

常時微動観測に基づく敦賀平野の三次元S波速度構造
の推定

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2010-10-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小嶋, 啓介, 佐藤, 毅, 黒田, 貴紀 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/2514

常時微動観測に基づく敦賀平野の三次元S波速度構造の推定

Estimation of 3-Dimensional S-Wave Velocity Structure of Tsuruga Plain
Based on Microtremor Observation

小嶋 啓介¹
(福井大学大学院工学研究科建築建設工学専攻)

佐藤 毅²
(塩浜工業(株) 技術部)

黒田 貴紀³
(須山建設(株))

1. まえがき

敦賀平野は東西、南北とも約5km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、重要港湾の敦賀港を擁し、市街地周辺を北陸本線、北陸自動車道などが通過する交通の要所である。一方で、敦賀市はいわゆる近畿三角帯の北部頂点付近に位置し、周辺には柳ヶ瀬断層や甲楽城断層のように総延長が20kmを越える大規模な断層が存在している。さらに、敦賀平野自体も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、比較的活動度の高い活断層が周辺に存在しており、精度の高い地震被害予測を早急に行うべき地域の一つであると考えられる。地震被害予測に際しては、地震断層の想定とともに、予測地域の動的地盤構造の的確な評価は最重要項目の一つであり、対象領域のS波速度、Q値、層厚、密度などの地盤構造が的確に評価できるかどうかによって、地震被害予測の精度が決定付けられるといっても過言ではない。福井県は、福井地震断層と敦賀断層の活動を想定した地震被害予測²⁾を実施しているが、使用された地盤モデルは、微地形ならびに表層地質などを基に推定された部分が多く、地盤構造として信頼性が高いとは言い難い。

本論文では、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、三次元S波速度構造の推定を行なった。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。ついで、観測位相速度をターゲットとし、遺伝的アルゴリズムを用いて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。さらに、アレイ観測を補間するために、露頭と平野域で二点同時微動観測ならびに一点三成分観測を実施し、そのフーリエスペクトル、H/HならびにH/Vスペクトルから、観測地点の卓越周期ならびに地盤増幅特性を評価するとともに、アレイ観測による平均S波速度を援用して、観測点ごとの第四紀層堆積深を検討した。最後に、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、敦賀平野の概略的な三次元地盤構造を求め、既存資料との比較検討を行った。

(キーワード：敦賀平野、常時微動、アレイ観測、地盤統計手法、S波速度構造)

¹ Keisuke KOJIMA (Department Architecture and Civil Engineering, University of Fukui, 910-8507, Japan)

² Takeshi SATHO (Shiohama-Kogyo Co. Ltd., 914-0039, Japan)

³ Takanori KURODA (Suyama Construction Co. Ltd., 432-8562, Japan)

