

3次元差分法による2016年熊本地震の伝播特性に関する研究

寄井田 恭佑

1. はじめに

2016年4月16日1時25分に熊本地方を震源とする M_{JMA} 7.3の地震(以下、熊本地震)が発生した。熊本地震は、布田川断層帯と日奈久断層帯が活動したもので、Kubo et al. (2016) による、強震波形記録に基づく震源インバージョン解析の結果からは、断層破壊が震源の北東側に進み、震央の北東10~30 km、深さ約15 km以浅に大きなすべり領域が推定されている。震源断層近傍の益城町や西原村では、幅数秒のパルス状の波形が観測された一方で、震源から北東にやや離れた阿蘇カルデラ内の防災科学技術研究所(NIED)のK-NET一の宮(KMM004)で周期約3秒の長周期地震動が観測された。

野津・長尾(2005)は、スペクトルインバージョンによる解析から、カルデラ内の観測点で0.2~1 Hzの帯域でのサイト増幅特性が著しく大きくなる点があることを示し、その要因としてカルデラ内において、厚く堆積している比較的軟らかい火山性の堆積物による増幅やカルデラの閉じた地形による表面波の卓越などを挙げている。免震構造物などの長周期構造物から木造住家までの幅広い構造物に影響を及ぼす0.2~1 Hzの地震動の増幅メカニズムを解明することは、今後の構造物の耐震性を考える上で重要である。しかし、カルデラ内に設置されている地震計数やカルデラでの地震動に関する既往研究は少ない。

そこで本研究は、2016年熊本地震の観測記録にみられる地震動特性の成因を解明することを目的とし、3次元差分法による地震動シミュレーションを行い、特に地震動の伝播特性について検討を行う。

2. 観測記録の分析

まず、熊本地震の観測記録にみられる地震動特性について考察する。熊本地震では、NIEDの強震観測網や地方公共団体、気象庁などにより多数の地震記録が得られ公開されている。ここでは、断層近傍の走向方向に位置する観測点の記録を用いて、地震動の伝播特性について考察を行う。比較に用いる観測点およびKubo et al. (2016)の曲面断層モデル、以降の検討に用いるラインA-A'を図1に、ラインA-A'直下の地下構造断面図³⁾を図2に示す。震央からラインA-A'への垂線との交点をラインA-A'における基準点としている。各観測点の速度波形を断層直交方向(N140E)、断層平行方向(N50E)に変換した速度ペーストアップを図3に示す。なお、観測記

録の波形には、0.05~1.0 Hzのバンドパスフィルターを施し、各波形の最大値により基準化している。また、各波形の右の数字は最大速度を示している。各観測点の断層平行方向と断層平行方向の振幅を比較すると、ほとんどの観測点で断層平行方向の振幅が大きい。破壊の進行方向の断層直交方向においてディレクティビティ効果によるパルス状の波がみられる。断層平行方向においては、カルデラ内に位置するKMM004で継続時間の長い長周期地震動が観測され、カルデラ外の93005においても振幅が小さいものの継続時間の長い地震動が観測された。

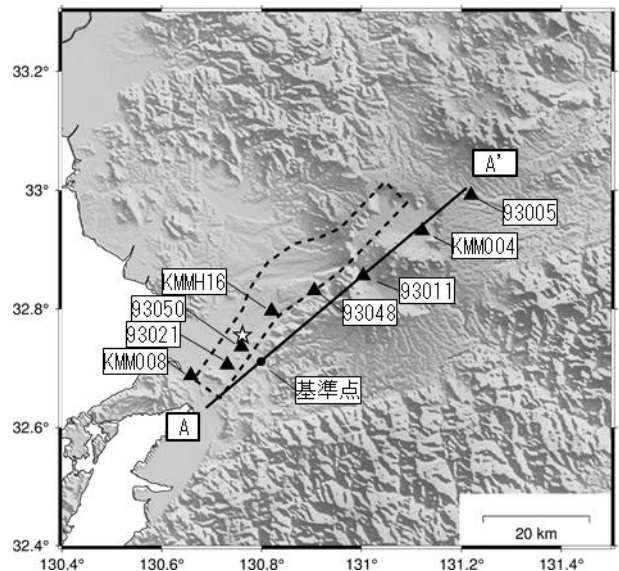


図1 比較する観測点(三角)および曲面断層モデル(点線)と震央位置(星印)、検討に用いるラインA-A'(実線)

