

Microtremor Array Observation in Fukui Plain

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2010-10-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小嶋, 啓介, 鈴木, 大輔, 辻森, 卓実, 苗加, 一典, 黒田, 貴紀, KOJIMA, Keisuke, SUZUKI, Daisuke, TSUJIMORI, Takumi, NOHKA, Kazunori, KURODA, Takanori メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10098/2532 |

福井平野における常時微動のアレイ観測

Microtremor Array Observation in Fukui Plain

小嶋 啓介*
(福井大学工学部)

鈴木 大輔**, 辻森 卓実**
(福井大学大学院工学研究科)

苗加 一典***, 黒田 貴紀***
(福井大学工学部建築建設工学科)

1. まえがき

福井地震(1948年6月28日, Mj=7.1)の被害調査では, 地震被害と土質・地形との密接な関係が定量的に示された. 北陸震災調査特別委員会による家屋の倒壊率の調査¹⁾によれば, 倒壊率50%以上の範囲と沖積平野がほぼ対応していること, 倒壊率60%以上の福井市の市街地周辺において, 基盤岩が露頭している足羽山周辺では例外的に被害が見られないなど, 地盤特性と地震被害との密接な関係を象徴的に示す事例を多数あげることができる. このことは, 地震被害予測の精度向上には, 起振断層の決定とともに, 対象領域各点のS波速度, Q値, 層厚, 密度などの地盤構造の適確な評価が不可欠であることを示している. 兵庫県南部地震以来, 各地で地震被害予測が行われてきており, 福井地震から50年を経過したことを契機として, 福井県地震被害予測調査²⁾も実施された. しかしながら同被害予測に使用された地盤モデルは, 既存ボーリング情報, 微地形ならびに表層地質などを基に推定されたものであり, 地盤構造としての信頼性, 特に洪積層以深の構造の信頼性が十分とは言い難い.

広域的な地下構造評価には, PおよびS波弾性波探査が有用であるが, 福井平野周辺では地震断層調査を目的とした局所的な弾性波探査^{3, 4)}が行われているにすぎない. 一方で, 弾性波探査以外の方法を利用した地震基盤に至る地下深部の構造解明を目的とした調査も少数ながら実施されている. 小林ら⁵⁾は, 福井平野北部で高密度重力異常測定を行い, 2次元タルワニ法によって地下構造の推定を行っており, 山中ら⁶⁾は, Rayleigh波の位相速度を評価関数とするインヴァージョンから, 福井平野の地震基盤までのS波速度構造を検討している. 筆者ら⁷⁾も, 福井大学の強震鉛直アレイと, 福井平野に展開した数箇所の表層での観測情報に基づいて, 観測点直下のS波速度, Q値ならびに層厚を推定する方法を適用し, 福井平野の東西断面の地盤構造の推定を試みている. しかしながら, これらの方法を広範な領域の高密度観測に援用することは, 限られた予算と人員では多くの困難を伴うと考えられる. このため筆者ら⁸⁾は, 観測が容易な地表面の3成分常時微動を利用して, 地域の地盤構造を推定する方法を提案した. この研究では, 福井平野全体を覆うグリッドごとに, 地表の3成分常時

(キーワード: 福井平野, 常時微動, アレイ観測, 分散曲線, 地下構造)

-
- * Keisuke KOJIMA
(Department of Architect and Civil Engineering, Fukui University, 910-8507 Fukui, Japan)
- ** Daisuke SUZUKI, Takumi TSUJIMORI
(Graduate School of Engineering, Fukui University, 910-8507 Fukui, Japan)
- *** Kazunori NOHKA, Takanori KURODA
(Department of Architect and Civil Engineering, Fukui University, 910-8507 Fukui, Japan)

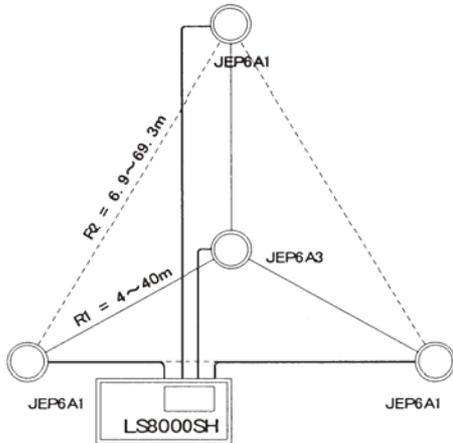
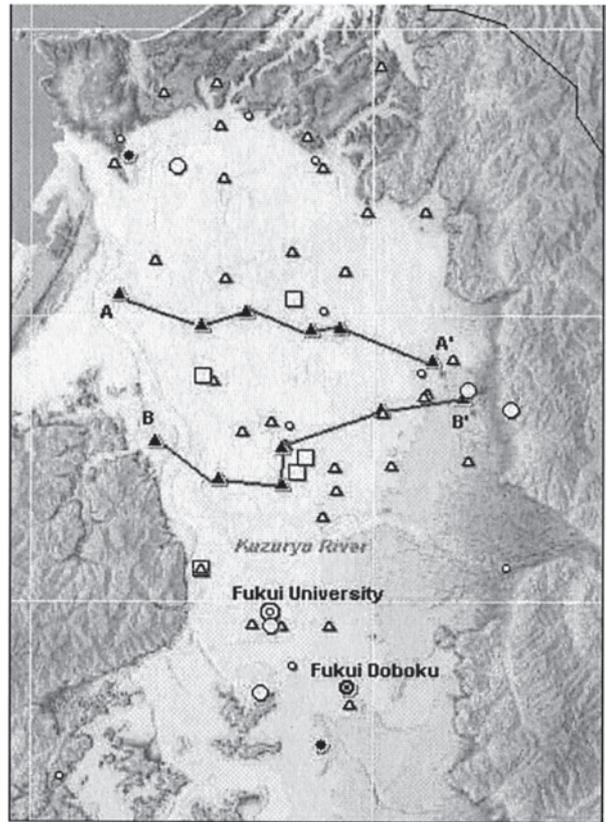


