

微動 H/V 探査に基づく福井平野の 3 次元地盤構造の推定

安井 譲^{*1}, 小嶋啓介^{*2}, 野口竜也^{*3}, 香川敬生^{*3}
目代智滝^{*4}, 清水健博^{*2}, 前田聖拓^{*2}, 堀川晋壱^{*1}

Survey on 3-D soil structure of Fukui Plain through microtremor H/V spectrum method

Yuzuru Yasui, Keisuke Kojima, Tatsuya Noguchi, Takao Kagawa,
Satoru Mokudai, Takehiro Shimizu, Kiyohiro Maeda and Shin-ichi Horikawa

Three-dimensional soil structure in Fukui Plain was estimated from microtremor observations at 1 km mesh points. Depth of alluvial, diluvial, tertiary layers and seismic bedrock were evaluated from the observed H/V spectrum ratios through the GA method. The main features on the seismic bedrock depth in the target area are as follows. There is a deep domain along the west edge of the plain. The depth becomes quickly shallower to westward and gently shallower to eastward. Another deep linear domain estimated along the east edge has possibility of corresponding to the 1948 Fukui Earthquake Fault. Moreover a steep change of bedrock depth is found at the northern side of Asuwayama Hill.

Keywords: Fukui Plain, 3-D soil structure, H/V spectrum, genetic algorithm, Rayleigh wave, fundamental mode, seismic bedrock, Fukui Earthquake Fault

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震以後、各地で誘発地震が相次ぎ福井でも福井地震の再来が懸念されている。地震防災の基本となる地表面の強震動の予測を的確に行うためには地盤モデルが必要である。ところで、小嶋ら¹⁾は微動の H/V スペクトルに現れる卓越周期を S 波の 1/4 波長則によるものと関連付けて、福井平野の新第三紀層以浅の地盤の 3 次元構造モデルを作成している。また、安井ら^{2),3)}はレーリー波の基本モードスペクトルのピーク振動数に関連付けて地表面から深部の地震基盤に至る地盤の 2 次元構造モデルを推定している。一方、福井地震断層など直下の断層の広がりやを考慮した地震動予測を行うためには深部の地震基盤を含む 3 次元地

*1 土木環境工学科 *2 福井大学工学部建築建設工学科 *3 鳥取大学大学院工学研究科 *4 建設工学科
土木環境工学専攻学生



● : 観測地点 ▲ : 既往のアレイ観測地点

図-1 観測位置

表-1 メッシュコードと観点名

1次メッシュコード	2次メッシュ			観点名 (図幅記号-3次メッシュコード)
	2次メッシュコード	図幅名	図幅記号	
5436	1	福井	FKI	FKI-00~99
5436	2	永平寺	EHJ	EHJ-00~99
5436	10	鮎川	AYK	AYK-00~99
5436	11	越前森田	EMT	EMT-00~99
5436	12	丸岡	MRK	MRK-00~99
5436	21	三国	MKN	MKN-00~99
5436	22	越前中川	ENG	ENG-00~99

盤モデルがあると都合が良い。そこで、福井平野で高密度の単点 3 成分微動観測を行い、安井らの方法²⁾を用いて、地表面から深部の地震基盤に至る地盤の 3 次元地盤構造の推定を試みることにした。

2. 測定地点

測定の対象としたのは福井平野で、1 次メッシュコードが 5436 の地域に含まれる 2 次メッシュ⁴⁾の図幅名が、三国 (MKN)、越前中川 (ENG)、越前森田 (EMT)、丸岡 (MRK)、福井 (FKI)、永平寺 (EHJ) の平野部と鮎川 (AYK) の一部である。測定地点は、1km 四方ごとに測定することを考えて、3 次メッシュ (緯度差 30 秒、経度差 45 秒、1 辺の長さ約 1km) の中心付近とした。観点名は、緯度方向に 10 等分された位置座標 (0~9) と経度方向に 10 等分された位置座標 (0~9) のセットで表す 3 次メッシュコードの頭に図幅記号を付加して、例えば、FKI-52 (福井の緯度方向の座標が 5、経度方向の座標が 2 の場合) などとした。参考のため、表-1 に、1 次メッシュコード、2 次メッシュコードと図幅名および本研究で用いた観点名と 3 次メッシュコードとの関係を示した。図-1 に測定を実施した地点を示したが、その総数は 284 地点である。なお、同

図中の位置座標 (Ni, Ei) は, 上記の測点名とは別に福井の南西角の 3 次メッシュ FKI-00 を起点 (N0, E0) として示したものである. また, 同図には著者ら⁵⁾が過去に実施した 6 つのアレイ観測の位置も示してある.

