

論文

常時微動観測に基づく敦賀平野の
S波速度構造の推定

小嶋 啓介*・野口 竜也**・佐藤 毅***・黒田 貴紀****

Estimation of S-wave Velocity Structure of
Tsuruga Plain Based on Microtremor ObservationKeisuke KOJIMA*, Tatsuya NOGUCHI**,
Takeshi SATHO*** and Takanori KURODA****

Abstract

The accurate estimations of Quaternary structure are indispensable in order to accurately predict the seismic damage of the region. However, around the Tsuruga Plain, subsurface investigation information such as the S-wave velocity structure hardly exists. The problems analyzed in this study are estimations of 3D Quaternary configuration of the Tsuruga Plain using the data from microtremor observations. Microtremor array observations have been conducted at twelve sites in order to determine the S-wave velocity structure. The phase velocities at each site were inverted to a vertical S-wave profile using a genetic algorithm. To interpolate the array observations, the 3-components microtremor observations were carried out at 58 points. The 3D configuration models of Quaternary have been evaluated by using geo-statistical procedure. By comparing with the inverted structure of gravity anomaly observation and with the existing data, the validity of the estimated structure was examined.

キーワード：敦賀平野，常時微動観測，位相速度，H/V スペクトル，S波速度構造

Key Words：Tsuruga Plain, microtremor observation, phase velocity, H/V-spectrum, S-wave velocity structure

* 福井大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, The University of
Fukui
** 鳥取大学工学部
Faculty of Engineering, Tottori University

*** 塩浜工業（株）
Shiohamakougyou Co.,LTD
**** 須山建設（株）
Suyama Kensetsu Co.,LTD

本論文に対する討論は平成20年11月末日まで受け付ける。

1. まえがき

敦賀平野は東西、南北とも約5 kmと比較的小規模であり、敦賀市の人口も約7万人にすぎないが、重要港湾である敦賀港を擁し、周辺を北陸本線、北陸自動車道、国道8号線などが通過し、原子力発電所も隣接した要衝である。一方で、敦賀市はいわゆる近畿三角帯の北部頂点付近を占める位置にあり、周辺には柳ヶ瀬断層や甲楽城断層のように総延長が20 kmを越える大規模な断層も存在している。また敦賀平野自体が、南東の敦賀断層と南西の野坂断層を境界とし、敦賀湾の沈降とともに、笙の川、黒河川などが形成したものと考えられている¹⁾。以上のように、敦賀市は防災戦略面から見て非常に重要な都市であることに加え、平野周辺には比較的活動度の高い活断層が密に分布しており、地震被害予測²⁾を早急に行うべき地域の一つであると考えられる。

近年、敦賀平野周辺の敦賀断層、野坂断層、美方断層ならびに柳ヶ瀬断層などについてのトレンチ調査³⁾があいついで実施され、活動履歴の一部が明らかにされた。しかしながら、地震被害予測に不可欠な敦賀平野周辺の動的地盤構造の解明を目的とした弾性波探査やPS検層はほとんど実施されておらず、洪積層以深に達する大深度ボーリング情報なども蓄積されていない。

本論文では、敦賀平野の地震被害予測の基礎資料を与えることを目的とし、常時微動観測情報に基づいて、敦賀平野の震動特性の評価と、S波速度構造の推定を行なっている。はじめに常時微動の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た。また、観測位相速度をターゲットとしたS波速度構造の最適化を行ない、観測点直下の地盤構造の推定を行なった。ついで、アレイ観測を補間するために、微動の三成分観測を実施し、そのフーリエスペクトルならびにH/Vスペクトルから、観測地点の卓越周期特性を評価するとともに、アレイ観測から求めた沖積層および洪積層の平均S波速度を援用して、観測点ごとの第四紀層堆積深を推定した。さらに、常時微動から推定した観測点ごとの地盤構造をサンプルとし、地盤統計手法(Co-Kriging法)

を適用して、敦賀平野の三次元地盤構造を求めた。また、重力異常からも基盤深度を求め、既存資料および推定構造相互の比較検討を行った。

2. 敦賀平野の微動特性と観測位相速度

2.1 常時微動観測

図1は敦賀平野の地形図上に微動観測点を示したものであり、国土地理院の数値地図⁴⁾50 mメッシュ(標高)と地図表示ソフトウェアカシミール⁵⁾を用いて作成した。同図中の▲はアレイ観測と一点三成分観測点を実施した地点、□は単独の三成分観測を実施した地点(HV+No.で表記)を表している。また、岩盤露頭と平野内の同時三成分観測も実施した。図1の◎で示すHH-B1は、○で示す平野内観測点HH-1～HH-12の基準点、同様にHH-B13はHH-14～HH-24までの基準点である。図2は、敦賀平野周辺の微地形区分¹⁾を示している。同図の東西方向のアルファベットで示す列は経度の45秒ごと、南北方向の数字で示す行は緯度の30秒ごとの区分を示しており、東西、南北方向の最小区分はそれぞれ、11.25秒および7.5秒に対応している。この分割は敦賀平野を約250 mメッシュで区分したことに相当している。図1, 2より、敦賀平野は平野周辺から敦賀湾へと流下する河川によって形成され、上流側には扇状地、中流域には氾濫原、最下流側には浜堤が発達するという典型的な沖積平野地形を有していることが確認できる。

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⁶⁾。各加速度検出器の固有周波数は3 Hzであり、概ね0.3～40 Hz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, 40 mの3セットを基本とし、観測地点の状況に応じて、3 m～40 mの範囲で大、中、小の3種の半径を設定した。アレイ観測は日中に

行ったが、自動車の通過等による擾乱があると判断される場合には、計測をやり直した。なお、サンプリング間隔は0.01sで、約26,000個の上下動を収録した。

三成分観測については、ノイズの少ない4,096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⁷⁾を算出した。同時三成分観測では、各観測点の水平動を露頭観測点の水平動で基準化したH/Hスペクトルも求めた。図3は、アレイ観測を実施した地点の単独および同時三成分観測から得られたフーリエスペクトルとH/VおよびH/H

