

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

石作 桃子

1. はじめに

地震動の特性は震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性によって特徴づけられ、特に地盤増幅特性、すなわち地震基盤から地表までの堆積層が地震動に及ぼす影響は大きいと考えられている。川瀬（1993）では、表層地盤が地震動特性に大きな影響を与えることに言及し、表層地盤の地震波増幅に関する研究の将来的な課題について述べている¹⁾。

九州地方では多くの活断層が存在し、近年では2005年の福岡県西方沖の地震や2016年熊本地震などの地震被害も発生している。また、太平洋沿岸では日向灘周辺の地震活動度が高いほか、南海トラフの地震の懸念もあるなど地震の揺れによる被害に対して十分な備えが必要である。よって、九州地方において地盤増幅特性を適切に評価することは、地震動に対する建造物等の安全性を考える上で重要である。染井・ほか(2019)²⁾では、スペクトルインバージョンに基づいて熊本地震系列の強震記録から九州地方の一部観測点の地盤地震動特性を推定しているが、対象とする強震記録および観測点の範囲を広げたいうでの解析が必要であると考ええる。

そこで本研究では、九州地方全域を対象として防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET および KiK-net³⁾の観測点で観測された強震記録に対しスペクトルインバージョン⁴⁾を適用し、地盤増幅特性の推定を行う。また、推定した地盤増幅特性と各地域の地質の関係について考察を行う。

2. 対象地域の概要

九州地方は中央に九州山地が形成されており、その北部に阿蘇山や九重山、南部に霧島山が分布している。阿蘇山は東西に18 km、南北に25 kmの世界最大規模のカルデラを形成している。主な平野としては、福岡県・佐賀県の南部に位置する軟弱地盤を有する九州最大の筑紫平野、宮崎県東部において南北60 kmに広がる宮崎平野のほか、直方平野、熊本平野、川内平野などがある⁵⁾。

本研究では鹿児島県の離島部を除く九州地方の K-NET および KiK-net 観測点計208点を対象とした。図

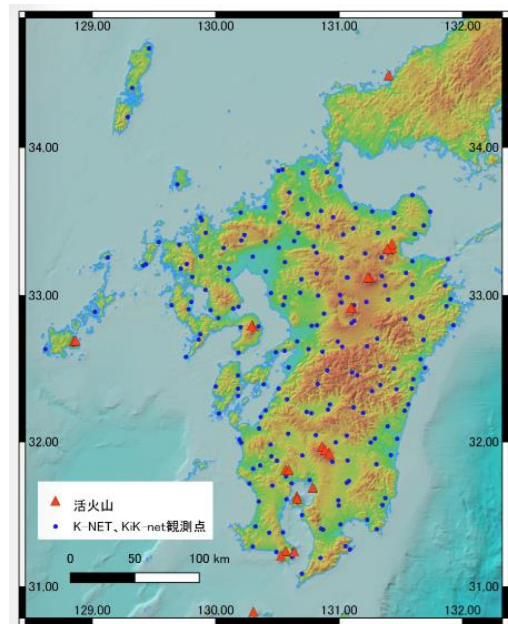


図1 九州地方の対象観測点と活火山の分布⁶⁾

1に対象観測点と活火山の分布を示す。

3. スペクトルインバージョン

3.1 解析手法

以下に、岩田・入倉（1986）⁴⁾を引用してスペクトルインバージョンの概要を示す。

今、 I 個の地震が J 個の観測点ですべて観測されたとする。そのとき j 番目の観測点で観測される i 番目の地震記録のフーリエ振幅スペクトルは次式で表される。

$$O_{ij} = S_i(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot G_j(f) \quad (1)$$

ここで $S_i(f)$ は i 番目の地震の震源特性、 $P_{ij}(f)$ は i 番目の地震の震源から j 番目の観測点までの伝播経路特性、 $G_j(f)$ は j 番目の観測点における地盤増幅特性である。伝播経路特性は震源距離を R_{ij} 、伝播経路における平均的なS波速度を V_s 、S波のQ値を Q_s として次式で表される。

$$P_{ij}(f) = \frac{1}{R_{ij}} \exp\left(-\frac{\pi f R_{ij}}{Q_s V_s}\right) \quad (2)$$