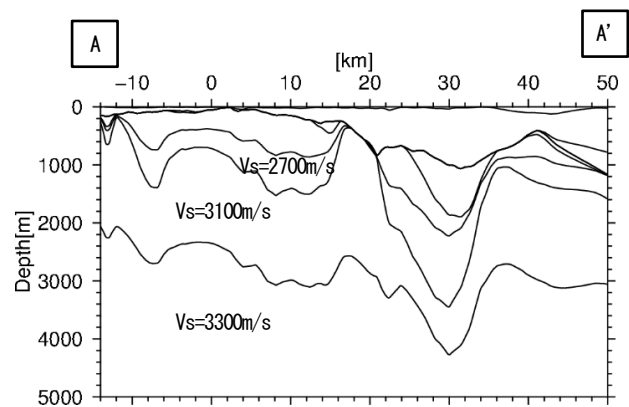


図2 ラインA-A'直下のJ-SHISによる地下構造断面図

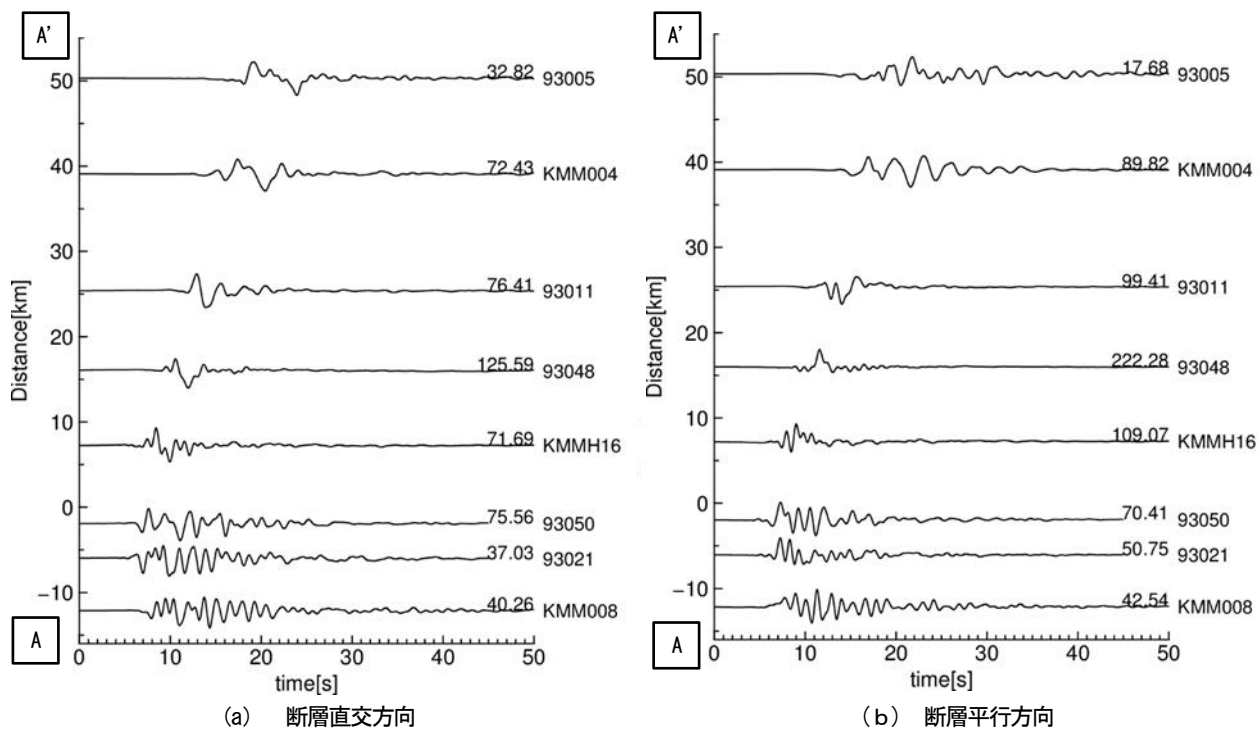


図3 観測記録の速度ペーストアップ (バンドパスフィルター : 0.05~1.0Hz)

表1 曲面断層モデル主要部のパラメータ

	北部	中央部	南部
走向(°)	224	235	215
傾斜角(°)	75	65	75

3. 3次元差分法によるシミュレーション

3.1 計算条件

前述した観測記録の特徴の成因解明を目的に、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。計算プログラムには、3次元差分法プログラムGMS⁴⁾を用いた。震源断層モデルには、Kubo et al. (2016) による曲面断層モデルを使用した。このモデルは、3つの主要部(北部, 中央部, 南部)とそれらをつなぐ遷移部分で構成され、上端長さ53 km, 幅24 kmであり、破壊開始点は北緯32.7557度, 東経130.7616度, 深さ13.58 kmである。主要部の断層パラメータを表1に示す。断層面全体での地震モーメントは 5.5×10^{19} Nm (Mw7.1)である。断層は長さ約2 km, 幅2 kmの小断層に分割され、各小断層でのすべり時間関数は破壊開始から0.8秒幅のスムーズドランプ関数を0.4秒ずらしに13個並べて表現されている。地下構造モデルは、NIEDの地震ハザードステーションJ-SHISによる深部地盤構造モデル(2009)³⁾を利用し、解析領域は震源断層モデルを中心に約100 km四方, 深さは約50 kmとした。