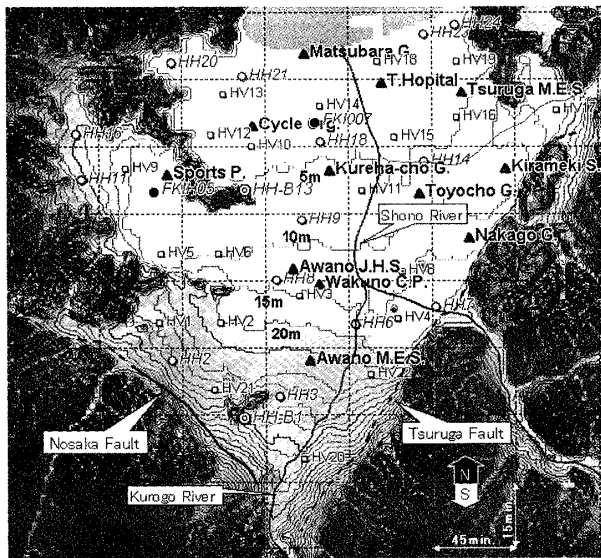


図1 敦賀平野の地形と常時微動観測点

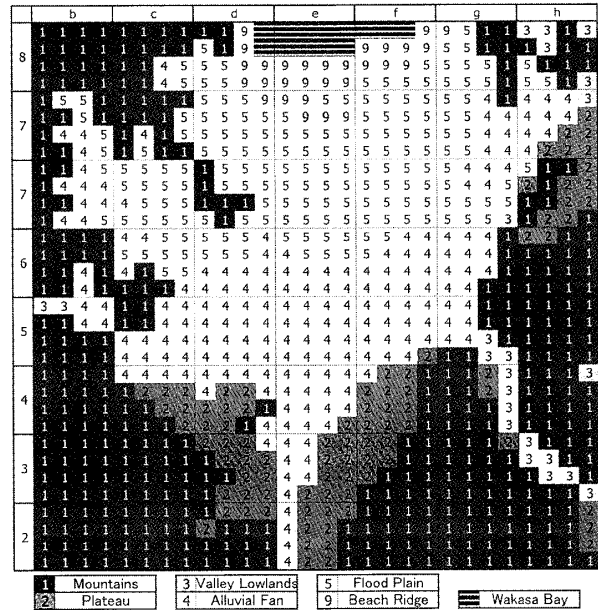


図2 敦賀平野の微地形区分

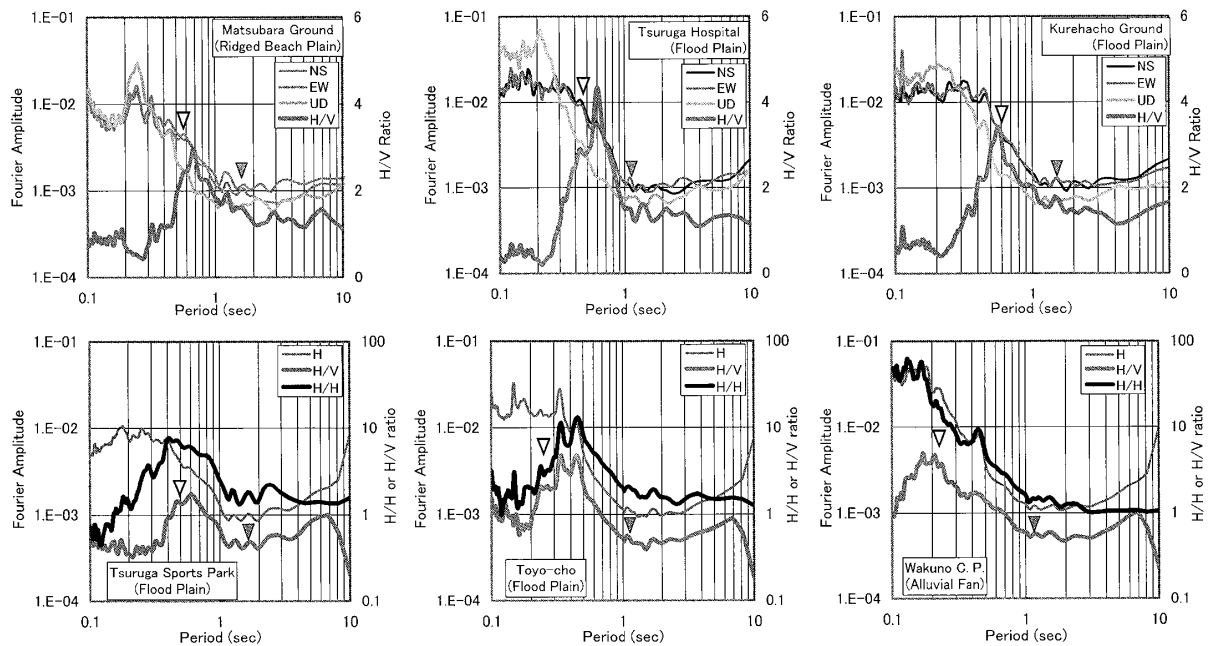


図3 三成分観測によるフーリエスペクトルとH/Vスペクトル

スペクトルの一例である。左上から右下にかけて、海岸から山麓方向に並べており、各観測点名および微地形区分は図中に併記されている。これらの図より、H/VとH/Hの類似性が高いこと、どのH/Vのスペクトルからも、周期0.2～1.0sの範囲に明瞭なピークが認められ、そのピーク周期付近で水平動のフーリエスペクトルも極大値となっていることが確認できる。一方、周期0.7～2.0sでは、不明瞭ながら第2のピークが認められる。例えば敦賀病院では、0.6sに明瞭なピークがあり、1.3s付近に第2のピークが認められる。なお、第2のピーク周期が複数存在する場合には、福井県が地震被害予測に際して使用した地盤モデル²⁾ (以後福井県モデルと呼ぶ) に4分の1波長測を適用して算出される値に近いピーク周期を選択した。筆者らが別途実施した、福井平野における約200箇所での観測された微動スペクトル特性の分析⁸⁾から、短周期側と長周期側の2つの卓越周期は、沖積層と第四紀層最下面に起因することを確認している。図3に示した▽と▼印は、後述するアレイ観測に基づく最適地盤構造に4分の1波長測を適用して得られる、沖積層および第四紀層最下面に対応する卓越周期を示している。これらの値は、H/Vスペクトルから読み取られるピーク周期に概ね対応しており、敦賀平野でも福井平野と同様に、コントラストの大きな2つの地層境界に起因した卓越周期が観測されたものと仮定し、4章の第四紀層厚の推定に利用する。