この式を線形化するために両辺の常用対数をとると、次のように表される。

$$\log O_{ij} = \log S_i + \log P_{ij} + \log G_j \quad (3)$$

地震と観測点の組み合わせにより $I \times J$ 個の式が成り立つ。これらの連立方程式を解くことによって周波数 f

毎に I 個の震源特性、 J 個の地盤増幅特性、1個の Q 値の計 $I+J+1$ 個のパラメータを決定する。なお、このとき $S_i(f)$ と $G_j(f)$ の間にトレードオフの関係があるため、拘束条件が必要となる。本研究では大浴(2021)⁸⁾の解析結果から、地表/地中スペクトル比が高周波数側までフラットであったFKOH10とOITH09を岩盤観測点とみなし、地盤増幅特性を全周波数において2として拘束条件に用いた。

3.2 データセット

本研究では1996年10月から2020年9月までに起こった地震で震央距離が300 km以下の観測記録のうち、S/N比を考慮して気象庁マグニチュード(M_j)が4.5以上、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮して最大加速度100 cm/s²以下の地震の強震記録を使用した。解析に用いるフーリエ振幅スペクトルは水平2成分をベクトル合成したものとし、JMA2001走時表⁷⁾を用いてS波到達後から10.24秒間を読み取って算出した。平滑化にはバンド幅0.4 HzのParzenウィンドウを用い、解析区間の前後10%にCousin taperをかけた。

また、地震タイプと伝播経路の違いによる解析結果の違いを検討するため、観測点と地震を火山フロントの前弧側と背弧側のグループにそれぞれ分け、観測点と地震のグループの組み合わせ4パターンに全観測点と全震源の組み合わせを加えた計5パターンのデータセットに対してスペクトルインバージョンを行った。図2に火山フロントと震央位置の分布を示す。

3.3 解析結果

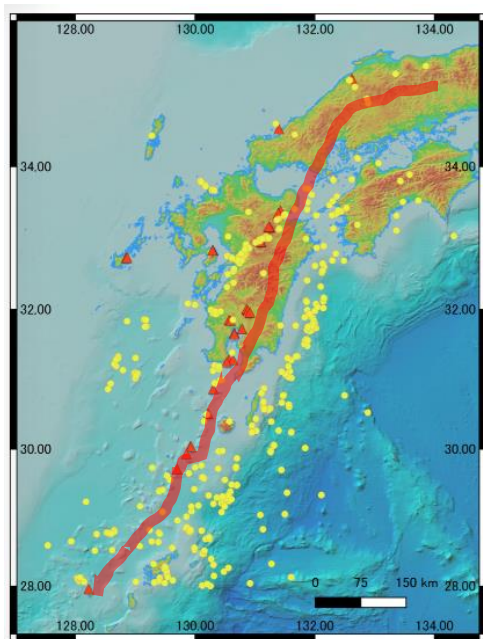


図2 解析に用いる地震の震央位置の分布と火山フロント⁶⁾

解析により求められた地盤増幅特性の一例を図3に示す。OIT016、MYZ008、MYZH06、KGS08は前弧側の観測点、FKO002、SAGH04、NGS019、KMMH05は背弧側の観測点である。図中には野津・長尾(2007)⁹⁾の結果も併せて示している。MYZ008、MYZH06、SAGH04では10 Hz付近、NGS019、KMMH05では2.0~5.0 Hz、OIT016、KGS08、FKO002では1.0~2.0 Hzに地盤増幅特性のピークが見られ、野津・長尾(2007)の結果とも概ねピークの位置が一致していることから推定の妥当性が確認できる。また、前弧側観測点はデータセットの種類に関わらず概ね形状が一致しているが、背弧側観測点はデータセットによる地盤増幅特性の差が大きい傾向がある。