3. 観測とデータ解析の概要

地震計として Lennartz 社製 LE-3D-5s 型速度計(5 秒 3 成分)を用い, これと白山工業の Ls8000 データロガーを組み合わせて地表面 3 成分の常時微動観測を行った. 観測は, 6 月~10 月および 12 月の延べ 36 日間にわたって実施した. 測定条件は以下のとおりである. 即ち, 測定時間は 15~20 分で, サンプル周波数は 100Hz, フィルターを 30Hz, アンプの倍率を 30 倍とした. データ解析は, 雑音の少ない良好な区間 (20.48 秒) 20 組を目標として選定し, スペクトル解析を行い H/V スペクトルを求めた. 図-2 に H/V スペクトルの例として EMT-07 測点のものを示した. 同図に見られるごとく, 多くの測点において 2 つのピークを有する複峰型のスペクトル形状を示した. ここに, Parzen ウィンドウの幅は 0.1Hz である. 同図では, 1.7Hz (\bar{f}_1) と 0.49Hz(\bar{f}_2)にピークが認められる.

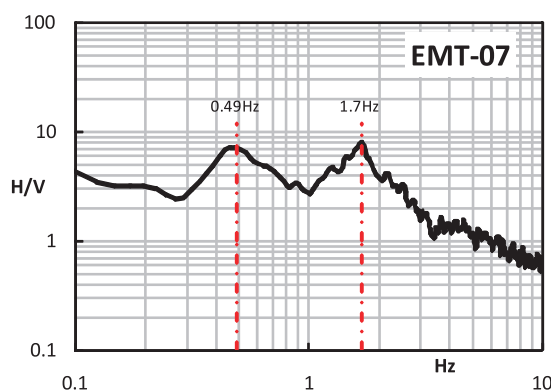


図-2 H/V スペクトルの例 (EMT-07)

4. 地盤構造の推定法と H/V スペクトルの同定結果

微動 H/V 観測に基づく地盤構造推定は以下のような手順で行った. まず, 図-3 に示すように, 沖積層, 洪積層, 新第三紀層および地震基盤からなる 4 層構造を仮定する. 沖積層と洪積層の S 波速度 V_{si} ($i=1,2$) は, アレイ観測結果^{2),5)}を参考にして, それぞれ 170m/sec, 580m/sec とした. 第 3 紀層と地震基盤の S 波速度 V_{si} ($i=3,4$) は, 既往の研究⁶⁾に倣い, それぞれ 1800m/sec, 3200m/sec とした. また, 各層の地盤密度 ρ_i ($i=1\sim4$) も同研究を参考にして, それぞれ 1.7g/cm³, 1.8 g/cm³, 2.0 g/cm³ および 2.5 g/cm³ とした. ここに P 波速度 V_{pi} ($i=1\sim4$) は S 波速度 V_{si} との関係を表す狐崎らの経験公式⁷⁾

$$V_{pi} = 1290 + 1.11V_{si} \quad (1)$$

により定めた.

