

微動 H/V と重力探査による福井平野の地下構造推定

安井譲¹・野口竜也²・橋本勇一³・中谷英史⁴・香川敬生⁵

¹福井工業大学 土木環境工学科 教授 (〒910-8505福井市学園3-6-1)

E-mail: yasui@fukui-ut.ac.jp

²鳥取大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 助教 (〒680-8552鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

³福井工業大学 土木環境工学科 大学院生 (〒910-8505福井市学園3-6-1)

E-mail: yh0130@kvp.biglobe.ne.jp

⁴鳥取大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 大学院生 (〒680-8552鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: nakaya05044@cv.tottori-u.ac.jp

⁵鳥取大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 (〒680-8552鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

福井平野で既に行われている微動アレイ観測に基づく地盤速度構造を照査・検討することを目的として福井平野西縁部の4つのアレイ観測点を通る南北の測線において詳細な微動H/V観測と重力観測を行った。重力観測は基盤が露頭していると考えられる東西の山地についても実施した。微動H/Vスペクトルと重力観測から推定した第3紀層や地震基盤の深さはアレイ観測の結果と一部不整合な部分が見受けられるものの、その大まかな形状は一致した。また、微動H/V探査ではH/Vスペクトルの2つのピーク振動数に着目して沖積層から地震基盤までの地盤構造を逆推定する簡易的な方法を試行しているが本方法の有用性も確認できたとも言える。

Key Words : *Fukui Plain, microtremor, H/V spectrum, Rayleigh wave, soil velocity structure, genetic algorithm, gravity survey, mass density, tertiary layer, seismic bedrock*

1. はじめに

著者らは福井平野の深層地盤速度構造を明らかにすることを目的として、菅谷を始めとする6測点で微動アレイ観測を行ってきた¹⁾。これらの速度構造を2次元あるいは3次元的なデータで照査・検討することを考えて、福井平野西縁部の4つの微動アレイ観測点に沿う南北の測線において詳細な微動H/V探査と重力探査を行なった。ここに、微動H/V探査ではH/Vスペクトル²⁾の2つのピーク振動数³⁾に着目して第3紀層や地震基盤の深さを逆算する簡易的な方法を試行している。なお、重力観測では既存の観測⁴⁾を補間すべく東西の山地の測点についても観測を実施した。

2. 微動H/V探査

(1) 観測の概要

微動観測は菅谷地点を通る福井平野西縁部の南北の約20kmの測線で10月24日～26日、11月8日と12月

12日に実施した。図-1に観測点の位置を示したが、これらの測点の間隔は500mである。微動アレイ観測は本測線上の菅谷(No.4)、山室(No.15)、春江(No.20)および東荒井(No.29)の4地点で行われている。

微動観測の概要は以下のようである。即ち、地震計は旧アカシ製のGPL-6A3Pで、測定時間は20分、サンプリング周波数は100Hz、またローパスフィルターの折点周波数は5Hzとした。得られたデータから雑音のない良好な区間(20.48秒)を10組選定して、その後半部に20.48秒の0区間を付加してスペクトル計算を行ない、H/Vスペクトルを求めた。

(2) H/Vスペクトル

図-2にH/Vスペクトルの例としてNo.4測点のものを示した。同図と後述する図-3に見られるごとく、南北両端の数地点を除き、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、1.54Hz(f_1)と0.51Hz(f_2)にピークが認められる。図-3に f_1 と f_2 に対応する周期 $T_1(=1/f_1)$ と $T_2(=1/f_2)$ の分布を示した。