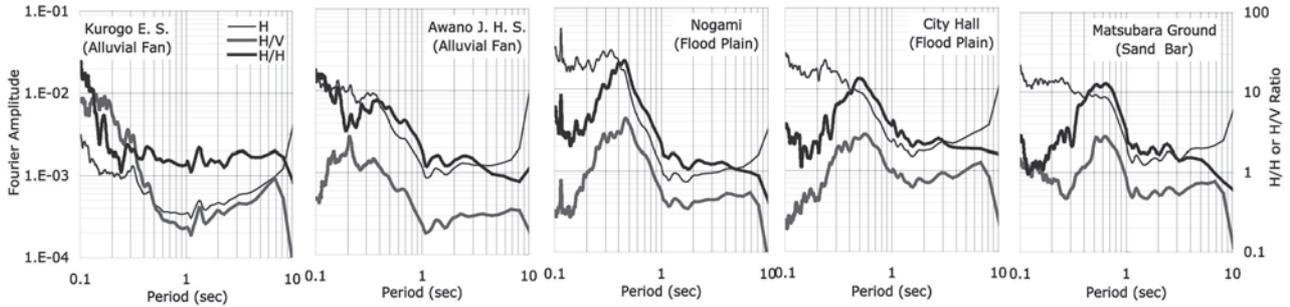


図-3 常時微動のフーリエ、H/HおよびH/Vスペクトル

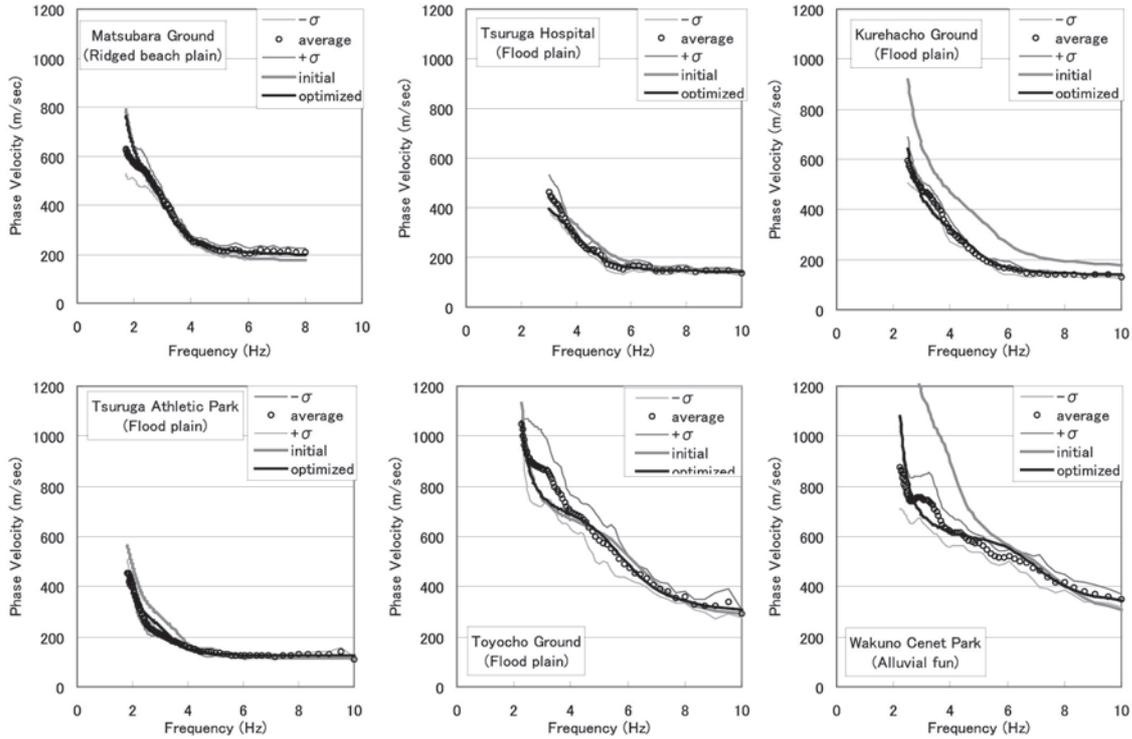


図-4 アレイ観測に基づく位相速度と最適地盤構造による理論位相速度の比較

アレイ観測記録からの位相速度算出手順は、松岡ら⁷⁾が示した空間自己相関法を適用した。正三角形アレイでは、通常は中心と各頂点間で3個のコヒーレンスを算出するが、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のプロットは、微地形区分ごとの代表的な観測点のRayleigh波の位相速度である。観測位相速度の上下の灰色細線は位相速度の分散を示している。和久野中央公園の3.5Hz付近のように、やや不連続で分散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10Hz付近の位相速度は120~210m/sec程度であり、やや深い構造に起因する2Hz付近の位相速度は400~800m/sec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/secおよび600~1000m/sec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

ならず、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、ボーリング情報からも有機質性の軟弱層が厚く堆積していることが確認されており、小オボレ谷跡として形成さ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、敦賀病院などに比較してやや大きく、表層の厚い砂層の存在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、山側に向かうにつれて大きくなる傾向や、微地形ごとの特徴と矛盾が少なく、地下構造を反映した情報として捉えられたものと判断できる。