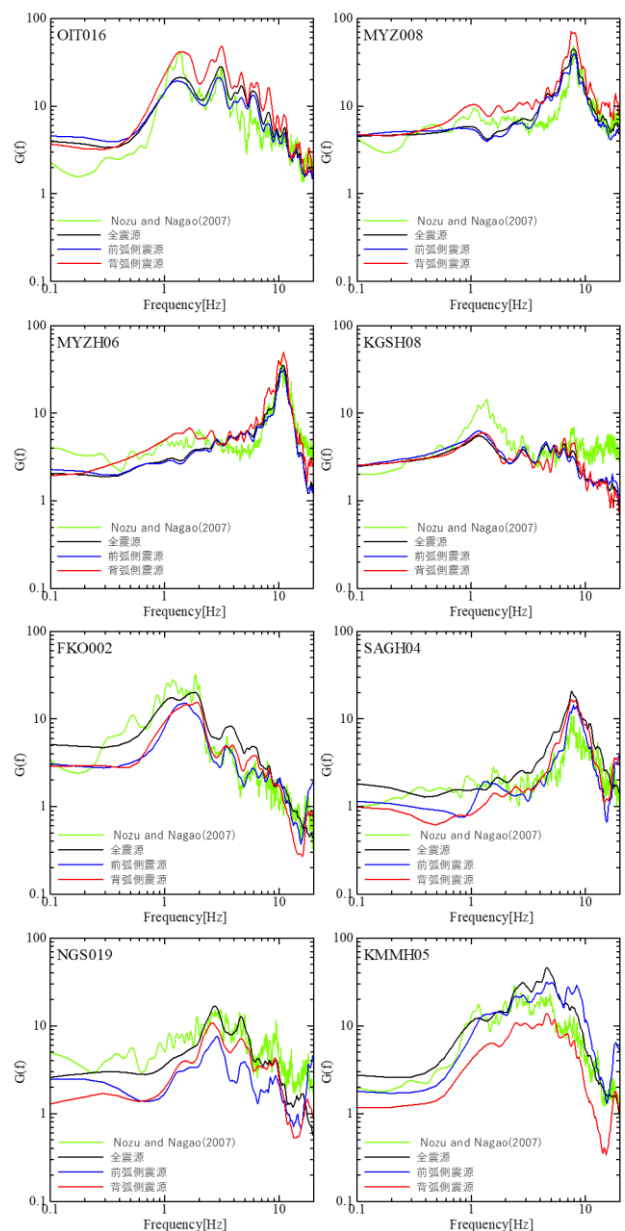


図3 推定された地盤増幅特性の例



図5 長周期側で地盤増幅特性が10以上の観測点⁶⁾

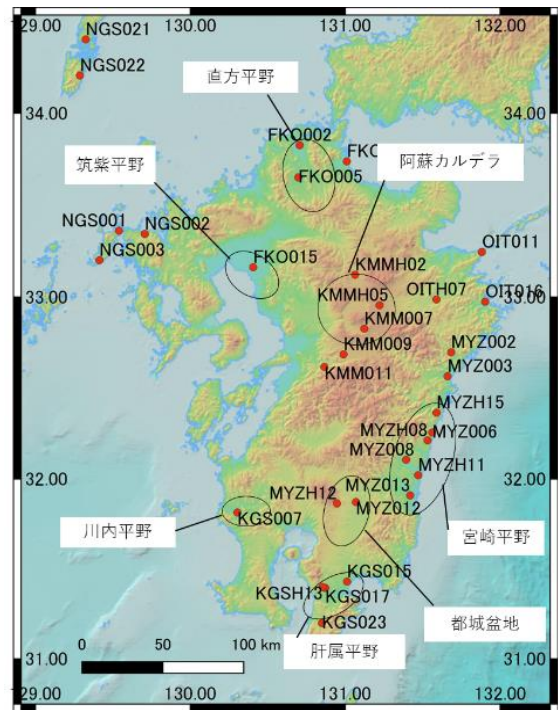


図6 短周期側で地盤増幅特性が15以上の観測点⁶⁾

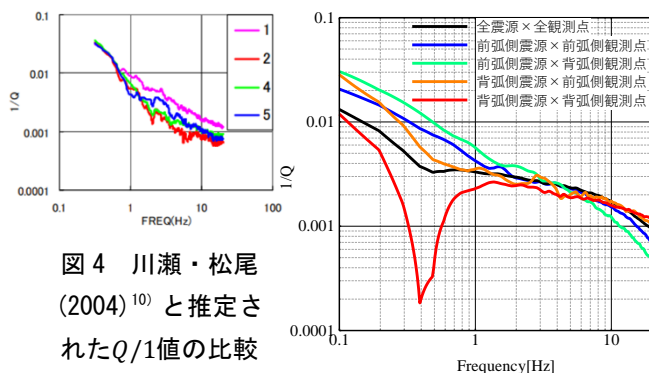


図4 川瀬・松尾 (2004)¹⁰⁾と推定された $1/Q$ 値の比較

次に、図4に解析により求められた $1/Q$ 値を示す。背弧側震源と背弧側観測点の組み合わせのみ低周波側に大きなトラフが表れているが、他の組み合わせでは概ね形状が一致しており、これは川瀬・松尾(2004)¹⁰⁾の $1/Q$ 値の形状とも概ね一致している。したがって、データセットの違いによる伝播経路の影響は少ないと考えられ、以降の検討には使用した観測記録が最も多い全震源と全観測点の組み合わせによるデータセットで求められた地盤増幅特性を使用する。