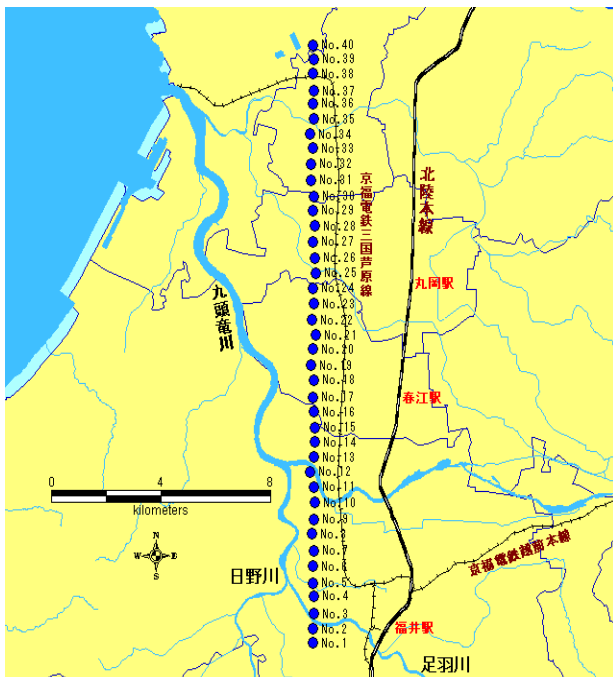


図-1 測点配置

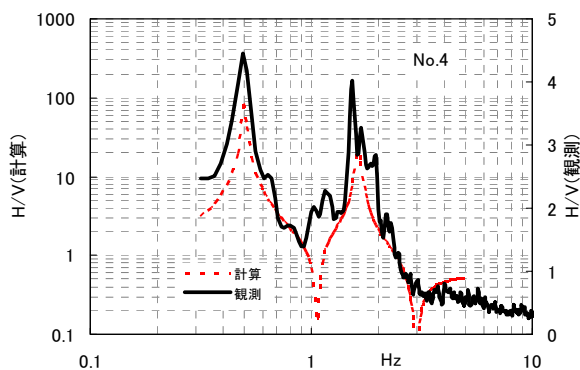


図-2 H/Vスペクトルの例 (No. 4測点)

(3) 地盤構造の推定

H/Vスペクトルに現れた2つのピーク振動数を利用して地盤構造を推定するが、その手順は以下のようである。

まず、図-4に示すように地盤構造を単純化して、沖積層、洪積層、第3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波速度はアレイ観測結果¹⁾を参考にして、それぞれ170m/sec, 580 m/secとした。第3紀層と地震基盤のS波速度は既往の研究²⁾に倣い、それぞれ1,800m/sec, 3,200m/secとした。また、第①層～④層の単位体積質量も同研究を参考にして、それぞれ1.7, 1.8, 2.0および2.5ton/m³とし、P波速度は狐崎らの式⁶⁾によった。

沖積層の厚さ H_1 は基本的には1/4波長則に基づく式(1)により求めるが、H/Vスペクトルの f_1 のピークの適合度により必要に応じて微調整するものとする。

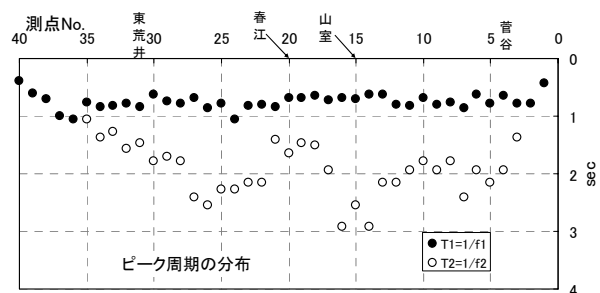


図-3 ピーク周期の分布

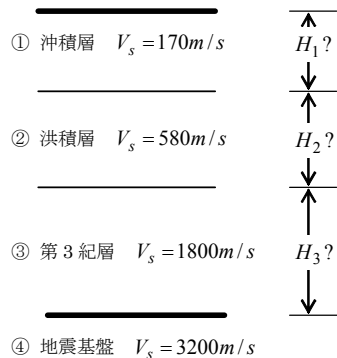


図-4 単純化した地盤モデル

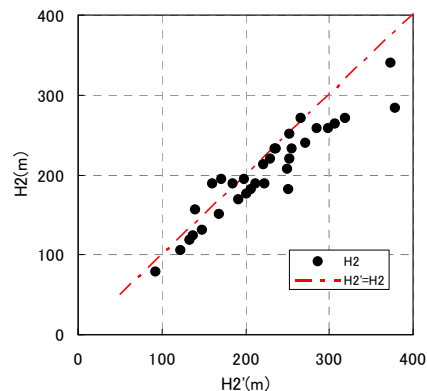


図-5 H_2 と H_2' との関係

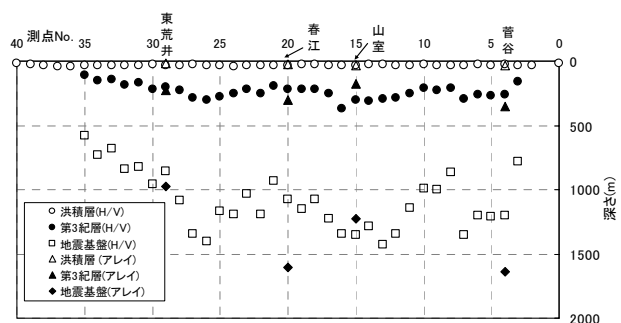


図-6 微動H/Vから推定した地盤構造

洪積層の厚さ H_2 と第3紀層厚 H_3 は、レイリー波の基本モード⁷⁾のH/Vスペクトルのピーク振動数が観測による f_2 に一致するようにGA探索^{8),9)}で求めるが、その探索は f_2 のピーク周辺の限られた範囲で行うものとし、 H_2 の探索目標の目安 H_2' は1/4波長則に基づく式(2)により定めた。式(3)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 : 調整係数、等々である。なお、探索計算では、ビット数を6、標本数を30、世代数を100とし、 H_2 と H_3 の探索範囲の上限を、それぞれ500mと3,000mとした。