図-1 アレイ観測システム

図-2 福井平野における強震観測地点および常時微動のアレイ観測地点

- , □ : 3成分強震観測
- : K-NET, Kik-net観測点
- : 計測震度計
- △, ▲ : アレイ観測点



微動測定を行い、収集されたスペクトル特性および水平/鉛直スペクトル比（H/V スペクトル）から、観測点ごとの固有周期ならびに H/V 倍率を特定するとともに、判読された固有周期に4分の1波長則を適用し、沖積層および洪積層の厚さを推定し、福井平野周辺の第四紀構造モデルを提案している。求められた地盤構造は、弾性波探査に基づく反射面、ボーリングデータ、重力異常結果などとの比較を通して妥当性を検証している。しかしながらこの方法では、観測点の固有周期の判読が困難な場合があること、沖積層および第四紀層最下面の位置は推定しているものの、沖積層および洪積層内部の詳細な S 波速度構造を直接推定することができないことなどの問題点も明らかになった。本研究では、これらの欠点を補い、より詳細で信頼性の高い地盤構造を解明することを目的として、福井平野に散在するグラウンドおよび公園などにおいて常時微動のアレイ観測を行い、空間自己相関法を適用して Rayleigh 波速度構造を求めるとともに、それを利用して求めた地盤構造の推定結果について検討する。

2. 常時微動のアレイ観測と位相速度の算定

(1) 常時微動アレイ観測

図-1 は、本研究で使用した常時微動のアレイ観測システムの配置図である。常時微動の計測には、(株)Akashi 製の3成分加速度計 JEP6A3 を1台と、上下動のみを検出する JEP6A1 を3台組み合わせて使用し、データの収録には白山工業(株)製の DATAMARK-LS8000SH を用いた。検出器およびデータ収録装置は小型軽量で容易に運搬できることに加え、検出器は電源を必要とせず、データ収録装置は単2乾電池4本で24時間程度稼働させることができる。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。図-1に示す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(250sec)を収録した。なお、一地点のアレイ観測は、3人で、1時間以

内に終了する簡便なものであり、広領域の密度の高い観測も可能と考えられる。

図-2は、福井平野における強震および常時微動の観測地点を示したものである。当研究室では、◎印で示す福井大学グラウンドの鉛直アレイと、○および□印で示す地点で表層のみの強震観測を実施している。また、●印で示す防災科学研究所のK-NETおよびKiK-netの観測点の強震データも公開されており、これらの点では、地震応答特性が把握でき、強震観測情報を利用した地下構造の推定も可能である。一方、○印で示した各自治体に配置された計測震度計については、計測震度は公開されるものの、同時に収録されている強震動データは公開されていないため、観測点付近の地震応答特性などの評価には利用できず、強震動データの早期公開が望まれる。強震観測情報を補い、福井地域の動的地盤構造の推定精度を向上させるため、昨年度から△および▲で示す地点で常時微動のアレイ観測を行っている。このうち、本研究ではAA'およびBB'の2本の東西軸に沿う12地点の観測結果を中心に検討を加える。各観測点の微地形区分を表-1に示すが、大半が氾濫原および三角州であり、九頭竜川の下流に向かって沖積層が厚くなり、表面波の位相速度が遅くなる傾向が予想される。

(2)空間自己相関法

微動のアレイ観測に基づいて、表面波の位相速度を算出する代表的な方法として、空間自己相関法 (SPAC法)⁹⁾と、周波数-波数スペクトル法 (F-K法)¹⁰⁾がある。宮腰ら¹¹⁾によれば、アレイの最大半径を r_{max} 、最小半径を r_{min} とすれば、推定可能な位相速度の波長 λ の範囲は次式で与えられる。

$$\text{SPAC法} : 2r_{min} \leq \lambda \leq 10r_{max} \quad (1)$$

$$\text{F-K法} : \sqrt{3}r_{min} \leq \lambda \leq 5r_{max} \quad (2)$$

上式より、アレイ半径条件が同一ならば、SPAC法を用いた方が、広い波長(周期)帯域をカバーできることが理解できる。また、SPAC法を用いる場合には、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、F-K法よりも少ない3~4個の検出器で安定した解析が可能であること、本研究では、第三紀層上面までの比較的浅い部分の構造を推定対象とするため、100mを超えるようなアレイ半径は必要ないこと、などを考慮しSPAC法を採用することとした。