3. アレイ観測点のS波速度構造の推定

3. 1 S波速度構造推定手法の定式化

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 波位相速度および水平/鉛直変位特性などをターゲットとし、事前情報から設定した初期地盤構造を、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11)}。本研究でも次に示すように、観測位相速度と計算位相速度との差を観測位相速度の標準偏差で基準化した誤差の二乗和を目的関数 J に設定し、その最小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。

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

ここに、 c_i^o : i 番目の周波数の観測位相速度、 c_i^c : c_i^o に対応する計算位相速度、 σ_i : 観測位相速度の分散を示している。Haskell⁸⁾の方法によって c_i^c を算出する場合には、水平堆積を仮定した地盤各層の、層厚、密度、S波速度および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、狐崎ら⁹⁾による次の経験式によりS波速度と連動させる。

$$V_p = 1.11V_s + 1290 \quad (2)$$

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 C_{HL} および C_{VL} を求めるものとする。こ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。そのため、初期地盤モデルを適切に設定することが重要となる。通常は、近接地でのP/S検層、弾性波探査あるいは深層ボーリングなどに基づいて想定することが多いが、地方においては探査事例が少なく、初期モデルの設定には大きな困難を伴うことが多い。この解決策として本研究では、長尾・紺野¹⁰⁾が示した、波長 λ の Rayleigh 波の位相速度は、深さ Z ($Z \approx 1.3 \times \lambda$) までの平均S波速度を近似するとした関係を利用し、観測位相速度から直接、地表面から深さ方向に、順次初期S波速度を設定する方法を利用した。その詳細は、筆者らの論文¹¹⁾を参考されたい。

図-4に示したアレイ観測から求められた Rayleigh 波の位相速度分布に対し、同手法を適用して得られたS波速度の深度分布の近似値を、図-5の連続した曲線で示す。図中の細実線は走時平均S波速度に基づく深さごとのS波速度分布(VT)、細点線は層厚平均S波速度に基づくS波速度分布(VH)である。図-5の太い点線と破線は、福井県がボーリングデータなどを参考に設定した地盤モデルにおける沖積層および第四紀層深度である。同様に灰色の点線と破線は、常時微動の三成分観測による沖積層および第四紀層底面に起因すると仮定した卓越周期 T_a と T_q に、4分の1波長則を適用して推定した沖積層お

