

微動アレイ観測による福岡市南部の地盤構造の推定

森 重信

1. はじめに

地震動の特性は、地盤の構造による影響を大きく受けることが明らかとなっており、地盤構造を把握しておくことは、強震動の予測をする際に非常に重要である。福岡市域では、これまでに、木下ら¹⁾によって福岡市の4つの地点でアレイ微動による地盤構造の推定が行われているが、福岡市南部での地下構造探査は行われていない。

また、福岡では警固断層による地震動の発生が危惧されており、都市防災・減災の観点から、定量的な地震動の予測を行うことが重要である。こうした中で、梅田ら²⁾は、中道・川瀬³⁾の福岡市域の3次元地盤構造モデルに基づいて、福岡県西方沖地震で観測された記録波形に理論波形が合うように震源モデルのチューニングを行っている。しかし、城南区の観測点で、震源モデルのチューニングでは観測波形との一致度を向上させられなかったことから、福岡市南部で中道・川瀬モデルを見直す必要があることを指摘している。

そこで、本研究では、福岡市における地震動の特性を理解するための基礎資料を得ることを目的として、福岡市の城南区および南区においてアレイ微動観測を実施し、地盤構造の推定を行う。

2. アレイ微動観測

アレイ観測を行った地点は、福岡市の城南区と南区の2地点である。城南区は梅田ら²⁾が行った研究において一致度の向上が見られなかった地点であり、南区は木下ら¹⁾によってアレイ微動観測が行われていない地点である。各地点で、サイズの異なる4つのアレイで観測を行った。以降、アレイのサイズは大きいものからLLアレイ、Lアレイ、Sアレイ、SSアレイとする。アレイの形状は大きさの異なる3つの三角形で構成され、それぞれの三角形の頂点3点に地震計を配置し、中心点と合わせて合計10点で同時に観測を行った。各観測地点のLLアレイのうち、最も外側の観測点の位置を図1に示す。

計測は1アレイにつき、15分の計測を4回行った。地震計を設置する際には、交通振動によるノイズの影

響を考え、学校や公園などの敷地を使用した。観測を行った日時を表1に示す。

本研究で行った観測には、データロガー (LS-8000WD) とアンプを内蔵した加速度地震計 (SMAR-6A3P) を使用した。計測の際、各観測点での時間の同時性を確保するために、GPS 信号を利用して時間ずれの補正を行った。サンプリング周波数は 100Hz、アンプ倍率 500 倍である。なお、一部の観測点では、交通振動が大きいためアンプ倍率を 200 倍としている。



図1 LLアレイの観測点位置
(中心点および外側の3点)

表1 アレイ微動観測の概要

| 観測地点 | アレイサイズ | 観測日時 | 観測点数 | 中心点からの 最小距離(m) | 中心点からの 最大距離(m) |
|------|--------|--------------------------|------|-------------------|-------------------|
| 城南区 | LL | 2008/8/21 16:10~17:27 | 10 | 216.00 | 1011.48 |
| | L | 2008/8/21 14:20~15:37 | 10 | 90.99 | 519.11 |
| | S | 2008/8/20 13:00~14:17 | 10 | 57.50 | 293.90 |
| | SS | 2008/8/20 11:20~12:37 | 10 | 30.63 | 185.39 |
| 南区 | LL | 2008/8/19 16:00~17:17 | 10 | 218.61 | 1102.83 |
| | L | 2008/8/19 14:20~15:37 | 10 | 73.44 | 591.51 |
| | S | 2008/8/18 15:48~16:57 | 10 | 56.54 | 282.00 |
| | SS | 2008/8/18 14:18~15:27 | 10 | 22.60 | 140.41 |

3. F-Kスペクトル解析

観測記録より得られたデータのうち、ノイズ等の影響が小さいと考えられるものを選択し、鉛直成分を20.48秒ずつオーバーラップさせながら40.96秒ごとに波形を分割した。そして、これらの波形を用いてCaponの方法⁴⁾によりF-Kスペクトル解析を行い、位相速度を求めた。

