

地震動 H/V スペクトル比に基づく福岡平野の地盤震動特性

土屋 郁武

1. はじめに

福岡平野は博多湾に面しており、福岡市を中心に西は糸島平野、東は宗像平野まで広がり、その大部分は河川などの堆積作用によって形成された沖積平野である。平野直下には警固断層帯が存在し、その北西部では 2005 年 3 月 20 日午前 10 時 53 分に、気象庁マグニチュード (M_j) 7.0、最大震度 6 弱の福岡県西方沖の地震が発生した。震源に近い玄海島だけではなく震源から離れた平野部においても強い揺れや被害が生じた¹⁾。これは福岡平野を伝わる地震動が地盤の影響で増幅されたことが原因の一つとして考えられる。また、警固断層帯南東部については、今後 30 年以内に 0.3~6% の確率で大地震が発生するとされており、最も逼迫性の高い S ランクに分類されている²⁾。

そこで本研究では、福岡平野の地震観測点を対象に、地震動の S 波の水平動と上下動のスペクトル比(以降、H/V スペクトル比)³⁾に基づいて各観測点の地盤震動特性を分析する。

2. 地震観測記録による地盤震動特性

2.1 解析方法

本研究で用いる H/V スペクトル比は単点での地盤震動特性の評価が可能であり、地盤の卓越周期の推定にもよく用いられる。また、近年では拡散波動場理論によって、その物理的な意味についても明確にされており、地下構造モデルと直接関連付けられている³⁾。

本研究における H/V スペクトル比は地震動の NS 成分、EW 成分、UD 成分の S 波部分のフーリエスペクトル FS_{NS} 、 FS_{EW} 、 FS_{UD} を用いて、以下の式で算出した。

$$H/V = \sqrt{FS_{NS}^2 + FS_{EW}^2} / FS_{UD} \quad (1)$$

フーリエスペクトルの算出は目視で確認した S 波開始時刻から 20.48 秒間を用い、平滑化にはバンド幅 0.4 Hz の Parzen window を用いた。複数の観測記録から算出された H/V スペクトル比の対数平均を、それぞれの観測点における H/V スペクトル比とした。

2.2 対象観測点

本研究における対象観測点は、防災科学技術研究所の K-NET ならびに KiK-net 観測点⁵⁾の 4 観測点に加えて、気象庁の 6 観測点、福岡県震度計の 21 観測点、計 31 観測点とした。図 1 に対象観測点の配置と福岡平野の地質図⁴⁾を示す。K-NET 福岡観測点 (FKO006) や県震度計福岡市早良区観測点 (FUKU0014) は地震による被害が懸念される埋立地上に位置する。気象庁手光観測点 (9C7) は花崗岩上にあり、同志摩初観測点 (9C9) や県震度計宇美町観測点 (FUKU0071)、同志免町観測点 (FUKU0073) は海岸平野堆積物上に位置する。また、KiK-net 宇美観測点 (FKOH03) や県震度計須恵町観測点 (FUKU0074) では段丘堆積物上などの標高が高くなっている場所に立地し、岩盤観測点となっている。

2.3 解析に用いた地震観測記録

解析に用いた地震観測記録は、以下の条件に基づいて抽出した。

- ・ 1996 年 10 月 1 日から 2018 年 12 月 1 日に発生した地震
- ・ 震央距離が 300 km 以内の記録
- ・ M_j が 4.0 以上
- ・ 最大加速度 100 cm/s^2 以下 (2005 年福岡県西方沖の地震の最大余震の記録のみ 100 cm/s^2 を超える)

以上の条件によって、抽出された地震数は 207 地震であり、その中から K-NET、KiK-net の対象観測点では、対象とした 4 観測点で共通に記録された 10 地震、気象庁の観測網では対象 6 観測点に共通の 17 地震、県震度計の観測網では対象の 21 の観測点に共通の 17 地震を解析対象とした。