2.2 Rayleigh 波位相速度

本研究では、空間自己相関法⁹⁾ (SPAC法)を用いて、微動アレイ観測からRayleigh波の位相速度を算出した。これは、SPAC法の方が周波数-波数法¹⁰⁾より算出される波長範囲が広いとされること、円周上に検出器を配置する必要があるという制約はあるものの、3～4個の検出器で、安定した解析が可能であることを考慮したものである。位相速度算出手順は、松岡ら¹²⁾に習ったが、その詳細はここでは省略する。微動のスペクトルの算出に際しては、2,048個のデータを1フレームとし、4分の1にあたる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。これにより、空間自己相関係数ひいては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、通常を中心と各頂点間とともに、三辺の両端をアレイの中心と頂点とみなしても、3組のコヒーレンスが計算できる。したがって、5, 15, 40mのアレイ半径で観測を行った場合、辺長として8.7, 26.0および69.3mが加わり、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。

図4の○印は、図3に対応する観測点の微動アレイ観測記録に空間自己相関法を適用して求められた周波数ごとの位相速度である。観測位相速度の上下の灰色細線は位相速度の標準偏差を示している。これらの位相速度曲線は、6種類のアレイ半径から求められる位相速度を、連続性と標準偏差を考慮して、不安定な部分を除いてまとめて示したものである。本研究の観測システムおよびアレイ半径では、位相速度を算出できる最低周波数は概ね2.0Hz程度であることが分かる。和久野中央公園の3.5Hz付近のように、やや不連続で標準偏差も大きい地点も見受けられるが、全体的には周波数の増加とともに位相速度が減少する正の分散性が見られ、Rayleigh波の基本モードに対応する位相速度が検出できたものと判断できる。氾濫原に区分される敦賀病院、呉羽町グラウンド、敦賀運動公園では、地下浅部のS波速度に依存すると思われる10Hz付近の位相速度は120～210m/s程度であり、やや深い構造に起因すると思われる2Hz付近の位相速度は400～800m/sであるのに対し、扇状地に属する和久野中央公園では、それぞれ、300～400m/sおよび600～1,000m/sと明らかに大きい。東洋町グラウンドは氾濫原に区分されているが、扇状地の末端に近く、位相速度も大きい傾向が認められる。敦賀運動公園は、山麓に位置するにもかかわらず、他の氾濫原に属する観測点に比較して明らかに小さな位相速度が算出されている。この地点付近は、敦賀平野中央やや西側に位置する半島状山塊によって、主な河川から陰になっており、福井県モデルでも有機質土の軟弱層を対応させており、小オボレ谷跡として形成さ

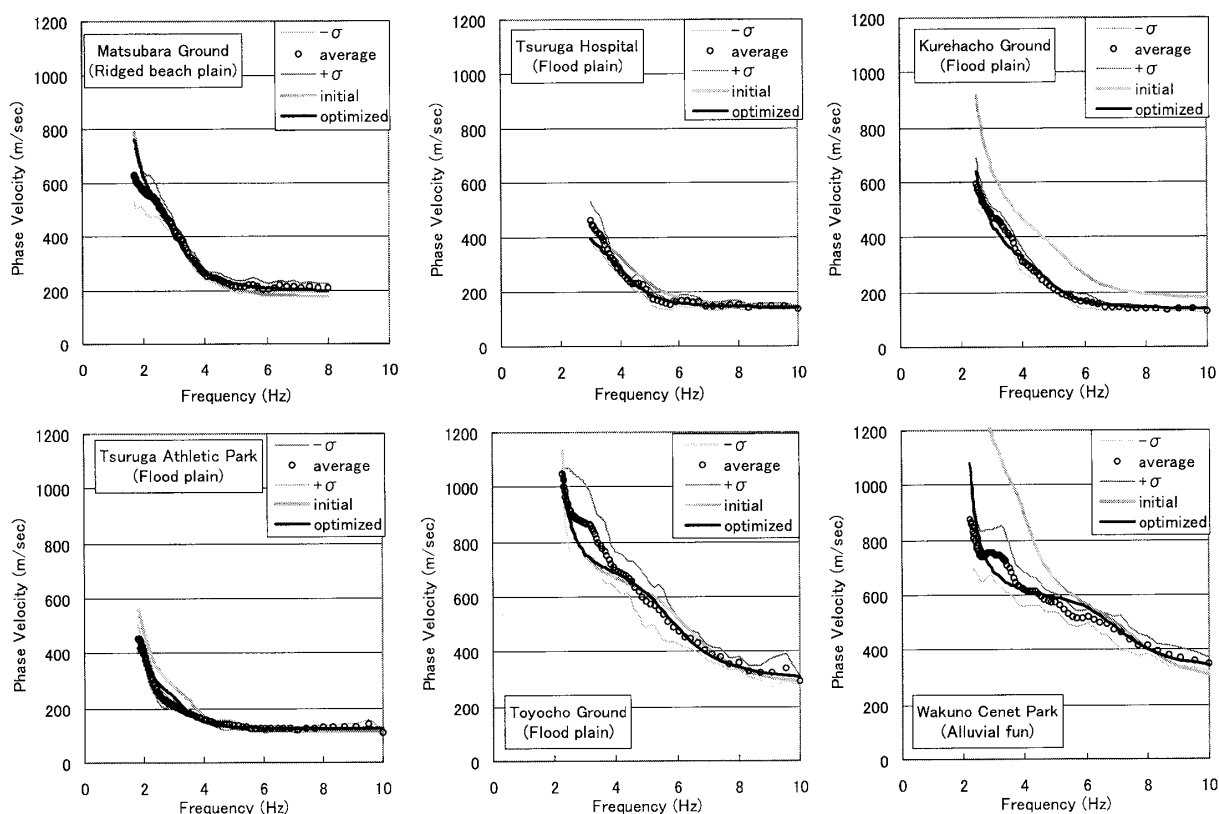


図4 アレイ観測に基づく位相速度と最適地盤構造による理論位相速度の比較

れた可能性を示唆するものと思われる。海岸に近く浜堤に属する松原グラウンドの高周波域の位相速度は、敦賀病院や呉羽町グラウンドに比較してやや大きく算出されており、表層の砂層の影響を示唆するものと思われる。以上より、アレイ観測から求められた位相速度は、微地形ごとの特徴と矛盾が少なく、実際の地下構造を概ね推定できているものと判断できる。

