

岩盤観測点に対する地震動のスペクトル比による 筑紫平野の地盤増幅特性の検討

松原 涼真

1. はじめに

筑紫平野は有明海に面する段丘面・沖積低地・干拓地からなる九州最大の沖積平野であり、牛津川、筑後川を境として、西から白石地域（以後、白石平野）、佐賀地域（以後m佐賀平野）、筑後地域（以後、筑後平野）に区分される。多くは軟弱な河川・海岸堆積層に覆われ、クレーク網が発達していることもあり、2005年3月20日の福岡県西方沖地震（Mj 7.0）や2016年4月16日の熊本地震（Mj 7.3）において、震度5程度の大きな揺れが観測された。また、平野の北部には、佐賀平野北縁断層帯や水縄断層帯などもあることから、適切な地震防災対策が必要であり、そのためにも筑紫平野の地盤増幅特性の把握は重要であると考えられる。

これまでの筑紫平野の地盤震動特性についての検討として、田中（2019）¹⁾は2005年福岡県西方沖の地震の最大余震（Mj 5.5）を対象とした強震動シミュレーションを行った。野間・他（2019）²⁾は筑後平野において実施した微動アレイ観測から周期4秒以上と長周期帯域の地震動が大きく増幅される地下構造を推定し、さらに野間（2021）³⁾では、筑紫平野全域における既存の地下構造モデルと野間・他（2019）の地下構造モデル、新たに微動アレイ観測から推定した地下構造モデルを統合し、強震動シミュレーションを用いて当該平野の地盤増幅特性について検討した。

本研究では平野内の地震観測点で観測された地震記録と平野周辺の岩盤観測点とのスペクトル比から、筑紫平野の地盤増幅特性について評価する。

2. 解析手法

本研究では、地盤上に位置する地震観測点の地盤増幅特性を把握するために、岩盤点とのスペクトル比⁴⁾を用いる。一般に、地震動のS波フーリエ振幅スペクトル $O(f)$ は震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ 、地盤増幅特性 $G(f)$ を用いて、

$$O(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \quad (1)$$

と表される。伝播経路特性 $P(f)$ は、震源距離 R による幾何減衰と伝播媒質の減衰の大きさを表す $Q_s(f)$ で示す

ことができる。

幾何減衰を補正した同一の地震の近接する岩盤観測点0に対する地盤観測点 j のスペクトル比 $O_j(f)/O_0(f)$ は、それぞれの観測点に対する幾何減衰以外である $Q_s(f)$ による伝播経路特性が同等であるとすれば、

$$O_j(f)/O_0(f) = \{G_j(f)/G_0(f)\} \cdot \{R_0/R_j\} \quad (2)$$

となる。ここで、岩盤観測点の地盤増幅特性を1と考えれば、

$$G_j(f) = \{O_j(f)/O_0(f)\} \cdot \{R_j/R_0\} \quad (3)$$

となり、地盤観測点の地盤増幅特性を評価できる。

本研究におけるフーリエスペクトルは、Transverse成分S波初動到達後20.48秒間から算出し、平滑化には0.2 HzのParzen windowを用いた。サンプリング周波数は100 Hzである。

3. 解析データ

3.1 観測点の概要

本研究で対象とした地震観測点を表1、その分布を図1に示す。

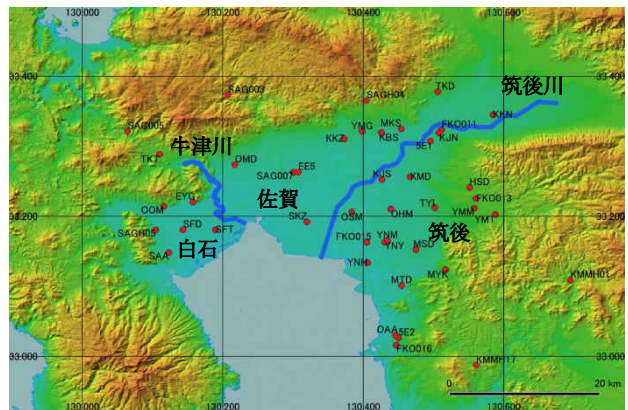


図1 対象観測点の分布（背景は地理院地図⁵⁾）

基準点となる岩盤観測点は、地震データ数が多い防災科学技術研究所のK-NETとKiK-net観測点⁶⁾を対象とした、シームレス地質図⁷⁾による各観測点の表層地質やPS検層結果⁸⁾から岩盤に近く、石作（2021）⁸⁾によるスペクトルインバージョンの結果から、低周波側で増幅率が1に近いものを選定した。その結果FKO016、KMMH01、KMMH17、SAG003、SAG005、SAGH04の6観測点を基準点とした。なお、スペクトルインバージョン