以下、松岡ら¹²⁾を参考に、SPAC法の概要を述べる。半径 r のアレイ観測によって得られる中心および頂点(中心角 θ)の微動の周波数 f の複素フーリエ成分を、それぞれ $X(f)$ および $Y(f, \theta)$ とすると、空間自己相関係数 $\rho(r, f)$ は次式で求めることができる。

$$\rho(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{real} \left[\frac{S_{XY}(f, \theta)}{S_X(f)S_Y(f, \theta)} \right]^2 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \gamma(f, \theta) d\theta \quad (3)$$

ここに、 $S_{XY}(f, \theta) = \frac{2\pi}{T} E[X^*(f)Y(f, \theta)]$: 2点間のクロススペクトル、 $S_X(f) = \frac{2\pi}{T} E[X^*(f)X(f)]$:

中心のパワースペクトル、 $S_Y(f) = \frac{2\pi}{T} E[Y^*(f, \theta)Y(f, \theta)]$: 頂点パワースペクトル、 $\gamma(f, \theta)$: コヒーレンスであり、 $E[\]$ は期待値を表している。

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、4分の1にあたる512個をオーバーラップさせながら、収録データ全体から m 個のフレームを取り出し、算術平均操作を行うことにより期待値を算出した。また、今回のような正三角形アレイでは、式(1)における空間平均操作は、三頂点間のコヒーレンスの平均操作に単純化される。図-1の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、三辺の両端を中心と頂点とみなしても、3個のコ

表-1 常時微動のアレイ観測地点の一覧

| 観測地点(AA') | 住 所 | 微地形区分 | 観測地点(BB') | 住 所 | 微地形区分 |
|-----------|--------|-------|-----------|---------|-------|
| 平章小学校 | 丸岡町霞町 | 氾濫原 | 丸岡高校城東分校 | 丸岡町八ヶ郷 | 扇状地 |
| 坂井中央公園 | 坂井町長畑 | 氾濫原 | 丸岡スポーツランド | 丸岡町八口 | 氾濫原 |
| 坂勤労者グラウンド | 坂井町上新庄 | 氾濫原 | ハートピア春江 | 春江町東太郎丸 | 氾濫原 |
| 兵庫小学校 | 坂井町上兵庫 | 三角州 | つくし野公園 | 福井市つくし野 | 氾濫原 |
| NECグラウンド | 坂井町大牧 | 三角州 | 河合小学校 | 福井市山室町 | 氾濫原 |
| 折戸公園 | 坂井町折戸 | 自然堤防 | 宮下グラウンド | 福井市江上町 | 氾濫原 |

