

3次元差分法による地震動シミュレーションに基づく 大分平野の地震動特性の評価

太田 瑞貴

1. はじめに

大分平野は、大分県中東部及び別府湾岸南部に広がる平野で大分川と大野川が形成した三角州とその間の沖積平野とからなる。この大分平野の厚い堆積層は地震動を増幅させることが知られている。例えば、奈川ほか(2002)¹⁾は、大分平野から280 km離れた場所で発生した2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)において平野内の観測点にて周期5~10秒の地震動が顕著に増幅した継続時間の長い地震動が観測されたことを指摘している。また、大分平野の地震動特性に関する既往研究として、文部科学省・京都大学(2017)²⁾や吉見ら(2008)³⁾により、微動アレイ観測、反射法探査等に基づく地下構造モデルの推定や地震動シミュレーションを用いた大分平野の地震動特性の評価等、様々な視点から調査が行われてきた。しかし、調査によって推定した地下構造モデルの妥当性の検証や高度化までは充分ではない。

そこで、本研究では、大分平野を対象地域とし、強震観測記録による鉛直動に対する水平動スペクトル比(H/Vスペクトル比)、岩盤観測点に対する堆積層上観測点のスペクトル比から地盤震動特性を把握するとともに、既存の地下構造モデルを用いた一次元増幅率、及び3次元差分法による地震動シミュレーションの結果から、既存地下構造モデルの妥当性の検証や特徴の把握を含めた大分平野の地震動特性について改めて評価する。

2. 大分平野の強震観測点分布

本研究では、大分平野内および平野周辺に位置する防災科学技術研究所の強震観測網K-NETおよびKiK-net⁴⁾、気象庁⁵⁾の観測点(岩盤観測点も含む)から、計5観測点を採用した。堆積層上の観測点は、K-NET大分(OIT010)、気象庁大分市明野北(EE7)、岩盤上の観測点は、K-NET犬飼(OIT013)、佐賀関(OIT011)、KiK-

net野津原(OITH05)である。観測点分布を図1に示す。なお、OIT010およびOIT013は、それぞれ2015年、2006年に移設されているため、観測記録を用いて解析をする際は、移設前後で記録を分け解析を行った。図1中のB、Aはそれぞれ移設前、移設後を表している。

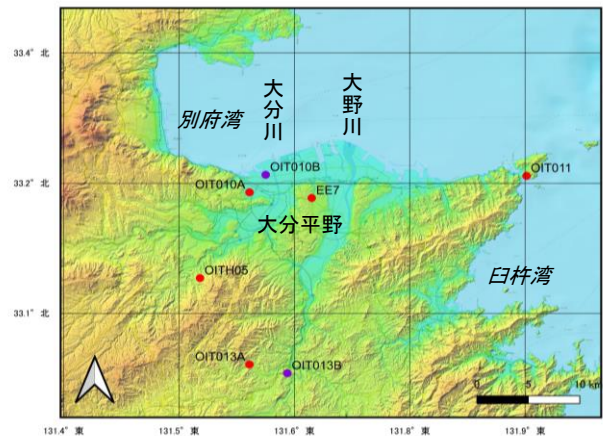


図1 対象観測点分布(背景は国土地理院地図⁶⁾)

3. 観測記録を用いた地盤震動特性の評価

3.1 地盤震動特性の評価方法

(1) 地震動のH/Vスペクトル比

地震動のH/Vスペクトル比は式(1)に示す、加速度時刻歴波形のフーリエ振幅スペクトルの水平動(NS、EWのベクトル和)と上下動(UD)の比である。観測点ごとに、地盤の卓越周期を推定する手法として用いられる⁷⁾。

$$H/V \text{ スペクトル比} = \sqrt{NS^2 + EW^2} / UD \quad (1)$$

なお、フーリエ振幅スペクトルはS波到達後からの20.48秒間のデータに対して算出しており、このデータの前後10%にはcos型のテーパを施している。平滑化にはバンド幅0.2 HzのParzen windowを用いた。