ョンの結果から、FKO016は0.1~0.3 Hzにおいてわずかな増幅、KMMH17、SAG003、SAG005、SAGH04は0.3~1 Hzにおいて増幅率がやや下回るが、SAG003は2 Hz、KMMH01は3 Hz、それ以外は5 Hzまで、増幅率は1付近で平坦であるとみなすことができる。表1に岩盤観測点と対応する地盤観測点の組み合わせを併せて示す。ただし、岩盤観測点の違いについてはノイズを考慮したうえで平均をとった。

表1 岩盤観測点と地盤観測点の組み合わせ

| 観測器 | 観測点 | コード | FKO016 | KMMH01 | KMMH17 | SAG003 | SAG005 | SAGH04 | |
|---------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| K-NET | 久留米 | FKO011 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | |
| | 八女 | FKO013 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | |
| | 柳川 | FKO015 | ○ | ○ | ○ | | | ○ | |
| | 大牟田 | FKO016 | ○ | ○ | | | | | |
| | 富士 | SAG003 | | | | ○ | ○ | | |
| KiK-net | 蔵木 | SAG005 | | | | ○ | ○ | | |
| | 佐賀 | SAG007 | ○ | | | | ○ | ○ | |
| | 東脊振 | SAGH04 | | | | ○ | ○ | | |
| | 白石 | SAGH05 | | | | ○ | ○ | | |
| | 鹿北 | KMMH01 | | ○ | | | | | |
| 気象庁 | 久留米市津福本町 | 5E1 | ○ | ○ | | ○ | | ○ | |
| | 佐賀市駅前中央 | EE5 | ○ | | | ○ | | ○ | |
| | 大牟田市笹林 | 5E2 | ○ | ○ | ○ | | | | |
| | 福岡県 | 久留米市城島町 | KJS | ○ | | ○ | | | ○ |
| | | 久留米市城南町 | KJN | ○ | ○ | | | | ○ |
| | | 久留米市三瀬町 | KMD | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| | | 久留米市北野町 | KKN | | ○ | | | | |
| | | 広川町新代 | HSD | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | | 八女市本町 | YMM | ○ | ○ | | | | ○ |
| | | 八女市立花 | YMT | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | | 筑後市山ノ井 | TYI | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | | 柳川市本町 | YNH | ○ | ○ | | | | ○ |
| | | 柳川市大和町 | YNY | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | | 柳川市三橋町 | YNM | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | | 大木町八町牟田 | OHM | ○ | ○ | | ○ | | ○ |
| | | みやま市瀬高町 | MSD | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | | みやま市山川町 | MYK | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| みやま市高田町 | | MTD | ○ | ○ | | | | ○ | |
| 佐賀県 | | 大川市透見 | OSM | ○ | ○ | | ○ | | ○ |
| | | 大牟田市有明町 | OAA | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| | 佐賀市川副 | SKZ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 小城市三日月 | OMD | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 神埼市神埼 | KKZ | | | | ○ | | ○ | |
| | 吉野ヶ里町三田川 | YMG | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 白石町福田 | SFD | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 白石町福富 | SFT | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 白石町有明 | SAA | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 大町町大町 | OOM | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 上峰町坊所 | KBS | | | | ○ | | ○ | |
| | みやき町北茂安 | MKS | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 多久市北多久町 | TKT | | | | ○ | ○ | ○ | |
| | 鳥栖市宿町 | TYD | | | | ○ | | ○ | |
| | 江北町山口 | EYG | | | | ○ | ○ | ○ | |

3.2 観測記録

本研究では、九州地方周辺を震源とするMj3.1~7.3、震源深さ5~167 kmの360地震を使用した。K-NETとKiK-netの観測点については1996年10月から2021年10月の360地震、気象庁⁹⁾の観測点は2004年から2018年の253地震、福岡県震度計は2011年から2021年7月の247地震、佐賀県震度計は2016年4月14日から20日の125地震を使用した。

