

# 2016年熊本地震においてK-NET一の宮で観測された 長周期地震動に影響を及ぼす断層パラメータに関する研究

上 蘭 周平

## 1. はじめに

2016年4月16日1時25分に発生した熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震(以下、本震)が発生した。この地震を受け、阿蘇市一の宮町の阿蘇神社では、楼門と拝殿が倒壊し、大きな被害を受けた<sup>1)</sup>。阿蘇神社の南、約1.8km離れた防災科学技術研究所のK-NET一の宮において周期3秒程度の長周期成分が卓越する地震動が観測されたことから、田中(2016)<sup>2)</sup>は、この阿蘇神社の被害の要因として、一般的な木造建物に比べ重たい小屋組みを有し、固有周期が長い楼門や拝殿が選択的に共振し、倒壊に至ったと指摘している。この被害のより詳細な検討のためには、阿蘇神社で観測された地震動を的確に再現する必要がある。しかし、既存の特性化震源モデル<sup>2)3)</sup>などでは、K-NET一の宮でのこのような長周期成分を多く含む地震動の再現性が低い傾向にある。また、阿蘇市一の宮では本震時、地盤が非線形挙動を示していた可能性があるため、その影響も含め長周期地震動の成因について検討する必要がある。

本研究では、本震の際にK-NET一の宮で観測された長周期地震動の再現性向上を目的とし、特性化震源モデルの断層パラメータの検討と地盤の非線形挙動を考慮した地震応答解析を行い、断層パラメータの設定が、本震時のK-NET一の宮における長周期地震動に及ぼす影響について検討する。

## 2. K-NET一の宮で観測された地震動

図1に、本震における周期2.0~5.0秒の平均加速度応答値(減衰5%)の空間分布を示す。図中の断層モデルは小林・他(2016)<sup>4)</sup>による。周期2.0~5.0秒では、西原村で応答値が最大となり、阿蘇市一の宮(以降、KMM004)、熊本市南区、宇城市で応答値が大きくなる。

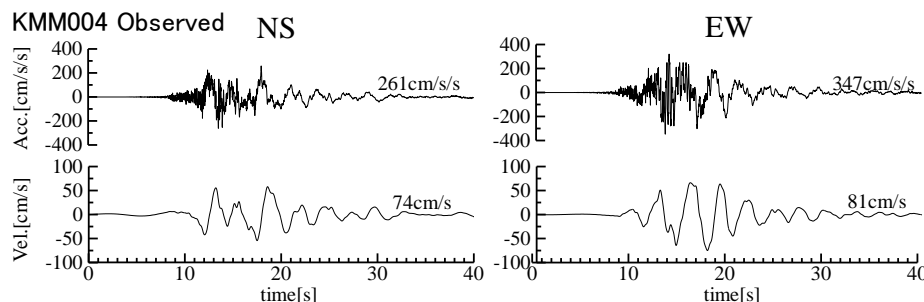


図2 KMM004における本震の加速度波形、速度波形、加速度フーリエスペクトル

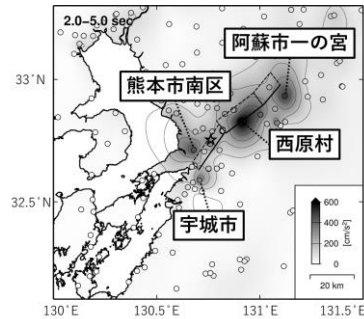
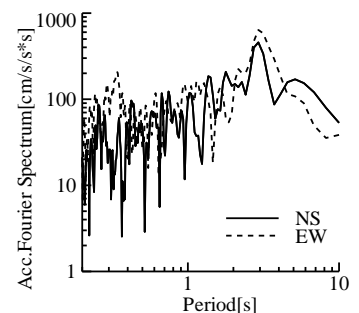


