

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 筑紫平野の地震動特性に関する研究

田中 斐佳

1. はじめに

九州最大の平野である筑紫平野は、平野内に水縄断層帯と佐賀平野北縁断層帯を有し、断層山地の間に陥没したかつての有明海の湾奥に形成された平野である。丘陵、台地、沖積低地、人工的な埋立地および干拓地から成り、筑紫平野北東部には火成岩、西部には変成岩から成る山地が分布し、平野内を筑後川が縦断している(図1)。この筑紫平野内の強震観測点では、2005年3月20日10時53分に発生した福岡県西方沖の地震(気象庁マグニチュードMj 7.0)、2016年4月16日1時25分に発生した熊本地震(Mj 7.3、以降熊本地震)の際に、震央からそれぞれ約67km、50kmと離れているにもかかわらず、震度5弱、一部5強に及ぶ大きな揺れが観測された²⁾。この一因として筑紫平野における地盤増幅特性の影響が考えられる。

将来発生する地震に対する安全性を検討する上で、筑紫平野全体の地震動特性の把握は重要であるが、特に筑紫平野南西部では、地盤震動特性や地下構造に関する既往研究の蓄積は十分でない。

そこで本研究では、筑紫平野を対象地域とし、強震観測記録を用いた地盤増幅特性、さらには、3次元差分法による地震動シミュレーションを用いた地震波伝播性状について検討を行う。

2. 筑紫平野における熊本地震の強震動

熊本地震の際、震源から50km離れている防災科学技術研究所の強震観測網FKO015では周期1.0秒、4.0

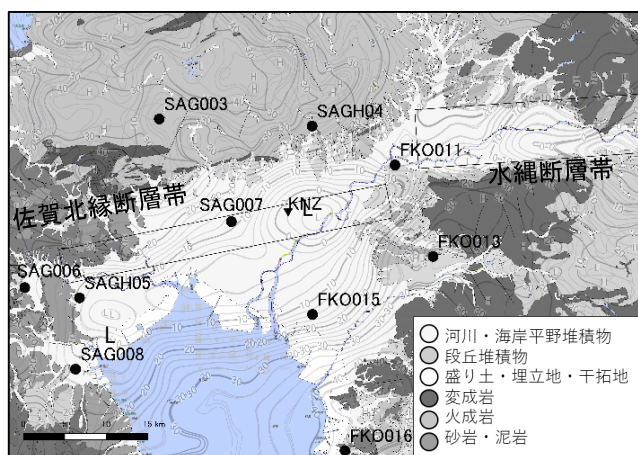


図1 対象領域と観測点(シームレス地質図³⁾⁴⁾に加筆

秒の加速度応答値が大きかったことが指摘されている²⁾。図2に熊本地震における筑紫平野での周期4.0秒の加速度応答値の空間分布を示す。加速度応答値は、観測記録の全区間から計算した各周期の水平2成分の加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%とした。熊本地震では、防災科学技術研究所の強震観測網K-NETとKiK-netの記録に加え、気象庁、地方公共団体の観測点での記録が得られている。図2には、筑紫平野とその周辺に位置する観測点も合わせて示している。

筑紫平野は震源から50km程度離れているにもかかわらず、筑紫平野南西部では筑紫平野周辺の観測点に比べて大きな応答値が観測され、その値は50~100 cm/s²に及ぶ。また、加速度応答値の空間分布は一様ではなく、河川・海岸堆積物上に位置する神埼市千代田(KNZ)では100 cm/s²程度、FKO015、SAG007では50~80 cm/s²の応答値が観測されている。一方、変成岩、火成岩、砂岩・泥岩や段丘堆積物上に位置するその他の観測点は、応答値が20 cm/s²を下回る。

図1には、ブーゲー異常図⁴⁾を合わせて示しているが、筑紫平野では周辺よりもブーゲー異常値が小さく、特に負の領域がKNZ付近に存在する。これは、堆積層が特に厚いことを示唆しており、加速度応答値の空間分布と対応する。

