

# 経験的グリーン関数法に基づく 2016 年 4 月 16 日に大分県中部で発生した

## 正断層型地殻内地震の震源特性に関する研究

中尾 隆

### 1. はじめに

大分県中部では、2016 年 4 月 16 日の熊本地震の本震（以降、熊本地震）直後に、マグニチュード (M) 6 クラスの地震が誘発された（以後、大分県中部の地震と呼ぶ）。この大分県中部の地震は、震源深さが 11.8 km である<sup>1)</sup>ため、地殻内地震であると考えられる。また、宮澤 (2016)<sup>2)</sup>は大分県中部の地震のメカニズム解を、右横ずれを伴う北傾斜の正断層と指摘している。

一方、震源断層を特定した地震における強震動を高精度に予測するための標準的な方法論として強震動予測レシピ<sup>3)4)</sup>が提案されている。この強震動予測レシピで用いられる震源パラメータの一つに加速度震源スペクトルの短周期領域のレベル（短周期レベル）があるが、これは震源から放出される短周期地震動の振幅に対応する量であり、応力降下量やアスペリティの総面積を求める際の重要なパラメータである。

地殻内地震の短周期レベルについては、佐藤 (2010)<sup>5)</sup>や壇・他 (2001)<sup>6)</sup>により地震モーメント  $M_0$  に比例する経験式が提案されている。しかし、正断層型の地殻内地震の短周期レベルについては、その発生頻度が低いことが一因となり、検討例が少ない。特に M6 以上の正断層型地震に対して短周期レベルを推定した例は、2011 年福島浜通り付近の地震 (M7.0) を対象とした佐藤 (2012)<sup>7)</sup>のみである。

本研究では、経験的グリーン関数法を用いて大分県中部の地震の震源特性、特に短周期レベルを推定し、既往研究結果による逆断層型や横ずれ断層型の地殻内地震の短周期レベルとの比較から正断層型地殻内地震の短周期レベルの考察をする。

### 2. 大分県中部の地震と熊本地震の概要

大分県中部の地震と熊本地震の諸元を表 1 に示す。大分県中部の地震は、熊本地震の本震の約 30 秒後に発生したため、その観測記録には熊本地震の影響が含まれ、震源決定は困難である。震源およびメカニズムの推定を試みた既往研究は、気象庁マグニチュード  $M_j$  5.7~6.5、走向約 240 度、傾斜角約 60 度、すべり角約 140 度、大分平野-湯布院断層帯西部で発生した地震

であると指摘している。図 1 に熊本地震と大分県中部の地震の震央位置と、大分県で観測された地震波の一例を示す。OITH11 の加速度波形において、15 秒あたりに熊本地震の P 波初動、24 秒に S 波初動、さらに 35 秒付近から大分県中部の地震の P 波が到達している。

表 1 地震の諸元

	2016年 熊本地震	大分県中部 の地震	大分小地震
発震時刻	2016-04-16 <sup>I</sup> 01:25:05	2016-04-16 <sup>I</sup> 01:25:37	2016-04-29 <sup>I</sup> 15:09:34
震央位置 (°)	32.7530N <sup>II</sup> 130.7620E	33.2747N <sup>I</sup> 131.3532E	33.2578N <sup>II</sup> 131.3680E
深さ (km)	12.45 <sup>II</sup>	11.79 <sup>I</sup>	7.44 <sup>II</sup>
走向 (°)	226 <sup>III</sup>	240 <sup>IV</sup>	236 <sup>III</sup>
傾斜角 (°)	84	60	30
すべり角 (°)	-142	-140	-148
$M_j$	7.3 <sup>I</sup>	5.7-6.5 <sup>V</sup>	4.5 <sup>I</sup>
$M_0$ (Nm)	4.42E+19 <sup>V</sup>	2.11E+18 <sup>V</sup>	7.08E+15 <sup>V</sup>

