

Microtremor Observation around the Fukui-Earthquake-Fault

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2007-12-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小嶋, 啓介, 越野, 智博, KOJIMA, Keisuke, KOSHINO, Tomohiro メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/1203

福井地震断層周辺における常時微動観測

Microtremor Observation around the Fukui-Earthquake-Fault

小嶋 啓介*
(福井大学工学研究科)
越野 智博**
(株アイワホーム)

1. まえがき

1948年6月28日に発生した福井地震(M7.1)では、軟弱な沖積層が広がる福井平野周辺で建物の倒壊率が100%に迫る未曾有の被害が発生した。その際、福井平野の中央および東部の広い範囲で地割れなどの発生は認められたものの、地震に伴う断層は厚い堆積層のため地表面に露出しておらず、地震直後に実施された水準および三角測量から、伏在する断層の概略的な位置が推定されているにすぎない。そのため、福井地震断層の継続的活動に伴う地下構造および活動履歴を明らかにしようとするいくつかの研究が実施されてきた。天池、竹内は¹⁾、福井地震断層のほぼ中央と思われる坂井市田島川周辺で、エアガンおよび板叩き震源による弾性波探査を行ない、深さ約300mまでのP波構造および深さ約20mまでのS波速度構造を求めている。また井上、中川は²⁾、九頭竜川河川敷の福井大橋付近から北陸自動車道に至る約2000mの区間で、P波による弾性波探査、ならびに重力探査を実施している。その結果、想定断層付近での反射面の不連続ならびに断層破碎帯によると思われる低ブーゲー重力異常は認めたものの、明瞭な基盤構造の評価には至っていない。さらに衣笠ら^{3), 4)}(福井県地域活断層調査検討委員会)は、福井地震断層を含めた福井平野東縁断層帯の調査のために、JR春江駅から丸岡インターチェンジに至る約6kmの区間で、P波およびS波による反射法探査を実施し、山麓から平野中央に向かって、第三紀層からなる基盤が深くなること、基盤面を100m以上不連続的に変化させる断層は存在しないことを確認している。一方岡本ら⁵⁾は、天池らの調査地点近傍で深さ約30mまでのボーリングを実施し、赤ホヤ火山灰層を同定し、断層両側でのギャップと活動度を推定している。また、前出の衣笠らは、丸岡インターチェンジ付近のS波探査測線周辺でトレンチ調査を行なっているが、約800~700年前の噴砂跡は認めたものの、1948年福井地震に伴う断層は発見されていない。

(キーワード：福井地震断層，常時微動，アレイ観測，S波速度構造)

* Keisuke Kojima

(Department of Architecture and Civil Engineering, University of Fukui, 910-8507, Fukui, Japan)

** Tomohiro Koshino

(Aiwa Home Corp., 3-62, Nonoichi-machi, Ishikawa, 921-8802)

以上のように、福井地震断層を対象としたいくつかの調査・研究が実施されてきているものの、残念ながら現段階では、福井地震断層の活動に伴う明確な地下構造の特定と活動履歴の解明には至っていないと判断せざるを得ない。本論では、弾性波探査の調査履歴がある測線に沿って、常時微動のアレイならびに三成分観測を実施し、Rayleigh 波の位相速度およびH/V スペクトル特性から、観測点ごとのS 波速度構造を推定することにより、断層活動に伴う地下構造推定の可能性を検討する。

2. 常時微動観測に基づく卓越周期分布

2. 1 常時微動観測

図-1 は、福井平野中央部の地形図上に、想定される福井地震断層と常時微動の観測位置を示したものである。同図は、国土地理院の数値地図 50m メッシュ標高と地図表示ソフト Kashmir を用いて作成した。図に示す3つの測線のうち、田島川測線は天池、竹内らのPおよびS波探査実施地点、春江測線は福井県による福井平野東縁断層帯調査に際して実施されたP波探査地点、