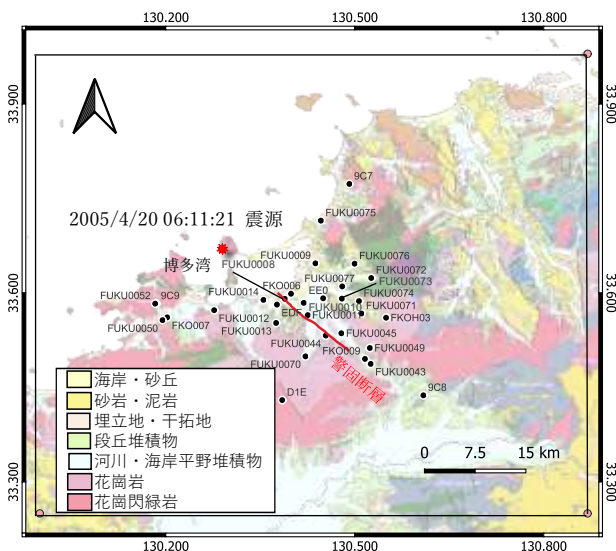


図 1 対象観測点 (丸印) の分布と平野の地質⁴⁾

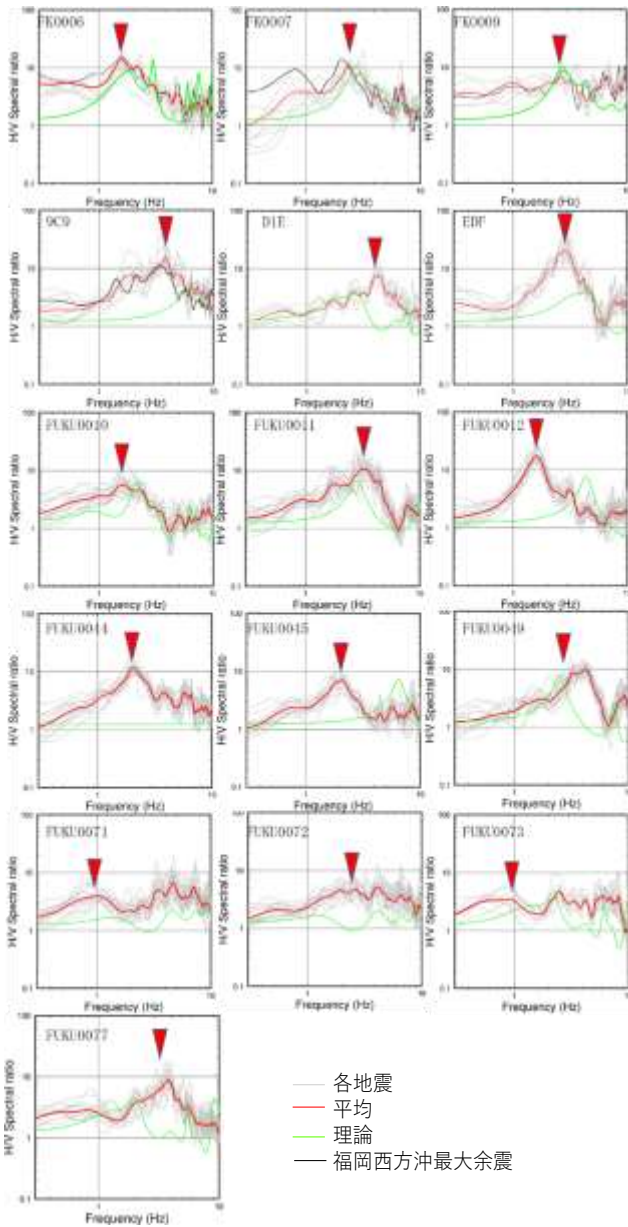


図2 地震動のH/Vスペクトル比

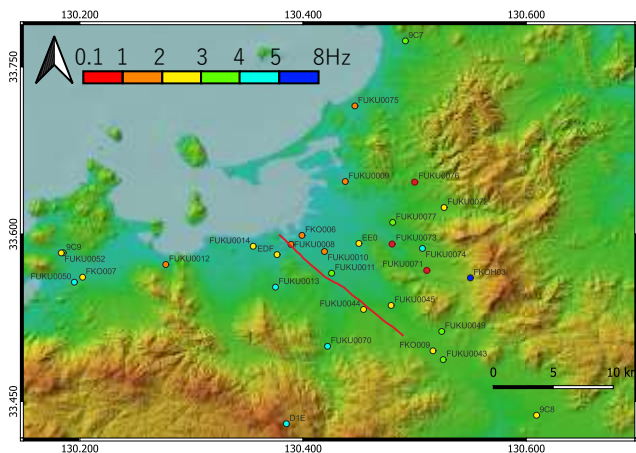
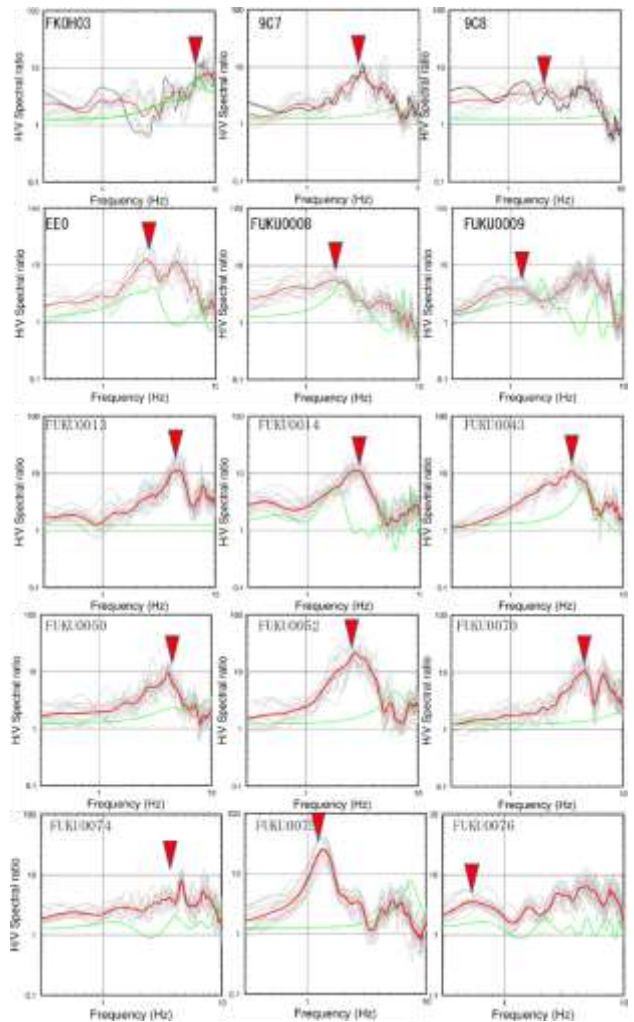


図3 一次ピーク周波数の空間分布と標高図⁶⁾



2.4 解析結果と考察

図2に、解析対象とした31観測点において地震記録から算出されたH/Vスペクトル比とその平均値を示す。観測記録のS/N比を考慮して、対象周波数帯域は0.3~10 Hzとした。

平野の西端、北東端に位置している9C7や9C9の低周波側でのピーク周波数は3.2 Hz、3.8 Hzと3.0 Hz以上であるのに対して、平野の中心部に位置し、警固断層の北東側に位置するFKO006では1.6 Hzと低い値を示す。また、岩盤サイトであるFKOH03では7.9 Hzと比較的高周波成分が卓越する。これらを1次ピーク周波数として、図2には赤三角印で示し、図3には平野内のすべての対象観測点のH/Vスペクトル比の平均値から読み取った1次ピーク周波数の空間分布を示す。