沖積層の厚さ H_1 は, 式(2)により求める. また, 洪積層の厚さ H_2 と新第三紀層の厚さ H_3 は,

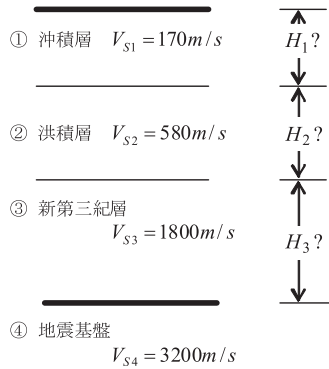


図-3 単純化した地盤モデル

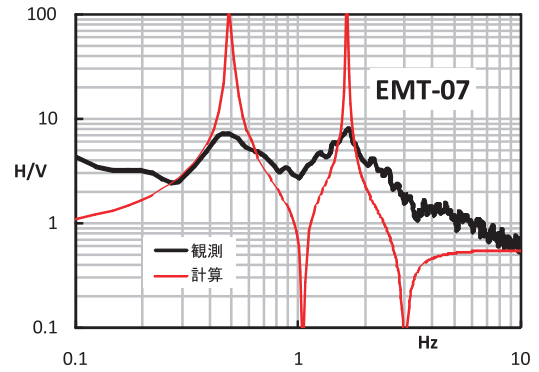


図-4 H/V スペクトルの同定の例

レーリー波の基本モード⁸⁾の H/V スペクトルのピーク振動数が観測による \bar{f}_2 に一致するように GA 探索^{9),10)}で求める。このとき、 H_2 の探索範囲は $0.5H_2' \sim 1.5H_2'$ とし、 H_3 の探索範囲は 50~2000m と広く設定した。ここに、 H_2' は式(3)を用いて定めるものとする。

式(4)に GA 探索の評価関数を示した。ここに、 N : 振動数 f_i の数、 R_0 : H/V の観測値、 R_c : 同計算値、 α : 対数値に対する調整係数、である。評価の対象を H/V スペクトルのピーク振動数 \bar{f}_2 の近傍の振動数範囲に限定するので N は十数点程度である。なお、探索により得られた地盤モデルの計算値の観測値 \bar{f}_1 に対する近似度が思わしくない場合は、観測値に適合するように H_1 の値を微調整して再度 H_2 と H_3 の最適値を探索するものとする。

$$\bar{f}_1 = \frac{V_{s1}}{4H_1} \quad (2)$$

$$\bar{f}_2 = \frac{V_{s1}H_1 + V_{s2}H_2'}{4(H_1 + H_2')^2} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [R_0(f_i) - \alpha \times \log\{R_c(f_i)\}]^2 \quad (4)$$

$$\alpha \approx \max[R_0(f_i)] / \log 100 = \max[R_0(f_i)] / 2 \quad (5)$$

なお、H/V スペクトルが単峰型の場合は、そのピークが \bar{f}_1 に対応するピークか \bar{f}_2 に対応するピークかを隣接する複峰型の地点のものを参考にして推定した上で、考えられる幾つかのモデルの逆解析を行い、H/V スペクトルの全体的な形状や谷の振動数などに着目して最適なモデルを定めることとする。

2つのピークを、洪積層上面と新第三紀層上面を基盤とする実体波の増幅特性で関連づけようとする他の近似的な方法^{11),12)}と比べると、地震基盤の弾性を考慮していることに加えその深さまで推定することができるように本方法の特色がある。他方、より厳密な手法として H/V スペクトルの振幅値そのものを逆解析する新井ら¹³⁾の方法があるが、本方法はピーク振動数を近似することを一義的に考えており、彼らの方法に比べて簡略的な方法であるといえる。