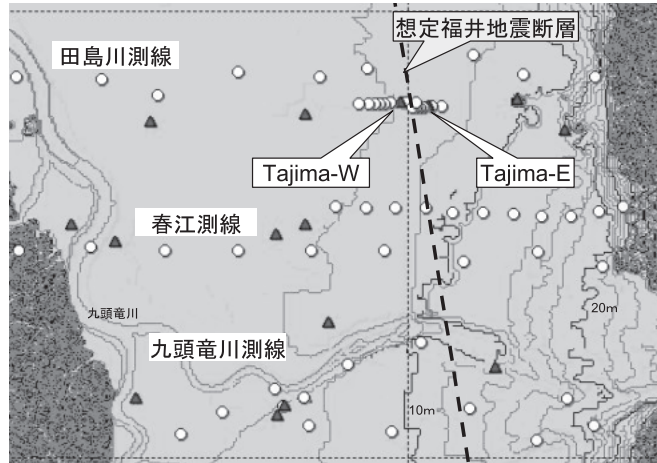


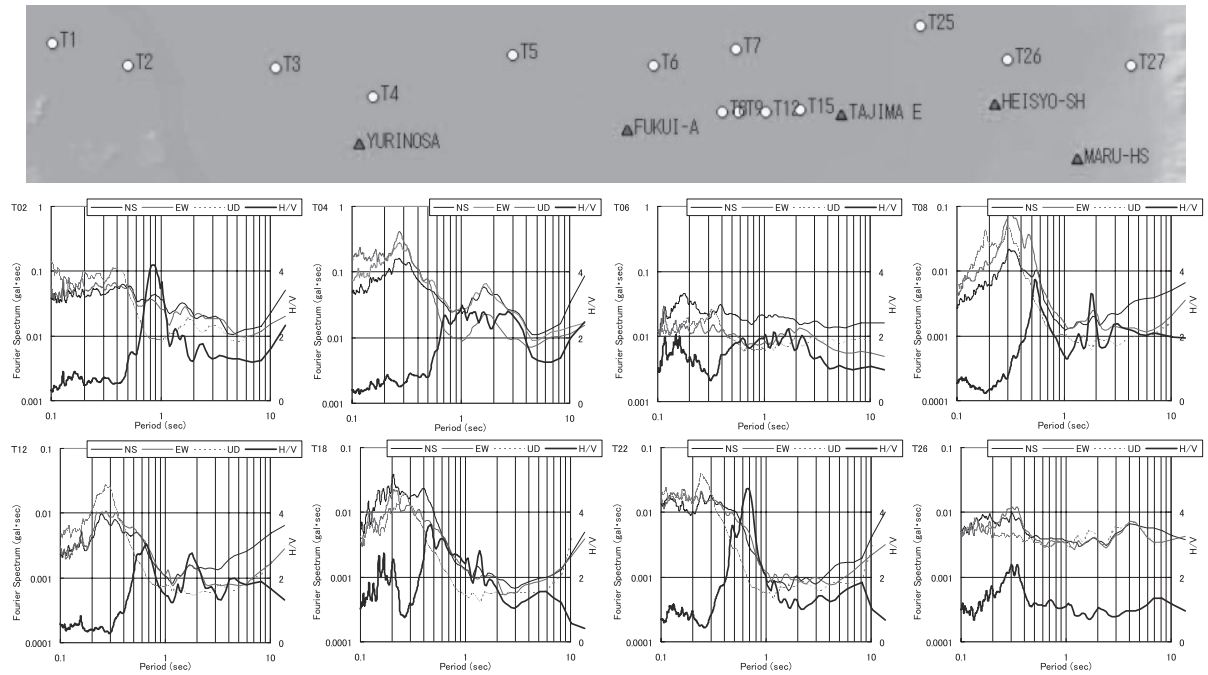
図-1 常時微動のアレイおよび三成分観測位置

九頭竜川測線は井上らによるP波探査法の実施地点に対応しており、それぞれの探査測線とオーバーラップするように微動観測点を配置した。各測線とも、想定されている福井地震断層に直交する方向で、常時微動のアレイ観測▲と、一点三成分観測○を実施した。常時微動のアレイ観測では、正三角形の中心と、頂点に検出器を合計4台設置する正三角形配置を採用した。中心には(株)Akashi製の三成分加速度計 JEP6A3 を、頂点には上下動のみを検出する JEP6A1 を3台それぞれ設置した。各検出器からケーブルにより、白山工業(株)製の DATAMARK-LS8000SH に直接接続してデータの収録を行った。各加速度検出器の固有周波数は3Hzであり、概ね0.3~40Hzの範囲でフラットな特性を有している。正三角形アレイの中心と頂点との距離であるアレイ半径としては、5, 15, 40mの3セットを基本とし、観測地点の状況に応じて、3m~40mの範囲で大、中、小の3種の半径を設定した。各アレイ半径での観測に際し、サンプリング間隔0.01secで、約25,000個の上下動を収録した。三成分観測についてはJEP6A3を1台用いることによって収録されるNS, EWおよびUDの三成分のノイズの少ない4096個のデータ区間を5セット抽出し、バンド幅0.3HzのParzenウィンド処理を行い、各成分のフーリエスペクトルを求めた。また、NS,EWの水平2成分の相乗平均Hを上下動で除してH/Vスペクトルを算出した。微動観測の詳細については、筆者らの文献^{6), 7)}を参考されたい。

