

Estimation of Subsurface Structure of the Ohno Basin Based on Microtremor Observation

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-05-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小嶋, 啓介 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/7401

常時微動観測に基づく大野盆地の地下構造の推定

Estimation of Subsurface Structure of the Ohno Basin Based on Microtremor Observation

小嶋 啓介*
(福井大学工学研究科建築建設工学専攻)

1. まえがき

現在、日本列島周辺は地震の活動期に入ったと判断され、歴史地震の分析から、地震の活動期は次の南海・東南海地震の発生が懸念される 21 世紀半ばまで続き、その間、内陸の地殻内地震も頻発すると考えられている。実際、新潟県中越地震のように震度 7 を記録するような地震や、能登半島沖地震、福岡県西方沖地震のように地震のポテンシャルが低いと考えられていた地域での地震が相次いでいる。さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震は、日本列島を構成する岩塊に作用していた応力の再配分および断層の特性・活動度の変化、ひいては地震被害予測の見直し迫るものと考えられる。

福井県は、福井地平野東縁断層および敦賀断層などの活動を想定した地震被害予測¹⁾を実施しているが、その際に使用された地盤モデルは、浅層ボーリングや地形・地質からの類推を含んだ不確実性を含んだものである。福井県のような地方都市では、基盤岩に至る深層ボーリングならびに弾性波探査などが実施されることは少なく、洪積層以深を含む地盤構造に関する情報が希薄である。福井平野周辺や原子力発電所の周辺では、弾性波探査や深層ボーリングなども実施されている^{2)~7)}が、人口の少ない嶺南地域および奥越地域の調査はほとんど行われていない。本研究では、福井県東部に位置し、動的地盤構造に関する資料が特に少ない大野盆地を対象領域とし、常時微動のアレイ観測および 1 点 3 成分観測に基づいて、第三紀基盤岩に至る地盤構造を推定した結果を検討する。常時微動のアレイ観測からは、空間自己相関法 (SPAC 法) を適用して得られた Rayleigh 波位相速度曲線をターゲットする逆解析により、深さ方向の S 波速度分布を推定する。また、常時微動の 1 点 3 成分観測からは、H/V スペクトルを求め、卓越周期を判読するとともに、観測 H/V スペクトルをターゲットする逆解析により、沖積層および洪積層厚さの推定を行い、Kriging による空間補間により大野盆地の地下構造モデルを示した。

(キーワード：大野盆地，常時微動，S 波速度構造，地形・地質)