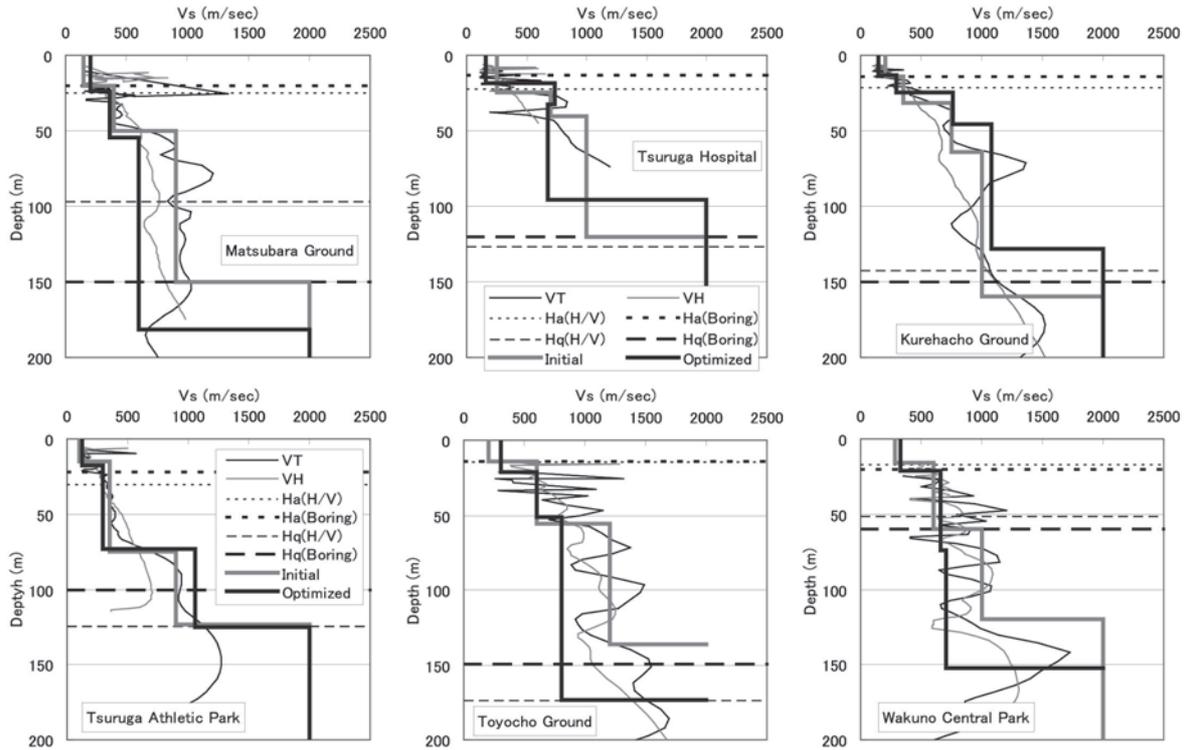


図-5 位相速度と平均S波速度の相関から設定された初期地盤モデルと最適地盤モデル

よび第四紀層深さを示している。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、福井県の地盤モデルと大差のないことが確認できる。図-3の松原グラウンドで、長周期側の卓越周期を1.2secとして読み取ったが、隣接するピークである1.5secを採用する場合には、第四紀層厚が約140mと推定され、福井県の設定深さ付近の値が算出される。この例のように、短周期側に比較して長周期側のピークは不明瞭な場合があり、卓越周期の判読に注意を要するようである。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いて設定したS波速度構造の初期モデルである。初期構造設定の際には、1) 概ね30m以浅の地下浅部については層厚平均S波速度(VH)を、それより深い部分は走時平均S波速度(VT)に基づくS波速度分布曲線を用いる。2) S波速度の急激な増減は、S波速度の異なる層の境界を通過していることと解釈し、最大あるいは最小勾配深さを層境界とする。3) すべての地点で、基盤のS波速度は2000m/secと仮定し、第四紀層は4層で区分するという方針を採用した。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¹²⁾を選定した。なお、層厚およびS波速度の修正率は、いずれも0.7~1.3に設定した。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 最適化計算結果

図-6は、呉羽町グラウンドの最適計算過程を示したものである。左図は、世代ごとの全個体の目的関数の平均と、各世代中の最小目的関数の値の、世代ごとの推移を示している。全個体の平均値は、数世代で第一世代の10%程度まで減少し、その後、最小値に漸近する過程が見られるのに対し、世代ごとの最小値は、はじめから最適値付近の個体が抽出されていることが確認できる。図-6の中央と右は、層厚とS波速度の推移を示している。世代ごとの最適モデルの推移を示しているため、初期世代から大