図1 本震の震源断層と平均加速度応答値の空間分布

KMM004における本震の水平動の加速度波形、速度波形、加速度フーリエスペクトルを図2に示す。なお、本研究では、観測波形および計算波形に0.2~5.0 Hzのバンドパスフィルタを施しており、加速度フーリエスペクトルの解析区間はS波初動の2秒前からの20.48秒とし、平滑化は行っていない。加速度波形と速度波形の最大振幅(以降、PGAとPGV)はNS成分で260 cm/s/s、58 cm/s、EW成分で346 cm/s/s、74 cm/sとなり、加速度フーリエスペクトルからも卓越周期は3秒となり長周期成分が卓越している。

## 3. 経験的グリーン関数法と既存の特性化震源モデル

経験的グリーン関数法<sup>5)6)</sup>を用いて既存の特性化震源モデルに基づき、KMM004において波形を合成し、観測記録と比較する。既存の特性化震源モデルを用いて、波形合成を行い、KMM004における観測記録の再現性が良いモデルを、本研究では特性化震源モデル推定にあたる初期モデルとする。今回波形合成のために用いる熊本地震の特性化震源モデルに、佐藤(2017)<sup>7)</sup>によるSATOH-Aモデル、Irikura et al. (2017)<sup>8)</sup>によるIrikura-YOSHIDAモデル、Irikura-KUBOモデルを用いた。各モデルによる合成波形と観測波形の比較を行ったが、本稿では紙面の都合上、SATOH-Aモデルの特性化震源モデルの地表投影図を図3に、経験的



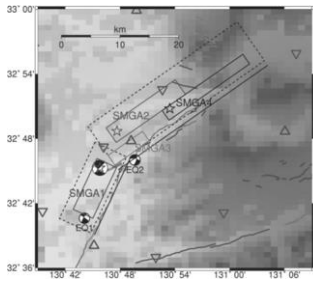


図3 SATOH-Aモデルの地表投影図<sup>2)</sup>

グリーン関数法による波形合成の結果を本震の観測波形と比較し図4に示す。なお、佐藤(2017)<sup>2)</sup>では、弱震動のS波部分の水平動と鉛直動のスペクトル比(S-H/V)の平均値に対する本震のS-H/Vの比を、経験的グリーン関数法による計算波のNS、EW成分それぞれのフーリエ振幅に乘じることで、地盤の非線形化の影響を補正しているが、ここでは補正前の結果を示す。

SATOH-Aモデルを用いた合成波形のPGAとPGVはNS成分で192 cm/s/s、14 cm/s、EW成分で164 cm/s/s、21 cm/sとなり、観測記録に比べ過小評価となっているが、他2つのモデルも含め周期約3秒の長周期地震動は卓越していた。その中で長周期帯域でのピーク周期が、NS、EW成分ともに3秒に最も近いSATOH-Aモデルを本研究における特性化震源モデルの初期モデルとした。

#### 4. 特性化震源モデルの再構築

##### 4.1 断層パラメータの検討

佐藤(2017)<sup>2)</sup>の特性化震源モデルを初期モデルとし、KMM004の長周期地震動の再現性向上を目的とした特性化震源モデルの断層パラメータの検討を行う。断層パラメータの解析手順は以下の通りである。

まず、既存の震源断層モデルの最終すべり量分布を参考にすべり量の大きなエリアに矩形のサブイベントである強震動生成域(以下、SMGA)を配置する。変位量分布よりSMGAの位置や個数を設定する。また、引間(2016)<sup>5)</sup>によると、本震における震源インバージョン解析では、断層上でアスペリティ付近の破壊伝播速度の変化が大きく、局所的には破壊伝播速度は震源域のS波速度を超えると指摘している。そのため、布田川断層側のSMGAの破壊伝播速度についてSATOH-Aモデルのように一定値を用いるのではなく、SMGAごとに個別で設定を行う。続いて、経験的グリーン関数法により波形を合成し、観測波形との比較を行う。