*Keisuke Kojima

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

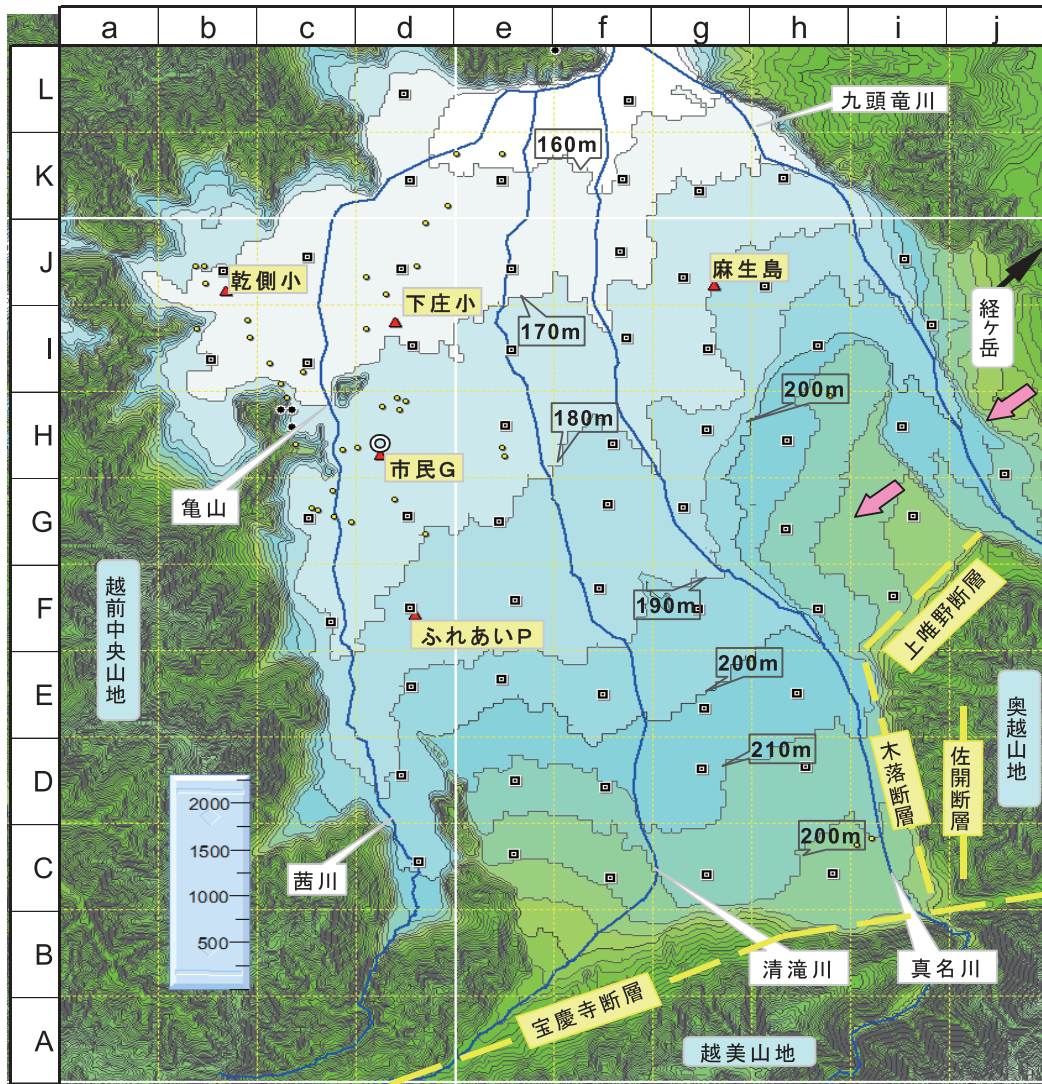


図-1 大野盆地の地形概要と常時微動観測点

2. 大野盆地の地形地質概要

図-1 は、国土地理院の数値地図 50m メッシュ標高⁸⁾を用いて作成した地形図上に、常時微動の観測点を示したものである。また、図-2 は 2010 年に(財)福井県建設技術公社によって刊行された福井県地質図⁹⁾に加筆した大野盆地の地質構造である。さらに、図-3 は図-1 に示した範囲の微地形分布^{10),11)}を示している。大野盆地は、東西約 9km、南北約 10km の広がりをもつ、標高が 160～250m 程度の山間盆地である。この盆地には、茜川、清滝川および真名川が概ね南から北に流下し、北端において、本流であり盆地の東端を流下する九頭竜川に合流している。大野市は、盆地の北西に位置する亀山の山頂に建設された大野城の城下町である。市街地は、清滝川によって形成された木本扇状地の先端付近に位置し、市街地の東側も真名川による真名川扇状地が広く分布している。これらの扇状地を構成する砂礫層は浸透性が高く帯水層を構成し、大野市は湧水が豊富で名水百選にも選定されている。西部の茜川に沿う細長い領域には氾濫原が広がり、流路から山陰になる盆地の北西端には、後背湿地に分類される軟弱地盤

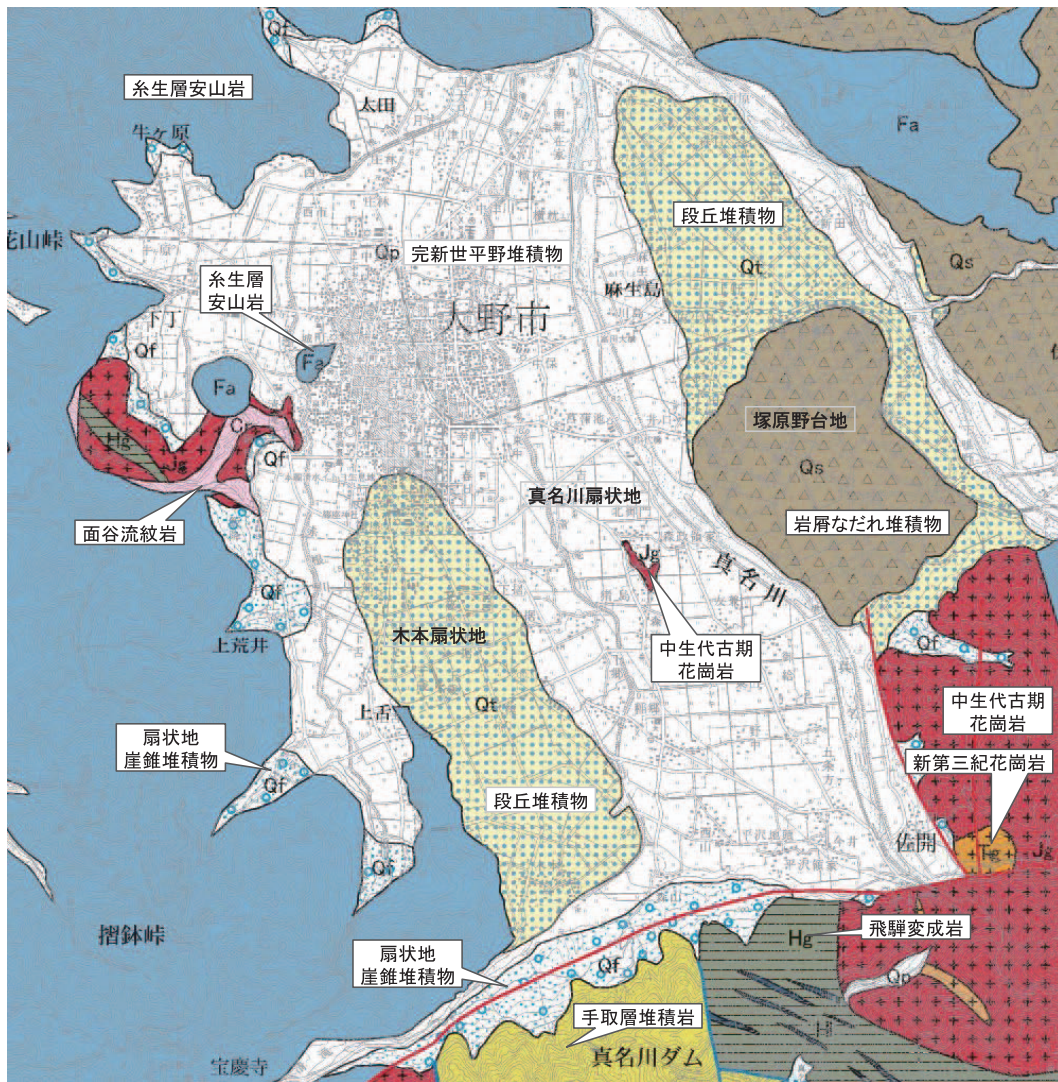


図-2 大野盆地の地質区分（福井県地質図改訂委員会に加筆）

が広がっている。真名川と九頭竜川に挟まれた領域には、盆地の北東に位置する経ヶ岳(1,622m)の岩層なだれ堆積物に覆われた泥流台地（流れ山）である塚原野台地（流れ山）が広がっている。同台地は周辺より 10～30m 程度高く、岩塊が散在し利水環境が悪いため、長らく放置されていたが、1965 年から断続的に開拓が進められ、現在では圃場整備された水田地帯となっている。