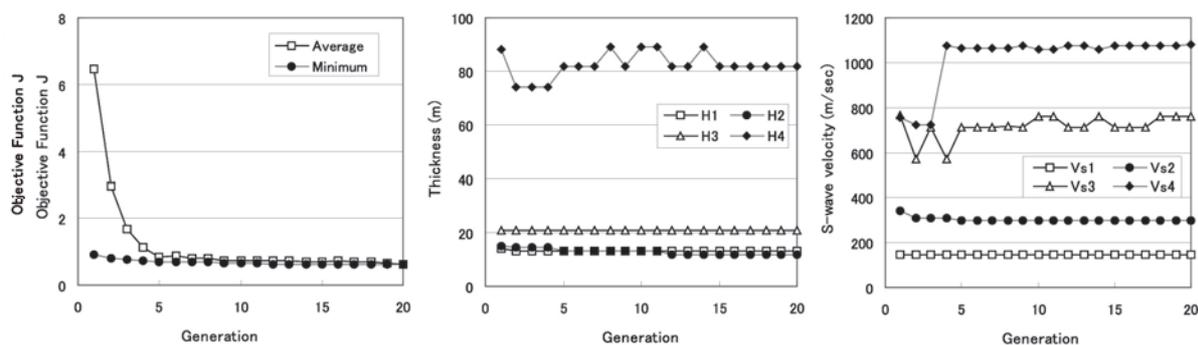


図-6 最適計算過程 (呉羽町グラウンド)

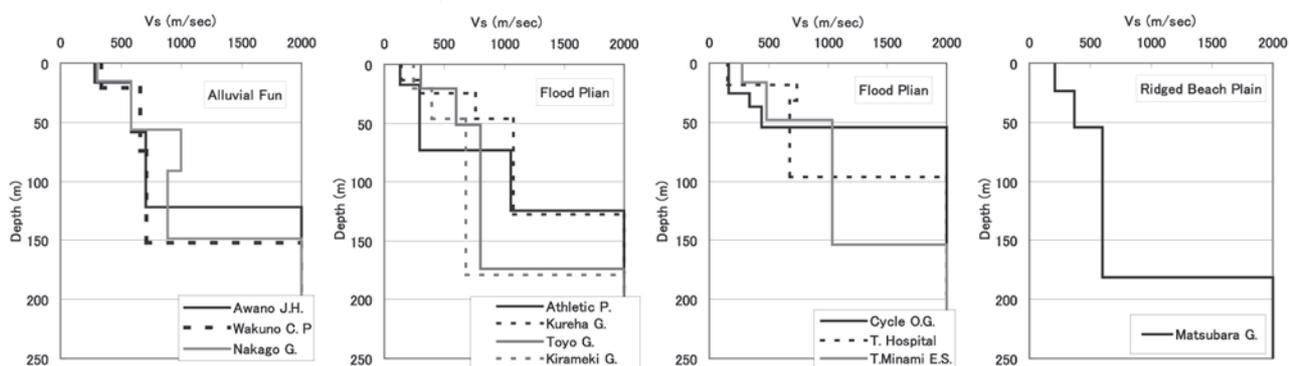


図-7 観測位相速度のインバージョンによる微地形ごとのS波速度構造

きな変化は少ないが、浅層の層厚(H1,H2)とS波速度(Vs1,Vs2)が比較的早期に収束するのに対し、洪積層の層厚(H3,H4)とS波速度(Vs4,Vs4)は遅れて収束していることが判る。

他のアレイ観測点でも同様の最適化計算を行ない、S波速度構造の推定を行った。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、沖積層などの浅い部分の構造は、初期モデル付近からあまり変化していないことがわかる。S波速度が300m/sec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、福井県の地盤モデルの沖積層深さに非常に近いことが判る。一方、最適化された構造の基盤深度と、福井県の地盤モデルおよび卓越周期から推定された構造の基盤深度の一致度はやや低い。また、和久野中央公園では、最適化構造の洪積層中の速度境界が、福井県および卓越周期から推定された地盤モデルの基盤深度に対応する結果となっている。図-1に示した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S波速度構造における、沖積層、洪積層および第四紀層全体の平均S波速度は、それぞれ205, 651および515m/secである。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計算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。

図-7は、アレイ観測点の微地形区分ごとに、最適化されたS波速度構造を示したものであり、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。扇状地の沖積層のS波速度は、いずれも約300m/secと大きい。また、平野西部の独立丘付近を除いて、海側に向かって沖積層ならびに第四紀層が深くなる傾向が認められる。すべての地点で、最適化されたの地盤構造の基盤深度は180m以下であり、図-4に示した観測位相速度から推定できる限界深さ以内に収まっていることが確認できる。