3. アレイ観測点のS波速度構造の推定

3.1 S波速度構造推定法の定式化

アレイ観測情報に基づいて、観測点直下の動的地盤構造を推定しようとする場合、Rayleigh波位相速度およびH/V特性などをターゲットとし、事前に設定したS波速度構造を、何らかの最適化手法によって修正しようとする研究が一般的である^{例えば13)}。本研究でも次式で表す、観測位相速度 c_i^o と計算位相速度 c_i^c の差を、観測位相速度の標準偏差 σ_i で基準化した誤差の二乗和の逆数を適応度関数 F に設定し、その最大値を与える動的物性定数を探索

する最適化問題として定式化する。

$$\frac{1}{F} = \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{c_i^o - c_i^c}{\sigma_i} \right)^2 \rightarrow \text{minimize} \quad (1)$$

ここに、 i 、 N_f : 比較する周波数の番号および個数を示している。水平堆積を仮定し、Haskell¹⁴⁾の方法によって位相速度を算出する場合、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¹⁵⁾による経験式により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。式(1)を最小化する最適地盤モデルの探索には、次のような遺伝的アルゴリズム¹⁶⁾を選定した。1) 遺伝子は10進数変換時の連続性に優れたグレイコードを用いる。2) 個体の選択には、トーナメント法を採用し、適応度の高い個体が無条件で選択されるエリート選択を併用す

る。3) 遺伝子の交叉には一様交叉を採用した。
4) 層厚およびS波速度の修正率は、0.7~1.3に設定する。これは、層厚およびS波速度が、初期値から±30%の範囲内で修正されることを意味している。

3.2 初期S波速度構造の設定法

上述のような定式化を行なう場合には、最適地盤構造の探索過程で、解の発散や非現実的な収束の発生を避けることができる反面、最適解の初期値への依存度が高くなる。通常は、初期構造を近接地でのPS検層および深層ボーリングなどから設定することが多いが、地方においては探査資料が少なく、初期モデルの設定には困難を伴うことが多い。この解決策として筆者らは、長尾・紺野¹⁷⁾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する方法を提案しており、福井平野における常時微動観測に対する適用結果を報告している¹⁸⁾。長尾・紺野はPS検層実施地点のデータを収集し、深さ5 mごとの平均S波速度と、波長5 mごとの位相速度の関係を表形式で示しており、両者の相関を回帰分析によって求めると次式のように近似できる。

$$\bar{V}_{S_z}^T \cong C_z \leftrightarrow \lambda_n = 1.33Z_n + 1.73 \quad (2)$$

$$\bar{V}_{S_z}^H \cong C_z \leftrightarrow \lambda_n = 2.22Z_n \quad (3)$$

ここに、 $\bar{V}_{S_z}^T$ 、 $\bar{V}_{S_z}^H$ ：走時Tおよび層厚Hによる深さ Z_n までの平均S波速度である。本研究では、この近似が敦賀平野においても成立すると仮定する。走時と層厚平均S波速度を、式(4)と(5)のように表記することにより、式(6)によって深さを設定した区間nのS波速度 V_{S_n} を、地表面から順次下方に向かって設定することができる。

$$\bar{V}_{S_z}^T = \frac{Z_n}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{S_i}}} = \frac{Z_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{H_i}{V_{S_i}} + \frac{H_n}{V_{S_n}}} = \frac{Z_n}{T_{n-1} + \frac{H_n}{V_{S_n}}} \quad (4)$$

$$\bar{V}_{S_z}^H = \frac{\sum_{i=1}^n H_i V_{S_i}}{Z_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} H_i V_{S_i} + H_n V_{S_n}}{Z_n} \quad (5)$$

$$Z_n = Z_{n-1} + H_n = Z_{\min} \cdot 10^{0.01n} \leq Z_{\max} \quad (6)$$

ここに、 H_n ：層厚、 Z_{\min} 、 Z_{\max} ：観測波長と式(2)、(3)から求まる最小・最大深度である。

図5は上記の設定法を、図4に示したアレイ観測から求められたRayleigh波の位相速度に適用し、観測点直下の深さ方向のS波速度分布を推定した結果である。図中の細実線(VT)は走時平均S波速度、細点線(VH)は層厚平均S波速度に基づくS波速度分布である。同図より、層厚平均によるS波速度は、走時平均による値よりやや低く、探索可能深さは小さいが安定的であること、両方法とも浅い部分ではS波速度の増減が大きく、深い部分では安定的となるが、これは深さが大きくなるにつれて分解能が悪化することを意味するものとも解釈できる。また、これらの値の到達深度は、アレイ観測からS波速度構造を推定できる最大深度にほぼ対応するものと考えられる。

図中の細い点線(Ha(H/V)とHq(H/V))は、H/Vスペクトルから求めた卓越周期TaおよびTqと四分の一波長則から求めた沖積層および第四紀層深さを示している。この時、Ta、Tqが、沖積層および第四紀層最下面に起因するものとし、沖積層と洪積層の平均S波速度は、福井平野の平均S波速度⁸⁾である139および525m/sという値を用いた。図5の太い点線は、福井県モデルの沖積層(Ha(Fukui))および第四紀層深度(Hq(Fukui))である。なお福井県モデルは、敦賀平野部では基盤に達する削孔情報がほとんど存在しないため、浅層ボーリング、地形および表層地質に基づいて、典型的な地盤モデルを割り付けたものである。このため、図2に示した範囲で、約500mメッシュごとのモデル地盤は13種類しかなく、基盤深度やS波速度の裏付けも少ない不確実性を含んだものであることに留意しておく必要がある。卓越周期からの推定された境界深度は、松原グラウンドを除いて、福井県モデルと大差のないことが確認できる。図5の灰色の太い実線は、上述の走時および層厚平均S波速度からのS波速度構造推定法に基づき、下記の方針に従って設定したS波速度構造の初期モデルである。すなわち1)す