大野盆地は断層による陥没性盆地と推定されており、盆地の南端は宝慶寺断層（長さ 18km、確実度 II, B 級）により、ジュラ紀の堆積岩である手取層(Tk)および古期花崗岩(Jg)等で構成された越美山地と明確に区分される。また、東側は越前富田、上唯野、佐開、木落などの小断層を挟んで、中新世および鮮新世の安山岩(Fa, Ya)が優勢な奥越山地が、そして西・北側は中新世の安山岩(Fa)からなる越前中央山地を取り囲んでいる。以上のように大野盆地周辺は中新世安山岩類が優勢であり、その厚さは 500m 程度と推定されている。市街地の西端に位置する孤立丘である亀山も Fa の露頭とされていることから、本研究では、大野盆地の基盤をこの中新世の安山岩類であると仮定する。

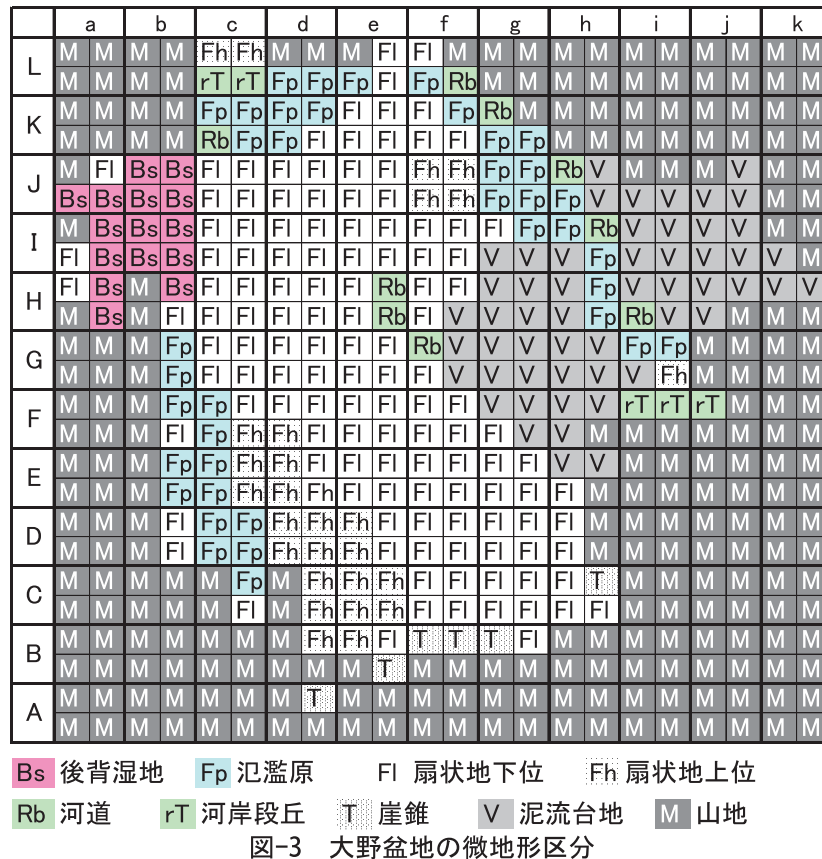


図-3 大野盆地の微地形区分

3. 常時微動観測に基づく大野盆地の震動特性の推定

3. 1 常時微動観測

大野盆地の震動特性の分布ならびにS波速度構造を明らかにすることを目的とし、常時微動のアレイおよび1点3成分観測¹⁾²⁾を実施した。アレイ観測および3成分観測地点を図-1の△および○印で示す。

1点3成分観測は、対象領域を緯度方向に30秒、経度方向に45秒の約1km間隔のグリッドに分割し、その中心付近の神社、公園、道路などで実施した。観測点は、図に付した緯度方向の行番号(大文字)と、経度方向の列番号(小文字)を組み合わせる。常時微動は、Lennartz社の3成分速度計LE-3D/5sあるいはLE-3D/lite型速度計(固有周期5秒と1秒)と白山工業(株)製のデータロガーLS-8000SHを組み合わせ使用した。1点3成分観測では、30Hzのローパスフィルタをかけ、サンプリング間隔0.01sで6~20分の観測を行い、ノイズの小さい40.96秒の区間を5組以上選択して、フーリエスペクトルおよびH/Vスペクトルを算出した。

常時微動のアレイ観測は、公園、学校のグラウンドおよび静かな農道のT字路部分で実施した。アレイ観測では正三角形アレイを採用し、LE-3D/liteとLs-8000SHを4組使用して、観測地点の状況に応じて、3m~60mの範囲で大、中、小の3種の半径を設定して観測を行った。