図3に熊本地震時に筑紫平野で観測された速度波形、加速度フーリエスペクトルを示す。速度波形の算出には0.03 Hzのハイパスフィルタを用いている。また加速度フーリエスペクトルはS波初動到達後の20.48秒間から求めており、平滑化には0.2 HzのParzen windowを用いた。岩盤サイトであるSAGH04、段丘堆積物上に位置するFKO013、河川・海岸堆積物上に位置するFKO015、KNZを一例として示している。

KNZ、FKO015では他の観測点に比べて、振幅は2倍以上大きく、KNZでは主要動の継続時間がSAGH04の2倍程度長い。また、FKO013、FKO015はどちらも震央距離が約56kmであるが、鉛直成分の振幅の差はそれほど大きくない一方、水平動成分の振幅はFKO013に比べ、FKO015では2倍以上大きい。また、

FKO015、KNZ では3成分すべてで、後続波が40秒以上続いている。加速度フーリエスペクトルを見ると、SAGH04の水平動では約6Hzに大きなピークがあるのに対し、FKO013では約2Hz、KNZ、FKO015では、全体的に振幅が大きい、特に1Hzよりも低周波数側で、SAGH04やFKO013と比べて顕著に振幅が大きい。また、KNZにおける1Hz弱、FKO015における0.2Hz付近のピークは特徴的であり、地質との対応がうかがえ、地下構造による地震動の増幅の影響が推測される。KNZでは0.2Hz付近にピークは存在しないが、FKO015と同様に、0.2Hzの振幅はSAGH04の約10倍大きい。

3. 筑後平野のR/Vスペクトルと既存の地下構造

地震動のS波コーダ部分のRadial成分とVertical成分のスペクトル比(R/Vスペクトル)は速度構造に基づくRayleigh波基本モードの理論楕円率と対応することが知られている。⁵⁾⁶⁾⁷⁾そこで、各観測点で得られた地震波のS波コーダ部分からR/Vスペクトルを算出する。対象とした強震記録は、1996年から2018年10月までに対象観測点すべてで観測された地震のうち、Mjが大きいものから順に選択された10地震の記録であり、それらのR/Vスペクトルを観測点ごとに平均した(観測値)。地方公共団体の観測点KNZにおいては熊本地震

のみ記録が得られているため、熊本地震のR/Vスペクトルを示した。R/Vスペクトル算出の際の解析区間はS波初動到達後の2.78秒から21.57秒後から81.92秒間としたが、記録長が短く、81.92秒に満たない場合は後続に0を追加した。平滑化には0.1HzのParzen windowを用いた。なお、10地震の中には、熊本地震が含まれており、FKO016では最大加速度が200 cm/s²を超えていたが、他の9地震とR/Vスペクトルの形状がおおよそ一致していたため、非線形化の影響はないと判断して使用した。図4に解析結果の一例として、上記の観測点SAGH04、FKO015、KNZに加えて、段丘堆積物上に位置するFKO011のR/Vスペクトルを示す。観測値のピークは観測点ごとに大きく異なる。SAGH04では8Hz前後と非常に高周波数側にピークを持ち、FKO011では1.5Hz付近にピークが見られる。さらに、FKO015、KNZではそれぞれ0.2Hz、0.1Hzと非常に低周波数側にピークが見られ、堆積層が厚いことが推察される。FKO015、KNZではそれぞれ2Hz、1Hzにもピーク周波数が見られた。