4. 地盤震動特性の評価と地質との対応

4.1 地盤増幅特性の空間分布

対象とした全観測点について、推定した地盤増幅特性を周波数ごとに分け相加平均を算出し、その空間分布を求めた。長周期側(0.2~1.0 Hz)で増幅特性が10以上の観測点を図5、短周期側(1.0~20.0 Hz)で増幅特性が15以上の観測点を図6に示す。

長周期側では、始良カルデラや熊本平野のKMM008、

阿蘇カルデラのKMMH04で地盤増幅特性が大きくなっている。一方、短周期側では、直方平野、宮崎平野、都城盆地、肝属平野、阿蘇カルデラにおいて、地盤増幅特性が大きい観測点が複数見られる。また、筑紫平野のFKO015や川内平野のKGS007では、長周期側でも短周期側でも増幅特性が大きくなっている。

全ての周波数帯において特に平野部や盆地、海沿いの地域で増幅特性が大きい観測点がみられる一方、佐賀県の観測点では他の地域に比べて増幅特性が小さい傾向にある。また、同じ地域内の観測点であってもそれぞれの観測点の地盤増幅特性の値に大きな差があり、各地に局所的に増幅特性が大きい地点が見られる。

4.2 地形との対応の検討

J-SHISの微地形区分¹¹⁾および国土地理院の土地条件図⁶⁾と推定された地盤増幅特性の対応を検討する。地盤増幅特性が大きい地点が集中していた宮崎平野、都城盆地および阿蘇山周辺について微地形区分の図と増幅特性が大きい観測点との対応を図7に示す。また、1.0~2.0 Hzと2.0~5.0 Hzでそれぞれ著しく増幅特性が大きかったMYZ013とMYZH11について、土地条件図と増幅特性の対応を図8に示す。

まず、阿蘇山周辺と宮崎平野、都城盆地において、短周期側で地盤増幅特性が大きい地点の微地形区分は、火山山麓地、火山性丘陵、砂礫質台地、ローム台地のいずれかである点が多かった。よって、火砕流堆積や砂礫質、火山灰土層などの地形の観測点において、短