探索計算では、個体数を 30、ビット数を 6、世代数を 40 とし、交叉確率を 0.7、突然変異確率

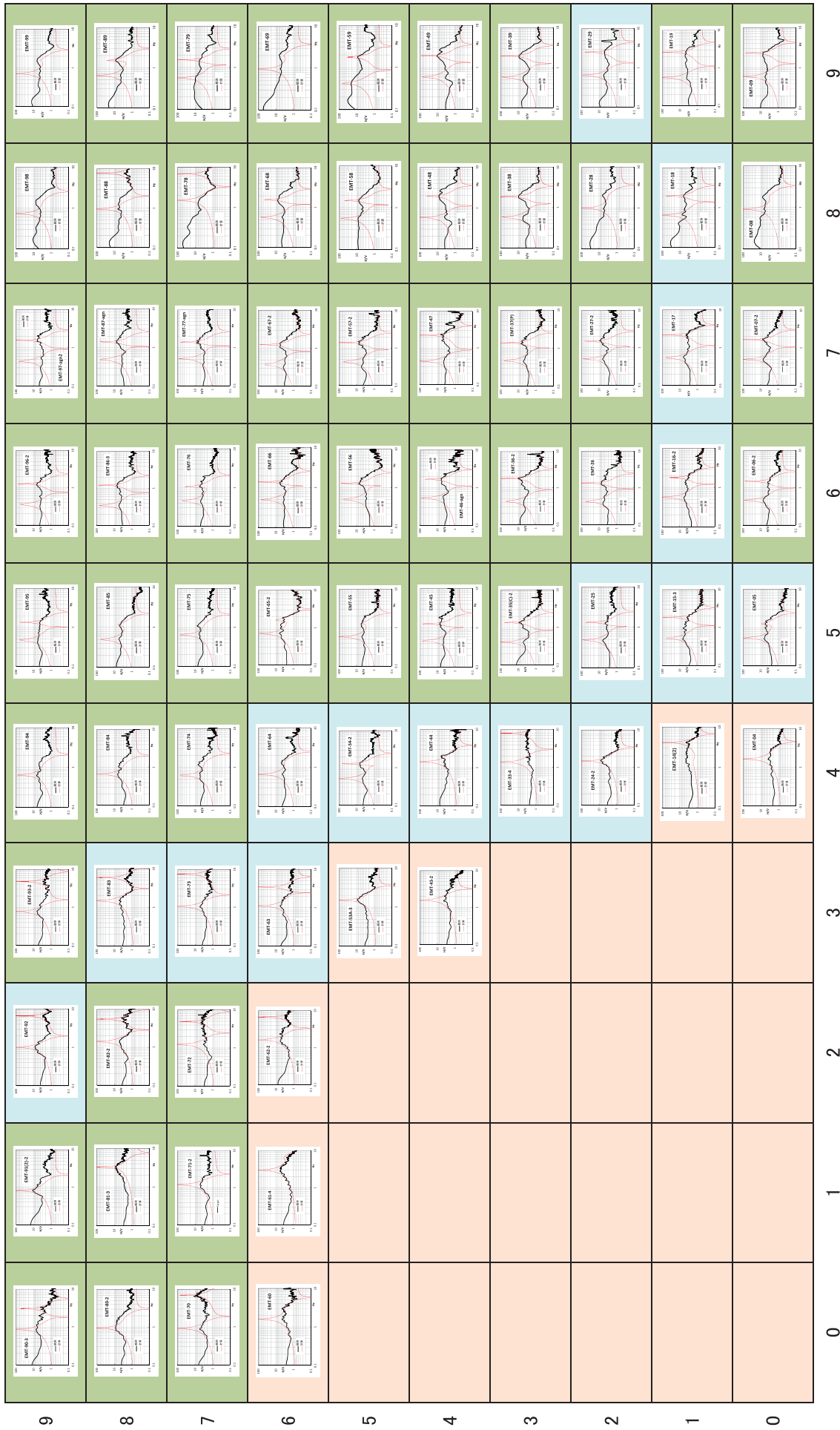


図-5 H/V スペクトルの同定結果の一覧 (越前森田:EMT)

を 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、予備解析において 3 回の試行を行ったが変動率は無視しうるほど小さかったので本解析における試行回数は 1 回としている。

図-4 に例として EMT-07 地点の H/V スペクトルの同定結果を示した。同図で計算とあるのはレーリー波の基本モードの H/V スペクトルである。さらに、図-5 に、越前森田 (EMT) を例として、観測による H/V スペクトルと同定結果を比較したものを対応する 3 次元メッシュに貼り付けたものを示した。ここに、同図中の背景の ■ は平野部を ■ は山地を、■ は河川を、それぞれ表す。

5. 3 次元地盤構造の推定とその考察

微動 H/V スペクトルの同定の結果、福井平野の任意の 3 次元メッシュコードが与えられると、当該地点の地表面から地震基盤に至る地盤構造を知ることが可能となった。即ち、3 次元のモデル構築のための地盤構造が得られたと言える。そこで、得られた 3 次元地盤構造の特徴について考察することとしたい。ここに、考察は地震基盤の深さを対象とすることとする。

図-6 に地震基盤深さの 3 次元鳥瞰図を示した。同図から福井平野の西縁側に主要な深部領域があることが分かる。また、中央よりやや東の E9 ライン等にも 1000m を超える地点があるようである。

