野の地下構造推定，土木学会地震工学論文集，第 30 巻，pp.75-81，2009。
- 3) 橋本勇一，安井譲，穴口達也，瀬下樹，中谷英史，野口竜也，香川敬生：微動 H/V と重力探査に基づく福井平野の東西断面の地下構造推定，土木学会第 65 回年次学術講演会，土木学会，CD-ROM，I-314，pp.627-628，2010。
- 4) 岡田廣，松本健，森本武男，笹谷努：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法，物理探査，第 43 巻，第 6 号，pp.402-417，1990。
- 5) 久田嘉章：成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法，日本建築学会構造系論文集，第 501 号，pp.49-56，1997。
- 6) 山中浩明，石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集，第 468 号，pp.9-17，1995。
- 7) 石田良平，村瀬治比古，小山修平：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用，森北出版，1997。

(平成 23 年 3 月 31 日受理)