本方法は、調整係数を導入してH/Vスペクトルの振幅値の最適化を緩和するなど、より厳密な手法¹⁰⁾を簡略化したものであるが、2つのピークに着目した他の近似的な方法^{3),11)}に比べると地震基盤の深さまで推定できるところにその特色がある。

図-2にはH/Vスペクトルの同定結果の例を示してある。同図で計算とあるのは同定した地盤定数を用いて計算したレイリー波の基本モードのH/Vスペクトルである。参考のため、図-5に H_2 と H_2' との関係を示しておいたが、 H_2 と H_2' の差が大きいほど、 f_2 は第3紀層地盤の上面で固定とした表層地盤の1/4波長則による固有振動数と一致しない度合いが強いことを示す。

$$f_1 = \frac{170}{4H_1} \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{170H_1 + 580H_2'}{4(H_1 + H_2')^2} \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [R_0(f_i) - \alpha \times \log\{R_c(f_i)\}]^2 \quad (3)$$

図-6に微動H/Vから推定した地盤構造を示した。第3紀層深さは100m～400m程度、地震基盤深さは深いところで1,500mとそれぞれ得られており、いずれも大まかな傾向はアレイ観測結果と一致している。

3. 重力探査

(1) 観測の概要

観測は2008年10月24日～26日に実施し、南北の測線の観測点は図-1のNo.1～No.40の微動観測点の測線に沿うように40地点とした。さらに、既存の重力観測において観測点が少ない丸岡付近と東西の山際を含む山間部の45地点の計85点で実施した。図-7に観測点（赤丸）をプロットしたものを示した。

重力計は、ラコスト・ロンバーク重力計（G-1034）を使用し、観測点の位置決定には、ディファレンシャルGPS(Thales社製mobile mapper)を使用した。重力値の基準点は、鳥取大学工学部土木棟の実験室とした。現地での基準点は丸岡電子基準点とし

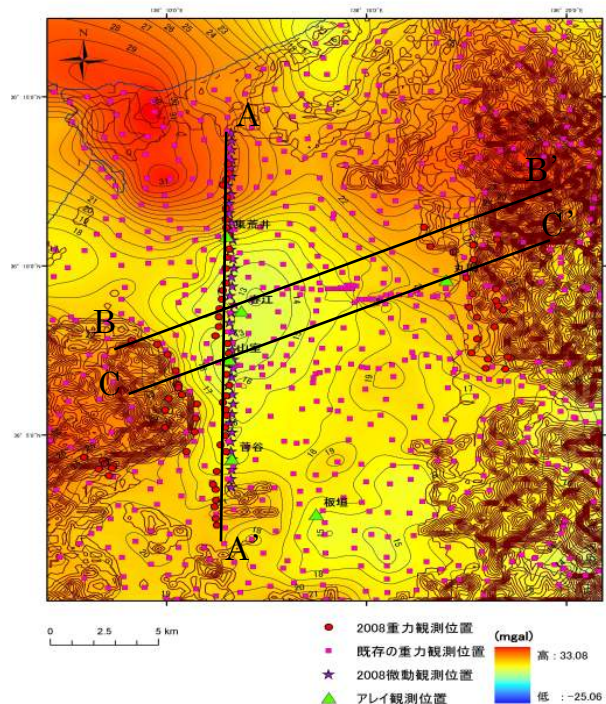


図-7 観測位置とブーゲ異常図
(仮定密度2.4g/cm³, コンター1.0mgal)

1日ごとに閉塞観測した。解析で用いた重力データとして、日本重力異常グリッドデータベース¹²⁾ Gravity Database of Southwest Japan¹³⁾と2007年の鯖江の観測点70点¹⁴⁾に、今回測定した85点を加えた。