4. 解析結果

図2にSFT、SAG007、FKO015、MYKにおける解析結果を一例として示す。

白石平野に位置するSFTは1.2 Hzで明確なピークを持ち、増幅率20倍となる。同じ平野部でSFTの西側に位置するSAA、SFDは同程度の大きな増幅を示すが、ピークが0.7~0.8 Hzとやや長周期側になる。SAG007は佐賀平野中心部の観測点であるが、0.6~3.0 Hz付近に増幅率7~10倍程度の盛り上がりが見られる。同じ佐賀平野でも北東部のMKSとKBSでは1.2 Hzと1.4 Hzに20倍もの顕著なピークを持つ。FKO015は筑後平野南部にあり、0.3 Hzで7倍、0.6 Hzで10倍、1.2~2.0 Hzで10倍以上の増幅を持つ。周辺観測点や筑後川付近の観測点も同じような傾向を示し、長周期帯でも大きな増幅を持つ。MYKは段丘堆積物上の観測点であり2.2 Hzで6倍程度の顕著なピークを持つ。他の段丘堆積物上の観測点も同様にピークは平野上よりも短周期側に見られ、その大きさは小さい。

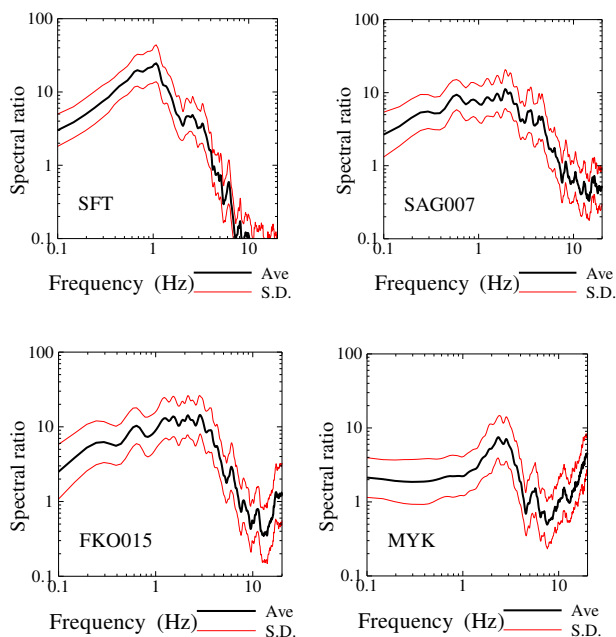


図2 岩盤観測点に対する地盤観測点のスペクトル比

本研究による結果の妥当性を確認するため、K-NETとKiK-netの観測点については岩盤観測点に対するスペクトル比と石作(2021)によるスペクトルインバージョンの結果の比較を行った(図2)。なお、本研究で使用した地震はほとんど火山フロントの背弧側に震源が位置するため石作(2021)の結果の内、背弧側震源の結果を比較の対象とした(図3)。ノイズや基準点の特性による多少の差はあるが、スペクトル比とスペクトルインバージョンの結果は概ね一致し、本研究の結果は妥当であるとした。

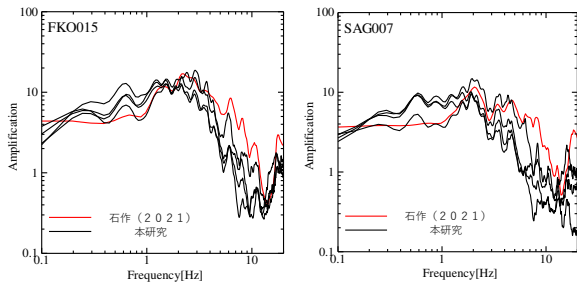


図3 スペクトルインバージョン結果との比較

5. 考察

5.1 理論 1次元地盤増幅率比との比較

既存地下構造モデルから求められる岩盤観測点および地盤観測点の理論 1次元地盤増幅率を計算し、その比と本研究によるスペクトル比との比較を行った。地盤観測点の地下構造モデルは野間・他 (2019) と野間 (2021) の結果を用いた。岩盤観測点の地下構造モデルは、各観測点の PS 検層結果⁶⁾と J-SHIS V3.2¹⁰⁾の地下構造モデルを統合することによって作成した。モデルの最下層は、野間・他 (2019) と野間 (2021) と条件をあわせ、地震基盤 ($V_s = 3.1 \text{ km/s}$) とした。各層の密度 $\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$ は、以下の $V_s \text{ (km/s)}$ との関係式¹¹⁾を用いた。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (4)$$

図4に結果の一例を示す。SFTの1次元地盤増幅率は第一ピークの0.3 Hzより高周波側で、増幅率に差が見られる。SAG007とFKO015の理論1次元地盤増幅率比は本研究による岩盤観測点に対するスペクトル比と概ね一致する。全体的な特徴としては、卓越周波数のずれは少なく、低周波数側での増幅値は概ね一致するが、SFTを含む白石平野や筑後川周辺の観測点において、特に0.8~2.0 Hzの周波数帯域で本研究の岩盤観測点に対するスペクトル比の増幅率が大きくなり、今後地下構造モデルの再検討が必要であるといえる。