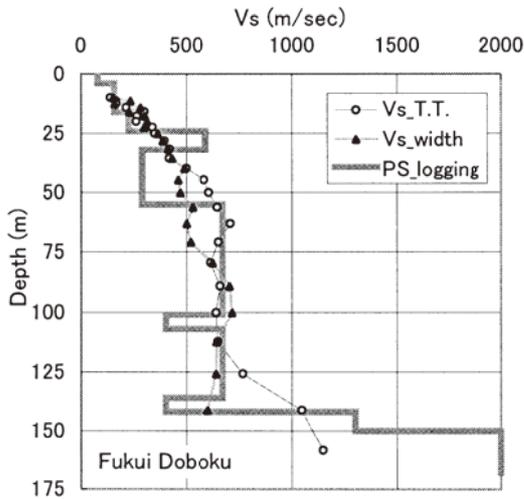


図-3 福井土木事務所のS波速度分布

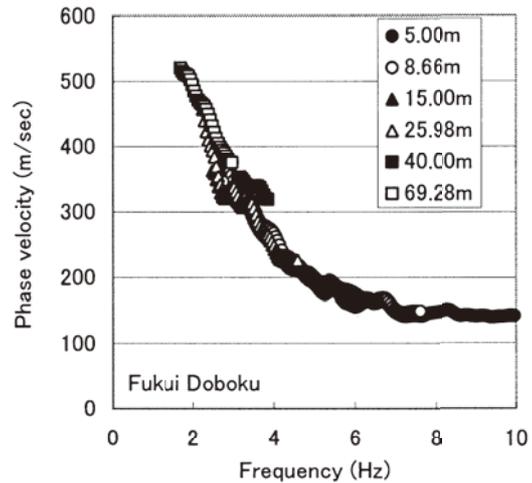


図-4 御幸グラウンドの観測分散曲線

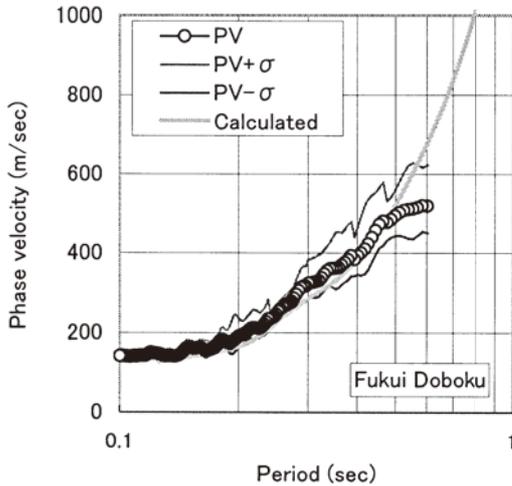


図-5 観測位相速度と理論位相速度の比較

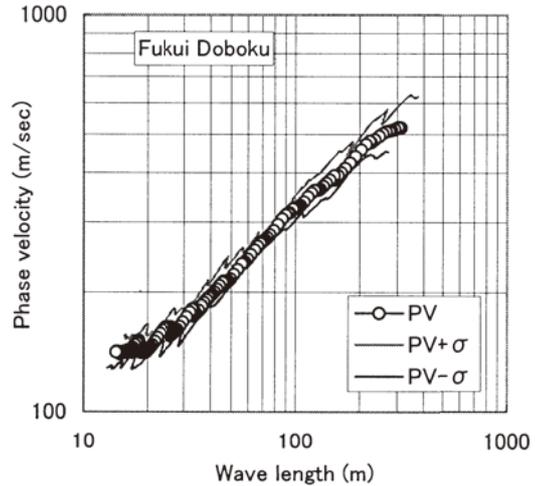


図-6 波長ごとの位相速度分布

ヒーレンスが計算できる。正三角形の中心と頂点間の距離が r m の場合、辺長は $\sqrt{3}r$ m となり、例えば半径 5 m のアレイでは、5 m と 8.67 m のアレイによる観測値が算出されることになる。

空間自己相関関数 $\rho(r, f)$ と、第 1 種 0 次のベッセル関数 $J_0(x)$ との間には次の関係が成立する。

$$\rho(r, \omega) = J_0(r\omega/c(\omega)) = J_0(x) \quad (4)$$

したがって、各 $\rho(r, f)$ に対応するベッセル関数が得られれば、そのアーギュメント x より、次式を

用いて位相速度が与えられる.

$$c(\omega) = r\omega/x \quad (5)$$

ただし、空間自己相関関数がナイキスト空間自己相関係数 $\rho_s = -0.304$ より小さな範囲では、空間エイリアジングの影響が混入するため、 $1 \geq \rho(r, \omega) \geq \rho_s$ の範囲について位相速度を求めた.

3. 福井土木事務所周辺の位相速度

図-2に示す福井土木事務所では、GL-150mの基盤までのP S検層が実施されており²⁾、P波およびS波速度構造が明らかになっており、Rayleigh波の理論位相速度を求めることができる. 常時微動観測は、土木事務所から南西に300m程度離れた御幸グラウンドで行ったため、厳密に同一地点というわけではないが、常時微動アレイ観測から算出される分散曲線との比較が可能である.

図-3の灰色線はP S検層による実測S波速度分布であり、24mまでが沖積層、24m以深が洪積層となっている. 本速度分布は解像度の高いサスペンション法によるものであるが、地表からの荷重のみによるダウンホール法では、55mより深い部分全体が670m/secとして求められており、100m付近および135~150m付近の速度の異なる層が検知されていない. 図-4は御幸グラウンドで実施された微動のアレイ観測データに、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. 5, 15, 30mのアレイ半径ごとに求まる位相速度を併せて示しているが、40mの3~4Hz付近に見られるように、一部高次モードと思われる大きな速度が算出されている周波数帯も見られるが、各アレイ半径から求められた位相速度は相互に一致していることが確認できる. 前章の(2)で示したように、空間自己相関係数の算出の際には、観測データから抽出されるm個のフレームからの期待値操作があり、空間自己相関係数ひいては位相速度の分散も算出できる. 図-5の○印は、各アレイ半径ごとに算出された位相速度について、周波数ごとの連続性を考慮するとともに、位相速度の分散が小さいアレイ半径に対応する速度を採用して対象地点の分散曲線としたものである. 同図の○印の上下の細線は位相速度の分散を示している. 短周期側に比較して、長周期側すなわち深い構造に起因する位相速度のばらつきがやや大きいことがわかる. 同図の太い灰色線は、図-3に示した実測S波速度構造に基づくRayleigh波の基本モードの理論分散曲線を示している. P S検層が行われた福井土木事務所と、アレイ観測を行った御幸公園が300m程度離れているため、厳密な比較にはならないが、観測値と理論値は良い対応が認められ、アレイ観測により同地点周辺のRayleigh波の位相速度が算定されていることが確認できる.

4. S波速度構造の簡易推定法

深さZまでの平均S波速度 V_{S_z} は、次の2つの式のように、走時により重み付けを行う方法(以下、走時 V_s)と、層厚により重み付けを行う方法(層厚 V_s)の2通りの求め方が考えられる.

$$\text{走時 } \bar{V}_{S_z} = \frac{Z}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{S_i}}} \quad (5) \quad \text{層厚 } \bar{V}_{S_z} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i V_{S_i}}{Z} \quad (6)$$

ここに H_i , V_{S_i} : i層の層厚およびS波速度を示している. 長尾, 紺野¹⁴⁾は、P S検層が行われて、S波速度構造が明らかにされている多数の地点で常時微動のアレイ観測を行い、観測されたレイリー波の波長 λ ごとの位相速度 C_λ と、深さZまでの平均S波速度 V_{S_z} との関係を調べている. 彼らは、深さ5mごとの走時および層厚による平均S波速度を近似する位相速度 C_λ を与える波長 λ を、5mごとに表形式で示しており、陽な式では表していないが、その関係は次の式で概ね近似できる.

$$\text{走時 } \bar{V}_{S_z} = C_\lambda \leftrightarrow \lambda = 1.33Z + 1.73 \quad (7)$$

$$\text{層厚 } \bar{V}_{S_z} = C_\lambda \leftrightarrow \lambda = 2.22Z \quad (8)$$