Kubo et al. (2016) による震源インバージョンでは、観測波形に対して0.05~1.0 Hzのバンドパスフィルターを施した速度波形を解析データとして用いているため、本解析の有効周波数上限値は1 Hzに設定した。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 km以下で120 m, それ以上で360 mとした。解析領域の側面および底面の内側方向の約7 kmを吸収領域とし、解析の時間刻みは0.01秒, 時間ステップを9000, 継続時間を90秒とした。以降の検討では、観測波形および計算波形に、0.05~1.0 Hzのバンドパスフィルターを施し、断層平行方向(N50E), 断層直交方向(N140E)に変換して示す。

3.2 伝播特性の検討

観測記録にみられた断層直交方向のディレクティビティ効果および断層平行方向の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による再現および成因の検討を行う。

図1に示すラインA-A'の速度ペーストアップを図4に示す。断層直交方向をみると、約20 km以降でパルス波がみられ、ディレクティビティ効果を再現でき、その波形形状も観測記録とよく一致した。

次に、断層平行方向をみると、約30 km付近で振幅が大きく、継続時間の長い地震動がみられる。カルデラはラインA-A'の約20 kmから40 kmの範囲内に位置し、図2の地下構造断面図より、カルデラ端部の地震基盤深度は比較的浅く、30 kmで堆積層が厚くなる2次元あるいは3次元に閉じた構造であるといえる。このため、野津・長尾(2005)の指摘のように、堆積平野の盆地構造と同様なメカニズムで発達した表面波が要因の一つとなり、継続時間の長い地震動が観測されたと考えられる。しかしながら、カルデラ外の93005においても継続時間の長い地震動が観測され、観測記録の振幅に比べ計算波形の振幅が93005では7割程度であるのに対して