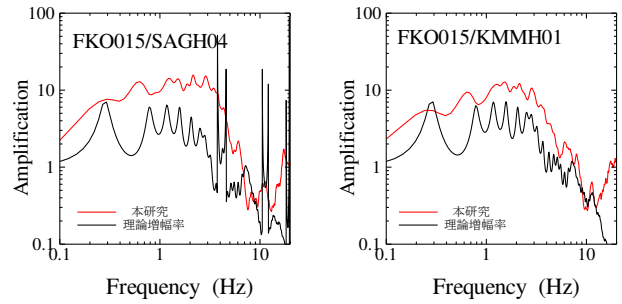
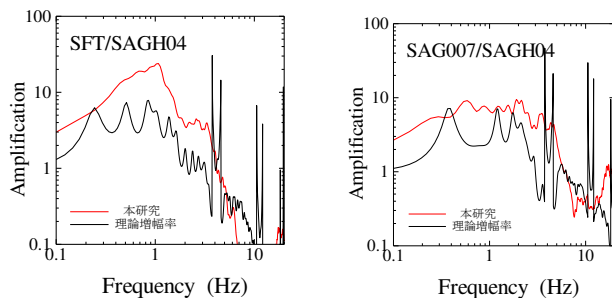


図4 岩盤観測点に対するスペクトル比と1次元地盤増幅率比の比較

5.2 速度応答スペクトル分布との比較

2016年4月16日の熊本地震 ($M_j 7.3$) の速度応答スペクトル分布¹⁾と比較を行った。速度応答値は、観測記録の水平2成分の全区間から計算した各周期の速度応答時刻歴をベクトル合成して得られる最大値とし、減衰定数は5%である。多くの地盤観測点で最大増幅率を示した周期1秒において、佐賀平野北東部、筑後川周辺で増幅が大きくなる点は一致する。スペクトル比における増幅と速度応答スペクトルについて白石平野では違いが見られる。周期3秒の長周期側については、白石平野、佐賀平野中心部、筑後平野南部、筑後川周辺で大きな応答が見られた。スペクトル比における増幅率と応答スペクトルは概ね対応している。佐賀平野南西部は周期1秒で大きな応答が見られる特徴があるが、本研究では佐賀平野南西部の観測点での検討が行われていないので今後の課題となる。

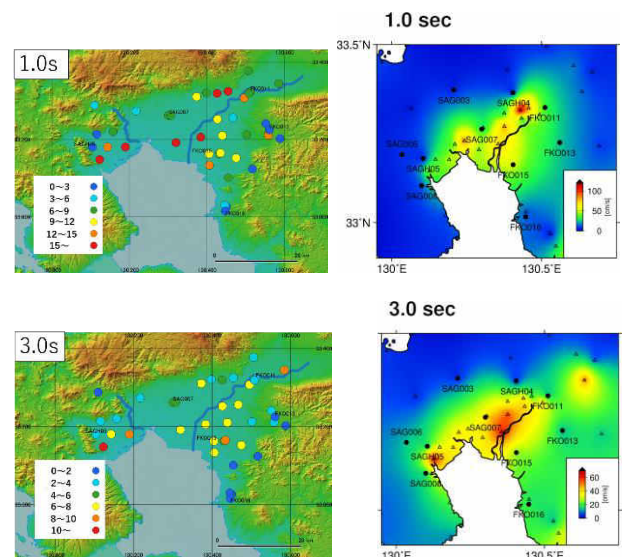


図5 短周期側と長周期側の増幅率分布 (背景は地理院地図⁵⁾) と速度応答スペクトル分布¹⁾の比較

5.3 表層地質図との比較

表層地質図⁷⁾と最大増幅率と卓越周波数について比較した(図6、図7)。河川・海岸堆積層上では、最大増幅率は10倍以上になる。白石平野のSAAとSFT、佐賀平野北東部のMKSとKBS、筑後川周辺のSKZとOSM、筑後平野南部のYNMでは20~30倍もの大きな増幅を示した。最も長周期側の卓越周波数については、白石平野では0.7~1.2 Hz、佐賀平野では0.3~0.6 Hz、筑後川周辺では0.2~0.5 Hz、筑後平野南部では0.25~0.5 Hzとなる。段丘堆積物上では、最大増幅率は5~10倍になる。卓越周波数については、1 Hz以上一つのピークを持つ観測点が多いが、FKO011、TKT、YMGについては広い周波数帯域でピークを示す。