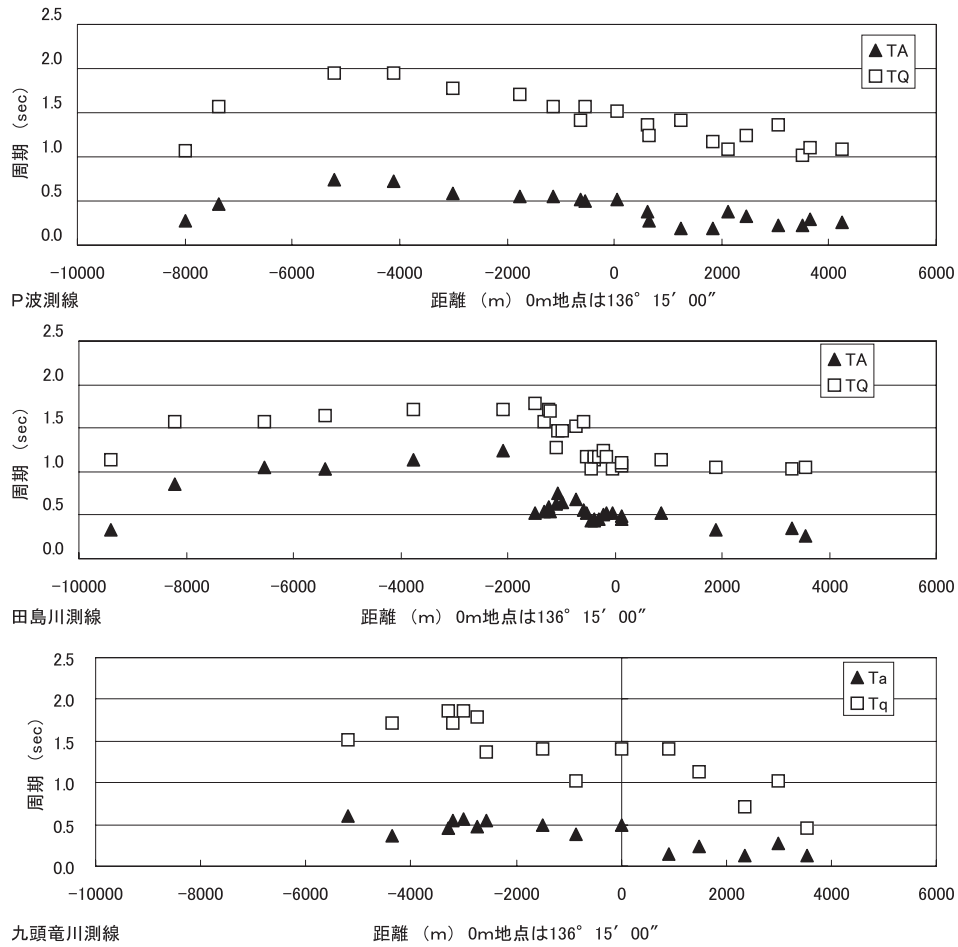
2. 2 微動のH/Vスペクトルと卓越周期

図-2 は、田島川測線におけるH/Vスペクトルを、観測地点を西から東に向かって、左上から右下に配置したものである。同図のT08地点やT12地点で典型的に認められるように、福井地震断層の常時微動のH/Vスペクトルには、0.6秒前後の明瞭なピークと、1.5秒付近のやや明瞭なピークが確認でき

福井地震断層周辺における常時微動観測



図－2 田島川測線の三成分観測から求められフーリエおよびH/Vスペクトル



図－3 微動三成分観測から評価した卓越周期 (Ta, Tq) の東西方向分布

る．筆者らが福井平野を中心として観測・継続してきた多数の常時微動データの分析結果から，これらのピークは沖積層および第四紀層最下面に起因した卓越周期と判断され，本研究ではそれぞれ T_a と T_q と表記する．なお， $T06$ 地点のように， H/V スペクトルのみから明瞭なピークが判断できない場合には，水平動のフーリエスペクトルおよび周辺の観測点のピーク周期を参考に，小さなピークから卓越周期を判断した．図－3は，3つの測線の各測点の H/V スペクトルから読み取った T_a 、 T_q の東西分布を示したものである．図中の距離 0mは，推定されている福井地震断層の通過位置付近の東経 136 度 15 分に対応している．3つの測線ともに東の山麓域から西の福井平野中央にかけて，卓越周期が増加する傾向にあること，扇状地および旧および旧河道に対応する九頭竜川測線では， T_a 、 T_q とともに氾濫原および三角州地形に対応する他の測線より小さめであること，断層が通過していると考えられる地点を境に東西で，卓越周期の不連続があることなどが読み取れる．

3. 常時微動観測のアレイ観測

3. 1 アレイ観測に基づくS波速度構造の推定

鉛直動を対象としたアレイ観測で得られたデータに空間自己相関法(SPAC法)を適用して Rayleigh 波位相速度を求めた．微動のスペクトルの算出に際しては，2048 個のデータを 1 フレームとし，512 個をオーバーラップさせながら，収録データから約 16 個のフレームを取り出した．この操作により，Rayleigh 波の位相速度の期待値と標準偏差が計算できる．また，正三角形アレイでは，中心と頂点のペアならびに頂点間のペアでコヒーレンスが計算できるので，三種類のアレイ半径で観測を行った場合，合計 6 種のアレイ径に基づく位相速度を算出することができる．これら 6 種の位相速度から，周波数(波長)ごとの連続性ならびに標準偏差を考慮して，1 本の位相速度曲線とその分散を選定した．さらに，アレイ中心で観測される H/V スペクトルは，Rayleigh 波の水平動と鉛直動によるものと仮定する．本研究では，アレイ観測から得られる Rayleigh 波の位相速度と H/V スペクトルをターゲットとし，次式で示す適応度関数 F を最大にする S 波速度構造を推定する．

$$\frac{1}{F} = \sum_{i=1}^{N_i^c} \left(\frac{C_i^O - C_i^C}{\sigma_i^C} \right)^2 + w \sum_{j=1}^{N_j^{H/V}} \left(\frac{H/V_j^O - H/V_j^C}{\sigma_j^{H/V}} \right)^2 \quad (1)$$

ここに C_i^O : アレイ観測による i 番目の周波数の Rayleigh 波位相速度， C_i^C : 理論位相速度， σ_i^C : C_i^O に対応する標準偏差， H/V_j^O : アレイ中心の j 番目の周波数に対応する観測 H/V スペクトル振幅， H/V_j^C : Rayleigh 波基本モードの理論 H/V 振幅比， $\sigma_j^{H/V}$: H/V_j^O に対応する標準偏差， w : 位相速度と H/V 振幅の重みを調整する係数であり，今回は，比較する各周波数で位相速度と H/V 振幅ともに 1σ にあたる誤差の合計が 1 になるように設定した．

Haskell の方法によって Rayleigh 波の理論位相速度および水平鉛直振幅比を算出する場合，地盤各層の層厚，密度，S 波および P 波速度が必要となる．このうち，密度は事前情報などから設定した値に固定し，P 波速度については，狐崎による経験式 ($V_P = 1.11 V_S + 1290$) により S 波速度と連動させる．以上の仮定から，地盤各層 L の層厚 H_L ならびに S 波速度 V_{SL} が残るが，本研究ではこれらを直接推定対象とはせず，その初期値からの修正率 Ch_L および Cv_L を求めるものとする．その際，修正率の上下限