図4には、既存の地下構造モデルから算出したRayleigh波基本モードの理論楕円率(理論値)を合わせて示す。既存の地下構造モデルには、防災科学技術研究

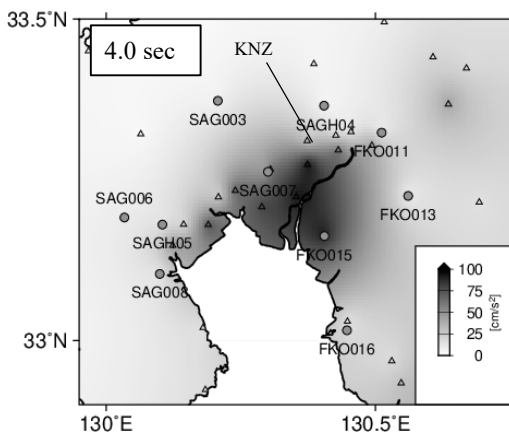


図2 筑紫平野における熊本地震本震時の加速度応答分布

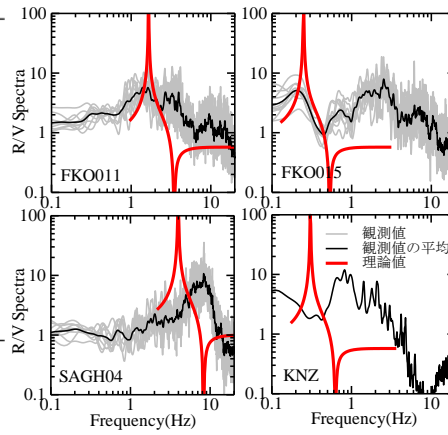


図4 R/VスペクトルとRayleigh波基本モードの理論楕円率

表1 震源パラメータ

| | |
|----------------|------------------------------------|
| 緯度 | 33.67 |
| 経度 | 130.29 |
| 深さ(m) | 13000 |
| strike | 133(JMA) |
| dip | 88(JMA) |
| rake | -33(JMA) |
| M ₀ | 1.31 × 10 ¹⁷ (F-net) |
| 震源時間関数 | Smoothed ramp function |
| rise time(s) | 0.85 |
| 有効周波数(Hz) | 0.1~1.0 |

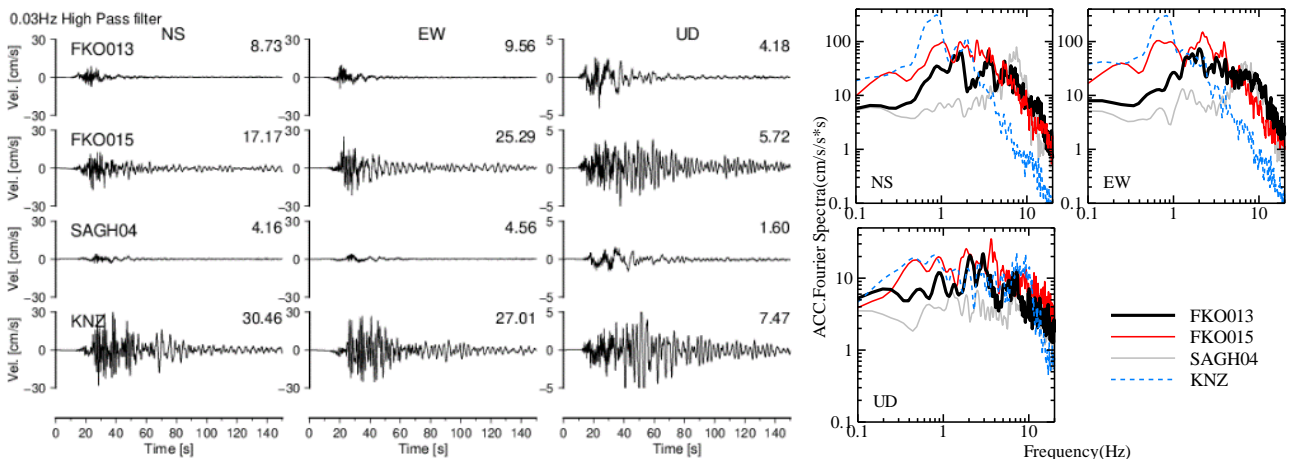


図3 熊本地震本震時に筑紫平野南部で観測された速度波形とフーリエスペクトル

所の地震ハザードステーション (J-SHIS) で公開されている深部地盤構造⁸⁾を用いた。SAGH04 では、堆積層上の観測点に比べて高周波数側にピークがあるものの、観測値のピークに対して理論値のピークが低周波数側に現れた。一方、筑後川沿いのKNZにおいては観測値のピークに対して理論値のピークが高周波数側に現れた。既存構造よりも実際には堆積層が厚いことが予測され、地下構造のより詳細な検討が必要である。しかし、FKO011、FKO015 およびその他の観測点では観測値と理論値のピークとトラフがよく一致し、地下構造は大局的に妥当である。