これらの式を用いて、例えば深さ 30m までの S 波速度の平均値を求めるためには、走時 V_{S30m} では、式(7)より $\lambda = 1.33 \times 30 + 1.73 = 41.63\text{m}$ に対応する位相速度を、層厚 V_{S30m} では、式(8)より $\lambda = 2.22 \times 30 = 66.6\text{m}$ に対応する位相速度を読み取ればよい。図-6は、御幸公園で観測された位相速度を、波長 λ に対してプロットしたものである。同図より、走時 V_{S30m} は 199.9m/sec 、層厚 V_{S30m} は 260.9m/sec と算出される。式(7)および(8)による近似が成り立つとすれば、両式をそれぞれ次のように表記することにより、表層から順次、区間ごとの S 波速度の近似値を求めることができる。

$$\text{走時 } \bar{V}_{S_z} = \frac{Z}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{S_i}}} = \frac{Z}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{H_i}{V_{S_i}} + \frac{H_n}{V_{S_n}}} = \frac{Z}{T_{n-1} + \frac{H_n}{V_{S_n}}} \quad (9)$$

$$\text{層厚 } \bar{V}_{S_z} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i V_{S_i}}{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} H_i V_{S_i} + H_n V_{S_n}}{Z} \quad (10)$$

5. 福井平野東西方向の常時微動特性

図-7は、図-2に示した AA'および BB'軸に沿うアレイ観測地点の分散曲線を示している。同図の平章小学校、NEC グラウンド、丸岡高校等では、高周波帯域で位相速度に振動状の乱れが認められ、高次モードの影響が現れている可能性がある。このような場合、その周波数帯域では、分散曲線の下限値が、基本モードの位相速度に近いといわれている。AA'ラインでは、丸岡町の平章小学校から、西に向かうに連れて沖積層および洪積層が厚くなると考えられるが、例えば 2Hz 付近の位相速度は、この順に小さくなっており、堆積層の厚さと調和的である。一方、表層の S 波速度に起因する 10Hz 付近の位相速度は、微地形に依存しているようであり、三角州の最上流側に位置する兵庫小学校と NEC グラウンドでは $150 \sim 160\text{m/sec}$ 程度とやや大きめに、氾濫原に分類されるその他の地点では $100 \sim 120\text{m/sec}$ という小さめの値に算出されている。BB'ラインについては、両側では山地に近く基盤岩が浅く、中央で堆積層が厚いと考えられるが、位相速度もこの傾向に対応している。また、扇状地に分類される丸岡高校では、氾濫原に位置する他の 5 箇所と比べて、高周波帯域で大きな位相速度が算出されている。

図-8はアレイ中心の加速度検出器による NS, EW および UD の 3 成分フーリエスペクトルと、水平 2 成分の相乗平均を上下成分で基準化した H/V スペクトルを併せて示したものである。Nakamura^{1,3)} によって提唱された H/V スペクトルは、当該地盤の増幅特性を近似しているとされている。同図より、H/V スペクトルには、0.3~1.5sec と、1~3sec の周期域に明瞭なピークが認められ、ほとんどのフーリエスペクトルには、H/V スペクトルのピークに対応したピークが観察できる。AA'ラインの短周期および長周期側のピークは 0.21, 1.11, 0.80, 1.28, 1.11, 1.02sec および 0.58, 1.46, 2.28, 2.05, 2.05, 2.05sec という値であり、概ね西に向かって大きくなる傾向が読み取れる。BB'ラインでみると、短周期側のピークは、東から西に向かい、0.31, 0.31, 0.56, 0.52, 1.14, 0.60sec となり、平野の両端で小さく、九頭竜川右岸付近で最大値を示している。一方、長周期側のピークは 1.14, 1.17, 1.78, 2.16, 1.46, 1.46sec と読み取れ、中央付近が大きい。

筆者は⁸⁾、H/V およびフーリエスペクトルから判読される上述の 2 つのピークが、それぞれ沖積層および第四紀層最下面に起因した固有周期であると仮定し、4分の1波長則と、沖積層および洪積層の平均 S 波速度を仮定することにより、沖積層および第四紀層の厚さを推定を試みている。ここでは、