は、 $\pm 30\%$ に設定した。式(1)を最小化する最適地盤モデルの探索には、遺伝的アルゴリズムを選定した。また、観測地点のS波速度構造の初期推定モデルは、長尾・紺野による、Rayleigh 波位相速度と平均S波速度との統計分析結果を利用して設定した。初期モデル作成に際しては、第3紀層を基盤とし、沖積層を2層、洪積層も2層の4層モデルとして設定した。なお、初期モデルの設定法ならびに遺伝的アルゴリズムの詳細については、筆者らの文献を参照されたい。

図-4および5の○印は、田島川測線の断層を中心として、両側に約600m離れた地点で実施したアレイ観測から求められた位相速度および三成分観測から求めたH/Vスペクトルを示している。図-4、5の実線は、最適化されたS波速度構造による理論値であり、位相速度なら

びにH/Vスペクトルともに、観測結果を良好に再現しており、推定されたS波速度構造が妥当であることを示すものと考えられる。図-6はS波速度構造の初期値および最適値であるが、断層の西側では東側に比較して、沖積層最下面で2m、洪積層最下面で16m程度低く推定されている。断層の両側では、古い層ほど段差が大きいといえるが、福井地震断層が継続的に活動してできた断層構造であるとは即断できない。

3. 2 H/Vスペクトルの卓越周期とアレイ観測に基づく第四紀地盤構造の推定

三成分観測から求められた二つの卓越周期と、アレイ観測によって推定されたS波速度構造を基に、以下のようにして三成分観測地点直下のS波速度構造を補間した。①三成分観測地点のS波速度および沖積層ならびに洪積層内の境界構造は、周辺のアレイ観測地点からの距離の2乗の逆比例する重み付け平均により推定する。②三成分観測地点の T_a 、 T_q を拘束条件として、4分の1波長則に基づいて地点ごとのS波速度構造を推定する。図-7のプロットは、沖積層の第1、第2層および洪積層の第1層、第2層の下面深度を示している。図-3に示した卓越周期 T_q の傾向に比較して、東西方向の深度の変化が小さくなっている。これは、測線の東側は礫を多く含んだ扇状地が広がっているため、アレイ観測から求められたS波速度大きくなることによるものである。三角形でプロットしている沖積層について