解析では上下成分のみを用い、振動数ごとのF-Kスペクトルを求めた。ピークの読み取りでは、まず、単一のピークが明瞭に出ているものを採用した。次にピークが複数ある場合でも、波数の値(位相速度の値)がほぼ同じ(図では、円周上に複数のピークがある)場合は採用した。なお、ある周波数の位相速度の値が、ピークが明瞭に出ているスペクトルから求めた位相速度の値と近い場合でも、スペクトルの形状が複雑なものでは採用していない。F-Kスペクトル解析によって得られた、城南区および南区の位相速度の平均値と標準偏差を図2に示す。

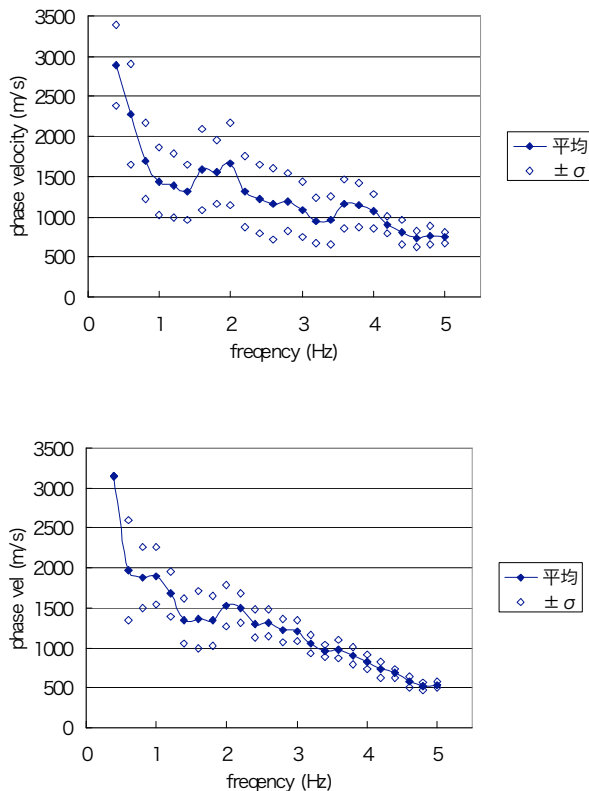


図2 F-Kスペクトル解析から求めた位相速度の平均値(上:城南区、下:南区)

4. 地盤構造の推定

観測結果から得られた位相速度の平均値と理論位相速度が一致するように地盤構造の推定を行った。理論位相速度を求める際には、パラメータとして、層厚、P波速度、S波速度、および密度を設定する必要がある。表層の地盤構造については、まず、観測点付近のボーリングデータをもとに層厚を決定した。ボーリングデータには速度や密度に関するデータは記載されていないため、N値のデータをもとに地震防災マップ作成技術資料⁵⁾にならって、N値とS波速度の関係式からS波速度を求めた。密度についてはLudwig et al. (1970)⁶⁾に掲載されている密度とS波・P波速度の関係のグラフから目視でおよその値を読み取った。P波速度については、狐崎・他⁷⁾のP波速度とS波速度の関係式から求めた。表層地盤以深の地盤構造については、中道・川瀬が作成した3次元地盤構造モデルのS波速度で拘束し、層厚を変数とした。密度およびP波速度については、表層の地盤と同様に設定し、理論位相速度を求めた。図3に観測記録から得られた位相速度の分散曲線と推定した地盤構造から得られた理論位相速度の分散曲線との比較を示す。推定された地下構造を表2および図4に示す。推定された地盤構造から、城南区、南区の両観測地点において、地下50mから70m付近でS波速度が1 km/sを超える層が現れる。また、S波速度2 km/sの層は地下600mから800mで現れており、木下ら¹⁾が推定した地下構造と概ね対応する結果となった。