図-7 に地震基盤のすべての東西断面を重ね書きして示した。同図から、E6 ライン（えちぜん鉄道三国芦原線にほぼ対応—図-1 参照）を境にして東側にはゆるやかに浅くなり、西側は東側に比べて急激に浅くなる形状であることが分かる。また、最深深さは約 1700m で、西縁の主要な深部領域内の EMT-96 (N19,E6) 地点（春江町井向）とやや東寄りの MKN-19 (N21,E9) 地点

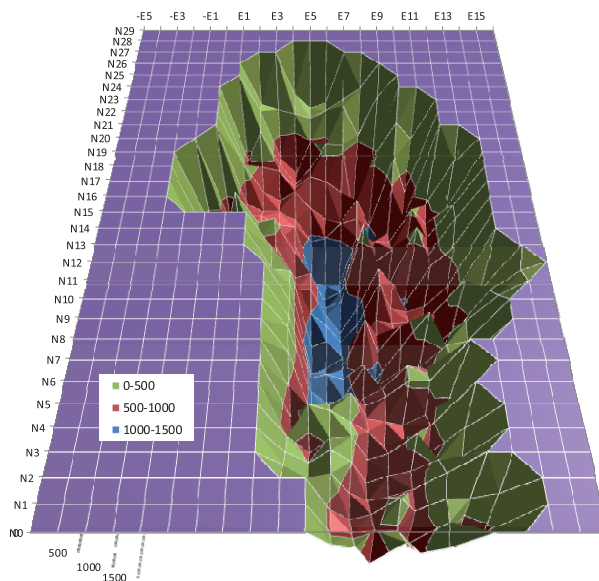


図-6 地震基盤深さの 3 次元鳥瞰図

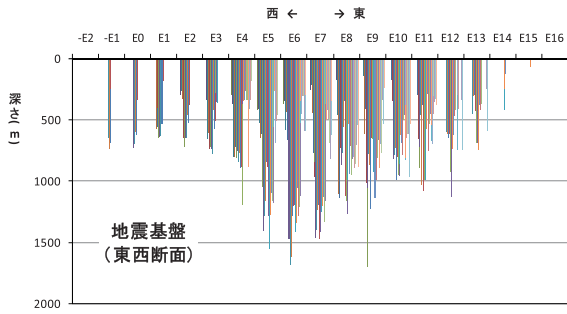


図-7 東西断面

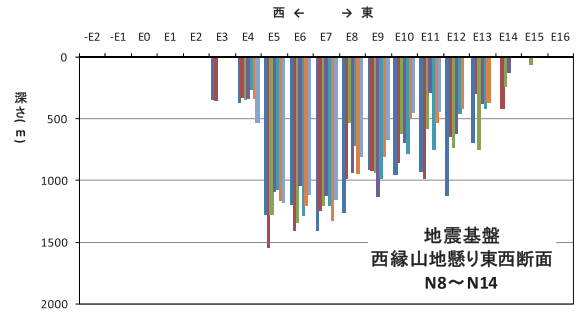


図-8 西縁山地懸りの東西断面

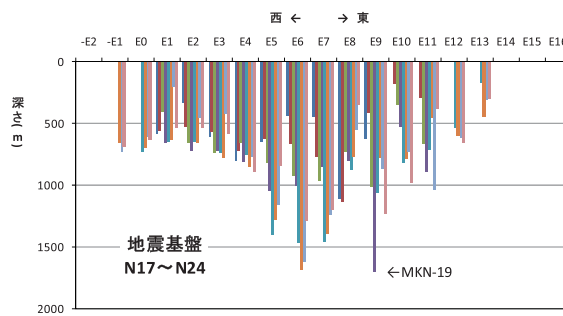


図-9 N17~N24 の東西断面

(坂井町長屋)で生じている。なお、平野主要部の幅約 10km、長さ約 25km の広さを考えると、地震基盤以浅の地盤は全体として扁平な厚さを有していると言える。

図-8 に、西縁の深部領域で、西縁の山地に懸かる南端の下市町付近を通る N8 ラインから北端の天管生町付近を通る N14 ラインまでの東西ラインの断面を重ね書きしたものを示した。同図から西縁部に急峻な段差が再確認され、その最大段差は高屋町を通る N13 断面の約 1200m である。この段差は未知の伏在断層の一部の可能性もあり今後の検討が必要である。