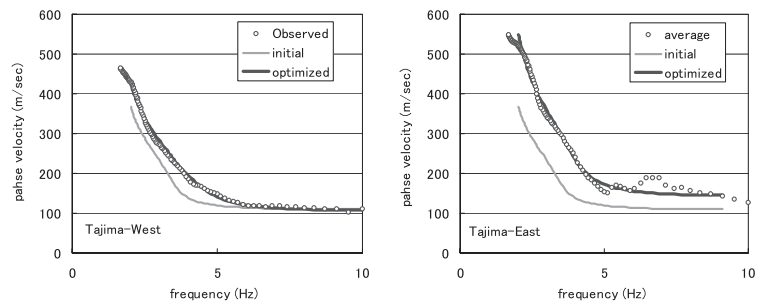


図-4 観測位相速度と理論位相速度の比較

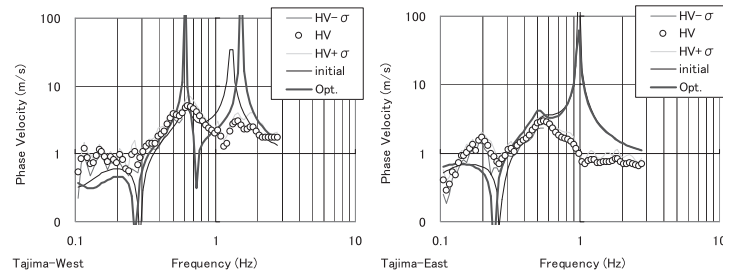


図-5 観測H/VとRayleigh波の理論H/Vの比較

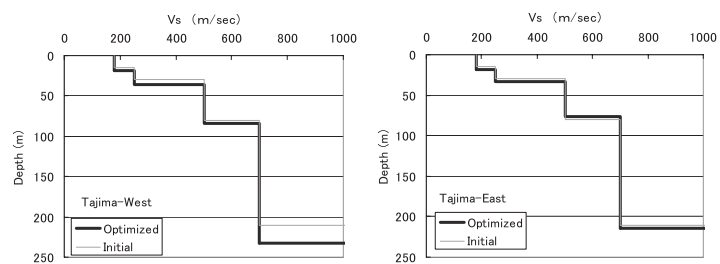
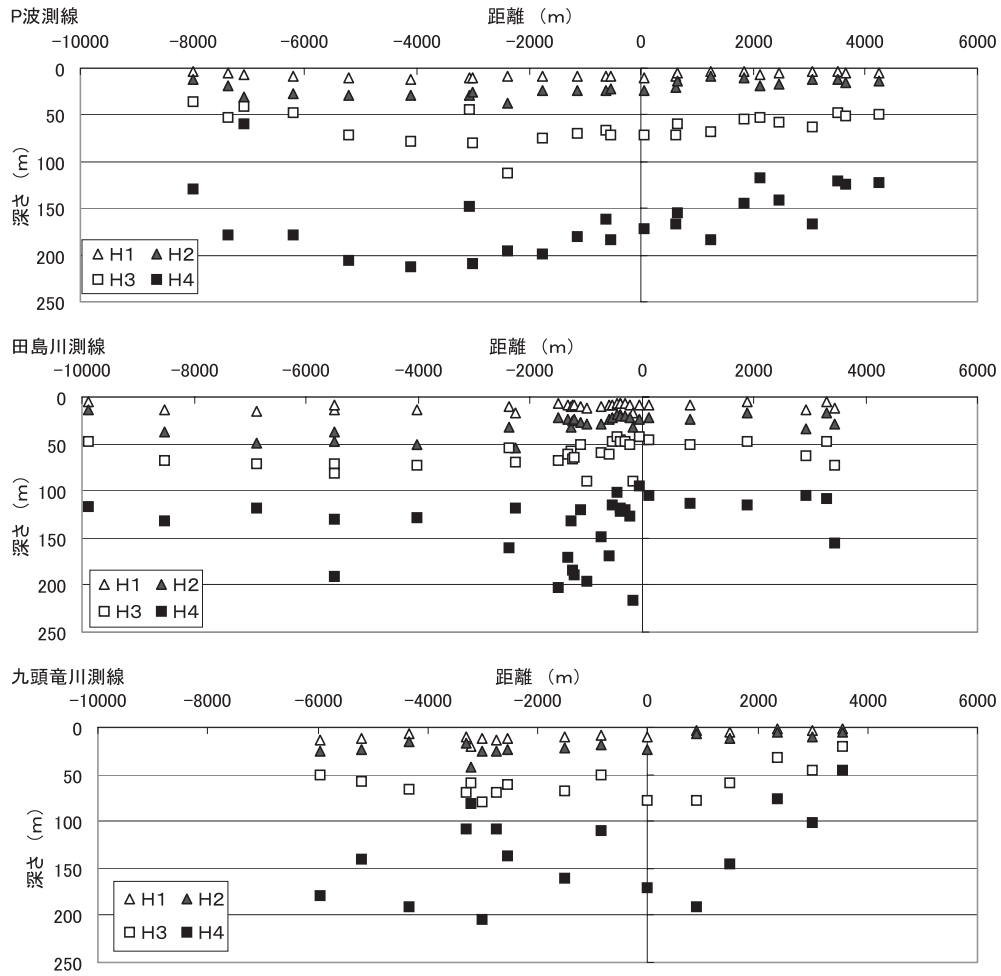
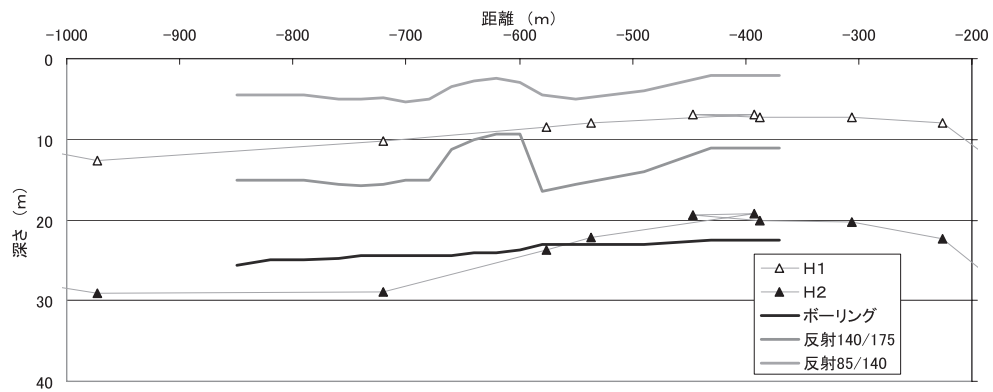


図-6 アレイ観測地点のS波速度構造の初期値および最適値



図－7 卓越周期とアレイ観測による推定 V_s に基づく第四紀地盤構造断面



図－8 田島川測線の板叩き法およびボーリングに基づく構造との比較

は、山麓から扇状地が広がる平野の東側から、氾濫原および三角州と続く西に向かって、比較的連続的かつ単調に厚くなる傾向が認められる。また推定された沖積層の最大厚さは 40m 程度であり、既存のボーリング情報と調和的である。一方、四角でプロットした洪積層厚さについては、いくつかの観測地点

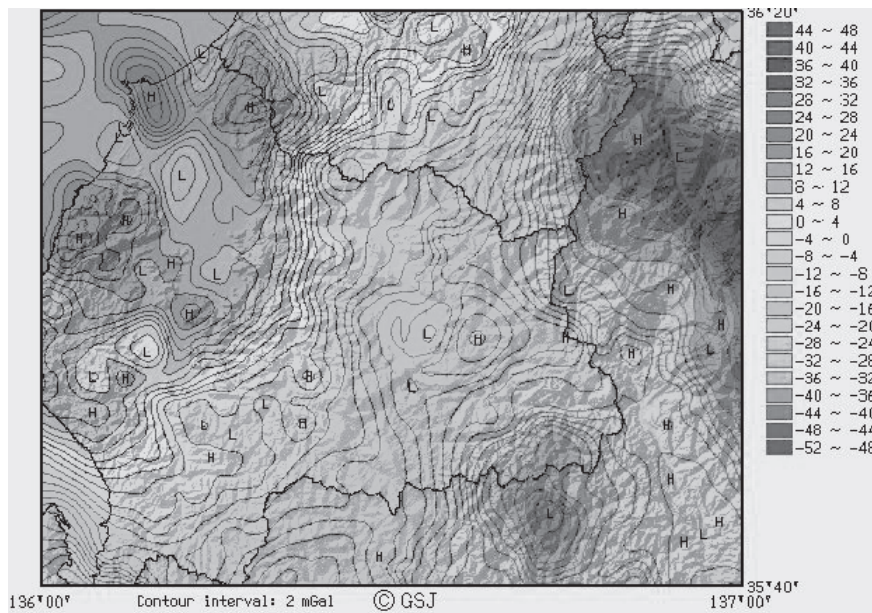
で、推定値が周辺に比較して不連続な地点が認められる。これはH/Vスペクトルの長周期側の卓越周期 T_q が明瞭でなく、卓越周期の判定に誤読があったことを示すものと考えられる。しかしながら、推定構造全体を眺めると、3つの測線の東西断面構造とも、下層すなわち堆積年代が古い層ほど、断層を挟んだ東西両側で食い違いが大きくなる傾向が見受けられ、断層活動を示唆しているようにも受け取れる。