5. 推定した地盤構造のH/Vスペクトル

F-Kスペクトル解析により推定した地盤構造からレイリー波のH/V理論値を求め、アレイ微動観測によって得られた微動のH/Vスペクトルとの比較を行った。ここで、H/Vスペクトルは各観測地点のLLアレイデータから水平成分のフーリエスペクトルの二乗根と鉛直成分のフーリエスペクトルの比である。図5に理論H/Vと微動のH/Vスペクトルを示す。城南区ではH/V理論値に顕著なピークは見られないが、その形状は観測記録から得られたH/Vスペクトルと対応している。また、南区では観測記録から得られたスペクトルのピークが3 Hz前後であるのに対して、理論値のピークが2 Hzとなった。これは、観測点付近のボーリングデータをもとに設定した表層地盤では観測点の地盤構造を表現できていなかった可能性があると考えられる。

6. 推定地盤による増幅特性

推定した地盤構造をもとに、1次元重複反射理論に基づき、地盤の増幅特性を求めた。なお、Q値は、 $Q=19.05 f^{0.52}$ としている⁸⁾。図6に城南区および南区の観測点付近のS波速度 3.5 km/s までの地盤に対する増幅率を示す。大きな増幅ピークは2 Hz以上の周波数域に限られ、最大の増幅は7~8 Hzで生じている。これは図4および表2に示したように、これらの地点が比較的浅い表層層厚となっていることを反映した結果である。しかし、同定されたS波速度600m/sの工学的基盤の厚さは40~50mあって、2Hz付近のピークの出現に寄与しているものと推察される。

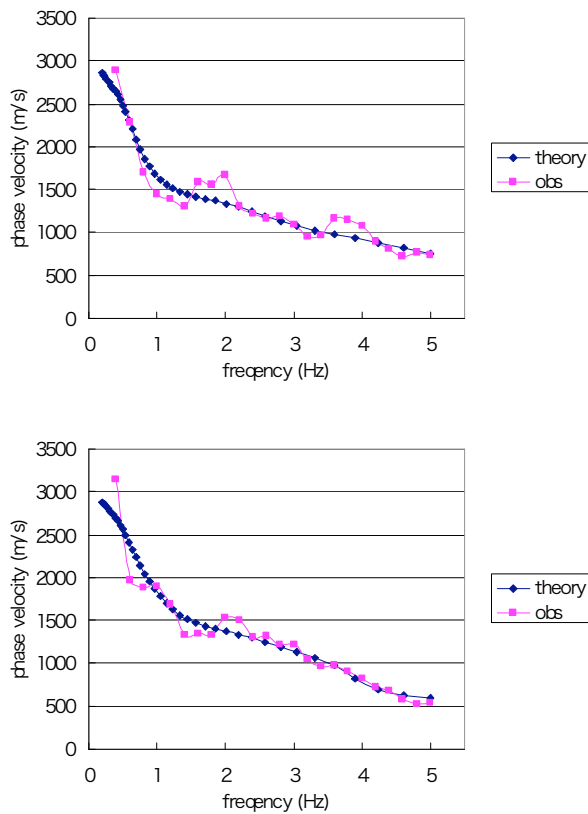


図3 F-Kスペクトル解析から求めた位相速度の
 平均値と理論分散曲線の比較
 (左下：城南区、上：南区)

7. まとめ

本研究では、深部地盤構造がほとんど未知である福岡市の城南区および南区においてアレイ微動観測を行い、得られた加速度記録からF-Kスペクトル解析を行うことによって、位相速度の分散曲線を得た。この結果に一致する理論分散曲線を求め、地盤構造の推定を行った。その結果、福岡市南部では、約600mから800mでS波速度が2km/sを超える層が現れることがわかった。これは木下ら¹⁾が推定した地盤構造と概ね一致している。また、南区ではH/Vスペクトルの理論値と観測値にずれがあることから、表層地盤のチューニングを考慮したより詳細な解析が必要であると考えられる。