平野全体の傾向として警固断層を境にして北東側と南西側でピーク周波数に差がある。南西部ではFKO007の2.4 Hz、県震度計糸島市観測点(FUKU0050)の4.1 Hz、同糸島志摩観測点(FUKU0052)の2.7 Hzなど2~5 Hzにピークを持つ観測点が多い。臨海部に位置する県震度計福岡市西区観測点(FUKU0012)の1.6

Hz が最も低く、他に 2 Hz を下回る 1 次ピーク周波数を持つ観測点は見られなかった。また、地質条件が同じ観測点であっても警固断層の南西側の FUKU0014 は 2.8 Hz と北東側の FKO006 と比べてピーク周波数はやや高かった。

北東側の臨海部に位置する観測点は 2 Hz 以下に 1 次ピーク周波数を持つ観測点が多い傾向にあり、先述の FKO006 の他に、県震度計福岡中央区舞鶴観測点 (FUKU0008)、同福岡市東区観測点 (FUKU0009)、同新宮町観測点 (FUKU0075) で 1.8 Hz、1.2 Hz、1.4 Hz となり、警固断層の付近では FUKU0008 で最も低い。幸佐・他 (2005) ⁷⁾ は、警固断層を境に基盤が大きく変化しており、西側に比べ東側は堆積層が厚く、それがこの地域の地震動の増幅に差を生じさせている可能性を指摘している。本研究における地盤の 1 次ピーク周波数が警固断層の東西で異なる傾向を示したのも、同様の要因であると考えられる。

北東側では内陸部にも関わらず FUKU0071 や FUKU0073、県震度計久山町観測点 (FUKU0076) のようにピーク周波数が 0.97 Hz、0.88 Hz、0.53 Hz と 1 Hz を下回る値を取る観測点がある。防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS の深部地盤構造モデル ⁸⁾ によると、これらの観測点付近の地震基盤上面深さは 500~700 m とその周辺に比べて深くなっており、厚い堆積層の影響が反映されていると考えられる。一方、比較的標高が高い FUKU0074 や FKO003 は 4.6 Hz、7.6 Hz と高周波数帯で卓越する。

また、北東側は南西側よりも比較的低い 1 次ピーク周波数を示すが、大局的には、1 Hz 未満の低周波数帯が卓越する地域はあまり見られない。内陸部では県震度計春日市観測点 (FUKU0044) で 2.1 Hz、同筑紫野観測点 (FUKU0043) で 3.5 Hz、気象庁筑前町高場観測点 (9C8) で 2.1 Hz と 2~4 Hz が卓越する。4.0 Hz 以上の高周波数帯域でピーク周波数を取る観測点は警固断層南西側の内陸部の観測点や段丘堆積物や背振山地上や三郡山地周辺に多く位置していた。

3. 理論計算による考察

3.1 1次元地下構造モデルを用いた理論 H/V スペクトル比との比較

図 2 に、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS の深部地盤構造モデル ⁸⁾ から得た観測点直下の 1 次元速度構造に基づく理論 H/V スペクトル比を併せて示す。また、K-NET、KiK-net の対象観測点では PS 検層結果の浅部構造も用いているが、その他の

観測点では S 波伝播速度 600m/s 以上の地下構造のみを使用している。この理論 H/V スペクトル比は拡散波動場理論 ³⁾ に基づいて式 (2) によって算出した。

$$H(\omega)/V(\omega) = \sqrt{\frac{2\alpha_H |TF_1(\omega)|}{\beta_H |TF_3(\omega)|}} \quad (2)$$