4. 常時微動の卓越周期による第四紀層厚の推定

アレイ観測のインバージョンによるS波速度構造と、一点および二点同時三成分観測に基づく卓越周期に基づき、以下の方法により、敦賀平野の三次元S波速度構造の推定を行なった。1) アレイ観測点のうち、連続した位相速度曲線が得られた11か所で、4層構造を仮定し、S波速度構造の同定を行なう。2) 三成分観測点直下のS波速度は、アレイ観測点からの距離の2乗に反比例する重み付け平均として設定する。三成分観測地点の層厚は、上記のS波速度と観測卓越周期に4分の1波長則を適用して決定する。3) 以上の操作で求めたアレイ観測点と三成分観測点の約50か所のS波速度構造をサンプルとし、地盤統計手法(Co-Kriging法)により、25,000分の1地形図の範囲を東西南北とも20等分した約250mメッシュ毎のS波速度構造の推定を行なう。地盤統計手法の詳細は文献13)に譲るが、被推定点 X_0 のある層の層厚 D を求める場合の例を次に示す。この場合、被推定点の層厚 D は、被推定点から半径 R_D 以内に存在するサンプル点 X_k の層厚、半径 R_E 以内に存在する標高データ点 X_l の標高 E_l を用いて、次式のように重み付き平均として推定される。

$$D(x_0) = \sum_{k=1}^{N_D} \lambda_{Dk} D(x_k) + \sum_{l=1}^{N_E} \lambda_{El} E(x_l) \quad (3)$$

ここに、 λ_{Dk} 、 λ_{El} は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-9は、常時微動観測から求められた沖積層および第四紀層最下面に起因すると考えられる卓越周期 T_a 、 T_q をサンプルとし、数値地図250mメッシュ標高データを補助情報として、Co-Krigingによって求められた敦賀平野全体の卓越周期分布である。図-9に示した被推定点は、図-2に示した東西11.25秒、南北7.5秒の、約250m間隔メッシュの中心に相当している。また、図-10は常時微動アレイおよび三成分観測の逆解析に基づく沖積層および第四紀層をサンプルとし、Co-Krigingによって求められた敦賀平野全体の堆積層厚分布である。図-8は、福井県が地震被害予測で使用した約500m間隔の地盤モデルを、図-9に対応させるため、250m間隔に補間して示した沖積層および第四紀層厚分布である。これらの図より、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80m以上であり、海側に向かって厚くなる傾向が認められる。孤立丘の南北に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、この地域の地形ならびに土質は、小オボレ谷跡の有機質土の堆積地域と判断される。図-8と10を比較すると、本研究の推定結果は、孤立丘周辺の、沖積層の15m以上の分布形状が単調であること、第四紀層の120m以上の範囲が狭いことなどの相違点も認められるが、全体的な分布形状は類似しているといえる。福井県の地盤モデルは、浅層ボーリング、地形および表層地質に基づいて、メッシュごとに典型的な地盤モデルを割り付けたものであり、基盤深度やS波速度の裏付けが少ない不確実性を含んだものである。したがって、福井県の地盤モデルとの一致をもって、推定構造の精度を議論することは難しい。しかしながら、今後、アレイ観測および三成分観測による位相速度と卓越周期の情報が蓄積され、より詳細で信頼性の高い地盤構造が求められるまでの概略的基本構造として、福井県の地盤モデルと相互補完的に利用できるものと考えられる。

本研究の手法では、任意間隔のメッシュによる被推定点の基盤までのS波速度および層厚分布(三次元S波速度構造)が算出される。したがって、任意の深さまでのS波速度の平均値を算出したり、地点