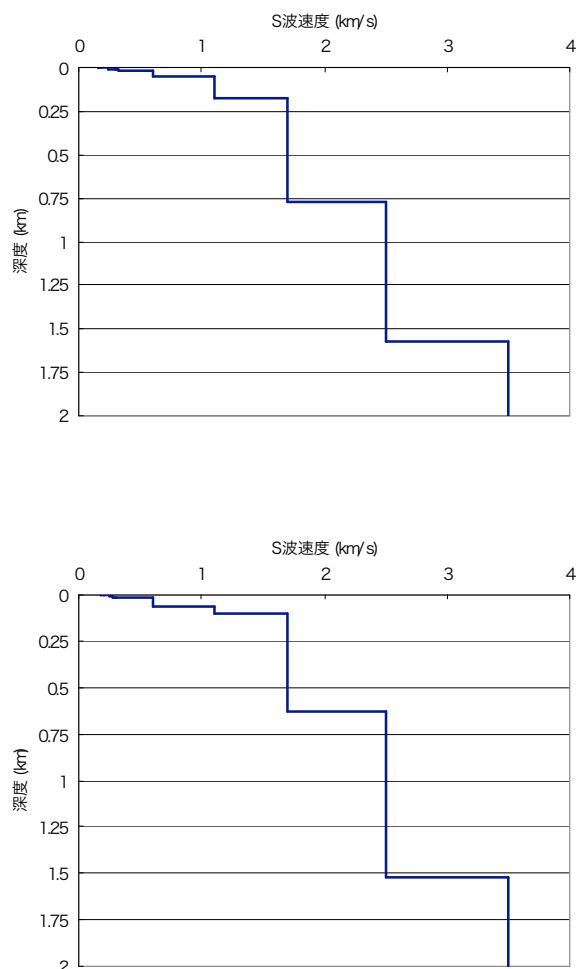


図4 推定した地盤構造
 (上：城南区、下：南区)

表2 推定した地盤構造のパラメータ
(上：城南区、下：南区)

| 層厚 (m) | P波速度 (m/s) | S波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) |
|--------|------------|------------|-------------------------|
| 0.6 | 1469 | 161 | 1.7 |
| 1.2 | 1462 | 155 | 1.7 |
| 1 | 1488 | 179 | 1.7 |
| 2 | 1550 | 234 | 1.75 |
| 0.8 | 1614 | 292 | 1.8 |
| 8 | 1645 | 320 | 1.8 |
| 40 | 1956 | 600 | 1.85 |
| 120 | 2511 | 1100 | 2 |
| 600 | 3177 | 1700 | 2.1 |
| 800 | 4065 | 2500 | 2.25 |
| ∞ | 5175 | 3500 | 2.7 |

| 層厚 (m) | P波速度 (m/s) | S波速度 (m/s) | 密度 (g/cm ³) |
|--------|------------|------------|-------------------------|
| 0.6 | 1487 | 178 | 1.70 |
| 1.8 | 1508 | 197 | 1.70 |
| 3.0 | 1563 | 246 | 1.75 |
| 6.7 | 1588 | 268 | 1.75 |
| 1.7 | 1667 | 300 | 1.80 |
| 50.0 | 1956 | 600 | 1.85 |
| 40.0 | 2511 | 1100 | 2.00 |
| 520.0 | 3177 | 1700 | 2.10 |
| 900.0 | 4065 | 2500 | 2.25 |
| ∞ | 5175 | 3500 | 2.70 |