3. 2 常時微動のスペクトル特性

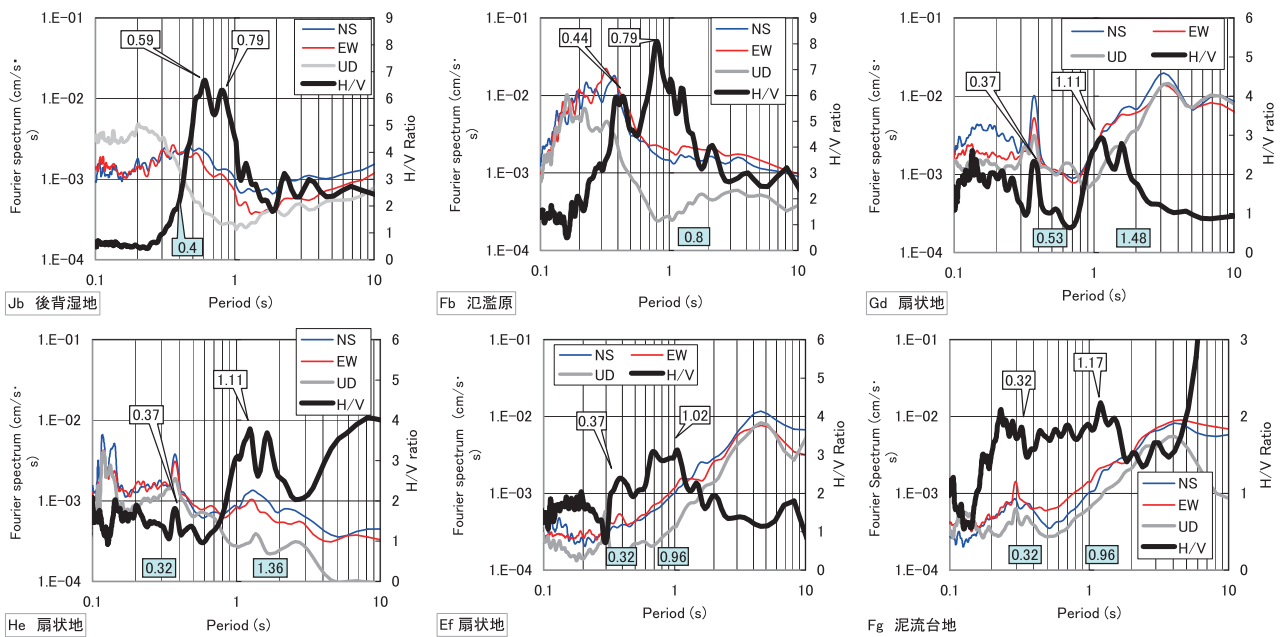


図-4 微地形区分ごとの代表的な常時微動のフーリエおよびH/Vスペクトル

微地形ごとの代表的な観測スペクトルを図-4に示す。図中2本の細線および灰色の太線は、NS,EWおよびUD成分のフーリエスペクトルであり、太い実線はH/Vスペクトルを示している。盆地西部の後背湿地および氾濫原に位置するJbとFb観測点のH/Vスペクトルは、短周期帯域の値が小さく明瞭な2つのピークが読み取れる。この傾向は、福井平野における微動観測で得られたH/Vスペクトルで共通して認められた。観測H/Vスペクトルと表面波の理論H/Vの比較から、これらの2つのピークは、沖積層最下面および第四紀層最下面に起因した卓越周期あることが確認されている。本研究では短周期側の卓越周期を T_a 、長周期側の卓越周期を T_q と名付け、その値を図中の白枠の数字で示す。一方、盆地の大部分を示す扇状地に位置する観測点では、0.2秒以下の短周期の振幅が比較的大きく、ピークも後背湿地と比較して明瞭ではない。これは、扇状地の表層は砂礫質土で覆われており、沖積層と洪積層のインピーダンス比が小さいことに起因しているものと解釈できる。H/Vスペクトルのピークが明瞭でない場合、ならびにピークが複数有り判読し難い場合には、H/Vと水平成分のスペクトルに共通したピークをもって卓越周期 T_a と T_q を選定した。図の下段の数字は、福井県の設定モデルに4分の1波長則を適用して求めた卓越周期である。福井県モデルのJbとFb観測点で数字が一つしかないのは、沖積層が欠如した構造を設定していることによる。観測H/Vから判読した卓越周期は福井県モデルから算出した値と近い場合と、やや離れた値をとっている場合がある。福井県モデルは大野盆地の約250のグリッドをわずかに10種のモデルによって割り振っており、その地点の特性と合わないモデルが設定されている可能性が否定できないと考えられる。

3. 2 Rayleigh 波位相速度に基づく地下構造の推定

アレイ観測に空間自己相関法 (SPAC 法) を適用して、Rayleigh 波の位相速度を算出した¹²⁾。微動の観測時刻歴からノイズの少ない区間を選択し、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解析フレームを取り出した。また、半径ごとの正三角形アレイの中