以上の作業を試行錯誤的に検討し、KMM004での長周期地震動の再現性を向上させる特性化震源モデルの再構築を試みた。

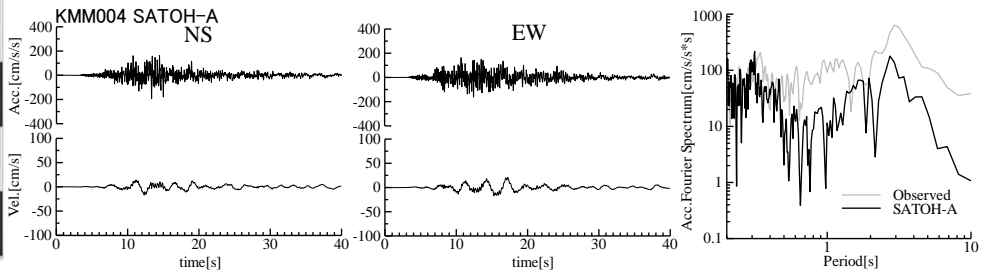


図4 SATOH-Aモデルによる合成波形

##### 4.2 推定した特性化震源モデル

本研究で推定した特性化震源モデルの地表投影図と特性化震源モデルの断層投影図を図5に示す。ここで、図5に示したK-NETの観測点であるKMM005(大津)、KMM009(矢部)と、KiK-netの観測点であるKMMH02(小国)、KMMH06(白水)は、佐藤(2017)<sup>2)</sup>においてSATOH-Aモデルで波形合成を行い、観測波形と比較した観測点である。本研究で推定した特性化震源モデルは、SMGAは日奈久断層側に1つ、布田川断層側に4つ配置し、背景領域については合成波形への寄与を考慮しない。要素断層が2.4 km×2.4 kmの正方形であるため、佐藤(2017)<sup>2)</sup>と同様、SMGA1は震源と同じ位置で破壊し、同心円状に伝播したと設定した。また、SMGA2とSMGA4、SMGA5はそれぞれの破壊開始点から同心円状に破壊し、SMGA3はSMGA5の破壊開始点から同心円状に破壊すると仮定した。SMGA破壊開始点からの破壊伝播速度は、日奈久断層側に1種類、布田川断層側に3種類設定する。また、SMGA4におけるSMGAの面積を浅部に拡大した。表1に本震において推定した断層パラメータを示す。

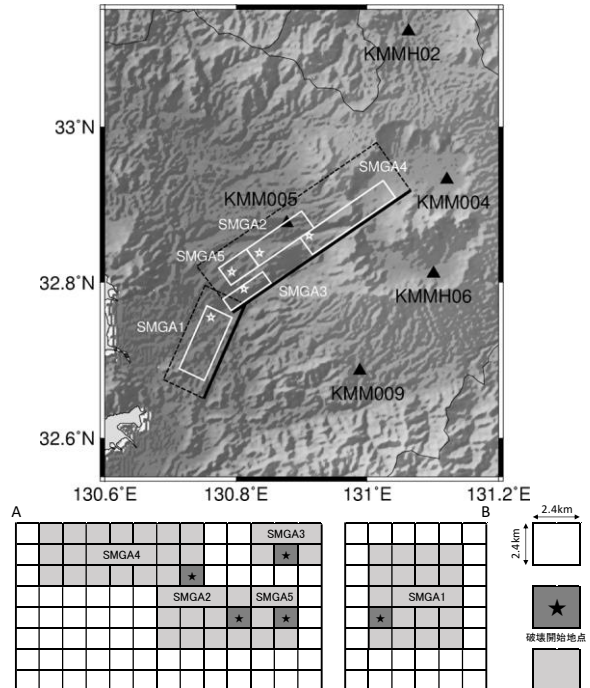


図5 推定した特性化震源モデルの地表投影図、断層投影図

## 5. 1次元等価線形化手法による地盤非線形挙動の検討

### 5.1 解析手順

本研究で対象としている KMM004 は本震において、100 cm/s/s を超える強震動を記録しており、地盤の非線形化が現れていたことが考えられるため、本研究では1次元等価線形化手法を用いて、地盤の1次元非線形地震応答解析を行う。なお、本研究では、この解析に吉田 (2008) <sup>6)</sup> による1次元地盤の地震応答解析プログラム DYNEQ を用いた。以下にその解析手順を示す。