ところで、図-7 の東寄りの MKN-19 (N21,E9) 地点で最深深さを記録したが、この深さの南北方向の連続性をみるために、図-9 に東西ライン N17~N24 の断面を重ね書きしたものを示した。同図の横軸の E9 をみると深さ 1000m を超える地点が複数あることが分かる。従って、MKN-19 地点の最深深さは孤立したものではなく、南北に連続していることが窺える。ここに、図-1 に見るように N17~N24 の E8~E10 の範囲には南北に福井地震断層が走っていることから、MKN-19 地点を含む地震基盤の落ち込みラインは同地震断層と関連があるものと思われる。

図-10 に地震基盤深さのすべての南北断面を重ね書きしたものを示した。同図から、菅谷町を通る N8 ラインから坂井町下兵庫を通る N21 ラインの 13km にわたる広い範囲で 1000m を超える地点が多いことが分かる。また、同図から足羽山の北側の足羽川付近を通る N7 ラインと N8 ラインとの間に段差があることが推察される。そこで、図-11 に、段差位置を特定するために足羽山に懸かる幅 (E5~E7) の南北断面を重ね書きしたものを示した。同図から、N7 と N8 の間

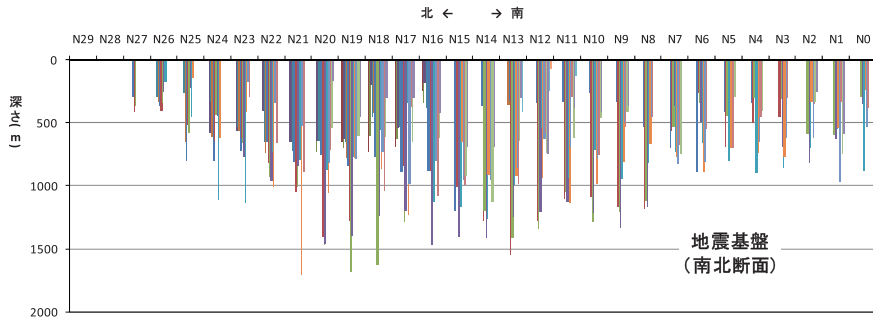


図-10 南北断面

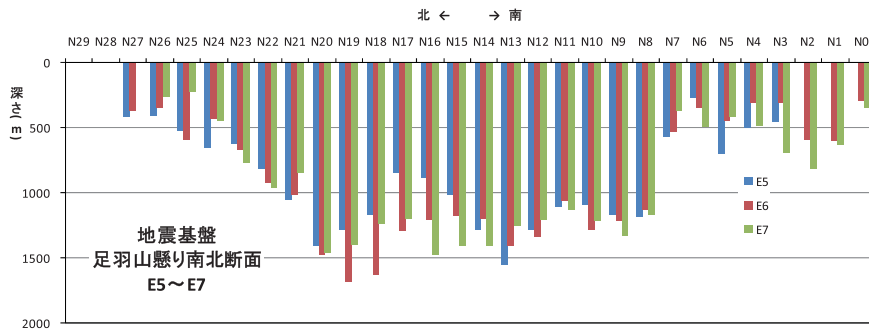


図-11 足羽山懸りの南北断面

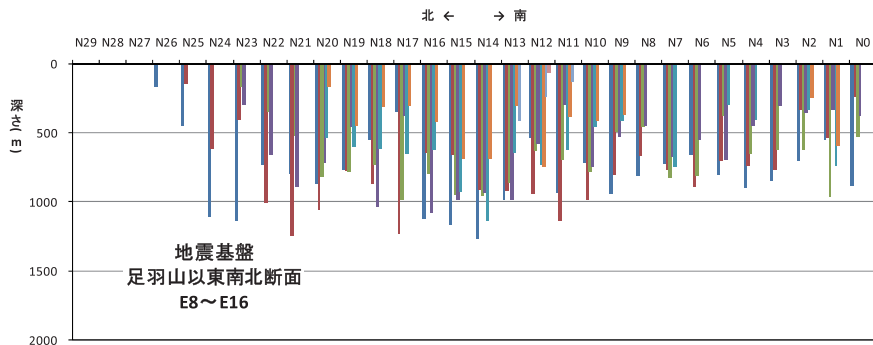


図-12 足羽山以東の南北断面

の段差は最大 800m 程度に及ぶことが分かる。参考のため、図-12 に足羽山以東 (E8~E16) の南北断面を重ね書きしたものを示した。足羽山を外れると段差はないようである。