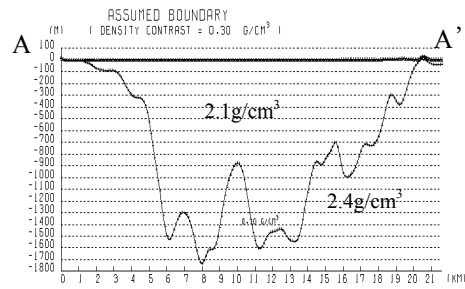
(2) 解析の概要

観測により得られたブーゲ異常値をもとにCVUR法¹⁵⁾により、丸岡周辺と菅谷・山室周辺の基盤が露出していると考えられる地点で密度推定を行った結果、平野周辺の基盤の密度が2.4g/cm³と推定できた。図-7に仮定密度を2.4g/cm³としたブーゲ異常図を示す。地下構造モデルの作成には仮定密度2.4g/cm³のブーゲ異常値を用いて2次元定量（2層モデル）解析および2次元多層モデル解析を行った。

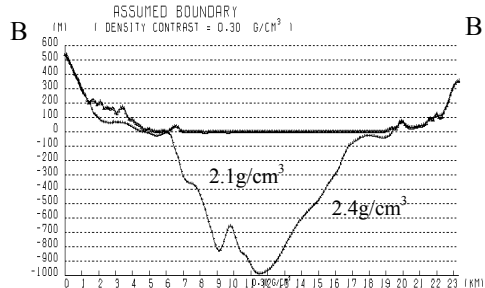
2次元定量解析では基盤と表層からなる均質な2層構造を仮定した。推定する断面には、観測を重点的に行った南北方向のA-A'断面と、両端で基盤が露頭していると思われる福井平野を東西方向に通るB-B'断面とC-C'断面を設定した。図-7にその断面位置を示す。ここに、表層の密度を2.1g/cm³、基盤の密度を2.4g/cm³とした。

コントロールポイントは、B-B'断面とC-C'断面は両端に基盤が露頭するように、A-A'断面ではB-B'断面とC-C'断面の交点の深度におくとともに北端と南端は基盤が露頭するように設定した。

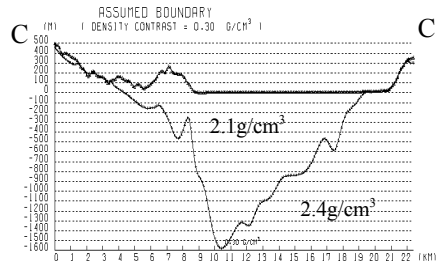
2次元多層モデル解析は微動観測が行われたA-A'断面で行った。ここでは、3層モデルを考え、1層目を1.8g/cm³、2層目を2.1g/cm³、3層目を2.4g/cm³とした。1層目と2層目の境界は地質断面図¹⁶⁾を、2層目



(a) A-A' 断面



(b) B-B' 断面



(c) C-C' 断面

図-8 2次元2層モデル

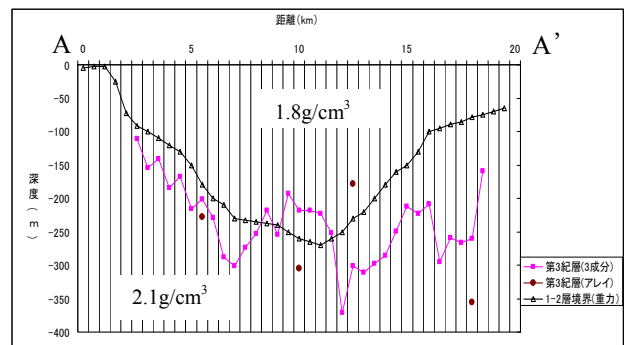
と3層目の境界は2次元定量解析の結果をそれぞれ参考にした。

(3) 2次元定量解析結果

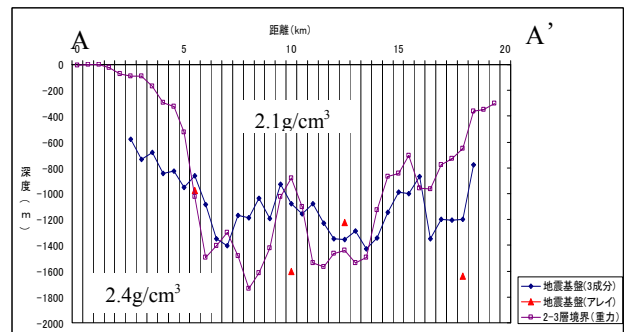
2次元定量解析により得られた2層モデルの結果を図-8に示す。A-A'断面では距離10km（図-1の測点No.20付近）において基盤の急な盛り上がりが見られる。また、基盤の最深部は東荒井と春江の間にみられ、深度は1,700mに達している。山室付近でも基盤が深くなっている。B-B'断面では基盤の最深部が1,000mと浅く、C-C'断面では基盤の最深部が1,600mに達している。