- ① 五通 (2018) <sup>7)</sup> と PS 検層 (図 6) の地下構造を参考に地震基盤以浅の地盤モデルを作成する。20m 以浅の地下構造には防災科学技術研究所の公表する KMM004 の PS 検層データを、20m 以深から地震基盤の地下構造には五通・他 (2018) <sup>7)</sup> の S 波速度構造モデルを参考に、地盤モデルを作成する。
- ② 地震基盤における要素地震を推定する。線形の1次元重複反射理論に基づき地表の要素地震の観測記録から地震基盤における要素地震を算出する。
- ③ 本研究で推定した特性化震源モデルを用いて、地震基盤での要素地震を経験的グリーン関数法で合成し、地震基盤における本震波形を推定する。
- ④ 推定した地盤モデルに、地震基盤波を入力し、DYNEQ を用いて地表での地震動を推定する。

### 5.2 解析条件

解析の際は、対象材料に対する動的変形特性試験を行って決めるのが好ましいが、本研究では既存の実験式により解析する。実験式には Hardin-Drnevich モデル <sup>9)</sup> を用いた。また、実験式のパラメータである基準せん断ひずみ  $\gamma_{0.5}$  ( $G/G_{max} = 0.5$ でのせん断ひずみ) と最大・最小減衰定数  $h_{max}, h_{min}$  は、古山田・他 (2003) <sup>10)</sup> で提案された動的変形試験結果から算定された値を用いた。以下にその値を示す。

$$\text{粘性土} : \gamma_{0.5} = 0.18\% \quad h_{max} = 17\% \quad h_{min} = 2\%$$

$$\text{砂質土} : \gamma_{0.5} = 0.10\% \quad h_{max} = 21\% \quad h_{min} = 2\%$$

### 5.3 解析結果

本研究で推定した KMM004 における地表での合成波形 (線形)、非線形挙動を考慮した地表での推定波形を観測波形と比較し、図 7 に示す。

本研究で推定した地震基盤の合成波形では、加速度フーリエスペクトルから周期 3 秒秒で卓越していることが確認された。また、河崎・他 (2018) <sup>11)</sup> では、SATOH-A モデルを用いて、地震基盤波を算出し卓越周期 3 が秒であることから、震源特性の影響を指摘している。本研究で推定した特性化震源モデルにおいても、周期 3 秒が卓越し同様の結果が確認された。

表 1 推定した断層パラメータ

	Length /Width [km]	Area of SMGA [km <sup>2</sup> ]	Stress Drop [MPa]	Seismic Moment [Nm]	Rupture Starting Time[s]	Rupture Velocity [km/s]
SMGA1	9.6/12.0	115.2	9.8	4.97E+18	1.0	2.4
SMGA2	9.6/7.2	69.12	9.8	2.31E+18	5.3	3.2
SMGA3	7.2/4.8	34.56	9.8	8.16E+17	5.5	2.8
SMGA4	14.4/7.2	103.68	9.8	4.24E+18	6.6	3.2
SMGA5	4.8/7.2	34.56	9.8	8.16E+17	3.3	2.4

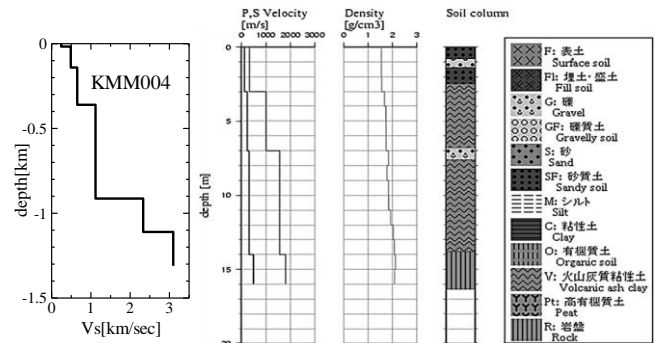
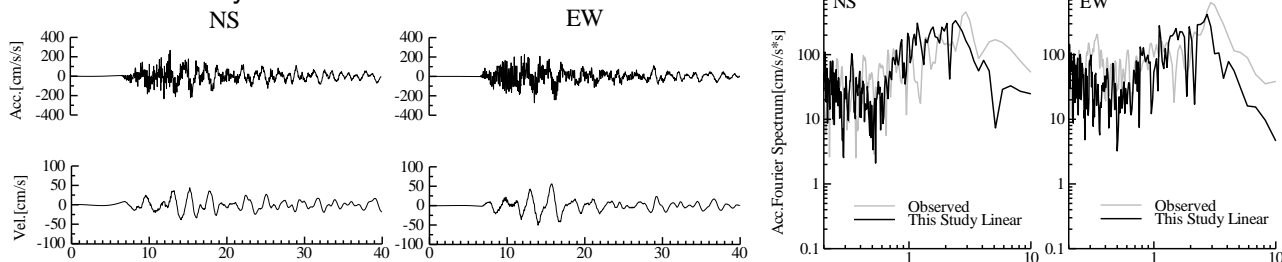