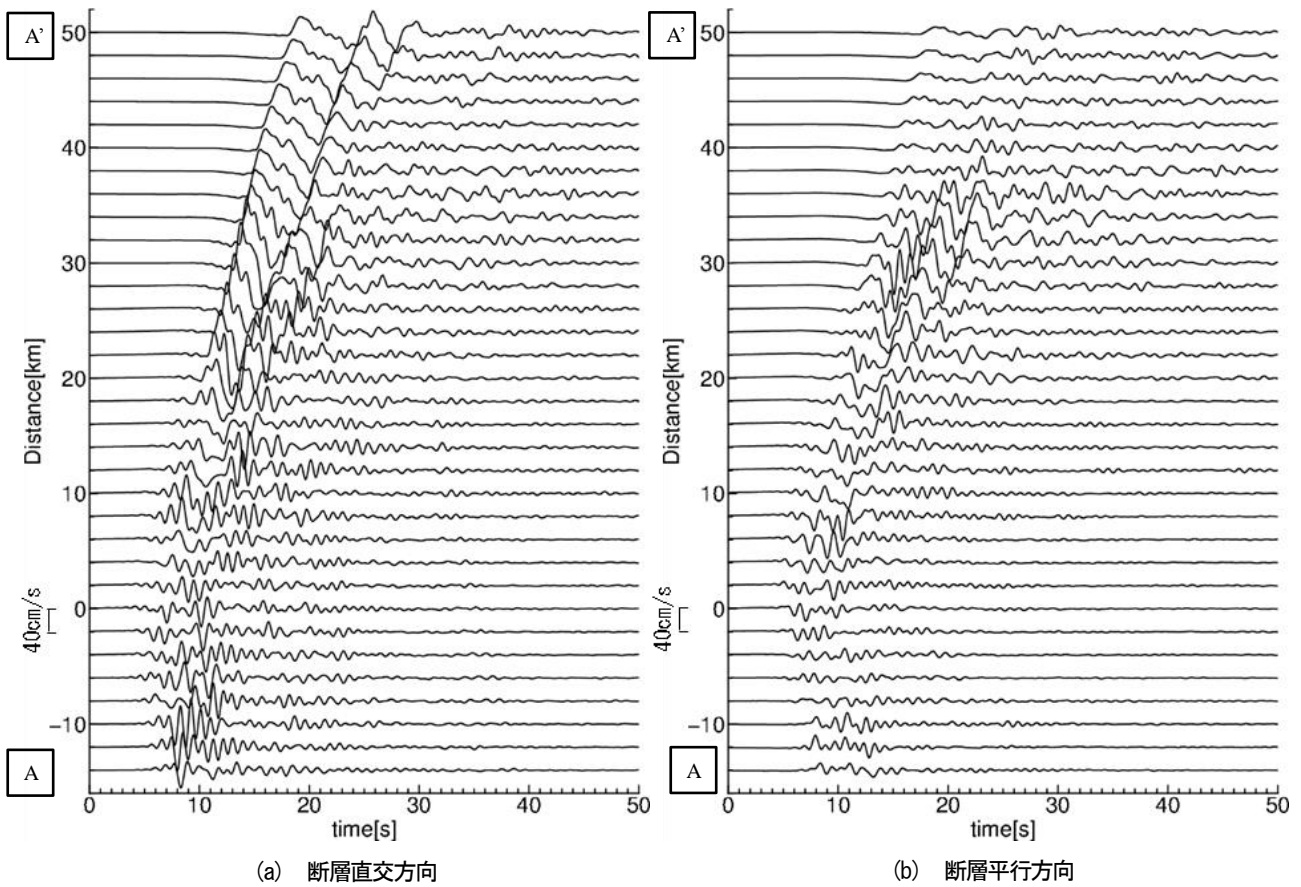


図4 ラインA-A' の速度ペーストアップ (バンドパスフィルター : 0.05-1.0Hz)

KMM004 においては2割程度しかない。そのため、断層平行方向における継続時間の長い地震動の成因について以降で検討を行う。

各地点における断層平行方向と断層直交方向の振幅を比較すると、計算波形では全体として断層平行方向の振幅が小さく、観測記録を説明できていない。この要因として、断層平行方向の地震動に対する震源断層モデルの精度が低い可能性や地下構造モデルの影響などが考えられる。

4. 地震基盤で浅の1次元地下構造による影響の検討

3次元差分法による地震動シミュレーションにおいて、断層平行方向における継続時間の長い地震動の特性は再現できたが、その振幅は再現出来なかった。先述のようにカルデラ内に比較的軟らかい層が厚く堆積しているが、本研究に用いている地下構造モデルの最小S波速度は600 m/sであるため、表層地盤の影響を含む地下構造を精度よく再現出来るとは言えない。

そこで、表層地盤の有無ならびに1次元地下構造の精度が地震動に及ぼす影響の検討を行う。五通 (2018) ⁵⁾は、微動アレイ探査に基づきKMM004のS波速度構造を推定している。本研究では、KMM004を対象とし、観測記録と3次元差分法による計算結果 (以下、3次元地下モデルによる計算波形) ならびに五通 (2018) が推定した地下構造を用い、1次元重複反射理論 (SHAKE) ⁶⁾に基づき算出した計算波形 (以下、

1次元地下モデルによる計算波形) の比較を行う。1次元解析による地震波の算出には入力地震波が必要であり、本解析においては地震基盤を基準面とするが、KMM004直下の地震基盤上面で得られる速度波形は地震基盤以浅の層から反射された地震波を含んでいる。そのため、地震基盤以浅の層を除いた地下構造モデルによるシミュレーションを行い、これにより得られた解放地震基盤波を入力地震波として用いる。密度は、太田・他 ⁷⁾による密度 ρ (g/cm³) とS波速度 V_s (km/s) との関係式 (式(1)) を用いて算出した。

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (1)$$

3次元差分法で用いた地下構造モデルの減衰定数は各層のS波速度 (m/s) の1/6~1/12であり、1 Hzを基準周波数とする周波数依存性が考慮されている。ここでは、各層のS波速度 (m/s) の1/10の値を減衰定数とし、1 Hzに比例させ解析を行った。

観測速度波形 (黒線)、3次元地下モデル (灰色線)、1次元地下モデルによる計算波形 (点線) の比較を図5に、速度フーリエスペクトルの比較を図6に示す。断層直交方向の速度波形をみると、観測速度波形と1次元地下モデルによる計算波形の振幅はよく一致し、3次元地下モデルによる計算波形の振幅が小さい値となった。断層直交方向の速度フーリエスペクトルをみると、観測速度波形および3次元地下モデルと、1次元地下モデルを用いた場合は低周波数側のピーク周波