(4) 2次元多層モデル解析結果

2次元多層モデル解析により得られた結果を図-9に示す。図中「3成分」とあるのは前章の微動3成分観測によるH/V探索結果を指す。図-9(a)の第3紀層境界と1層目と2層目の境界について重力、微動アレイおよび微動H/Vによる結果を比べると北側(A側)は3者とも類似した傾向を示すものの南半分(A'側)は互いに大きな差を示す。図-9(b)の地震基盤面と2層目と3層目の境界についてみると、重力、微動アレイおよび微動H/Vによる結果は、菅谷を除き概ね一致



(a) 地下構造 (1-2層境界)



(b) 地下構造 (2-3層境界)

図-9 2次元多層モデル

しているといえる。

差の大きい地点については、基盤あるいは表層の密度分布が断層などによって均質ではない（層構造になっていない）ことも考えられるため、この周辺の地質環境等を再度吟味して検討する必要がある。

4. おわりに

- (1) 既往の4つのアレイ観測点を通る福井平野の西縁部の約20kmの測線について500mピッチで常時微動観測と重力観測を、東西の山地において重力観測を行った。
- (2) 微動H/Vスペクトルの2つのピーク振動数に着目した簡易な地盤構造推定法を提案して地震基盤を含む地盤構造の推定を試みた。その結果、第3紀層深さは100m～400m程度、地震基盤深さは深いところで1,500mとそれぞれ得られた。
- (3) 重力データを基に福井平野の2次元の密度構造を推定した。その結果、第3紀層深さは250m程度で地震基盤の深さは最大1,700m程度であると推察された。
- (4) 重力解析、微動アレイおよび微動H/Vから推定した第3紀層の深さについて比較した結果、測線の北側においてアレイ観測の結果に概ね一致した。また地震基盤の深さについては、菅谷地点を除いて概ね一致した。差の大きい地点については、今後検討する必要がある。

謝辞：本研究を実施するにあたり卒業研究生の福井工業大学の伊原和紀氏と相馬友氏，鳥取大学の杉浦慎一氏の協力を得た．ここに記して謝意を表します．

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.
- 2) 時松孝次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文集，第439号，pp.81-87,1992年2月.
- 3) 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概要集（九州），pp.227-228,1998.
- 4) 小林直城，平松良浩，河野芳輝，竹内文明：重力異常による福井平野の3次元基盤構造の推定—福井地震およびその周辺の活断層との関係，地震，第2輯，第54巻，pp.1-8,2001.
- 5) 山中浩明，栗田勝実，瀬尾和大，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.
- 6) 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.
- 7) 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年11月.
- 8) 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.
- 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.9-17,1997年2月.
- 10) 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.
- 11) 小嶋啓介：強震および常時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.
- 12) 駒澤正夫：日本重力異常グリッドデータベース，日本重力 CD-ROM第2版，数値地質図 P-2，地質調査総合センター，2002.
- 13) The Gravity Research Group in Southwest Japan : Gravity Measurements and Database in Southwest Japan, Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9, 2002.
- 14) 野口竜也，小嶋啓介，大畑至：重力異常による鯖江断層周辺の基盤構造推定，第7回アジア国際地震学会連合(ASC)総会・2008年日本地震学会秋季大会合同大会概要集，Y1-206，2008.
- 15) Komazawa, M. : Gravimetric Analysis of Volcano and its Interpretation, J. Geod. Soc. Japan, Vol.41-1, pp.17-45, 1995.
- 16) 三浦静：福井平野と若狭地方の平野，特集 北陸の丘陵と平野，アーバンクボタ，No.31，pp.56-59，1992.

SURVEY ON UNDERGROUND SOIL STRUCTURE OF FUKUI PLAIN THROUGH MICROTREMOR AND GRAVITY OBSERVATIONS

Yuzuru YASUI, Tatsuya NOGUCHI, Yuhichi HASHIMOTO, Eiji NAKAYA
and
Takao KAGAWA

A detailed microtremor H/V and gravity observation were done in the line in the south north in the Fukui plain west part aiming to check the underground soil structure based on the microtremor array observation. The gravity observation was done also in the mountainous district in the east and west areas where the bedrock was outcrop. The proposed underground soil structure obtained through those observations roughly coincided with the results of the array observation. Moreover, it can be said that the usefulness of the proposed simple method being able to deduce the depth of the tertiary and seismic bedrock layer by paying attention to two kinds of peak frequencies of microtremor H/V spectra was confirmed.