(2) 岩盤観測点に対するスペクトル比

本研究では、地盤上に位置する観測点の地盤増幅特性を評価するために、岩盤観測点に対するスペクトル比⁸⁾を求める。基準とする岩盤観測点はOITH05とした。

一般的に地震動の S 波部分の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 $G(f)$ の積で表される (式 (2))。

$$O(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \quad (2)$$

任意観測点の地盤増幅特性を求めるためには、震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ を排除しなければならない。同一地震における同一領域に位置する 2 観測点の震源特性 $S(f)$ と伝播経路特性 $P(f)$ は、同等であり、震源距離の補正のみを行い、岩盤観測点 o に対する堆積層上に位置する観測点 j のスペクトル比をとると、

$$O_j(f)/O_o(f) = \{G_j(f)/G_o(f)\} \cdot \{R_o/R_j\} \quad (3)$$

となる。ここで岩盤観測点の地震基盤から地表までの地盤増幅特性を 1 と仮定すると、

$$G_j(f) = \{O_j(f)/O_o(f)\} \cdot \{R_j/R_o\} \quad (4)$$

となり、各観測点の地盤増幅特性を求めることができる。なお、フーリエスペクトルの計算方法は地震動の H/V スペクトル比と同様である。

(3) 理論一次元増幅特性比

本研究では、地震基盤以浅の地下構造モデルから算出される岩盤観測点の理論一次元増幅率に対する、地盤観測点の理論一次元増幅率の比を理論一次元増幅特性比とし、岩盤観測点に対するスペクトル比や H/V スペクトル比のピーク周波数と比較する。そして、地震動シミュレーションで得られる結果と観測記録の整合性や既存の地下構造モデルの妥当性を検討する上での基礎的な資料とする。本研究における理論一次元増幅率は、SH 波の一次元重複反射理論に基づき算出した。各層の密度 ρ (g/cm^3) は式 (5) を用いて算出した。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{Vs} \quad (5)$$

Q_s 値は、全層で S 波速度 V_s (m/s) の 1/15 とし、周波数依存性については考慮していない。各観測点の地下構造モデルは、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS⁹⁾による深部地盤構造モデルデー

タと K-NET あるいは KiK-net で公開されている PS 検層⁴⁾による浅部地盤データを統合して使用した。なお、気象庁の観測点については、浅部の PS 検層結果が公開されていないため、J-SHIS によるモデルのみを用いた。

3.2 解析に使用した地震記録

本研究では、1996 年 10 月から 2022 年 8 月までに発生し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、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/s^2 以下の記録を抽出した。その結果、各観測点における記録数は、OIT010B で 26 記録、OIT010A で 54 記録、OIT013B で 48 記録、OIT013A で 60 記録、OIT011 で 129 記録、OITH05 で 46 記録、EE7 で 66 記録であった。

3.3 解析結果および考察

本稿では、全観測点のうち大分平野内の堆積層上に位置する OIT010B、OIT010A、EE7、岩盤サイトに位置する OITH05 の解析結果を取り上げる。

(1) 地震動の H/V スペクトル比

各観測記録の H/V スペクトル比とその対数平均を図 2 に示す。堆積層上に位置する OIT010B、OIT010A では、顕著な鋭いピークは見られないが OIT010B では 0.5 Hz 付近に、OIT010A では 3.0 Hz 付近に比較的大きな盛り上がりが見られ、ピーク周波数に差が確認できる。段丘堆積物上に位置する EE7 では 1.5 Hz 付近に明確なピークが見られる。なお、基準岩盤観測点とした OITH05 は 3.0 Hz 程度まで平坦な形状となった。

(2) 岩盤観測点に対するスペクトル比

各観測記録の岩盤観測点 (OITH05) に対するスペクトル比とその対数平均を図 3 に示す。H/V スペクトル比同様、堆積層上に位置する OIT010B、OIT010A では、移設前後でピーク周波数に差が見られる。