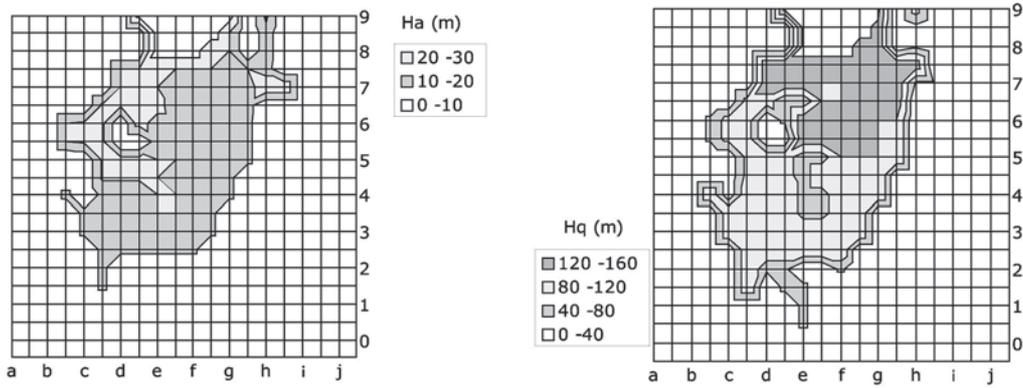


図-8 福井県設定地盤モデルによる第四紀層厚分布

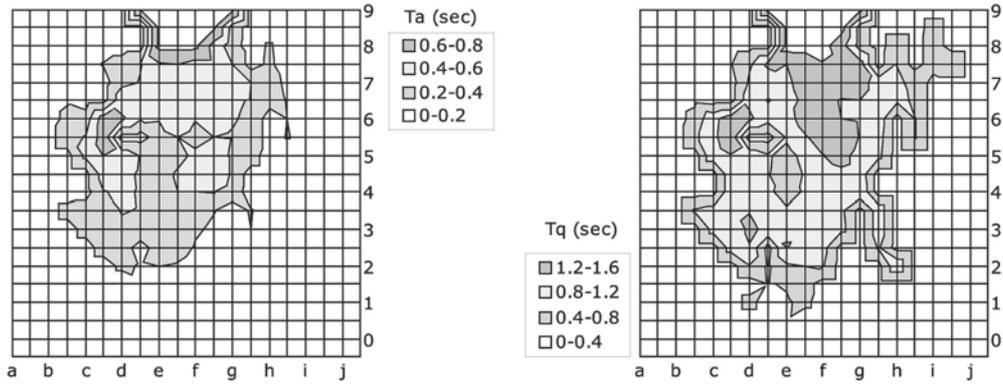


図-9 常時微動のH/HおよびH/Vスペクトルによる卓越周期分布

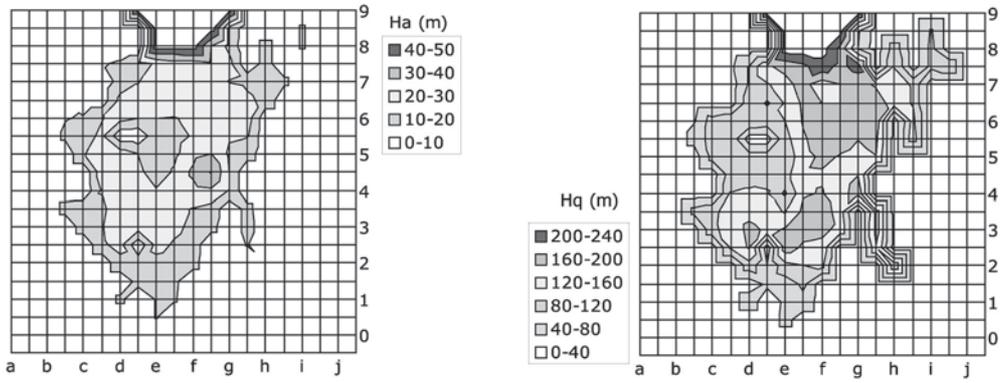


図-10 常時微動観測の逆解析によるS波速度構造に地盤統計手法を適用して求めた第四紀層構造

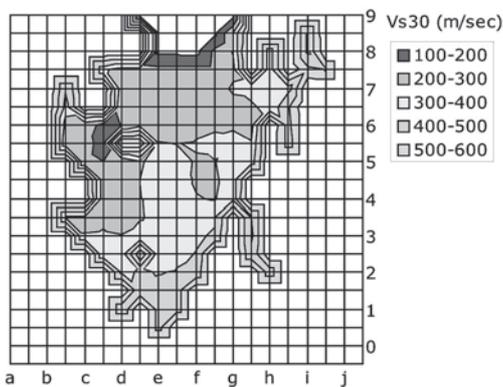


図-11 地盤統計手法に基づく V_{s30} の分布

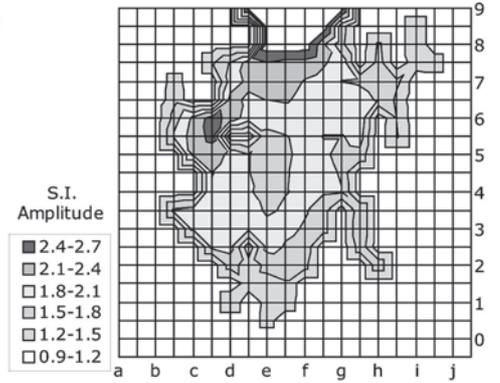


図-12 推定S波速度構造に基づくSI増幅率分布

ごとに重複反射法を適用し、地盤増幅率を算出したりすることが可能となる。図-11は推定されたS波速度構造から、深さ30mまでの平均S波速度である V_{s30} を求めたものである。 V_{s30} は、ボーリングによるN値からも比較的簡単に近似値を求めることができるが、地震被害予測に際し重要な指標となると考えられている。また、図-12は、重複反射法による地盤増幅率を0.1~2.5秒まで積分して求めたSI増幅率の分布を示す。SI増幅率は、第四紀層厚が深い敦賀湾沿岸部と、S波速度の小さな軟弱層が存在する平野西側のオボレ谷跡と考えられる地点で大きくなっており、地震時に被害が大きくなることが懸念される。また、SI増幅率と V_{s30} の分布傾向は非常に似通っており、敦賀平野においても、 V_{s30} が地震被害予測の際の重要な指標になりえることが確認できる。

5. 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、位相速度とH/Vスペクトル特性を求めるとともに、位相速度のインバージョンにより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するとともに、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250mメッシュの第四紀層構造を推定し、微地形分布ならびにボーリングデータなどとの矛盾が少ないことを確認した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- 