数にやや違いは見られるものの、フーリエ振幅に大きな違いは見られない。次に断層平行方向の速度波形をみると、観測記録に比べ1次元地下モデル、3次元地下モデルを用いた場合ともに振幅が足りない。速度フーリエスペクトルを比較すると、いずれもピーク周波数は0.3 Hz程度であり、その時のフーリエ振幅をみると、1次元地下モデルによる計算波形が3次元地下モデルによる計算波形の1.5倍程度となり、観測速度波形に近づいた。これより、KMM004の観測記録にみられる断層平行方向の長周期地震動の増幅には少なくともS波速度600 m/s以浅の層の有無を含む地下構造の精度の影響があると確認できた。また、依然として振幅が不足している原因として、2, 3次元的な波動伝播の影響や断層平行方向の地震動に対する断層モデルの精度が低いことなどが考えられる。

5. まとめ

本研究では、2016年熊本地震(M_{JMA}7.3)を対象とした3次元差分法による地震動シミュレーションを行い、地震動の伝播特性に関する検討を行った。さらに、シミュレーションにより得られた解放地震基盤波を用いた1次元解析により、表層地盤の有無および地下構造モデルの精度が地震動に及ぼす影響の検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 断層直交方向の地震動において、観測記録と計算波形の振幅に差はみられるが、位相は概ね一致し、観測記録にみられるディレクティビティ効果を再現できた。
- 断層平行方向の地震動において、震源から北東にやや離れた観測点における継続時間の長い地震動の傾向を再現でき、その成因としてカルデラ内の厚い堆積層による影響やカルデラの閉じた地形による表面波の生成および発達などが考えられるが、振幅を2割程度しか再現できない観測点もあった。
- 全体として、観測記録では断層直交方向より断層平行方向の振幅が大きくなる傾向がみられたが、計算波形では断層平行方向の振幅の再現性は低かった。
- 1次元地下構造が微動アレイ探査により推定されているKMM004において、本解析で得られた解放地震基盤波を用いた1次元解析を行ったところ、断層平行方向の長周期成分をより再現でき、表層地盤を含む地下構造の精度が長周期地震動の生成に少なからず寄与していることがわかった。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, 気象庁および地方自治体によって観測された地震記録を利用した。また、作図の一部にGMT(The Generic Mapping Tools)を使用した。ここに記して感謝の意を表する。

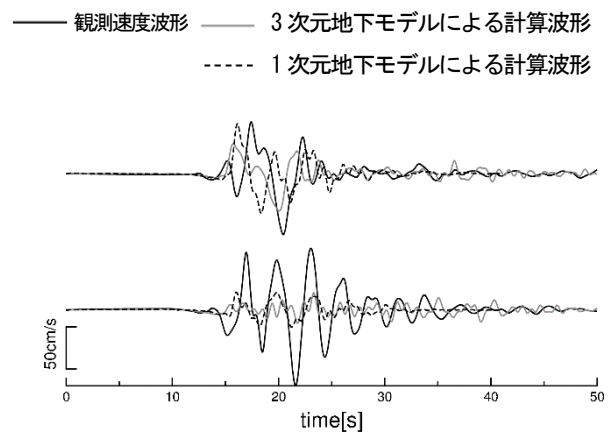


図5 KMM004における速度波形の比較

(上: 断層直交方向, 下: 断層平行方向)

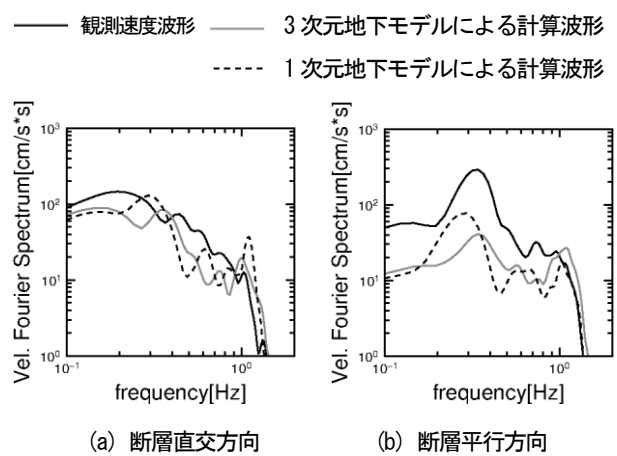


図6 KMM004における速度フーリエスペクトルの比較

参考文献

- Kubo et al.: Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, *Earth Planets and Space*, Vol. 68, 2016.
- 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の強震観測点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No. 1112, 2005.
- 藤原広行, 他: 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第337号, 2009.
- 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.
- 五通康形: カルデラに位置する阿蘇市街地の地盤振動特性に関する研究, 九州大学卒業論文, 2018.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.
- 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