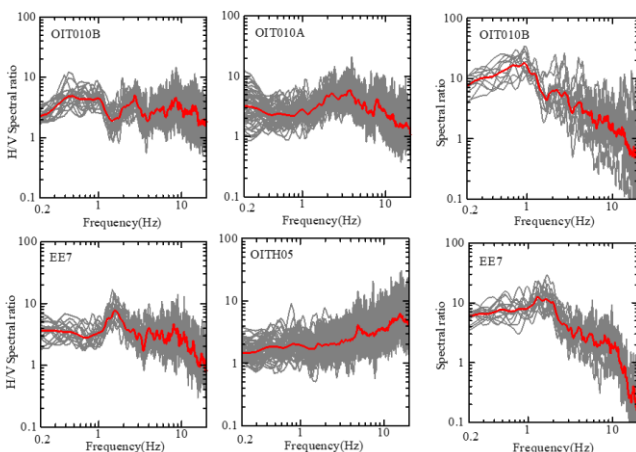


図 2 H/V スペクトル比

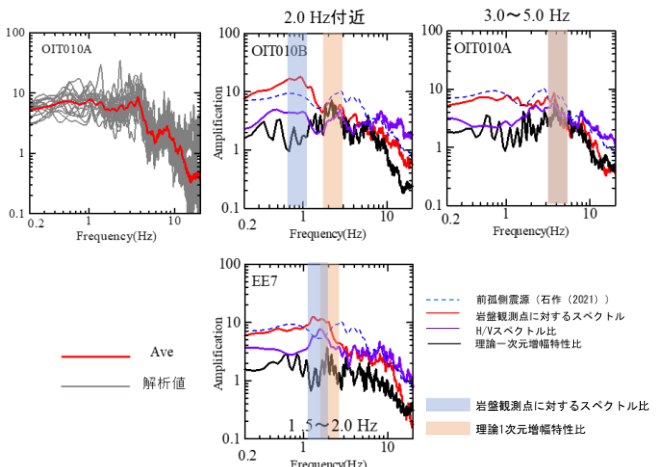


図 3 岩盤観測点に対するスペクトル比

図 4 理論値と既往研究との比較

OIT010B では 1.0 Hz 付近に、OIT010A においては 3.0 ~ 5.0 Hz 付近にピークが見られる。これは、同じ堆積層上の観測点であっても各観測点の堆積層の厚さ等の地下構造の違いによりピーク周波数に差が生じたと考えられる。段丘堆積物上に位置する EE7 では 1.2 Hz 付近にピークが見られる。

(3) 理論次元増幅特性比

本研究で求めた、理論次元増幅特性比と H/V スペクトル比、岩盤観測点に対するスペクトル比、石作 (2021) ¹⁰⁾ による地盤増幅特性との比較を図 4 に示す。堆積層上に位置する OIT010B、OIT010A ではそれぞれ 2.0 Hz 付近、3.0~5.0 Hz にピークが見られ、ピーク周波数に差が見られる。段丘堆積物上に位置する EE7 では 1.5~2.0 Hz にピークが見られた。地震動シミュレーションでは 0.2~2.0 Hz を対象周波数とするため、本研究のスペクトル比の最大ピークが 2.0 Hz 付近にある EE7 と比較すると、理論次元増幅特性比の方が既往研究や本研究で求めた岩盤観測点に対するスペクトル比よりも倍率が小さいため、最大振幅値等が観測値に対して過小評価となる可能性がある。

4. 3次元差分法による地震動シミュレーション

4.1 解析条件

大分平野上の観測点では、これまでに長周期地震動が観測されている。このような大分平野の地下構造の特徴を把握する事を目的に、3次元差分法による地震動シミュレーションを用いて検討を行う。計算には、防災科学技術研究所の3次元差分法プログラムGMS¹¹⁾を用い、地下構造モデルには、J-SHISによる深部地盤構造モデルV2を利用した。解析対象領域は、67.4 km × 55.5 km、深さは10 kmとした(図5)。本解析の有効周波数は0.2~2.0 Hzとした。