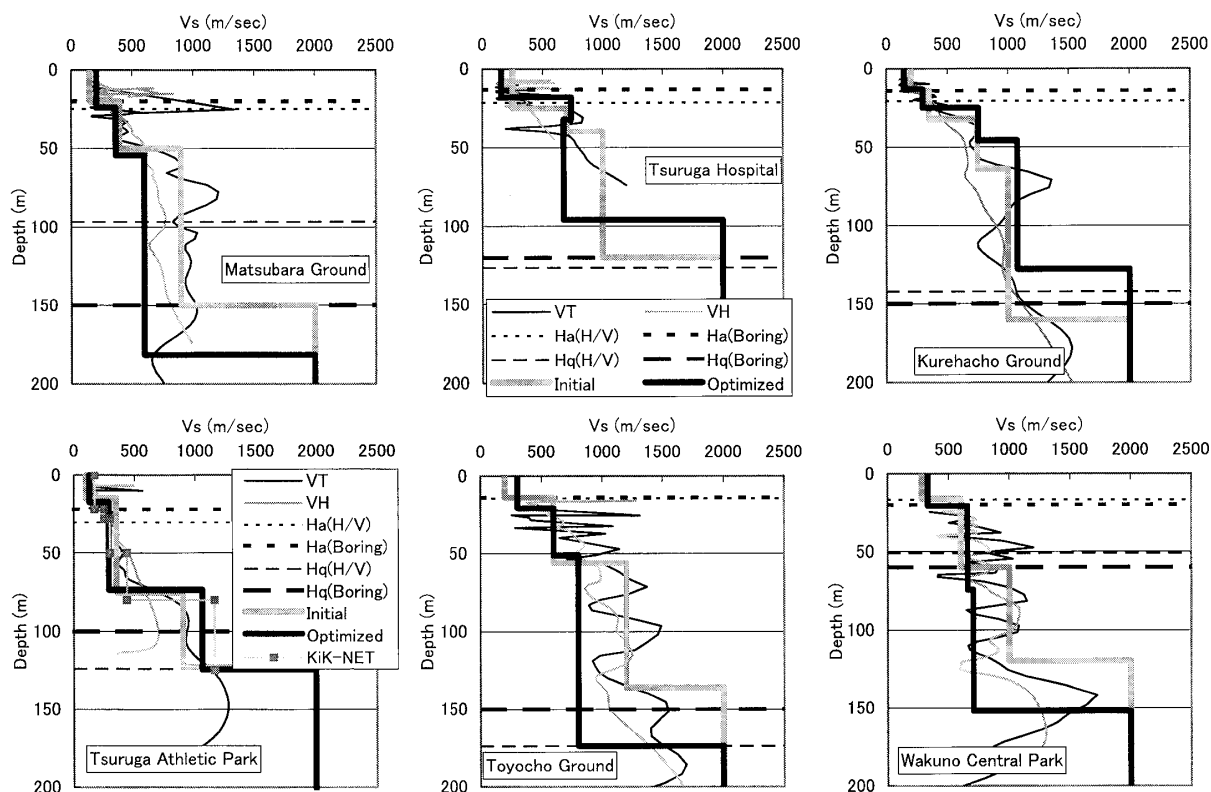


図5 位相速度と平均S波速度の相関から推定された初期地盤モデルと最適地盤モデル

すべての地点で、地下構造推定対象である第四紀層を、最大4層で区分する。基盤のS波速度は、後述する重力解析の最適密度 (2.6g/cm^3) に相当する $3,000\text{m/s}$ に設定した。2) 浅部については、より安定した層厚平均S波速度を、深部は推定限界深度が大きな走時平均S波速度に基づくS波速度分布曲線を主体的に用いる。3) S波速度の急激な増減は、速度境界を通過していることと解釈し、最大勾配深さを層境界とする。4) 敦賀病院のように、位相速度から推定されたS波速度の到達深さが浅いと判断される場合には、 T_q に基づく第四紀層深度を基に、基盤深さを設定する。

3.3 最適計算結果

図5の太い実線は最適化されたS波速度分布を示している。灰色太線で示した初期モデルと比較すると、洪積層深部のS波速度と基盤深度は大きく修正されているのに対し、沖積層付近の浅い部分の構造は、初期構造からの変化が小さいことがわかる。S波速度が 300m/s 以下の層を沖積層と見

なすと、最適化された構造の沖積層深さは、福井県モデルの沖積層深さに対応していることが判る。一方、推定された基盤深度を見ると、福井県モデルおよび卓越周期から推定された深度との一致度はやや低いことが確認できる。なお、敦賀運動公園のアレイ観測点から約 250m 離れた地点に、KiK-net観測点 (FKIH05) があり、PS検層結果が得られている。図5の□印は、深さ 125m まで実施されている検層によるS波速度分布を示している。PS検層では速度区分が多く、 50m 以深のS波速度も若干大きいですが、本推定法は検層速度に近い値を推定できていることが確認できる。

図4の灰色および黒の太実線は、初期モデルおよび最適モデルによる理論位相速度を示している。呉羽町グラウンドと和久野中央公園では、初期モデルによる計算位相速度は観測値より大きめに算出されているが、最適化により観測値を良好に再現できていることが判る。ここで、推定された基盤深度が福井県モデルと異なる和久野中央公園について考察する。同地点は、福井県モデルお

よび T_q から推定される基盤深度が、式(4)、(5)から推定される基盤深度より浅いため、洪積層内の速度境界をその深度に対応させ、下部の速度が大きい初期モデルを設定した。その初期モデルによる位相速度は、図4に示すように観測値に比べて大きく算出された。一方最適構造では、洪積層上部と下部のコントラストが小さく、基盤深度が大きく修正され、観測位相速度を良好に再現している。この例は、初期構造の設定が最善でない場合でも、観測位相速度を良好に再現できる、最適なS波速度構造が推定できた事例の一つと考えられる。

図1に示した山麓の扇頂付近の急傾斜地に位置する栗野南小学校以外の11箇所のアレイ観測地点では位相速度が求められており、同様の最適化計算を行なった。最適化された11箇所のS波速度構造における、沖積層および洪積層の平均S波速度は、それぞれ205, 651 m/sであり、福井平野の値よりやや大きい結果を得た。敦賀平野は福井平野に比較して、地表勾配が大きく山麓から河口までの距離が短いこと、扇状地の占める割合が大きいことなどを考慮すると、矛盾のない傾向が得られているものと判断される。

図6は、最適化されたS波速度構造を、アレイ観測点の微地形区分ごとに示したものであり、左から扇状地、中央2つが氾濫原、右が浜堤の地盤構造を示している。沖積層のS波速度では、扇状地における3地点でいずれも約300 m/sと明らかに大きく、ついで浜堤、氾濫原の順に小さく推定されている。また、図1で示した平野西部の独