先に示したように田島川測線の中央部では、天池らによる板叩き法による浅部探査と、岡本らによるボーリング調査が実施されている。図-8は、彼らの示した構造と、常時微動に基づく東西断面構造を比較したものである。天池らは板叩き法により、S波速度を表層から85, 140 および 175m/sec の3層を読み取り、それぞれの境界を図のように設定している。また、岡本らボーリング調査からは、洪積層上面を読み取り図示した。本研究では、沖積層を2層に区分しているため、天池らの3層構造とは直接比較できず、また-600m付近に見られるS波速度構造の不連続は再現できていない。しかしながら、東から西に向かって沖積層第1および第2層が系統的に深くなること、沖積層最深部はボーリングによる構造と近いことなど、田島川周辺の沖積層の基本的な構造は推定できていると考えられる。

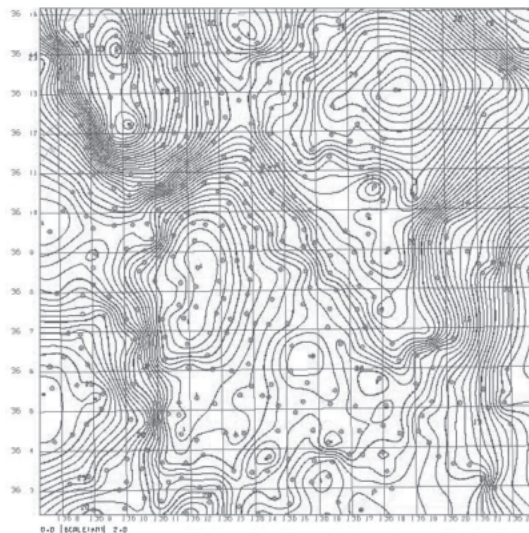
4. 重力異常に基づく基盤構造の推定

重力異常観測データは、産業技術総合研究所地質調査総合センターより公開されている日本重力CD-ROM 第2版に収録されているデータを用いた。重力異常の地形補正を行なう際には、国土地理院による数値地図250mおよび50mメッシュ（標高）を利用した。観測された重力異常から、基盤構造を算出する際には、駒澤によって開発された手法^{9), 10)}を利用した。その手順の概要を以下に示す。1) 観測重力データから、対象領域の値を取り出し、広域(250mメッシュ)および狭領域(50mメッシュ)の地形補正を行なう。2) 上方接続残差比較法(CVUR法)により重力基盤の密度の最適化を行なう。3) 最適密度を用いたブーゲー重力異常分布を算出する。4) 重力基盤と堆積層の密度差を設定し、露頭ならびに、ボーリングやアレイ観測結果から基盤深度が既知である地点をコントロールポイントとして、重力基盤深度を推定する。CUVR法を適用した結果、重力基盤の最適密度としては 2.67g/cm^3 が得られた。本研究では、福井平野周辺の重力基盤構造としては、第三紀層以深の重力基盤上に、第4紀層が堆積する2層構造を仮定し、両者の密度差を 0.57g/cm^3 として基盤構造の推定を行なった。また、コントロールポイントとしては、断面両側の山地の標高を基盤露頭地点として設定した。

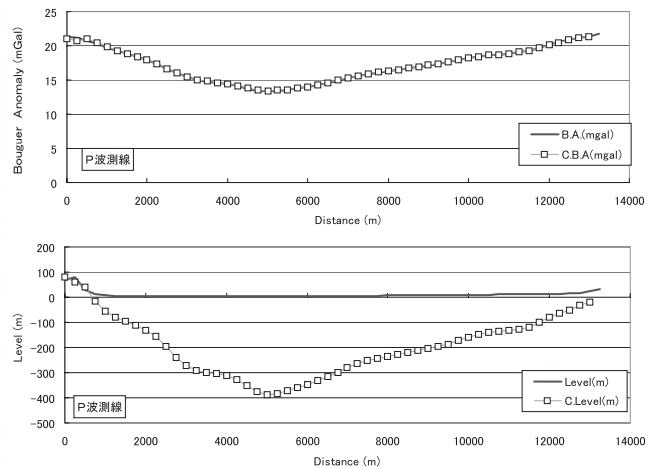
図-9は、日本重力CD-ROMに収録されている福井県周辺のブーゲー重力異常(仮定密度= 2.67g/cm^3)分布である。岐阜県から日本海に至る南東から北西にかけて、地下深部の構造に起因すると考えられる重力異常が負から正に系統的大きくなるトレンドが認められる。図-10は、重力異常解析に際し、細部の地形補正を施した対象地域周辺のブーゲー重力異常分布である。なお、図中のプロットは重力異常の観測点を示す。図-9ならびに10より、三国周辺の第三紀堆積岩の広がる地域および丹生山地周辺に重力異常の高まりが見られ、福井平野周辺には第4紀堆積層に起因すると思われる負の重力異常が認められる。図-11は春江測線(P波測線)を含む東西断面について、重力異常から基盤構造の推定を行なった結果である。上の図は、P波探査測線における観測ブーゲー異常値(○)と基盤深度の最適化を行なった理論重力異常(実線)との比較である。断面全体で両者の誤差はほとんど判読できず、最適化された基盤深度により観測重力異常が制度良く再現できていることが分かる。同図の下図は、