4. 3次元差分法による地震動シミュレーション

4.1 計算条件

筑紫平野の堆積層上の観測点では、継続時間の長い後続波と長周期地震動が観測されている。このような筑紫平野における地震波の伝播特性について、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、3次元差分法プログラムGMS⁹⁾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⁸⁾を利用した。対象とした地震は2005年4月20日6時11分に発生した福岡西方沖地震の最大余震(Mj 5.8)である。震源パラメータは気象庁によって決定されたメカニズム、九州大学によって決定された震源位置、F-netによって決定された地震モーメント M_0 を用いた(表

1)。解析領域は震源と筑紫平野を含む約78 km四方、深さは約20 kmとした(図5)。解析領域を最小限にするために、X軸は北から時計回りに38.7度傾けた。本解析の対象は長周期地震動であるため、有効周波数上限値は1 Hzとした。また、本解析領域の地下構造モデルにおける最小S波速度が600 m/sであるため、S波1波長あたり5格子を確保するために、差分格子間隔は水平、鉛直とも深さ3.1 km以下で100 m、それ以下で300 mとした。解析領域の側面および底面の内側方向の約2 kmを人工的な反射波を取り除くための吸収境界領域とし、解析の時間刻みは0.008秒、時間ステップは15000、継続時間は120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

観測記録にみられた継続時間の長い長周期地震動に対して地震動シミュレーションから得られたスナップショットを用いた検討を行う。図6に0.1~1.0 Hzのバンドパスフィルタをかけた震源破壊開始から20秒と60秒のX方向のスナップショットを示す。20秒では筑紫平野に入った地震波が山地に比べ、大きな振幅を持っており、S波初動が通過した後も平野内が大きな振幅を持っていることが分かる。震源からFKO012を結ぶ方向では大きな振幅が得られているが、震源の放射特性の影響が一因として考えられる。波の伝播速度についても、平野内では遅く、山地で速くなる傾向が見える。