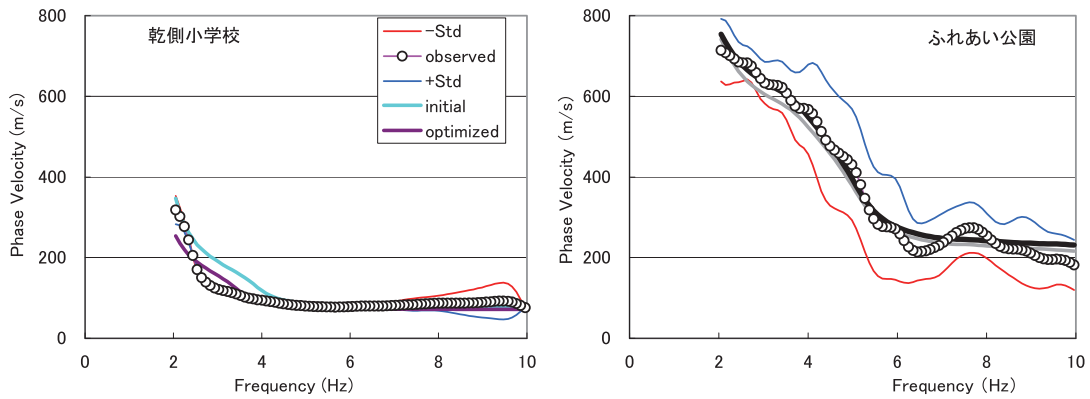


図-5 アレイ観測と最適地盤モデルによる Rayleigh 波位相速度の比較

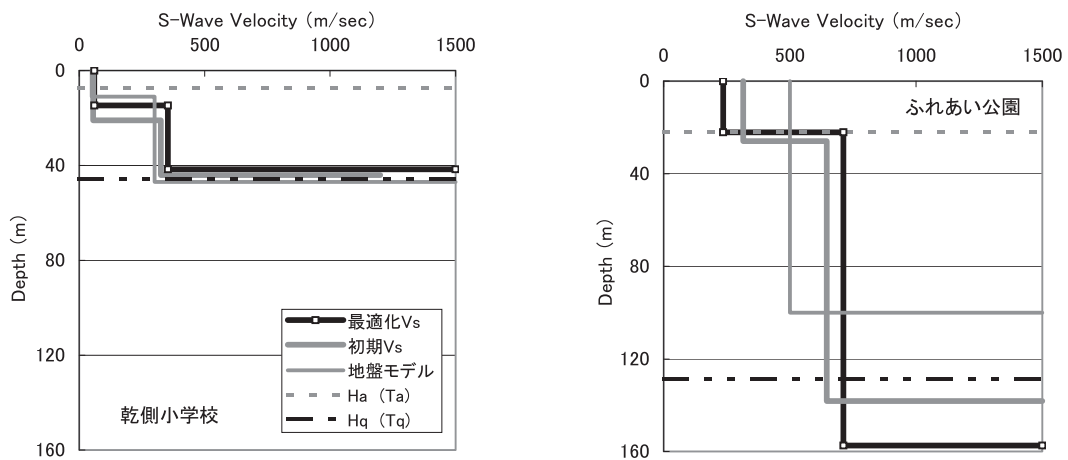


図-6 アレイ観測による位相速度に基づいて推定した S 波速度構造

心一頂点間および頂点一頂点間の空間自己相関係数から位相速度を算出した。図-5 は半径ごとに算出された位相速度を、連続性を考慮してつなげた位相速度曲線の例である。同図における○印は全フレームの平均値、上下の細線は分散を示している。後背湿地に位置する乾側小学校(IES)では、5Hz 以上で 80～100m/s 程度、2Hz でも 320m/s という遅い速度が得られており、速度のばらつきが小さく安定的な位相速度曲線が得られている。一方、扇状地に位置するふれあい公園では、最小値が 200m/s 程度であり、5Hz 以下で急増し、2Hz では 700m/s と比較的大きな位相速度が算出されている。

アレイ観測から求められた位相速度曲線をターゲットし、次の目的関数 J を最少化することにより、S 波速度構造の推定を行った¹³⁾。

$$J = \sum_{i=1}^{N_f^c} \left(\frac{C_i^O - C_i^C}{\sigma_i^O} \right)^2 \rightarrow \text{minimize} \quad (1)$$

ここに、 C_i^O : i 番目の周波数における観測位相速度、 C_i^C : C_i^O : に対応する理論位相速度、 σ_i^O : 観測位相速度の分散である。地盤の動的特性のうち、沖積層および洪積層の S 波速度および層厚を推定対象とし、各層の密度は固定した。P 波速度については、狐崎¹⁴⁾らによる S 波速度との回帰式 $V_p = 1.11 \times V_s + 1.29$ km/s を用いて S 波速度と連動させた。初期地盤モデルは、長尾・紺野¹⁵⁾によって示された、波長 λ の Rayleigh 波位相速度が深さ z までの平均 S 波速度で近似できるとの回帰分析結果を利用して設定した。

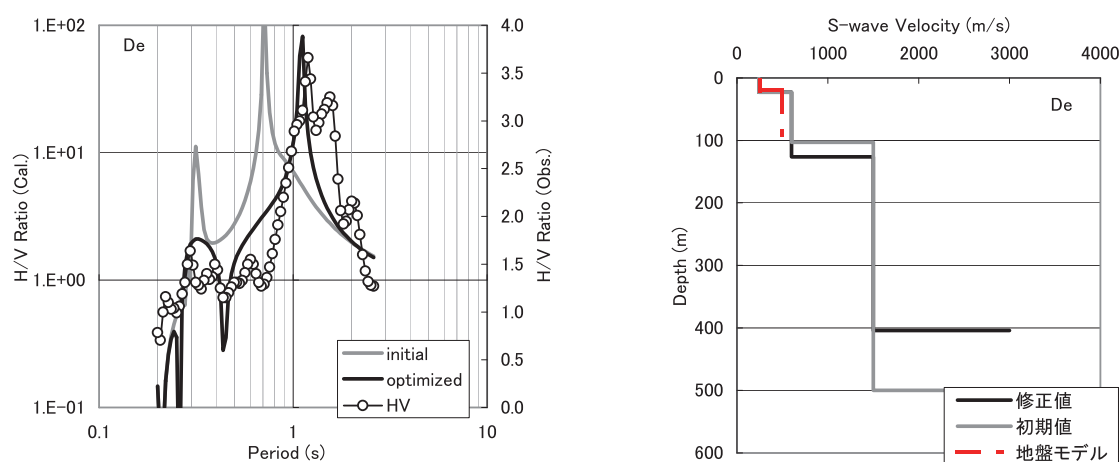


図-7 観測および理論 H/V スペクトルの比較および推定された S 波速度構造

すなわち、深さ z までの走時および層厚平均 S 波速度は、それぞれ波長 $\lambda \doteq 1.3z$ および $\lambda \doteq 2.2z$ の位相速度で近似できるとするものである。この関係を表層から順次適用して、S 波速度の深度分布を推定し、初期地盤モデルを設定した。なお、設定方法の詳細は、筆者らの論文 13) を参照されたい。S 波速度構造の最適化においては、層厚および S 波速度の初期値からの修正率を変数とし、遺伝的アルゴリズムを用いて探索した。