立丘付近で、笙の川の影に位置する運動公園とサイクル機構では、沖積層および洪積層上部のS波速度が小さいことに気付く。福井県モデルでは、これらの地域をオボレ谷跡地とし、表層の有機質土と厚い洪積層を想定しており、その特性と調和的な推定結果と解釈できる。

4. 常時微動の卓越周期による敦賀平野の第四紀構造モデルの推定

図2に示す小メッシュごとのS波速度構造を以下の手順で求めた。1) 三成分観測地点の沖積および洪積層のS波速度を、周辺のアレイ観測点の推定速度の重み付き平均として補間する。このとき、アレイ観測点までの距離の二乗の逆数を重みとした。2) 三成分微動観測点のH/Vスペクトルなどから判読された卓越周期 T_a , T_q と、補間されたS波速度を、4分の1波長則に代入することにより、微動観測点の沖積および第四紀層厚を推定する。3) アレイおよび三成分観測地点のS波速度構造をサンプルとし、地盤統計手法を用いてメッシュ点ごとの推定を行なう。著者ら¹⁹⁾は、福井平野の約200箇所の第四紀層構造を検討し、沖積および第四紀層厚と標高には高い相関があることを確認しており、敦賀平野においても同様の相関があるとして、標高データを用いたCo-Krigingによって第四紀層構造を推定する。この場合、被推定点 X_0 (図2の小メッシュの中心点) の層厚 D は、被推定点から半径 R_D 以内に存在する N_D 個のサンプル点 X_k の層厚と、半径 R_E 以内の N_E 個の標高データ点 X_l の標高 E_l を用いて、次式のように

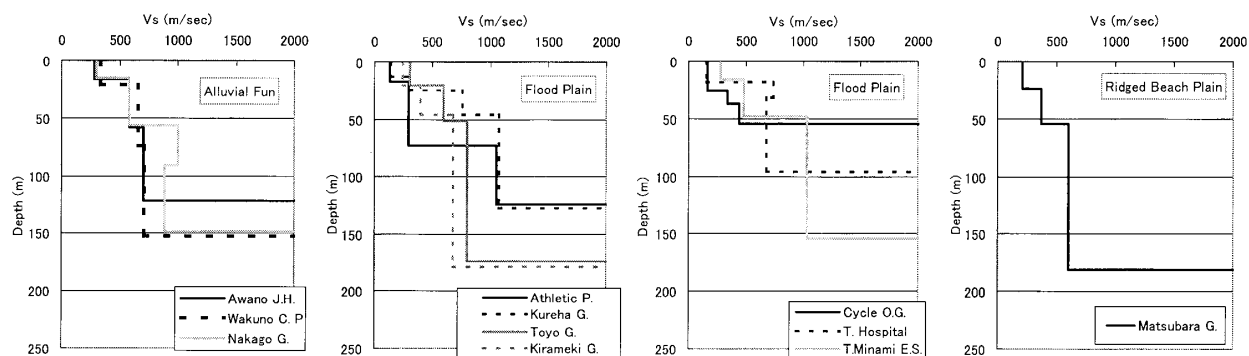


図6 観測位相速度のインヴァージョンによる微地形ごとのS波速度構造

重み付き平均として推定される。

$$D(x_0) = \sum_{k=1}^{N_D} \lambda_{Dk} D(x_k) + \sum_{i=1}^{N_E} \lambda_{Ei} E(x_i) \quad (7)$$

ここに、 λ_{Dk} 、 λ_{Ei} ：サンプル点の層厚と標高に関する重みである。これらの重みは、推定量の不偏性と、推定誤差分散の最小化条件を、Lagrangeの未定係数法を用いて展開された方程式系を解くことによって求められる。

図7(a)は、58箇所 of 微動観測点の卓越周期から推定された沖積層厚をサンプルとし、国土地理院の数値地図250mメッシュ標高データを補助情報として求められた敦賀平野(図2参照)の沖積層厚分布である。また、図7(b)は、第四紀層厚に対して同様の推定を行なった結果である。同図より、中央西側に位置する半島状の孤立丘周辺を除いて、平野の大部分で沖積層厚は10m以上、第四紀層厚で100m以上であり、海側に向かって厚くなる傾向が認められる。孤立丘の南北で沖積層厚が大きく推定されている地点が存在しているが、この領域は福井県モデルでは小オボレ谷跡の有機質土の堆積地域に区分された地域に対応している。卓越周期から沖積層厚を推定する際に使用したS波速度は、アレイ観測点の平均値であり、有機質土のS波速度より大きく、オボレ谷周辺の沖積層厚をやや大きめに推定している可能性もある。図8は、約500m間隔で設定されている福井県モデルを、図7に対応させるため、250m間隔

に補間して示したものである。本研究の沖積層厚の推定結果では分布形状が単調であるものの、平野の南東側は沖積層が薄く、孤立丘の南北および海岸部に深い領域が存在するという分布特性は類似しているように見受けられる。一方第四紀層厚については、全体的に福井県モデルより浅く、特に50~1000m以上の範囲が狭いことなどの相違点が認められる。図7、8より、推定層厚の平野全体の分布形状は、沖積層厚に比べ第四紀層厚の類似性は低いといえる。先に示したように、福井県モデルは、浅層ボーリングと微地形区分を主な拠り所としており、基盤に達する深層ボーリング情報はほとんど取り入れられていない。一方、本研究の推定構造も、高々11箇所のアレイ観測に基づく推定構造と、微動H/Vから読み取られた卓越周期に基づく間接的な推定構造であり、両モデルの一致をもって、推定構造の精度を結論付けることは難しい。今後、両モデルの整合性の低い地域を重点領域とし、アレイ観測などを追加し、信頼性の高いサンプルを稠密化し、モデルの信頼性を高める必要があると考えられる。

5. 重力異常に基づく基盤深度の推定

本研究で実施したアレイは最大半径が40mとやや小さく、図5に示した式(4)、(5)に基づく推定S波速度の限界深度は、基盤岩以深に十分達していない場合もあり、深部構造に関する信頼性が十分でない可能性がある。そのため重力異常を用いた