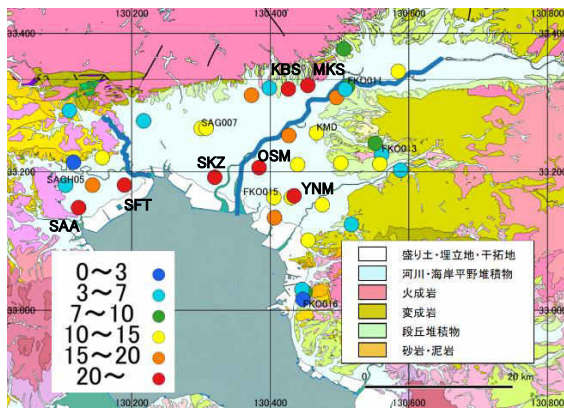


図6 表層地質図と地盤増幅率の最大値の分布

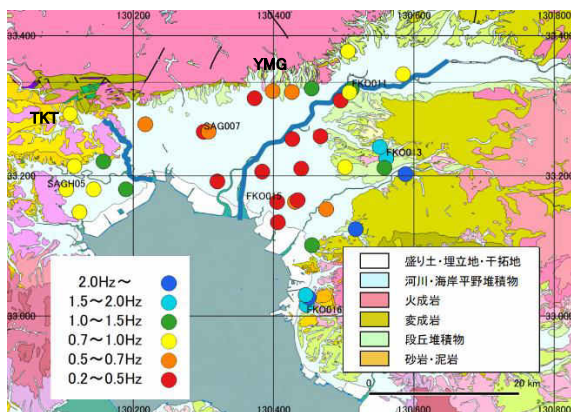


図7 表層地質図と最も長周期側の卓越周波数の分布

6. まとめ

本研究では筑紫平野の地盤観測点の地盤増幅特性を、周辺岩盤観測点とのスペクトル比として算出し、理論1次元地盤増幅率比、速度応答スペクトル分布、表層地質図との比較し、筑紫平野における地盤増幅特性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 河川・海岸堆積層上では、最大増幅率は10倍以上に

なる。最も長周期側の卓越周期については2.5秒以上になり、筑後川河口や筑後平野南部が最も大きい。

- 佐賀平野は、白石平野と筑後平野と比べると増幅が小さいが、例外として北東部のKBSとMKSではそれぞれ1.2 Hzと1.4 Hzで25倍の大きな増幅を示す。
- 久留米市周辺などの段丘堆積物上については、卓越周期は1秒以下となり、最大増幅率は5~10倍になる。河川・海岸堆積層上と比べると卓越周期と増幅値に大きな差が見られる。
- 岩盤観測点に対する地震動のスペクトル比は、実際の地震の速度応答スペクトルや既往の研究のスペクトルインバージョン、理論1次元地盤増幅率の結果と概ね一致した。しかし、平野部の0.8~2 Hzの帯域での増幅値が地下構造モデルから算出した1次元地盤増幅率よりも大きくなる点、また周期1秒でのスペクトル比における増幅と速度応答スペクトルに白石平野で違いが見られる点は、具体的な増幅値について踏まえて今後改めて検討する必要がある。

謝辞

本研究では、K-NET、KiK-net、気象庁、佐賀県震度計、福岡県震度計、J-SHIS V3.2のデータ、図の一部には地理院地図⁵⁾を使用した。記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 田中斐佳：観測された強震記録と強震動シミュレーションに基づく筑紫平野の地盤増幅特性に関する研究、九州大学修士論文、pp. 24-31, 2019
- 野間亮佑・他：微動アレイ観測による筑後平野のS波速度構造の推定、日本建築学会学術講演論文集、pp. 49-54, 2019
- 野間亮佑：筑紫平野における強震動シミュレーションのための微動アレイ観測に基づく3次元地下構造モデルの構築、九州大学修士論文、pp. 61-76, 2021
- Borcherdt: Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull. Seism. Soc. Am., 60, pp. 29-81, 1970
- 国土地理院：地理院地図、<https://maps.gsi.go.jp/> (参照 2022年1月30日)
- 防災科学技術研究所：NEID(K-NET, KiK-net)、<https://doi.org/10.17598/NIED.0004>、2019 (参照 2022年1月30日)
- 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://gbank.gsj.jp/seamless/seamless2015/2d> (参照 2022年1月30日)
- 石作桃子：スペクトルインバージョンに基づく九州地方の地盤増幅特性の推定に関する研究、九州大学卒業論文、pp. 33-56, 2021
- 気象庁、<http://www.jma.go.jp/jma/index.html> (参照 2022年1月30日)
- 防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション、<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/> (参照 2022年1月30日)
- 太田外氣晴・他：耐震・振動・制御、共立出版、339 p、2001