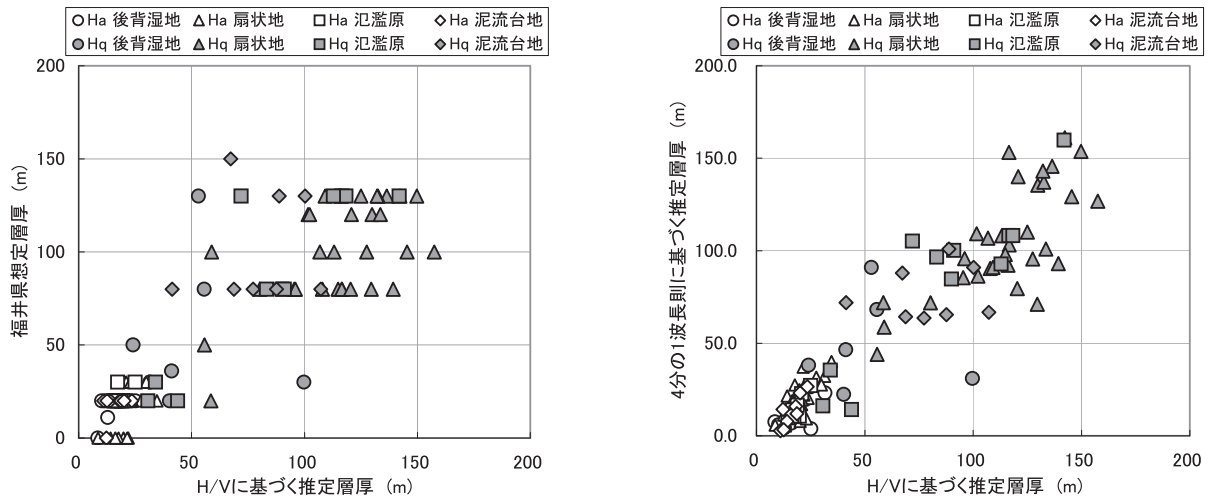
図-6 は図-5 に示した地点の S 波速度の推定結果であり、灰色線が初期値、実線が最適値を示している、また、図-5 の灰色線および太い実線は、初期モデルおよび最適モデルによる理論位相速度である。乾側小学校の S 波速度は表層で 60m/s、その下部が 350m/s、第四紀層厚は約 42m と浅く推定されている。一方、ふれあい公園は、表層の S 波速度は 240m/s 程度と比較的大きく、第四紀層厚は 157m と推定された。これらの推定結果は、乾側小学校が河川の山陰にあたるオボレ谷跡的な後背湿地に位置していること、ふれあい公園が盆地の中央よりで扇状地に位置しているという、地形・地質条件と調和的である。

3. 3 H/V スペクトルに基づく地下構造の推定

常時微動の H/V スペクトルについては、S 波の地盤増幅特性に基づくものであるとの説と、表面波によるものであるとの考え方がある。後者については Rayleigh 波および Love 波が混在し、かつその高次モードまでも考慮する必要があるとの理論もあるが、ここでは大野盆地で観測された常時微動の H/V スペクトルは、Rayleigh 波によるものであると仮定する。この仮定に基づき、下記の目的関数を設定し、設定した S 波速度構造による理論 H/V スペクトルと観測値の誤差を最少化する最適化手法により、観測地点の S 波速度構造の推定を行う。

$$J = \sum_{i=1}^{N_i^c} \left(\frac{H/V_i^O - \{\log_{10}(H/V_i^C) + c\}}{H/V_i^O} \right)^2 \rightarrow \text{minimize} \quad (1)$$

ここに、 H/V_i^O : i 番目の周波数における観測 H/V スペクトル、 H/V_i^C : H/V_i^O に対応する理論値、 c : 調整係数である。上式に基づく S 波速度構造の推定に際し以下の仮定を設けた。1) 地盤を沖積層、洪積層、第三紀層および基盤の 4 層モデルとする。2) 沖積層の S 波速度はアレイ観測地点の推定値と微地形区分を参考とし、氾濫原および後背湿地で 100m/s、扇状地その他で 240m/s とする。3) 洪積層について



(a) 福井県モデルとの比較

(b) 4分の1波長則に基づく推定値との比較

図-8 微動に基づいて推定された沖積層および第四紀層厚の微地形ごとの比較

は全ての地点で 600m/s, 第三紀層は 1500m/s, 基盤を 3000m/s と仮定する. 4) 密度と P波速度の過程は前節と同様であり, 沖積層, 洪積層および第三紀層の層厚のみを推定する. なお, 最適化手法については前節と同じ GA を用いた.

図-7は, 観測点 De の観測および理論 H/V スペクトルの比較であり, ○が観測値, 灰色線が初期地盤構造, 実践は最適地盤構造による理論 H/V スペクトルを示している. 観測 H/V スペクトルに認められるピーク全てには対応していないが, 卓越する2つのピークと極小値を与える周期は一致しており, 観測 H/V スペクトルを再現できる S波速度構造が推定できていると考えられる. 図-1に示したすべての1点3成分観測地点で, 上記の最適化計算を試みたが, 最適化計算が不完全に終了した地点も存在した. その原因としては, Rayleigh 波の特性方程式の算出で発散が生じたもの, 観測 H/V に明確なピークが存在せず理論値の対応が悪く, 推定された S波速度構造の信頼性に問題があると判断された場合があった. 最適化計算が不完全であった地点については, 周辺の S波速度構造および卓越周期に4分の1波長則を適用して得られる構造を考慮して, 第四紀層構造を設定した.