ここで、既往のアレイ観測点^{2),5)}のうち菅谷地点と山室地点の地下深部構造の状況を確認しておきたい。菅谷はアレイ観測による地震基盤深さと H/V 探査によるものとの一致度が芳しくなかった地点¹⁴⁾であり、山室は分散曲線の解釈においてレーリー波の基本モードだけでは説明できなかった地点¹⁴⁾である。図-13 に E5 ラインの南北断面を示したが同図には菅谷のほか、山室、春江および東荒井のアレイ観測結果も示してある。菅谷地点の南側に段差が 600m 程度の地震基盤の急峻な壁があるのが分かる。図-14 には N8 ラインの東西断面を示したが菅谷地点の西側にも段差が 600m 程度の地震基盤の急峻な壁があるのが分かる。これら直交する 2 面の段差が菅谷地点のアレイ観測結果に影響を及ぼしたことが考えられ、今後検討を加える必要がある。図-15

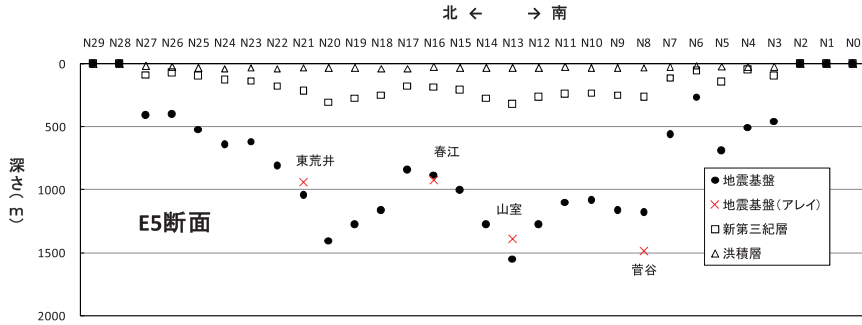


図-13 アレイ観測点の地震基盤 (E5 断面)

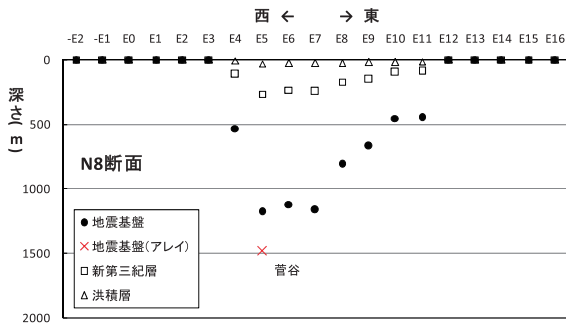


図-14 アレイ観測点の地震基盤 (N8 断面)

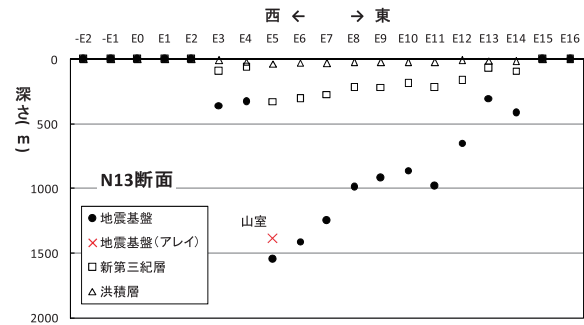


図-15 アレイ観測点の地震基盤 (N13 断面)



★ : 最深地点, ■ : 西縁の谷, ● : 東縁の谷, ▼ : 崖, ▲ : アレイ観測地点

図-16 地震基盤の谷地形と崖地形の位置

には N13 ラインの東西断面を示したが山室地点の西側に段差が 1200m 程度の地震基盤の急峻な壁があるのが分かる. この段差が山室地点のアレイ観測結果に影響を及ぼしたことが考えられ, これについても今後検討を加える必要がある.