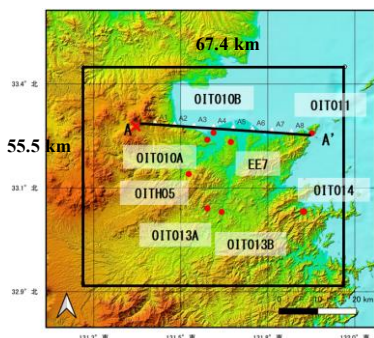


図5 シミュレーションの対象領域と観測点

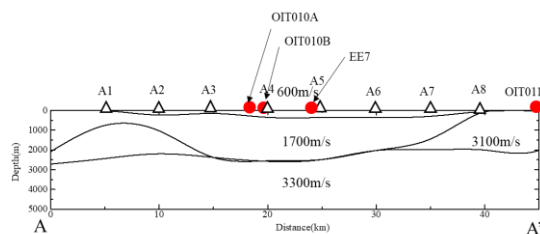


図6 測線A-A'の地下構造断面図

対象とした地震は、2016年4月16日7時11分に、大分県中部で発生した地震(Mj5.4)である。震源パラメータは防災科学技術研究所の広帯域地震観測網F-netによる震源モデル¹²⁾、気象庁による震源モデル⁵⁾、今西モデル²⁾の3パターンであり、本稿では一例としてF-net震源モデルのパラメータを表1に示す。また、差分格子間隔は地下構造モデルの最小S波速度が600 m/s、S波1波長あたり5格子、有効上限周波数が2.0 Hzということから、深さ約5.1 km以浅で50 m、それ以深で150 mとした。解析の時間刻みは0.004秒、時間ステップは15000、継続時間は60秒である。

4.2 スナップショットを用いた伝播性状の検討

3次元差分法で得られた計算波形の最大速度振幅分布のスナップショットを用いて大分平野内での波形の伝播を分析する。図7に破壊開始から15~60秒のEW方向のスナップショットを示す。スナップショットには0.2~2.0 Hzのバンドパスフィルタをかけた。大分平野の堆積層エリアに入った波は、60秒に至るまで揺れが継続し、大分平野の地質に対応が見られた。また、25秒と35秒(赤丸)で大分平野内の波の伝播の方向が大分平野東部から北部へ変化し地震波が増幅している事が分かる。

4.3 速度ペーストアップを用いた伝播性状の検討

3次元差分法で得られた速度ペーストアップを用いて地震波の伝播性状を分析する。図5に示す測線A-A'上の観測点におけるTransverse成分及びRadial成分の速度ペーストアップを図8、測線A-A'直下の地下構造断面図を図6に示す。なお、速度ペーストアップにおいて既存の観測点については、観測波形(黒色)と計算波形(赤色)を重ねて示しており、波形の隣の数値は各観測点の最大振幅値(cm/s)を示している。

表1 震源パラメータ

震源パラメータ	
緯度(°)	33.2715
経度(°)	131.3957
深さ(m)	5700
strike(°)	291
dip(°)	29
rake(°)	-77
Mo	5.13×10 ¹⁶
震源時間関数	Triangle(shifted)
rise time(s)	1.2
有効周波数(Hz)	0.2~2

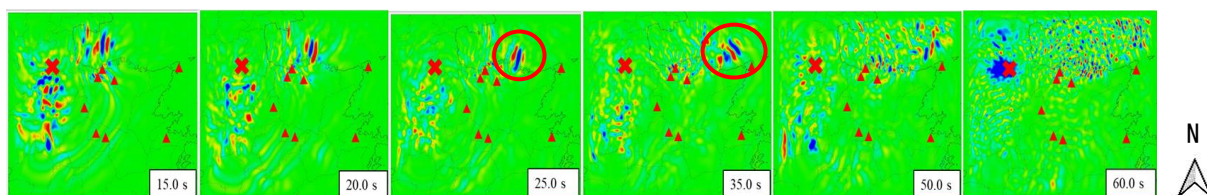


図7 シミュレーションで得られたスナップショット(EW成分)

速度波形には 0.2~2.0 Hz のバンドパスフィルタをかけた。Transverse 成分及び Radial 成分ともに地震波が岩盤から堆積層（震源から 20~30 km の範囲）に入ると、振幅が増幅していく様子が見られ、図 6 や堆積層の地質と対応している事が分かる。また、既存の観測点の計算結果と観測記録の比較については、後続波や波形の山谷等、細部まで再現できなかったが、最大振幅値や継続時間等は概ね再現できた。細部まで再現できなかった原因として、観測波形に含まれる表面波の影響や、図 1 の地形図や図 7 で示す通り、堆積層エリア背後の山からの反射波の後続波との干渉等によって波形が複雑化したことが考えられる。

5. まとめ

強震観測記録に基づく地盤震動特性の把握、既存地下構造モデルに基づく次元増幅率及び 3 次元差分法による地震動シミュレーションの結果から、大分平野の地震動特性について評価した。以下に得られた知見を示す。