図－9 福井県周辺のブーゲー重力異常分布（仮定密度＝2.67g/cm³）日本重力 CD-ROM より



図－10 測線周辺のブーゲー重力異常分布
（仮定密度＝2.67g/cm³）



図－11 卓越周期と推定 Vs に基づく
第四紀地盤構造

地表面ならびに基盤面の標高分布を示している。P波測線に対応する福井平野の基盤の東西断面構造は、平野中央より西側に最深部を有するすり鉢状で、その最大深度は約 380m となっている。この値は、福井県⁴⁾ が地震被害予測に使用した深度 200m の約 2 倍となっている。

図－12 は 3 つの測線の基盤深度の東西断面構造を示しており、■が常時微動，○が重力異常から求められた本研究による推定結果を，△で示す弾性波探査ならびに灰色太線で示す福井県の設定している地盤モデルと比較したものである。P波測線についてみると、微動から求めた基盤深度は、福井県のモデルに近く、平野中央部では重力異常に基づく深度に比べてかなり小さくなっている。最も確からしいと思われる P波探査による、第三紀基盤によるものと解釈されている反射面と比較した場合、微動に基

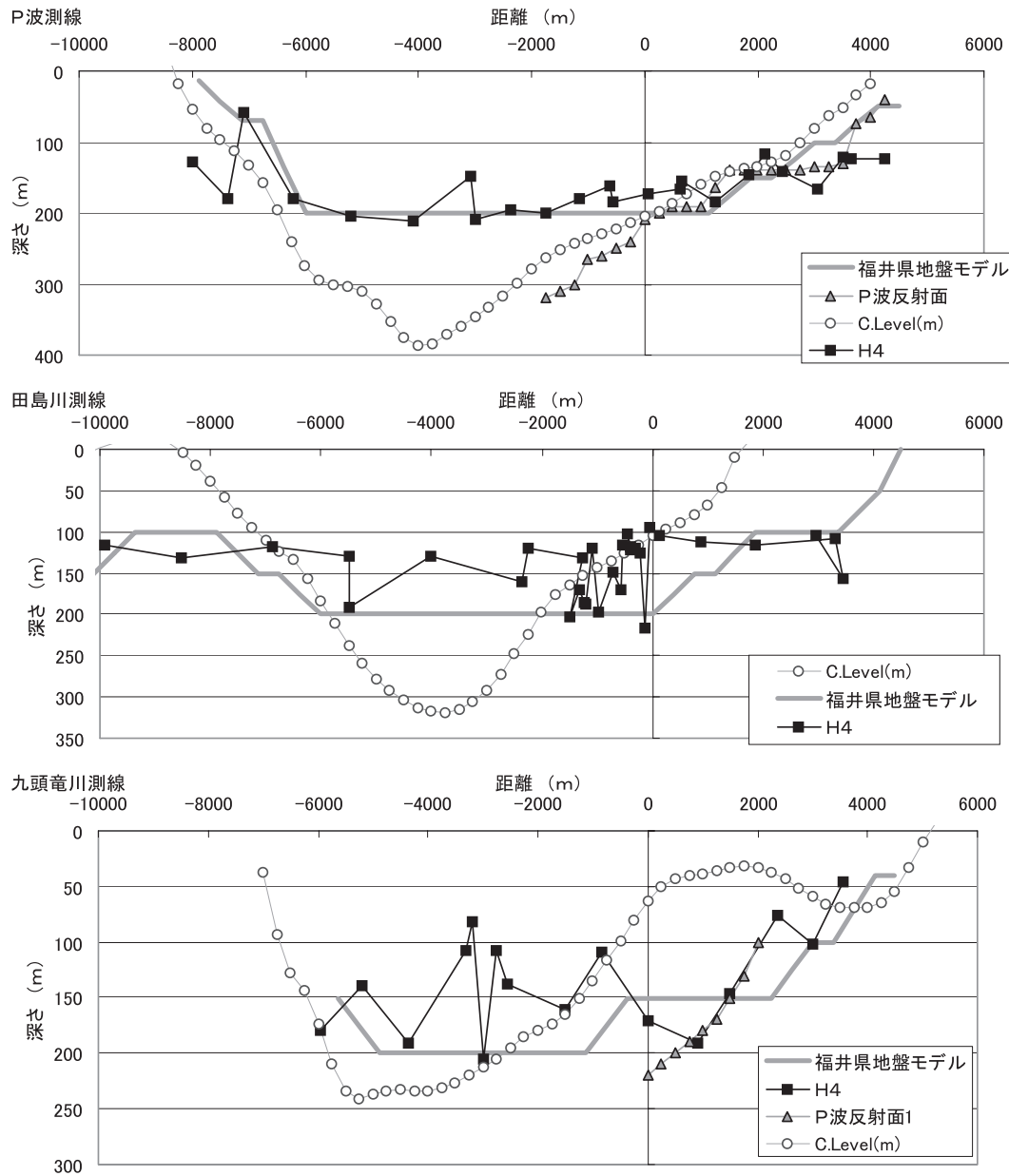


図-12 常時微動および重力異常に基づいて推定された基盤構造

づく基盤深度は東端部で大きな隔たりが認められる．このような結果が得られた一つの要因として，図-1で示したように，P波測線の東側でアレイ観測が実施されておらず，遠方のアレイによるS波速度の推定値を用いたことが考えられる．一方，重力異常に基づく構造と反射面は類似した傾向を有していることが確認できる．田島川測線の断面についてみると，微動に基づく基盤構造は福井県の地盤モデルと類似しているものの，重力異常に基づく基盤深度は断層の東側で地表面に達しており，矛盾した結果が得られていることが確認できる．重力異常に基づく構造については，福井平野周辺を第4紀層とそれ以

深の基盤という単純な2層モデルで仮定しているのに対し、実際は、基盤自体が平面的に不均一であり、第三紀堆積岩や中古世代の火山岩の密度構造を考えていないことが要因の一つとして考えられる。一方、九頭竜川測線についてみると、微動に基づく構造は不連続が大きいものの、福井県が設定しているモデルと近い値が得られていること、井上らによるP波探査が行なわれている0~2000mの範囲では、反射面と調和的な構造が求められていることなどが確認できる。

4. あとがき

本研究では、福井地震断層を対象とした既存の弾性波探査測線周辺で実施した、常時微動のアレイ観測と三成分観測データならびに重力異常観測情報を用い、断層の活動に起因すると思われる地下構造の解明を試みた。常時微動観測からは、Rayleigh波の位相速度構造とH/Vスペクトル特性を求めるとともに、位相速度のインバージョンから求められたS波速度とH/Vスペクトルから算出した卓越周期に基づいて、断層周辺の第四紀構造を構造の推定を行った。また、重力異常に行いては、基盤密度および堆積層との密度差の最適化を行ない、各測線上の第3紀層上面深度の東西断面を算出した。常時微動観測から推定された第四紀堆積構造を、既存のボーリングデータ、重力異常、弾性波探査情報などと比較し、以下の知見を得た。