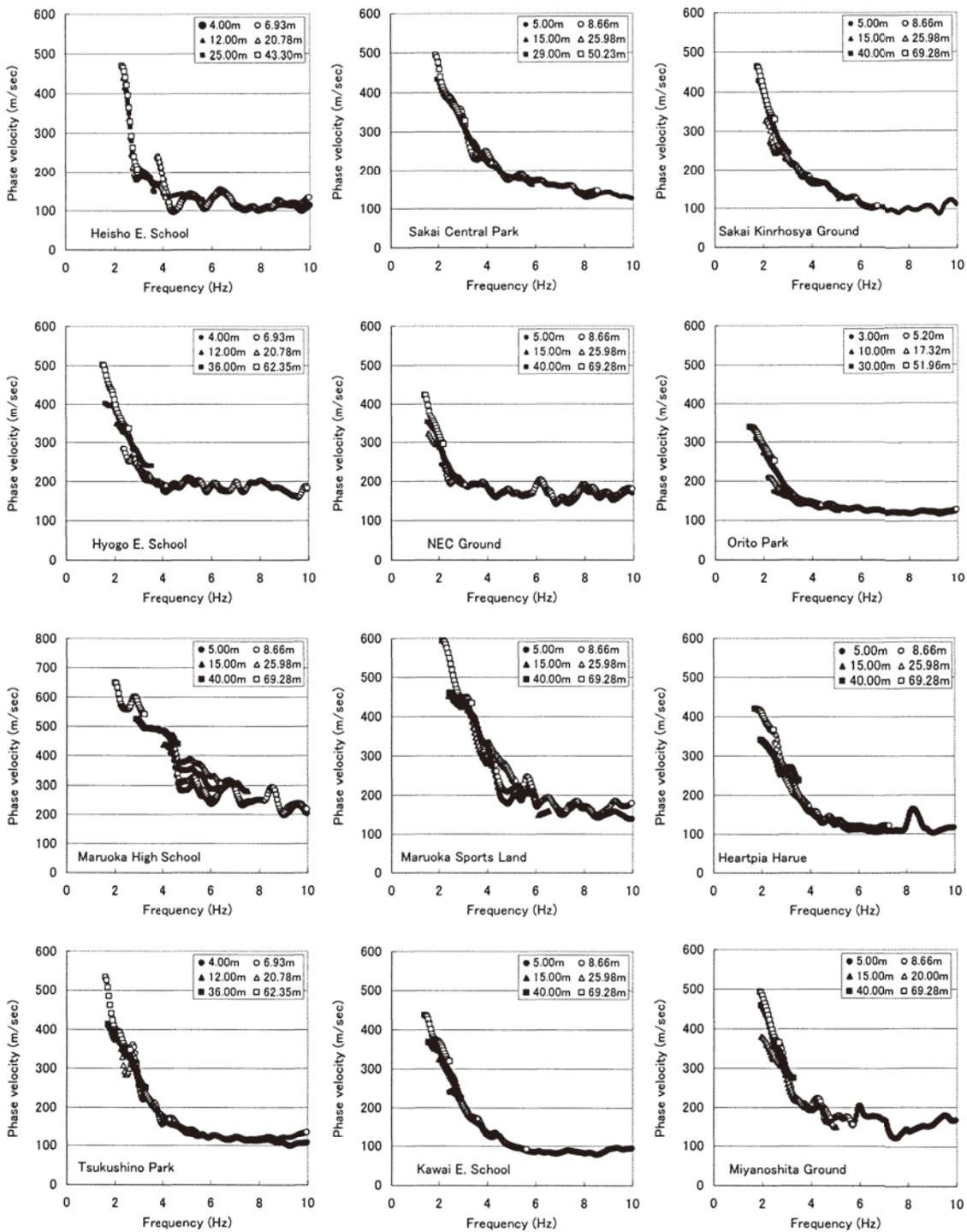


図-7 福井平野における常時微動アレイ観測に基づく表面波の位相速度(分散曲線)

既存のP S 検層結果ならびに福井平野全体の卓越周期と沖積・洪積層深さとの回帰分析などから、沖積層および洪積層のS波速度の平均値を 139 および 537m/sec とし、沖積層および第四紀層最下面の位置を算出した。図-9は、各観測点直下のS波速度の深度分布図であり、点線は算出された沖積層および第四紀層深さを、破線は福井県が地震被害予測に際して用いた推定値を示している。福井県の第四紀層深度は、50m おきの極めて粗い推定値であり、200m が最大深度となっており、現実の洪積