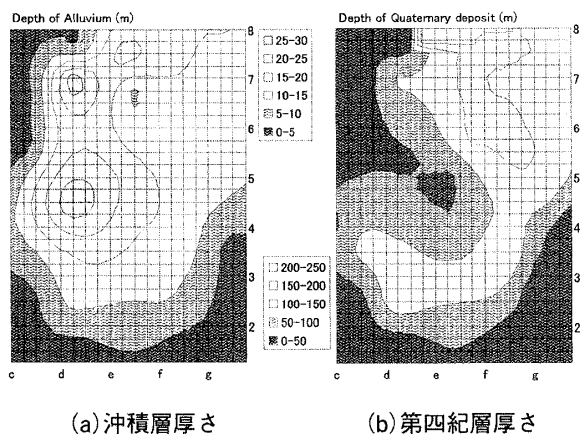


図7 常時微動から推定された第四紀層厚分布

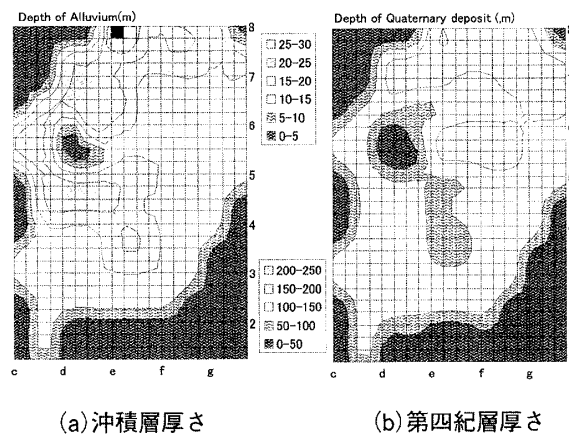


図8 福井県地震被害予測設定モデル

基盤深度解析を実施した。重力異常データは、日本重力CD-ROM第2版²⁰⁾およびGravity Database of Southwest Japan CD-ROM²¹⁾を利用し、敦賀平野周辺の570点のデータを抽出した。地形補正には、国土地理院発行の4 km, 1 km, 250 m, 50 m メッシュの数値地図を用いた。重力異常算出時の基盤は、平野周辺の山地を構成する花崗岩もしくは中古生層の変成岩とした。仮定密度の推定には基盤が露頭する5地点においてCVUR法²²⁾を適用し、 2.6 t/m^3 と推定された。図9にブーゲー重力

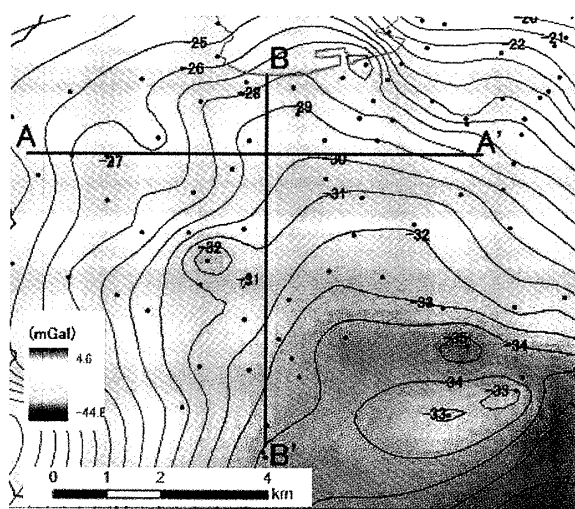
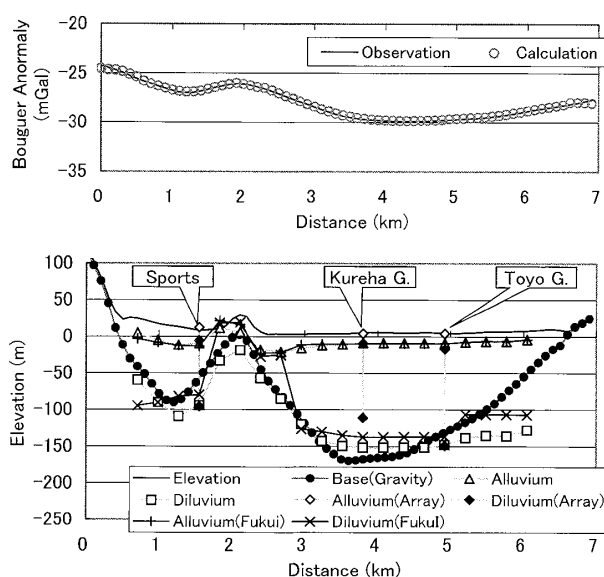


図9 ブーゲー重力異常図（コンター間隔 1 mGal）

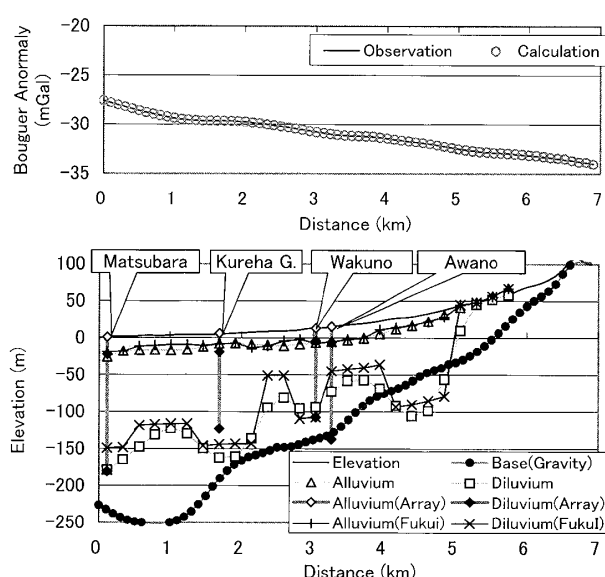
異常分布図を示す。グリッドサイズを100 m, コンター間隔を1 mGal で表現している。同図より、若狭湾から南南東の琵琶湖に向かい、負の重力異常が単調に大きくなる広域的重力異常に、敦賀平野周辺の局所異常が載ったような重力構造であることが確認できる。

図9の東西（A-A'）および南北方向（B-B'）の断面において、Komazawa²²⁾の方法により2次元解析を行った。この解析では、第四紀層と基盤岩層をイメージした2層モデルを仮定した理論重力異常値が、観測重力異常に最も良く一致するように、逐次基盤深さを推定する。拘束条件としては、A-A'断面では、両端で露頭するものとし、地表の標高で基盤深度を与え、B-B'断面では南端で基盤層が露頭し、A-A'断面とクロスする点で、A-A'断面の基盤深度を -167 m に設定した。なお、基盤-第四紀層の密度差 0.5 t/m^3 、重力異常のグリッド間隔は100 mとして計算した。図10の上図はブーゲー重力異常の測定値（実線）と推定モデルからの理論値○を重ねて示したものであり、最適モデルが観測値を適切に再現していることが確認できる。