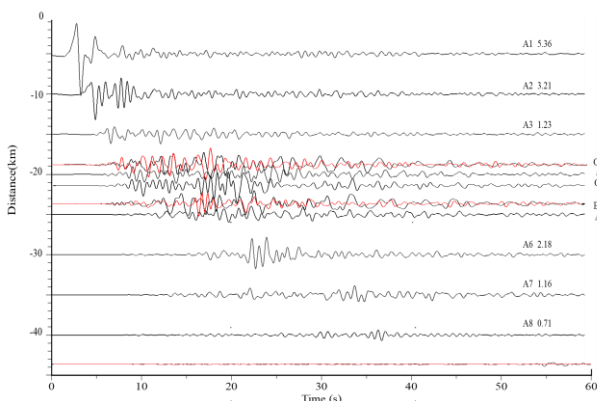
- 地震動の H/V スペクトル比では、堆積層上では卓越したピークは見られず移設観測点においてはピーク周波数に差が出る結果となった。
- 岩盤観測点に対するスペクトル比では、移設観測点において、OIT010A の方が高周波数側にピークが見られ、同じ地質上でピーク周波数に差が見られた。
- 理論次元増幅特性比との比較は、観測記録と比べて概ねピーク周波数は一致していたが、EE7 では増幅倍率が観測記録と比べて過小となった。
- 3 次元差分法による地震動シミュレーションでは、後続波や波形の山谷までは細かく再現できなかったが、最大振幅値や継続時間等は概ね再現できた。
- スナップショットでは、60 秒に至るまで大分平野の堆積層上で揺れが長く継続しており地質との対応が見られた。

速度ペーストアップでは、地震波が岩盤サイトから堆積層に入ると、振幅が増幅していく様子が見られ地下構造断面図と対応していた。

参考文献

- 1) 奈川ほか：2000 年鳥取県西部地震において大分平野で観測された長周期（5-10 s）地震波のシミュレーション、地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集、S081-S007、2002
- 2) 文部科学省研究開発局、国立大学法人京都大学大学院理学研究科：別府一万年山断層帯（大分平野一由布院断層帯東部）における重点的な調査観測平成 26 年~28 年度成果報告書、2017
- 3) 吉見ほか：微動アレイ探査で推定した大分平野の S 波速度構造、活断層・古地震研究報告、No. 8、p. 295-315、2008
- 4) 防災科学技術研究所：防災科研 K-NET、KiK-net、<https://doi.org/10.17598/NIED.0004>、2019
- 5) 気象庁：<https://www.jma.go.jp/jma/index>（参照 2022 年 11 月 26 日）
- 6) 国土地理院：地理院地図、<https://maps.gsi.go.jp>（参照 2022 年 7 月 28 日）
- 7) Kawase et al. : The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 101, No. 5, pp. 2001-2014, 2011
- 8) Borchardt R.D. : Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull. Seism. Soc. Am., 60, pp.29-81, 1970
- 9) 防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション、<https://doi.org/10.17598/nied.0010>、2019
- 10) 石作：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、2021
- 11) 青井ほか：地震動シミュレータ：GMS、物理探査、第 57 巻、第 6 号、pp. 651-666、2004
- 12) 広帯域地震観測網（F-net）：<http://www.fnet.bosai.go.jp>（参照 2022 年 12 月 1 日）

速度ペーストアップ A-A' Transverse



速度ペーストアップ A-A' Radial

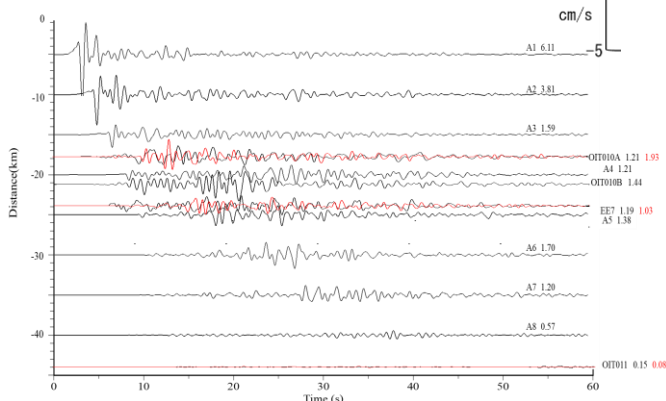


図 8 測線 A-A' の速度ペーストアップ (0.2~2.0 Hz)