図 6 五通 (2018) <sup>7)</sup> の推定した S 波速度構造、KMM004 の PS 検層

非線形補正後の推定地震波形の PGA と PGV は NS 成分で 219 cm/s/s、45 cm/s、EW 成分で 260 cm/s/s、59 cm/s となり、SATOH-A モデル (NS 成分: 192 cm/s/s、14 cm/s、EW 成分: 164 cm/s/s、21 cm/s) に比べ、PGV では約 3 倍の値を示し、再現性が向上した。また、加速度フーリエスペクトルを見ると、本震観測波形に比べ、やや短周期側にピークを持つ結果となった。しかし、ピーク値は NS 成分で 401 cm/s/s\*s、EW 成分で 402 cm/s/s\*s となり、本震の観測記録 (NS 成分 457 cm/s/s\*s、EW 成分: 637 cm/s/s\*s) を満足するほどではなかったが、SATOH-A モデルの合成波形 (NS 成分 103 cm/s/s\*s、EW 成分: 179 cm/s/s\*s) に比べ、再現性は大幅に向上している。また、長周期帯域だけではなく、中周期帯域の再現性も向上されており、本震の観測記録を概ね再現する結果となった。非線形挙動の検討では、加速度フーリエスペクトルを見ると、NS、EW 成分共に、周期 1 秒以下の周期帯域において、フーリエ振幅の値に変化が見られる点が存在する。一方、長周期帯域においてはフーリエ振幅や固有周期の長周期化は表れていない。本研究における推定波形の非線形挙動の影響を検討するために、線形での加速度フーリエスペクトルに対する非線形での加速度フーリエスペクトルの比をとり、SATOH-A モデルにおける補正項と比較を行った。結果を図 8 に示す。周期 3 秒付近に着目すると、佐藤 (2017) <sup>2)</sup> における補正項の比が NS、EW 成分で 4~5 程度であるのに対し、本研究における比は 1 付近で滞っている。つまり、本研究においては、佐藤 (2017) <sup>2)</sup> のような補正すべき非線形挙動が見られなかった。これは、本研究の対象となる KMM004 では長周期成分が卓越する地震動であるため、非線形挙動が結果に影響しにくい可能性が考えられる。そのため、