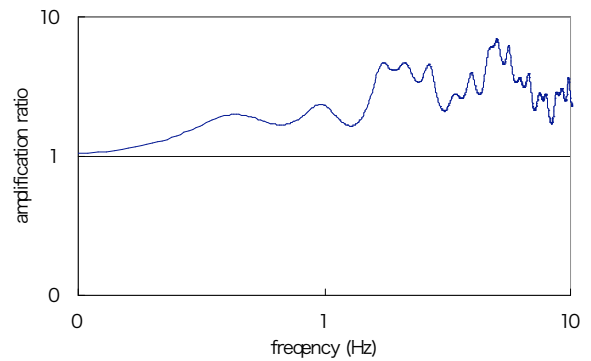
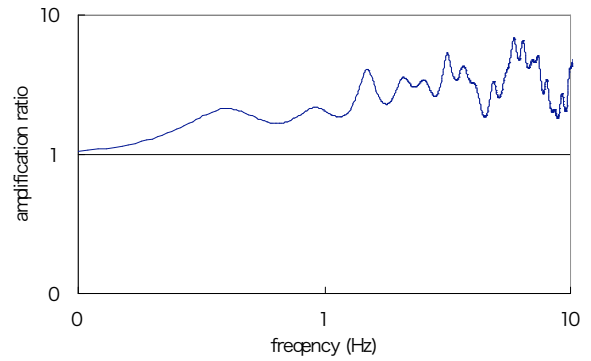


図6 推定地盤構造から求めた観測点付近の増幅特性
(上：城南区、下：南区)

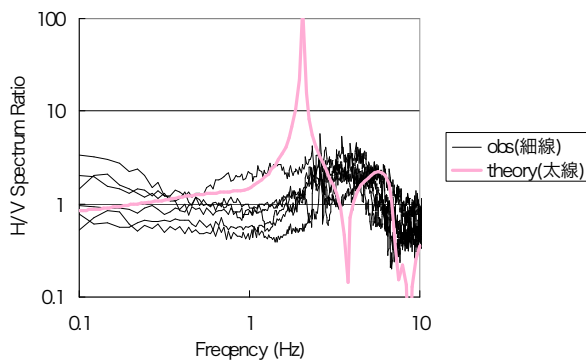
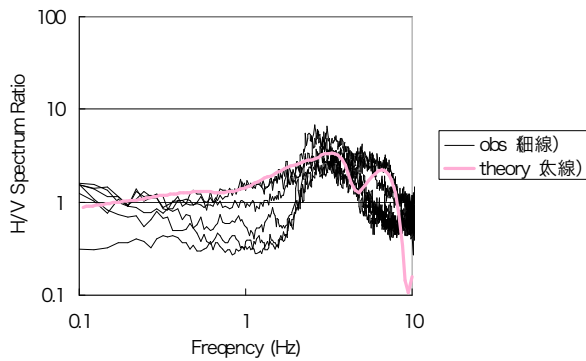


図5 H/Vの観測値と理論値の比較
(上：城南区、下：南区)

参考文献

- 1) 木下健：アレイ微動による福岡市の深部地盤構造の推定 2001年度 九州大学大学院修士論文, 2002.
- 2) 梅田尚子：福岡県西方沖地震の3次元有限差分法による強震動シミュレーション, 2005年度 九州大学卒業論文, 2006.
- 3) 中道聡・川瀬博：福岡市における三次元地下構造を考慮したハイブリッド法による広周期帯域強震動予測, 日本建築学会構造形論文集, 第560号, 83-91, 2002.
- 4) Capon, J.: High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, 1408-1418, 1969.
- 5) 内閣府(2005)：地震防災マップ作成技術資料, <http://www.bousai.go.jp>
- 6) Ludwig et al.: Seismic refraction, Maxwell, A. ed., The sea, 4. Wiley Interscience, New York, 53-84, 1970.
- 7) 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, pp4-10, 1990.
- 8) Fukushima, Y., S. Kinoshita, and H. Sato: Measurements of Q^{-1} for S waves in mudstone at Chikura, Japan: Comparison of incident and reflected phase in borehole seismograms, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 82, 148-163, 1992