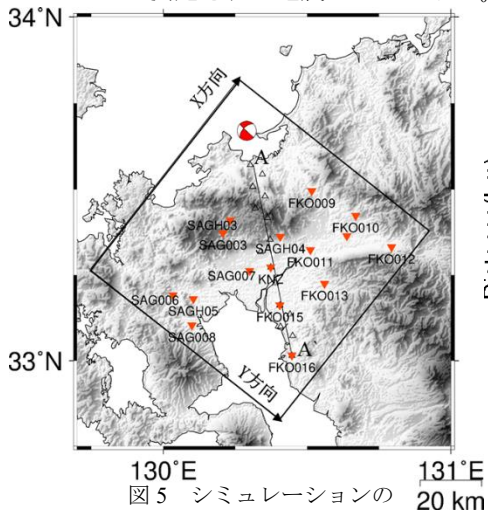


図5 シミュレーションの対象領域と観測点

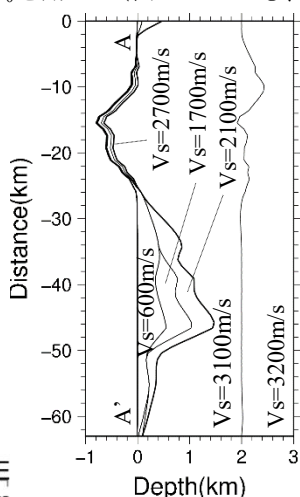


図8 ラインA-A'の地下構造

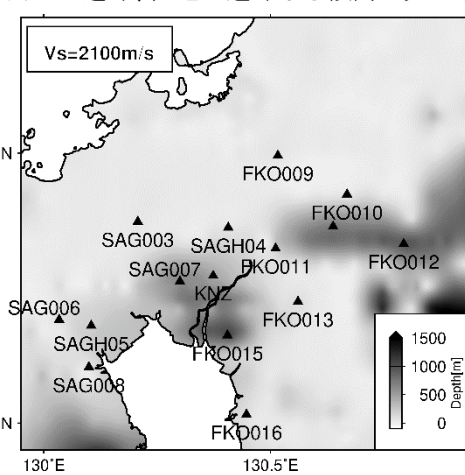


図7 Vs=2100m/sの上面深度

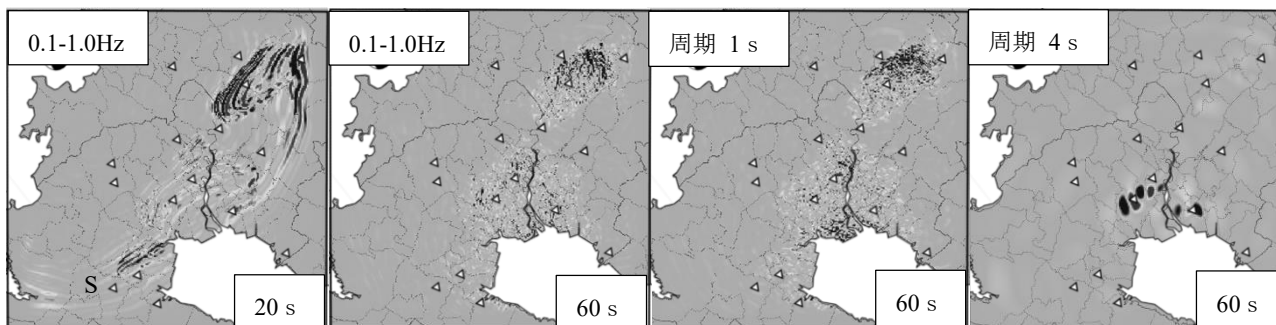


図6 シミュレーションから得られたスナップショット

また、60秒では筑紫平野の堆積層上では揺れが継続しており、筑紫平野内では長い継続時間が観測された。

次に周期成分に着目する。図6に周期1秒と周期4秒の60秒でのスナップショットを合わせて示す。周期1秒では筑紫平野の堆積層上で揺れが継続している。一方、周期4秒ではKNZ、FKO015、SAG007付近でのみ揺れが継続している。図7に示す $V_s=2100$ m/sの深度分布と比較すると振幅が大きい範囲と深度が対応しており、1/4波長則に従うと、 $V_s=2100$ m/sの深度と卓越周期に相関関係がある。

4.3 速度ペーストアップを用いた伝播性状の検討

地震波伝播性状について地震動シミュレーションから得られた速度ペーストアップを用いた検討を行う。図5に示すラインA-A'のシミュレーションから得られた速度ペーストアップを図9、ラインA-A'直下の地下構造断面図を図8に示す。Radial方向成分、Transverse方向成分ともに15km付近で振幅が一度小さくなり、筑紫平野堆積層上に当たる30kmから50kmの範囲で再び振幅が大きくなり、50km以降で小さくなる様子が見える。15km以降の振幅の大きさは図8に示した直下の基盤構造に対応しており、深度が深いほど振幅は大きい。また、同範囲で後続波の継続時間は30秒以上長く、堆積層上で地震波が滞留している様子が見える。

5. まとめ

本研究では筑後平野の強震観測点で観測された大きな揺れに着目し、観測された強震記録と3次元差分法シミュレーションを用いて、筑紫平野の震動特性とその要因を検討した。以下に得られた知見を示す。

- ・加速度応答スペクトル分布図から熊本地震本震時に筑紫平野南西部において周期4.0秒で50~100 cm/s²の相対的に大きな加速度応答値が観測され、100 cm/s²を観測したKNZはブーゲー異常図の負の領域

と対応する。

- ・筑紫平野の卓越周期は、堆積層で4.8秒以上、段丘層、山間部付近で1.0秒以下と大きな違いが見られ、地下構造の影響が推測される。
- ・KNZではR/VスペクトルとRayleigh波基本モードの理論楕円率が大きくずれており、地下構造の検討が必要な箇所もあるが、既存の地下構造は大局的に妥当である。
- ・地震動シミュレーションの結果から、筑紫平野内で長い継続時間は再現され、周期1秒では筑紫平野の堆積層上で後続波の振幅が大きく、周期4秒では後続波の振幅の大きい範囲と $V_s=2100$ m/sの上面深度に対応が見られた。
- ・振幅と後続波の継続時間は直下の基盤構造に対応し、深度が深いほど振幅は大きく、継続時間は長い。