### KMM004 This Study Linear



### KMM004 This Study Non-Linear

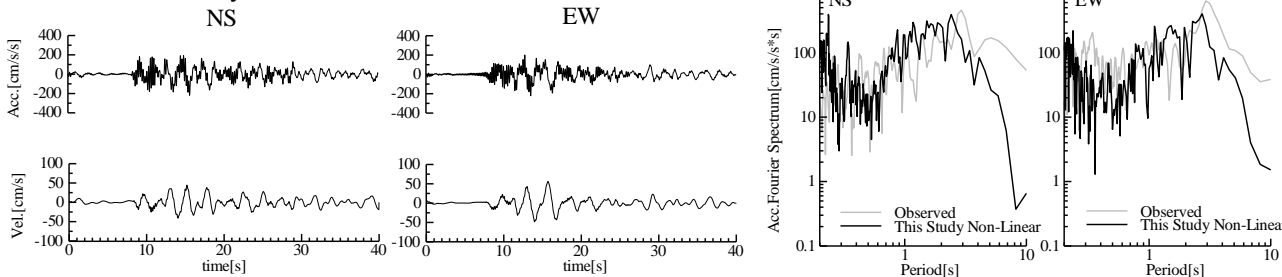


図7 本研究で推定した地表での合成波形（線形），非線形を考慮した地表での推定波形

KMM004 での周期 3 秒の長周期地震動は地盤の非線形挙動によるものではない可能性が示唆される。

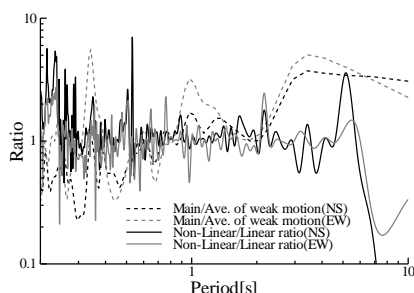


図8 非線形挙動における補正項の比較

## 6. まとめ

本研究では、本震において観測された長周期地震動の再現性は向上を目的として、既存の特性化震源モデルを参考に断層パラメータの検討を行い、経験的グリーン関数法を用いた波形合成と地盤の非線形挙動の検討から、K-NET 一の宮における長周期地震動に及ぼす影響を検討した。得られた知見を以下に示す。

- ・本研究で推定した地震動と SATOH-A モデルによる合成波形の比較から、PGA、PGV、加速度フーリエスペクトルの長周期成分の再現性が向上していた。そのため、本研究で検討した断層パラメータである、布田川断層帯における局所的な破壊伝播速度の変化と強震動生成域 (SMGA4) における面積の浅部拡大が長周期地震動に影響を及ぼす可能性が考えられる。
- ・地盤の非線形挙動の検討における補正項の比較から、本研究では佐藤 (2017) <sup>2)</sup> のような補正すべき非線形挙動は見られなかった。そのため、本震における K-NET 一の宮での周期 3 秒の長周期地震動は、地盤の非線形挙動による影響ではない可能性が示唆される。

## 参考文献

- 1) 田中圭：木造建築の被害の概要，2016 年度日本建築学会大会災害部門緊急報告会資料，pp. 12-18, 2016/8
- 2) 佐藤智美：強震観測記録に基づく 2016 年熊本地震の広帯域震源特性，日本建築学会構造系論文集，82 巻，741 号，pp. 1707-1717, 2017
- 3) Irikura, K., K. Miyakoshi, K. Kamae, K. Yoshida, K. Somei, S. Kurahashi and H. Miyake: Applicability of source scaling relations for crustal earthquakes to estimation of the ground motions of the 2016 Ku-mamoto earthquake, *Earth, Planets and Space*, 3, 2017
- 4) 小林広明・瀧藤一起・三宅弘恵：強震，遠地，測地データのジョイントインバージョンによる 2016 年熊本地震の震源過程，MIS34-P65, 2016
- 5) Irikura, K.: Prediction of strong Acceleration motions using empirical green's function, *Proceedings of the seventh japan earthquake engineering symposium*, pp. 151-156, 1986
- 6) 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 (MJMA6.5) 及び 5 月 13 日 (MJMA6.3) 鹿兒島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル，*地震第 2 輯*，51 巻，4 号 pp. 431-442, 1999
- 7) 引間和人：2016 年熊本地震の破壊伝播速度がやや長周期地震動へ及ぼした影響に関する検討，*日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国)*，p.205-206, 2017/8
- 8) 吉田望：DYNEQ A computer program for DYNAMIC response analysis of level ground by Equivalent linear method, 東北学院大学工学部，<http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>, 2008
- 9) 五通康形・上蘭周平・重藤迪子・神野達夫：2016 年熊本地震において長周期地震動が観測された強震観測点における微動アレイ探索，*物理探査学会第 138 回学術講演会論文集*，pp.222-225, 2018
- 10) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P.: *Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves*, *J. SMFD, Proc., ASCE, Vol.98, No.SM7*, pp.667-692, 1972
- 11) 古山田耕司・宮本裕司・三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性，*第 38 回地盤工学研究発表会講演集*，pp. 2077-2078, 2003
- 12) 河崎生・五通康形・上蘭周平・重藤迪子・神野達夫：2016 年熊本地震において K-NET 一の宮で観測された長周期地震動の検討，*日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北)*，pp.701-702, 2018