図10の下図は、重力異常と常時微動に基づいて推定された基盤構造断面の比較である。横軸は、



(a) 東西（A-A'）断面



(b) 南北（B-B'）断面

図10 常時微動による沖積層および洪積層深さと重力異常に基づく基盤深度との比較

西 (A) および北端 (B) からの距離, 縦軸は標高であり, 実線は地表面, \triangle と \square は常時微動による沖積層および第四紀層最下面, \bullet は重力異常に基づく基盤の標高を示している。さらに, 観測点名を併記した \diamond および \blacklozenge に挟まれた縦線は, Rayleigh 波の位相速度に基づく S 波速度の最適構造の, 沖積層 (S 波速度 300 m/s 以下) および洪積層の範囲である。なお, 重力異常解析における基盤 (密度 2.6 t/m^3) と, アレイ観測に基づく基盤 (S 波速度 3,000 m/s) の定義が異なること, アレイ観測地点が, A-A' および B-B' の解析断面から最大で数百 m 離れていることに留意しておく必要がある。さらに図中の + および \times は, 福井県モデルの沖積層および第四紀層深度を示している。

図10より, 東西断面では平野東部で, 微動から推定された第四紀層深さが大きいことを除けば, 重力異常に基づく構造との一致度が高い。特に, 平野の中央西よりの半島状丘陵の西側で浅く, 東側で深くなる W 字型の複雑な構造を, 微動と重力の両手法が同様に推定していることは興味深い。南北断面については, 微動による基盤深度は, 重力による深度より全体的に浅く, 変動量も大きい傾向にあるが, 南側の山麓部から若狭湾に向かって深くなり, 海岸線付近で最深部となっている全体的な傾向は共通している。また, 微動に基づく第四紀層深度は, 福井県モデルと同様の増減が認められる。これは, 微動 H/V スペクトルから T_q を読み取る際, ピークが明瞭でない場合に, 福井県モデルによる卓越周期を参考に, T_q を決定したことを反映したものと判断できる。

6. あとがき

本研究では, 敦賀平野において常時微動のアレイ観測と三成分観測を実施し, Rayleigh 波位相速度と H/V スペクトル特性を求めるとともに, 位相速度のインヴァージョンにより S 波速度構造の推定を行った。さらに, アレイ観測点の平均 S 波速度と, 微動の卓越周期を 4 分の 1 波長則に適用することにより, 三成分観測点の第四紀層構造を推定し, 層厚と標高との相関を利用した Co-Kriging による空間補間を行なうことにより, 敦

賀平野の 250 m メッシュの第四紀層構造を推定した。さらに, 公開されている敦賀平野周辺の重力異常データを用いて, 観測重力異常を再現できる密度差構造の推定も行なった。常時微動観測から推定した敦賀平野の S 波速度構造は, 重力異常に基づく構造, 微地形分布ならびに福井県モデルなどとの矛盾が少ないことを確認した。本研究によって微動から推定された敦賀平野周辺の地下構造は, 浅層ボーリングと微地形区分を拠り所とする福井県モデルに対し, 常時微動という異なった情報に基づく地下構造として一定の価値があるものと考えられる。しかしながら, H/V スペクトルの長周期側の卓越周期 T_q が明瞭でない場合があり, 福井県モデルの援用を必要としたことに加え, アレイ観測のインヴァージョンが実施できた地点は 11 箇所を過ぎず, 敦賀平野全体の S 波速度構造の推定には充分とはいえないこと, 最大アレイ半径がやや小さく, 深部構造の推定には不十分な面もあることなど不完全な面も残っていると考えられる。今後, 基盤深度の基準点を設けるために, 半径の大きなアレイ観測を行なっていく必要性もあると考えられる。

参考文献

- 1) 経済企画庁: 土地分類基本調査 (地形・表層地質・土壌) 敦賀, 付図, 1971.
- 2) 福井県県民生活部: 福井県地震被害予測調査総合報告書, 1989.
- 3) 杉山雄一, 吉岡敏和, 寒川 旭: 敦賀断層の活動履歴調査, 地質調査所速報, EQ/98/1, pp. 113-124, 1998.
- 4) 国土地理院: 数値地図 50 m メッシュ (標高), 2001.
- 5) 杉本智彦: カシミール 3D 入門, 実業の日本社, 2002.
- 6) 小嶋啓介, 佐藤 毅, 黒田貴紀: 常時微動観測に基づく敦賀平野の S 波速度構造の推定 (序報), 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要, No. 11, pp. 23-33, 2004.
- 7) Nakamura, Y.: A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI, Vol.30, No.1, pp.273-281, 1989.
- 8) 小嶋啓介, 山中浩明: 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, 2004.
- 9) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with spatial reference to microtremor, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, pp.415-456, 1957. (投稿受理:平成19年5月31日
訂正稿受理:平成20年1月29日)
- 10) Capon, J.: High-resolution frequency wave-number spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, pp.1408-1418, 1969.
- 11) 宮腰 研, 岡田 広, 凌 魁群: 微動探査法における推定可能な微動中の表面波位相速度の波長範囲, 第94回物理探査学会学術講演会概要集, pp.73-79, 1996.
- 12) 松岡達郎, 梅沢夏実, 巻島秀男: 地下構造推定のための空間自己相関法の適用性に関する検討, 物理探査, 第49巻, 第1号, pp.26-41, 1996.
- 13) 山中浩明, 栗田勝実, 瀬尾和夫, 小嶋啓介, 佐藤浩章, 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.
- 14) Haskell, N.A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, Bull., S.S.A., pp.17-34, 1953.
- 15) 狐崎長琅他: 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, Vol. 9, pp.4-10, 1990.
- 16) 石田良平他: 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.
- 17) 長尾 毅, 紺野克昭: 常時微動のアレイ観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No. 696/I, 58, pp.225-235, 2002.
- 18) 小嶋啓介, 辻森卓実, 苗加一典: 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, 2004.
- 19) 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, 9-19, 2005.
- 20) 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, 2004.
- 21) The Gravity Research Group in Southwest Japan, Gravity Measurements and Database in Southwest Japan, (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9, 2001.
- 22) Komazawa, M, Gravimetric Analysis of Volcano and its Interpretation, J. Geod. Soc. Japan, Vol.