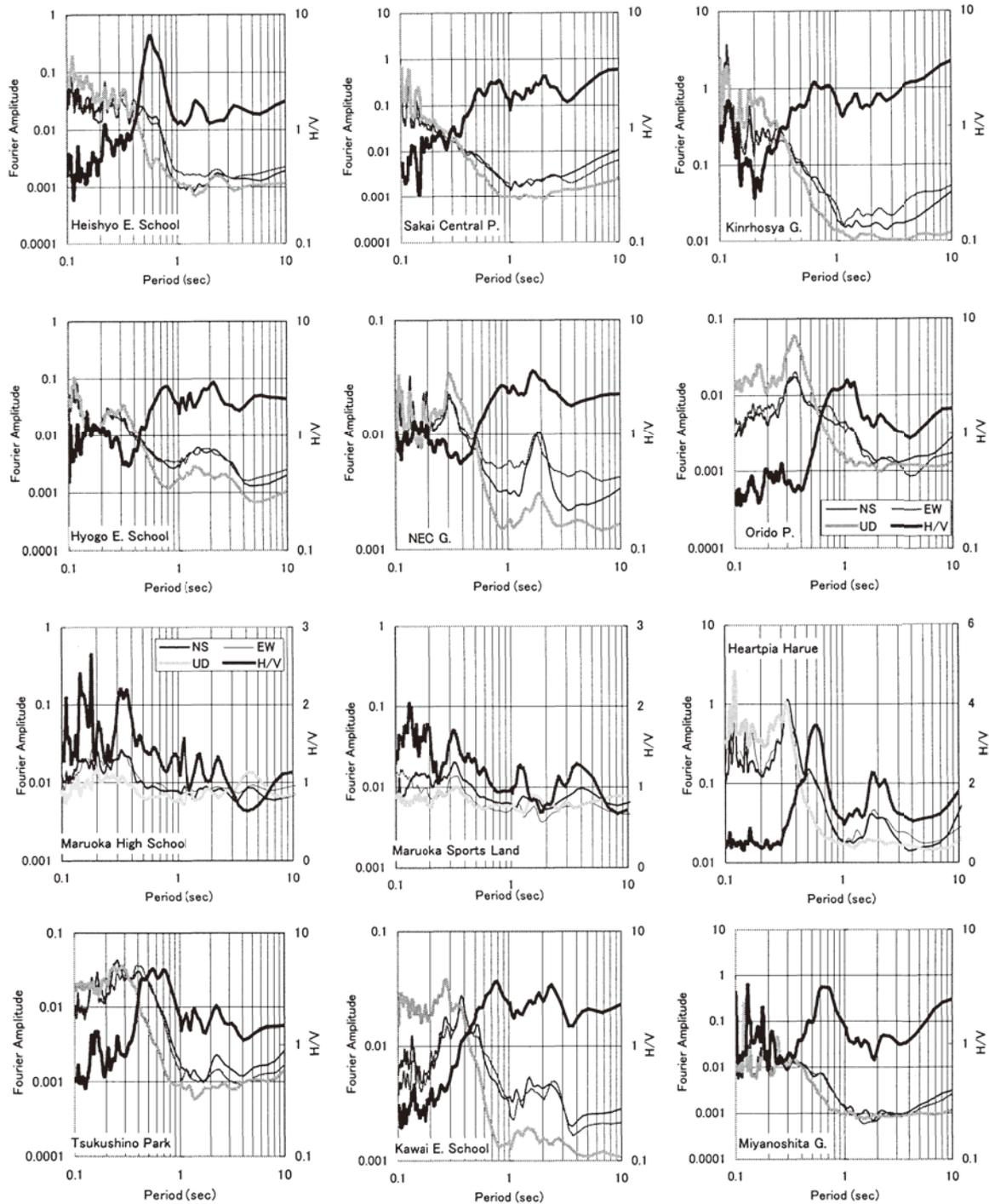


図-8 アレイ観測地点における常時微動の3成分フーリエスペクトルおよびH/Vスペクトル

層以深の地盤構造をどの程度反映しているか疑問が残る。

次に、常時微動アレイ観測に空間自己相関法を適用して求めた波長一位相速度関係に、式(9)および(10)を適用して推定した深さごとのS波速度構造について検討する。図-3に示した折れ線は、御幸グラウンドにおける推定結果であり、○は式(9)の走時 V_s に基づく方法、▲は式(10)の層厚 V_s に基づく方法による推定値を示している。いずれの方法でも、深さ 24~55m 付近の洪積層最上層のS波速度が急増して低下する部分が、その平均値付近に推定されていることを除いて、太い灰色線で示