参考文献

- 1) 日本地質学会編：日本地方地質誌 九州・沖縄地方, pp.97-101, 2012
- 2) 有馬拓, 寄井田恭佑, 重藤迪子, 神野達夫: 加速度応答値に着目した2016年熊本地震の本震における強震動評価, 2017年度日本建築学会大会(九州), 構造II, pp. 205-208, 2017.
- 3) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編: 20万分の1日本シームレス地質図, <https://gbank.gsj.jp/seamless/tilemap/>, アクセス日: 2018/12/11
- 4) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編: 20万分の1重力図(ブーゲー異常図), <https://gbank.gsj.jp/seamless/tilemap/>, アクセス日: 2019/1/30
- 5) 塩野計司, 太田裕, 工藤一嘉: やや長周期の微動 観測と地震工学への適用(6)-微動に含まれるRayleigh波成分-, 地震第2輯, 第32巻, pp. 59-122, 1991
- 6) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, pp. 81-87, 1992
- 7) 岡田廣, 凌甦群, 石川顕, 宮腰研: 微動のアレイ観測中に記録された地震動のコーダ部分に含まれるレイリー波の位相速度推定, 日本地震学会講演予稿集, 1993, pp.106.
- 8) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 東宏樹, 大井昌弘, はお憲生, 長谷川信介, 前田宜浩, 岩城麻子, 若松加寿江, 井元政二郎, 奥村俊彦, 松山尚典, 成田章: 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料 第379号, 2012
- 9) 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.

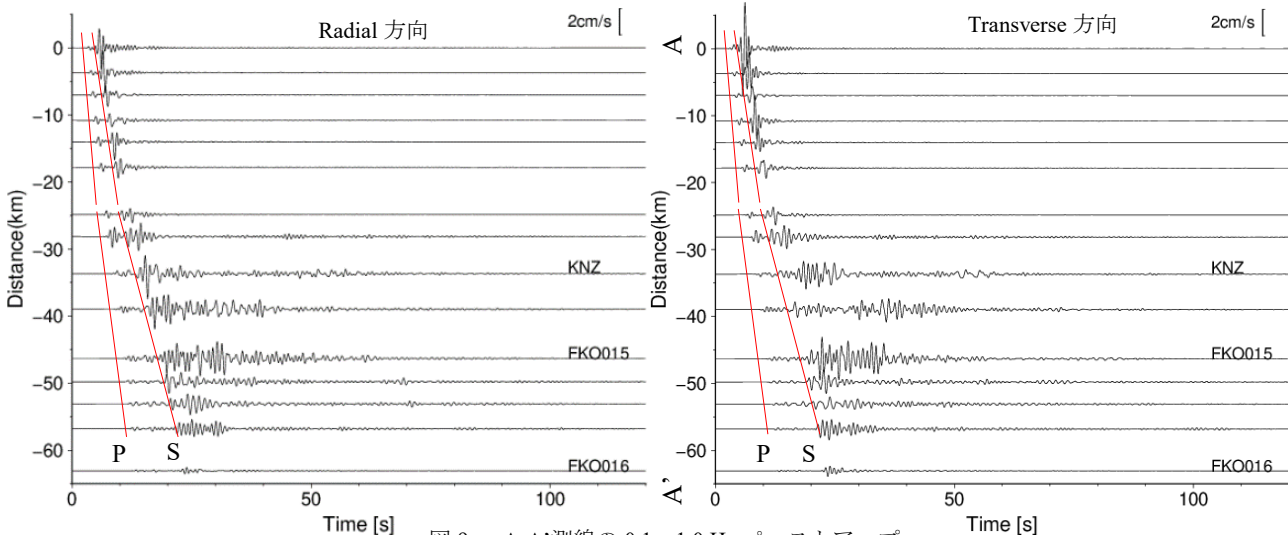


図9 A-A'測線の0.1~1.0 Hz ペーストアップ