4. 地盤統計手法に基づく大野盆地の地下構造の空間補間

4.1 1点3成分観測地点の地下構造

前節で示した H/V スペクトルに基づく推定法を, 3成分観測地点全体に適用し, 大野盆地の地下構造を推定した. 図-8a)は H/V スペクトルをターゲットとして推定された沖積層および第四紀層厚を, 福井県モデルの設定層厚と比較したものである. 同図では観測地点の微地形ごとに凡例を変えて示している. H/V スペクトルから推定した沖積層および第四紀層厚と福井県モデルはかなりの相関が認められるが, 福井県モデルでは特定の厚さに収集している部分が認められる. これは福井県モデルでは盆地部分をわずかに 10 種類の地盤モデルに割り当てていること, 洪積層の厚さが不明確であり概略値を設定している

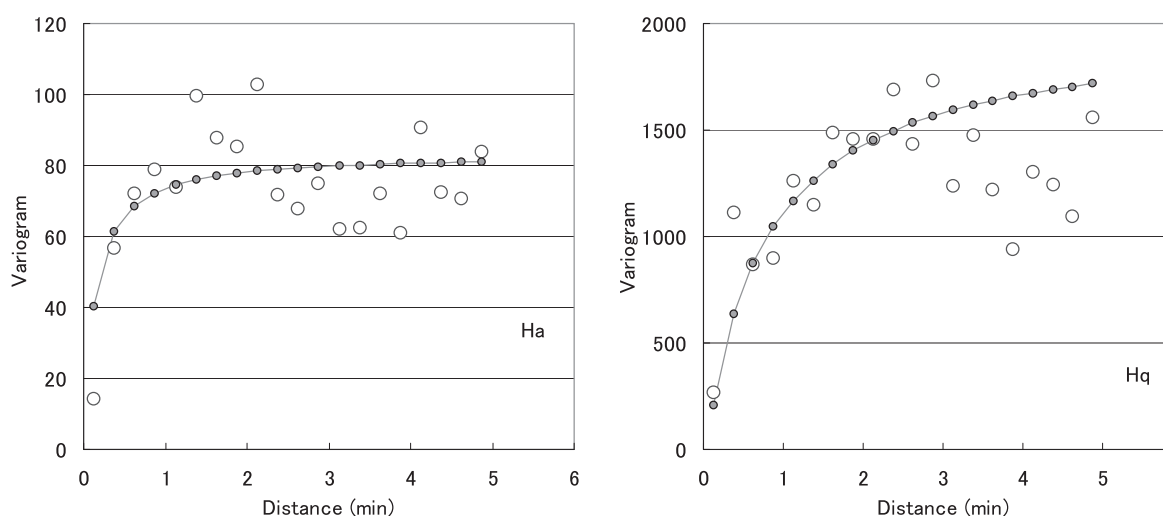


図-9 沖積層および第四紀層のセミバリオグラム

ことに起因している。同図(b)は、H/V スペクトルに基づく推定層厚と、H/V スペクトルから読み取った卓越周期 T_a および T_q に 4 分の 1 波長則を適用して推定した推定層厚との比較である。ややばらつきは認められるが、両者の対応は概ね良好であるといえる。

4. 2 大野盆地の地下構造

前節の H/V スペクトルに基づいて推定された観測点ごとの沖積層および第四紀層厚をサンプルとして、地盤統計手法の一つである **Kriging** を用いて大野盆地の地下構造モデルを作成する。**Kriging** では、ある空間内の未知点の推定量を、既知データの最適な重み付け加重平均として推定し、あわせてその分散などの信頼度を与える方法である。なお、**Kriging** の具体的手順については筆者らの文献 7) を参考にしたい。図-9 の○印は H/V スペクトルに基づいて推定された沖積層および第四紀層厚のセミバリオグラムである。同図で傾きが正であることは、サンプル点間の距離に応じてサンプル値の隔たりも大きくなることを示している。同図より、サンプル点間の距離が 2 分 (約 2.5km) 以内では、距離に近いほど推定層厚も類似するが、2 分を超えるとほぼ一定値に近づく傾向が認められる。同図の直線は、○の実験セミバリオグラムを双曲線で近似した理論セミバリオグラムである。

大野盆地の地下構造モデルを作成するための小メッシュ間隔としては、図-1 に示した 3 成分観測を行ったメッシュを縦横とも二等分した約 500m 間隔に設定した。その小メッシュの中心点における沖積層および第四紀層厚さを **Kriging** によって算出した。図-10 は大野盆地の第四紀層厚分布であり、上が沖積層厚、下が沖積層と洪積層を合わせた第四紀層厚分布を示している。沖積層は、九頭竜川および塚原野台地周辺で薄く、盆地西側の茜川に沿う氾濫原と、清滝川による扇状地において、下流側ほど深くなる傾向が認められ、盆地北西部の後背湿地で最も厚く推定されている。第四紀層厚分布を見ると、清滝川の流路に沿って厚く、旧市街地付近に 150m 以上の最深部が位置している。また盆地中央部に洪積層厚が 25m 程度の薄い領域が推定されているが、この位置は図-2 に示した古期花崗岩の露頭に対応しており、盆地鵜の基盤が単純なお椀状ではなく、北東部から南西に向かう半島状の高まりの存在が示唆される推定結果となった。旧市街地である大野藩の城下町は、金森長近により 1575 年から亀山城の建設と

もに計画されたものである。旧市街地は木本扇状地の先端付近の豊富な湧水を利用できる地点に選定されたが、今回推定された地下構造から見た場合、地震災害については有利とはいえない面があることが明らかとなった。

5. あとがき

本論文では、地下構造情報の少ない大野盆地を対象領域とし、常時微動のアレイ観測および1点3成分観測に基づいて、第三紀基盤岩に至るS波速度構造を求めるとともに、Krigingによる空間補間により大野盆地の地下構造モデルを作成した。今後、重力異常探査やボーリング情報と比較し、モデルの妥当性を検証する予定である。なお、本研究は科学研究費補助金（課題番号：22560478）を利用して行った。