図-16 にこれまで述べた地震基盤に関する考察をまとめて示した。同図には最深地点 (★), 西縁の主要な谷 (深部) 地点 (■), 東縁の谷地点 (●), 西縁の崖 (急峻な段差) 地点 (▼), 足羽山北の崖地点 (▽) などを示している。また, 6 つのアレイ観測点⁵⁾の位置 (▲) もプロットしてある。改めて東縁の谷地点に着目すると, それらは九頭竜川を挟む南北約 8km の範囲を除いて概ね福井地震断層に沿って分布していることが確認できる。

6. まとめ

- 1) 福井平野の約 1km メッシュごとに 284 測点の単点微動 3 成分観測を行った。観測により得られた H/V スペクトルを逆解析して, 沖積層, 洪積層, 新第三紀層および地震基盤の深さを求め 3 次元地盤モデル構築のための地盤構造を得た。以下に, 得られた 3 次元構造の地震基盤深さの特徴点について述べる。
- 2) 鳥瞰図および東西断面の考察から, 西縁に深部領域を有し, E6 ライン (えちぜん鉄道三国芦原線にほぼ対応) を境にして西側へは急激に浅くなり, 東側には比較的ゆるやかに浅くなる形状であることが分かった。また最深深さは西縁の深部領域内の地点 (春江町井向付近) とやや東寄りの地点 (坂井町長屋付近) で生じその深さは約 1700m であった。
- 3) 西縁の山地に懸かる下市町を通る N8 ラインから天菅生町を通る N14 ラインの間の東西断面には最大 1200m の急峻な段差があることが分かった。未知の伏在断層の可能性もあり今後検討する必要がある。
- 4) やや東寄りの最深部地点は孤立したものではなく, 南北に連続していることが確認された。これらの連続した深部地点は南北に走る福井地震断層に関連するものと推察されたが, 今後の検討も必要である。
- 5) 南北断面の考察から, 菅谷町を通る N8 ラインから坂井町下兵庫を通る N21 ラインの長さ 13km の広い範囲にわたって深さ 1000m を超える地点が多いことが分かった。また, 足羽山に懸かる幅 (E5~E7) の南北断面の考察から, 足羽山の北の足羽川北岸にある段差は 800m 程度に及ぶことが分かった。
- 6) アレイ観測を行っている菅谷地点は, 南側で 600m, 西側でも 600m と, 直交する 2 面において急峻な壁 (段差) に囲まれていること, また, 山室地点の西側には 1200m 程度の急峻な壁があることがなど分かった。こうした深部の状況がこれら 2 地点のアレイ観測結果に影響しているかどうかについて今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 小嶋啓介, 鈴木大輔: 常時微動観測と地盤統計手法に基づく福井平野の第四紀構造の推定, 応用地質, 第 46 巻, 第 1 号, pp.9-19, 2005.
- 2) 安井謙, 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, 安井讓, 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) 総務省: <http://www.stat.go.jp/data/mesh/pdf/gaiyo1.pdf#page=1>
- 5) 安井讓, 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.
- 6) 山中浩明, 栗田勝実, 瀬尾和夫, 小嶋啓介, 佐藤浩明, 宮腰研, 赤澤隆士: 微動アレイ観測による福井平野の S 波速度構造の推定, 地震, 第 2 輯, 第 53 巻, pp.37-43, 2000.
- 7) 狐崎長琅, 後藤典俊, 小林芳正, 井川猛, 堀家正則, 斎藤徳美, 黒田徹, 山根一修, 奥住宏一: 地震動予測のための深層地盤 P・S 波速度の推定, 自然災害科学, 9(3), pp.1-17, 1990.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 小嶋啓介: 強震および微動観測に基づく福井平野の地下構造の推定, 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.453-460, 2008.
- 12) 若松邦夫, 野畑有秀: 福井平野の地下構造と 1948 年福井地震の被害—その 1 微動 H/V の特性と推定地下構造—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.227-228, 1998.
- 13) Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.94, No.1, pp.53-63, Feb. 2004.
- 14) 安井讓, 橋本勇一, 野口竜也, 香川敬生: 微動 H/V 探査モデルに依拠した微動アレイモデルの再評価—福井平野の地盤構造を対象として—, 土木学会論文集 A1 特集号 (地震工学論文集), 論文番号 A1S-0024, 2012 (掲載予定).

(平成 24 年 3 月 31 日受理)