ここで α_H は基盤の P 波速度、 β_H は基盤の S 波速度、 $TF_1(\omega)$ は S 波の伝達関数、 $TF_3(\omega)$ は P 波の伝達関数を表す。また、各層の密度 ρ (g/cm³) は以下に示す V_S (km/s) との関係式 ⁹⁾ から求めた。

$$\rho = 1.4 + 1.67\sqrt{V_S} \quad (3)$$

FKOH03 の理論 H/V スペクトル比の 1 次ピーク周波数は 7.2 Hz であり、観測値の 8.0 Hz との差は 1 Hz 未満と比較的良好に対応する。また、FKO006 も観測 H/V スペクトル比の一次ピーク周波数の 1.6 Hz に対して理論 H/V スペクトル比では 1.8 Hz と対応が良く、高周波数帯のスペクトル比の形状もよく対応している。しかし、平野の端に位置している 9C7 と 9C9 における観測 H/V スペクトル比のピーク周波数はそれぞれ 3.2 Hz、3.8 Hz であるが、理論 H/V スペクトル比では 6.2 Hz、6.3 Hz と 2~3 Hz 程度の差が確認され、この他にも 9C8、FUKU0012、FUKU0013、FUKU0044、FUKU0045、FUKU0052、FUKU0070、FUKU0075 のように理論 H/V スペクトル比と観測 H/V スペクトル比に差が見られた観測点が散見された。この差異は、理論計算で用いた地下構造モデルには工学的基盤以浅の地下構造は含まれていないことによると考えられる。より詳細な検討を行うためには、浅部の地盤構造を含む地下構造の調査が必要である。

3.2 3次元地下構造モデルを用いた強震動シミュレーション

本研究では、J-SHIS の深部地盤構造モデルに基づいて、防災科学技術研究所により提供されている 3 次元差分法プログラム GMS ¹⁰⁾ を用いて強震動シミュレーションを行った。対象とした地震は、2005 年 4 月 20 日 6 時 11 分に発生した Mj 5.8 の福岡県西方沖の最大余震である。震源は点震源を仮定しており、震源パラメータは気象庁が公開しているメカニズム、九州大学 ¹¹⁾ によって定められた震源位置、防災科学技術研究所 F-net ¹²⁾ の地震モーメント M_0 を用いた。解析領域は福岡平野を含む約 81 km × 81 km (図 1 の黒枠)、深さ 20 km であり、有効周波数帯域は 0.1~1 Hz、格子間隔は地表付近は 100 m、深さ 3.0 km 以深で 300 m に設定し、0.008 秒刻みで 120 秒間 (計算ステップ数: 15000) の地震動の計算を行った。

3.3 シミュレーション結果と観測記録の比較

図5 上段に、1次元地下構造から算出した理論H/Vスペクトル比の形状が観測記録の平均H/Vスペクトル比と類似していたFKO006と、理論H/Vスペクトル比が観測記録の平均H/Vスペクトル比とは異なり平坦な形状になった9C7のH/Vスペクトル比を示す。本研究のシミュレーションの対象周波数は0.1~1 Hzのため1 Hzより高周波数側にはハッチをかけてある。観測記録の平均H/Vスペクトル比や福岡県西方沖の最大余震のH/Vスペクトル比を比較したところ、FKO006と9C7において3次元シミュレーションの結果は観測と比較的良好な対応が得られた。

また、観測H/Vスペクトル比の1次ピーク周波数が1 Hz未満の観測点のFUKU0073、FUKU0076における比較を図5 下段に示す。観測H/Vスペクトル比の1次ピーク周波数の値がFUKU0073で0.88 Hz、FUKU0076で0.53 Hzであるのに対して、3次元シミュレーションによる結果は0.85 Hz、0.73 Hzと観測同様、1 Hz以下の低周波数成分が卓越する結果となった。