1) 敦賀市内に配置した11箇所のアレイ観測観測点から求められた位相速度から、山際に近い場所に比較して、海に近い観測点では、どの周波数帯域においても位相速度が小さくなる傾向が確認された。
- 2) 位相速度と平均S波速度の相関を利用し、アレイ観測に基づく分散曲線から、観測点直下のS波速度構造を推定する方法は、S波速度構造推定の初期モデルを与える方法として有効であることを確認した。
- 3) 推定されたS波速度構造は、H/Vスペクトルの卓越周期に4分の1波長則を仮定して求められる構造、ならびにボーリングデータなどと調和的であることを確認した。

しかしながら、アレイ観測のインバージョンが実施できた地点は、11箇所に過ぎず、敦賀平野全体のS波速度構造の推定には不十分とも考えられ、今後、さらにアレイ観測情報を収集していく必要性もあると考えられる。なお本研究は、科学研究補助費16560409の補助を受けて行なった。

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) 国土地理院：数値地図50mメッシュ（標高），2001.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

- 7) 松岡達郎, 梅沢夏実, 卷島秀男: 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.
- 8) Haskell, N. A. : The dispersion of surface waves on multilayered media, Bull., S.S.A. , pp.17-34, 1953.
- 9) 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.
- 10) 長尾毅, 紺野克昭: 常時微動のアレー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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.