- 1) 福井地震断層周辺で得られた常時微動のH/Vスペクトルからは、沖積層最下面に起因する短周期側の卓越周期 T_a と、第4紀層最下面に起因する長周期側の卓越周期 T_q が読み取られた。
- 2) 常時微動アレイ観測に空間自己相関法を適用してRayleigh波の位相速度を求めるとともに、位相速度とH/Vスペクトルをターゲットとする逆解析を実行することにより、観測点直下のS波速度構造が推定できることを確認した。
- 3) アレイ観測から推定されたS波速度構造と、H/Vスペクトルの卓越周期を4分の1波長則に適用することにより、三成分観測地点のS波速度構造を推定できることを確認した。
- 4) 常時微動観測から求められうる第4紀層構造は、既存の弾性波探査および重力異常から求められる構造と大きな矛盾のないことを確認した。

福井平野の東西方向に連続的に実施した微動観測結果から、福井地震断層直交法の沖積層および第4紀層の系統的な傾斜構造が得られた。その地盤構造は、福井平野の広域的な構造を反映しており、既存データと概ね一致する傾向を示すことが確認できた。しかしながら、本研究の常時微動観測から地下構造を推定する方法は、観測点直下周辺で地盤が水平堆積構造であることを仮定している。このため、断層に伴う不連続構造を直接推定することはできない。したがって、断層による明確な食違い構造を評価するためには、アレイ半径と水平方向の構造分解能との関係を明らかにするとともに、傾斜構造を考慮できる表面波理論を導入するなどの、観測および理論の改良も必要と考えられる。

参考文献

- 1) 天池文男, 竹内文朗, 1989, 福井地震断層の弾性波探査, 月刊地球, Vol.11, pp.19-25.
- 2) 井上直人, 中川康一, 1999, 福井地震断層付近の地下構造調査, 地震, 第2輯, 第52巻, 161-169.
- 3) 衣笠善博, 荒井克彦, 鳥海勲, 山本博文, 安藤雅孝, 平野憲雄, 1999, 福井平野下の活断層について

て (序報), 地震, 第 2 輯, 第 52 卷, 171-176.

- 4) 福井県県民生活部, 1989, 福井県地震被害予測調査総合報告書.
- 5) 岡本拓夫他, 1989, 福井地震断層周辺でのボーリング調査, 月刊地球, Vol.11, pp.26-30.
- 6) 小嶋啓介, 山中浩明, 2004, 常時微動観測に基づく福井平野の第四紀層構造の推定, 土木学会論文報告集, No.752/I-66, pp.217-225.
- 7) 小嶋啓介, 山中浩明, 2003, 観測地震動に基づく福井平野の地下構造の推定, 応用地質, 第 44 巻, 第 2 号, pp.94-103.
- 8) 小嶋啓介, 辻森卓実, 苗加一典, 2004, 常時微動観測に基づく福井平野東西断面の S 波速度構造の推定, 応用力学論文集, Vol.7, pp.119-128.
- 9) 駒澤正夫, 1984, 北鹿地域の定量的重力解析について, 物理探鉱, 第 37 巻, 3 号, pp.19-30.
- 10) 駒澤正夫, 1988. 長谷川功: 関東地方の重力基盤に見える断裂構造, 物質学論集, 第 31 号, pp.57-74.