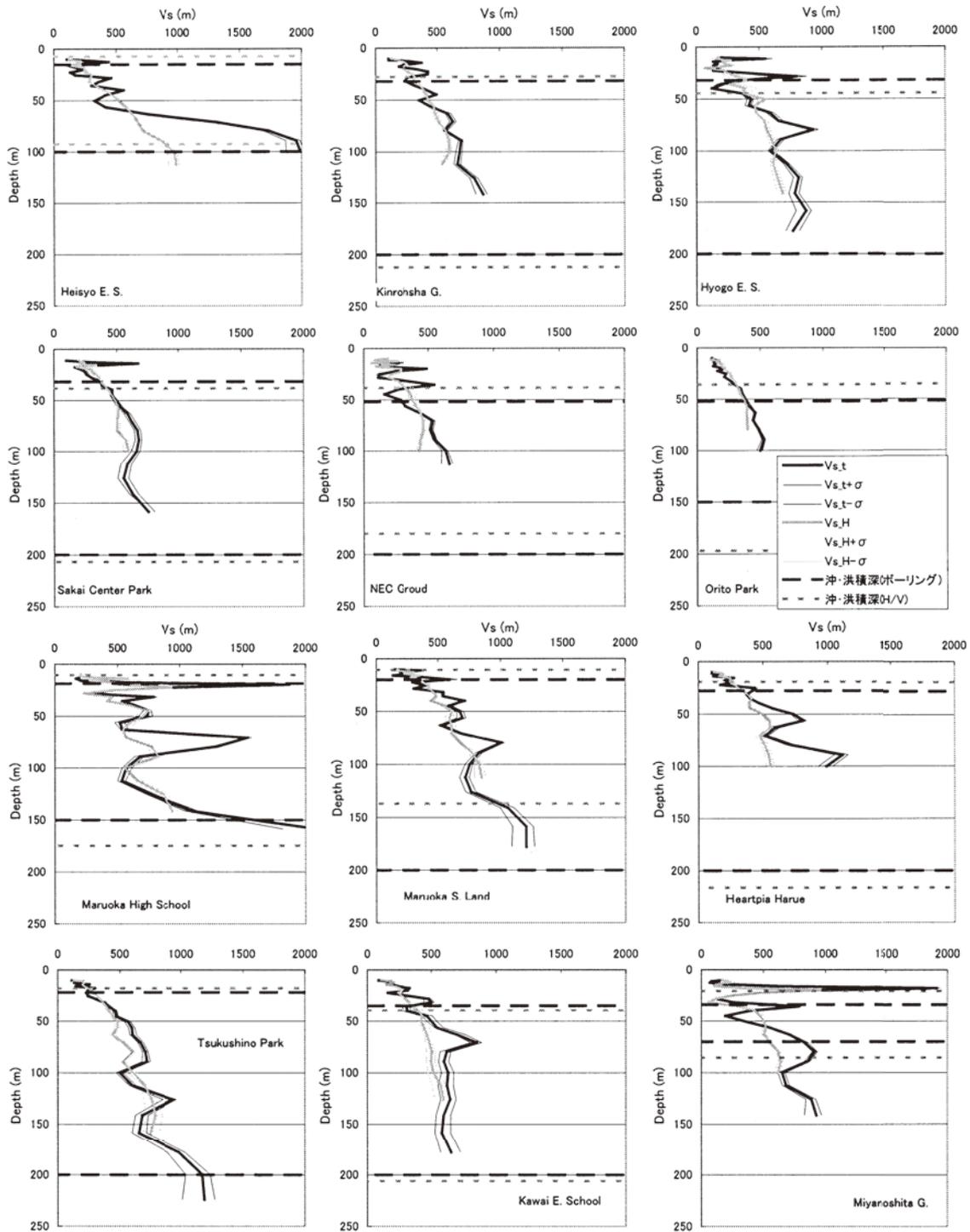


図-9 アレイ観測地点における常時微動の3成分フーリエスペクトルおよびH/Vスペクトル

したPS検層によるS波速度を精度良く推定できていると考えられる。

図-9の折れ線は、福井平野での常時微動観測地点で、同様の推定を行って得られたS波速度構造を示している。太実線が走時 V_s 、太灰色線が層厚 V_s に基づく推定値を表しており、細線は各々の分散を示している。走時 V_s に基づく推定値は、図-7に示した分散曲線の高周波域の振動的な乱れに起因して、50m程度より浅い部分でS波速度の急増減が認められる。しかしながら、いずれの地点で

でも、点線および破線で示した H/V とボーリングデータに基づく沖積層ならびに第四紀層深さと、 S 波速度が急増する深さが対応している。例えば、山地境界に比較的近い平章小学校の推定 S 波速度分布を見ると、 H/V およびボーリングデータに基づく沖積層深さ付近で、 S 波速度は 120m/sec から 300m/sec 前後に急増しており、第四紀層深さに近い 70m 程度で、 500 から 2000m/sec に急増していることがわかる。一方、層厚 V_s に基づく推定値は比較的安定しており、深さ 50m 程度までは、走時 V_s に基づく方法のばらつきの平均値的な値をとり、 50m 程度以深では走時 V_s に基づく方法の下限値付近に分布していることがわかる。また、層厚 V_s に基づく方法では、式(8)から明らかなように、同じ波長 λ に対し浅い深度 Z に対応しているため、推定できる深さは、走時 V_s に基づく方法に比較して小さい。これらの結果から、アレイ観測から求められた波長一位相速度関係が安定している場合には、走時 V_s に基づく方法を採用し、高周波域（短波長領域）で振動的な乱れが見られる場合には、 50m 付近より浅い部分については層厚 V_s に基づく方法をとることにより、両推定方法の長所を取り入れた地盤構造の推定が可能になると考えられる。

6. あとがき

福井平野周辺の S 波速度構造を解明することを最終目的とし、本研究では福井平野に散在する学校の校庭、グラウンドおよび公園などにおいて常時微動のアレイ観測を行うとともに、空間自己相関法を適用した Rayleigh 波速度構造と、それに基づく地盤構造の推定結果について検討を加えた。本研究を通して得られた知見を以下に示す。

- 1) 本研究で採用した常時微動アレイ観測システムで得られた観測情報に、空間自己相関法を適用することにより、Rayleigh 波の位相速度が安定して求められることを確認した。
- 2) 福井平野東西方向に設定された 12 箇所の観測点から求められた位相速度から、平野端部に比較して中央部に位置する観測点では、堆積層が厚い構造を反映して、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。
- 3) 波長 λ の位相速度と、深さ Z までの平均 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を提案した。
- 4) 推定された S 波速度構造は、 PS 検層に基づく S 波速度分布を精度良く再現していること、既存の沖積層および第四紀層深度と調和的であり、平野全体の地盤構造推定の一手段となりうることを確認した。

今後は観測地点を増やし、福井平野周辺の位相速度データを高い密度で収集するとともに、広い波長範囲で安定して位相速度関係が得られるように、位相速度の算出方法を改良し、精度が高く信頼性の高い S 波速度構造推定の基礎データを蓄積していく予定である。

参考文献

- 1) 北陸震災調査特別委員会：昭和 23 年福井地震震害調査報告 II 建築部門，1951.
- 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) 福井県：福井平野東縁断層帯に関する調査成果報告書，1998.
- 4) 衣笠善博，荒井克彦，鳥海勲，山本博文，安藤雅孝，平野憲雄：福井平野の活断層について（序報），地震，第 2 輯，第 52 巻，pp171-176，1999.
- 5) 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.
- 6) 山中浩明，栗田勝実，瀬尾和大，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.
- 7) 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.

- 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, I, 掲載決定.
- 9) Aki, K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with spatial reference to microtremor, Bull. Earthq. Res. Inst., 35, 415-456, 1967.
- 10) Capon, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, 1408-1418, 1969.
- 11) 宮腰研, 岡田広, 凌甦群, 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, 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, 26-41, 1996.
- 13) Nakamura, Y. : A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI, Vol.30, No.1, 273-281, 1989.
- 14) 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, 225-235, 2002.