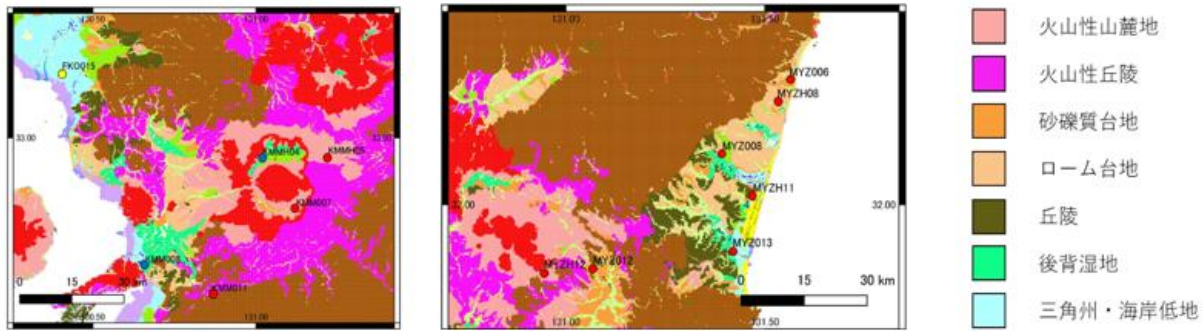


図7 地盤増幅特性が大きい観測点と微地形区分との対応¹¹⁾

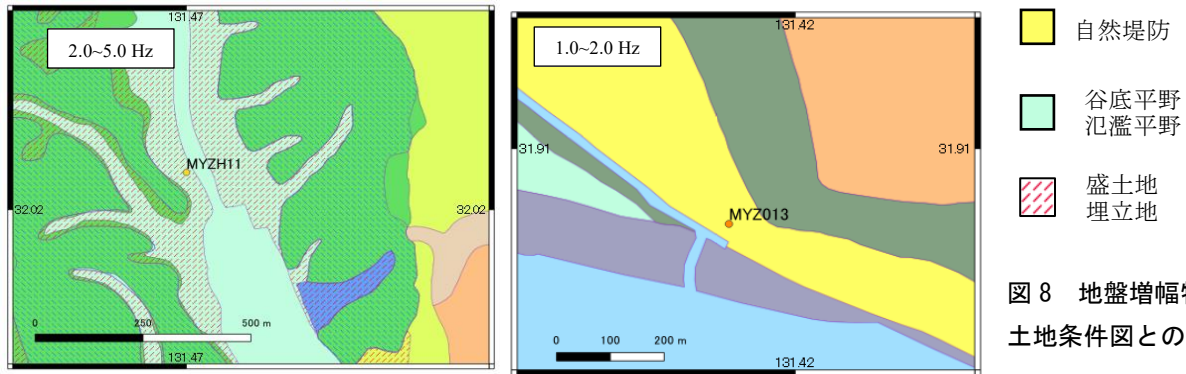


図8 地盤増幅特性と土地条件図との対応⁶⁾

周期側の増幅特性が大きくなる傾向があることがわかる。一方、長周期側で地盤増幅特性が大きい地点の微地形区分は後背湿地であり、粘性土からなる地盤で増幅特性が大きくなる傾向があることがわかる。

次に、MYZ013 と MYZH11 について土地条件図を見てみると、MYZ013 は自然堤防、MYZH11 は盛土地であることがわかる。自然堤防は洪水時に運ばれた砂などが流路沿いに堆積してできた地形であるため、砂質土が多く軟弱な地盤である。また、盛土地は人工的に造成された土地であるため、自然に形成された地盤と比べて地盤は軟弱である。同じ宮崎平野内でもこれらの2点で著しく増幅特性が大きいのはこのためであると推測される。

5. まとめ

本研究では、九州地方の208観測点を対象にK-NETおよびKiK-netの強震記録を用いて、対象地域の地盤増幅特性の評価を行った。また、推定した増幅特性と地形との対応を検討した。以下に得られた知見を示す。

- ・推定した地盤増幅特性について、そのピークを示す周波数は既往の研究とも概ね一致しており、妥当な結果である。
- ・九州地方において観測点および震源の位置による伝播経路特性への影響は少ないと推測される。
- ・平野部や盆地で地盤増幅特性が大きい傾向がある一方、佐賀県では地盤増幅特性が小さい観測点が多い。
- ・地盤増幅特性が大きい観測点については、短周期側

で火砕流堆積物や砂礫質、長周期側で粘性土などの軟弱地盤である地点が多く見られた。

- ・同じ宮崎平野内の観測点であっても、特に自然堤防や盛土地の観測点では著しく大きな地盤増幅特性が見られた。

参考文献

- 1) 川瀬博：表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション、地震、第2輯、第46巻、pp.171-190、1993
- 2) 染井一寛、浅野公之、岩田知孝、宮腰研、吉田邦一、吉見雅行：2016年熊本地震系列の強震記録から分離した震源・伝播経路・サイト増幅特性、日本地震工学会論文集、第19巻、第6号、pp.42-54、2019
- 3) 防災科学技術研究所、強震観測網(K-NET,KiK-net)、<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>(参照 2021-1-27)
- 4) 岩田知孝、入倉考次郎：観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性および観測点近傍の地盤特性を分離する試み、地震、第2輯、第39巻、pp.579-593、1986
- 5) ジオテック株式会社、都道府県別地形・地盤解説、<https://www.jiban.co.jp/tips/kihon/ground/prefecture/index.htm>(参照 2021-1-27)
- 6) 国土交通省国土地理院、地理院地図、<https://maps.gsi.go.jp/>(参照 2021-1-27)
- 7) 上野寛、島山信一、明田川保、舟崎淳、浜田信生：気象庁の震源決定方法の改善-浅部速度構造と重み関数の改良-、験震時報、第65巻、pp.123-134、2002
- 8) 大浴匠登：走時曲線と地表/地中スペクトル比の同時逆解析による地下構造モデルの再構築に関する研究-九州地方のKiK-net観測点における検討-、2021
- 9) 野津厚、長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性、港湾空港技術研究所資料、No.1112、p.56、2005
- 10) 川瀬博、松尾秀典：K-NET,KiK-net,JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析、日本地震工学会論文集、第4巻、第1号、pp.33-52、2004
- 11) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション、<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>(参照 2021-2-7)