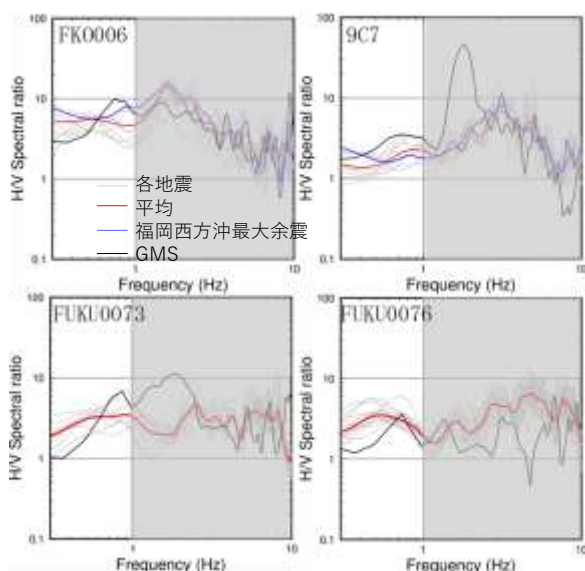


図5 H/V スペクトル比の比較

4. まとめ

本研究では福岡平野の観測点で得られた強震記録からH/Vスペクトル比を算出し、地盤震動特性を把握した。さらにJ-SHISの深部地盤構造モデルを用いて、拡散波動場理論に基づく1次元での理論H/Vスペクトル比、3次元強震動シミュレーションによるH/Vスペクトル比を算出し、観測H/Vスペクトル比と比較した。得られた知見を以下に示す。

- ・ 警固断層の東西で1次ピーク周波数が変化し、平野の南西側には2~5 Hzが卓越しやすく、北東側

では南西側に比べ2 Hz以下の低周波数帯が卓越する観測点が多い。

- ・ 平野全体で1次ピーク周波数が1 Hz未満を下回る場所は少ないが、平野内陸部の三郡山地付近のFUKU0071やFUKU0073のように、堆積層が厚い地域で1 Hzを下回る観測点が散見された。
- ・ 観測と理論H/Vスペクトル比の1次ピーク周波数が一致しない観測点がいくつかみられた。これは解析に使用した地下構造モデルにおいて浅部地盤構造を考慮されていないことが一つの要因であると考えられる。より精度の高い計算には、浅部地盤構造を含む詳細な地盤の調査が必要である。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所 K-NET、KiK-net、気象庁、福岡県震度計の強震記録を使用した。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 川瀬博: 福岡県西方沖地震で観測された震度計データとその構造物破壊能, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号, pp. 190-191, 2007
- 2) 地震調査研究推進本部: 警固断層帯(南東部)における重点的な調査観測 平成23-25年度 成果報告書, pp. 32-45, 2014
- 3) Kawase, H., Sánchez-Sesma, F. J. and Matsushima, S.: The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves, Bull. Seismol. Soc. Am., 101 (5), pp. 2001-2014, 2011
- 4) 地質調査総合センター: 20万分の1日本シームレス地質図, <https://www.gsj.jp/>, (アクセス2023年1月21日)
- 5) 防災科学技術研究所: 防災科研 K-NET, KiK-net, 2019, <https://doi.org/10.17598/nied.0004>
- 6) 国土地理院: 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html#digible>, (アクセス2023年1月21日)
- 7) 幸佐賢二, 日野伸一, 松田泰治, 鳥野清: 福岡県西方沖地震による建物被害集中地域分析, Proc. 28th JSCE Earthquake Engineering Symposium, pp. 1-4, 2005
- 8) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, 2019, <https://doi.org/10.17598/nied.0010>
- 9) 太田外氣晴, 江守勝彦, 河西良幸: 耐震・振動・制御, 共立出版, pp.339, 2001
- 10) 青井真, 早川俊彦, 藤原広行: 地震動シミュレータ:GMS, 物理探査, 第57巻, 第6号, pp. 651-666, 2004,
- 11) 九州大学大学院研究院附属地震火山観測研究センター: <https://sevo.kyushu-u.ac.jp/wp/>, (アクセス2023年1月27日)
- 12) 防災科学技術研究所: 防災科研 F-NET, 2019, <https://doi.org/10.17598/NIED.0005>