謝辞：大野盆地における微動観測ならびに解析には、本学の戸塚陽一君、成瀬美紗さん、宮前寛人君に尽力を頂いた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 福井県：福井平野東縁断層帯に関する調査成果報告書，1998.
- 3) 小林直哉，平松良浩，河野芳輝，竹内文朗：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

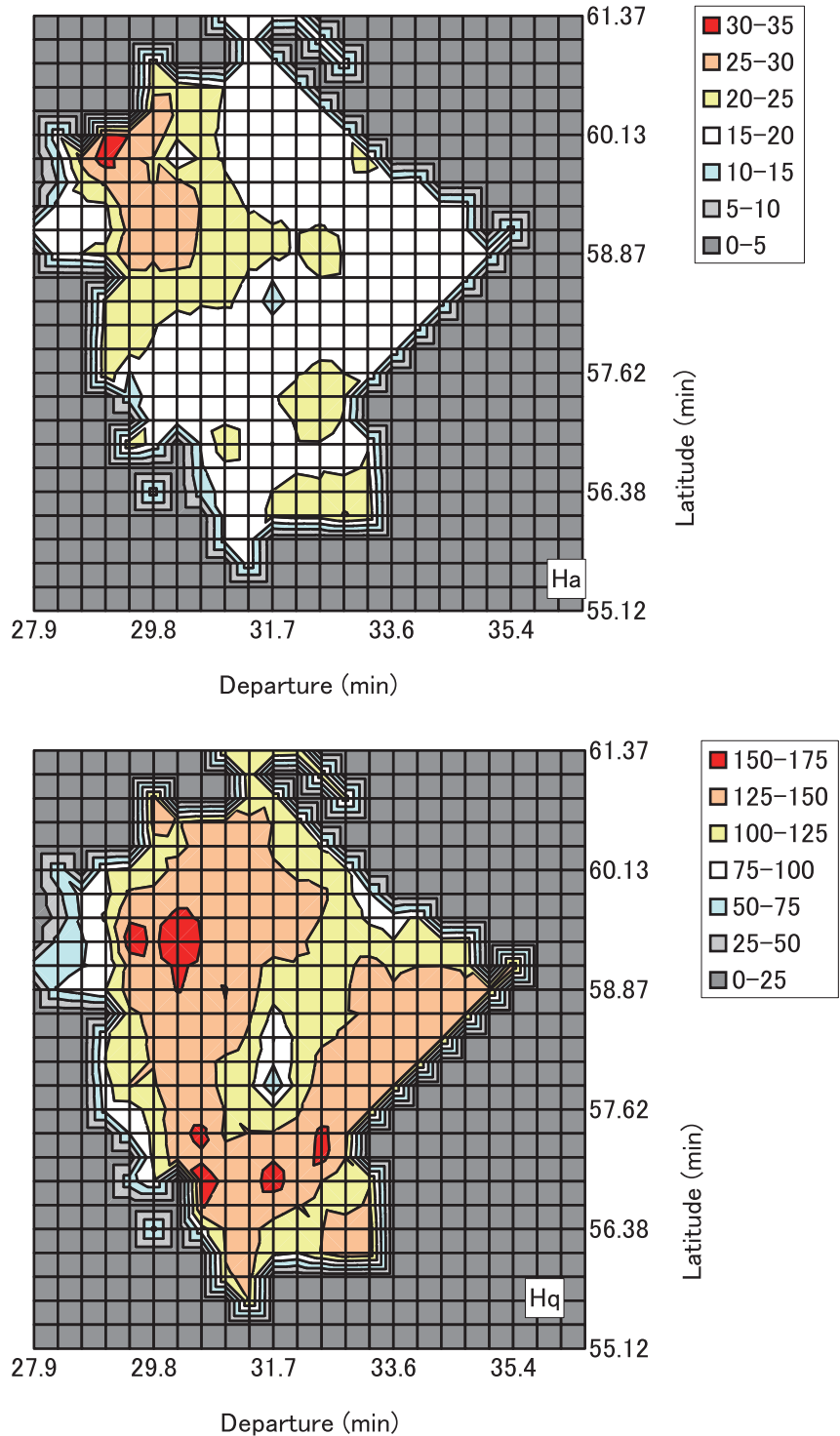


図-10 Krigingによる空間補間による大野盆地の第四紀層厚分布

震およびその周辺の活断層との関係一，地震，第2輯，第54巻，pp.1-8，2001.

- 4) 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.
- 5) 小嶋啓介，山中浩明：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.94-103，2003.
- 6) 安井謙，野口竜也，橋本勇一，中谷英史，香川敬生，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，30号，pp.75-81，2009.
- 7) 小嶋啓介，鈴木大輔：常時微動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，Vol. 46，No.1，pp.9-19，2005.
- 8) 国土地理院：数値地図50mメッシュ（標高），2001.
- 9) 福井県建設技術公社：福井県地質図2010年版および同説明書，2010.
- 10) 国土庁土地局国土調査課：土地分類図(福井県)，1974.
- 11) 福井県県民生活部：土地分類基本調査（地形・表層地質・土壌），大野，荒島岳，1996.
- 12) 小嶋啓介，本 耕大：常時微動観測のアレイ観測に基づく福井平野のS波速度構造の推定，土木学会論文集A1，Vol.68，No.1，pp.98-109，2012.
- 13) 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.119-128，2007.
- 14) 狐崎長琅他，後藤典俊，小林芳正，井川猛，堀家正則，齊藤徳美，黒田徹，山根一修，奥住宏一：地震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，No.3，pp.1-17，1990.
- 15) 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.
- 16) 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，土木学会論文集，No.752/I-66，pp.217-225，2004.