I JMA II NIED<sup>8)</sup> III F-net<sup>9)</sup> IV 宮澤 (2016) V 本研究

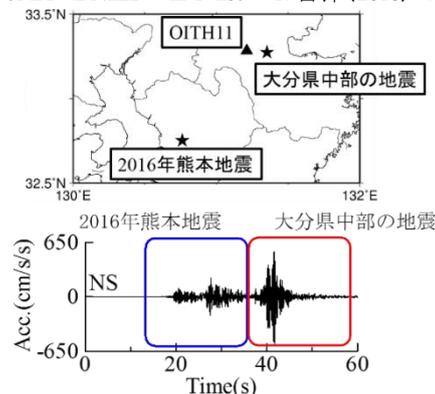


図 1 震央位置 (★) と OITH11 の位置 (▲)、OITH11 の加速度波形

### 3. 2016 年熊本地震本震の影響の除去

#### 3.1. 2016 年熊本地震の既存の特性化震源モデル

本研究では、大分県の地震観測点で得られた観測波形 (OITOB) から経験的グリーン関数により算出した熊本地震の合成波形 (KMMSYN) を引くことで、大分県中部の地震と熊本地震の地震波の分離を試みる。経験的グリーン関数法を適用して熊本地震の特性化震源モデルを提案した既往研究として、Irikura et al. (2017)<sup>10)</sup>と佐藤 (2017)<sup>11)</sup>がある。Irikura et al. (2017) では、強震動生成領域が 1 個と 3 個の特性化震源モデル、佐藤 (2017) では、本震と余震の  $f_{max}$  の違いと地

盤の非線形の影響を補正して強震動生成領域が 4 個 (Satoh-A モデル) と 5 個 (Satoh-Y モデル) の特性化震源モデルを提案推定している。ここでは、これら 4 つの特性化震源モデルから本研究に最適なものを選定する。なお、紙面の都合上、梗概には佐藤 (2017) の 2 つの特性化震源モデルを用いた検討のみを載せる。

### 3.2. 解析データ

解析には、1997 年 1 月から 2017 年 8 月までに防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET、KiK-net で観測されたデータのうち、大分県中部の地震、各特性化震源モデルの構築に使われた要素地震、震源位置や震源メカニズムを考慮して大分県中部の地震の合成に用いる要素地震になり得る地震の全てが観測されている観測点のデータを用いた。熊本地震と大分県中部の地震の震央位置、観測点の位置を図 2 に示す。

この結果、抽出されたデータは 4 地震、観測点は福岡県と大分県の K-NET (7 地点)・KiK-net (5 地点) の観測点 12 地点のデータである。

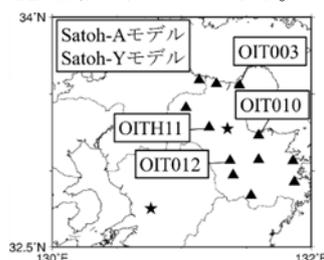


図 2 震央位置 (★) と観測点の位置 (▲)

### 3.3. 特性化震源モデルの検討

図 2 の観測点を対象に、特性化震源モデルを用いて、経験的グリーン関数法によって熊本地震の強震動シミュレーションを行い、観測記録の再現性が良いモデルを本研究で採用する。このとき、本研究で採用する経験的グリーン関数法は、三宅・他 (1999) <sup>12)</sup>の手法とする。対象周期 0.1~5 秒である。また、これらの観測点は、熊本地震の震源から約 80 km 離れており、振幅はそれほど大きくないため、この地震による地盤の非線形化を考慮する必要がない。そこで、Satoh-A モデルと Satoh-Y モデルにおいて、地盤の非線形の影響を補正していない。

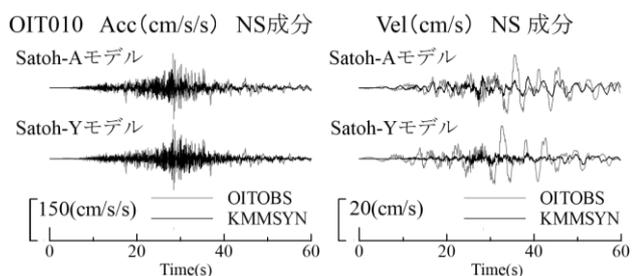


図 3 OITOBS と KMMSYN の比較

対象とする観測点のうち、OIT010 における 2 つの特性化震源モデルで再現した加速度波形と速度波形を図 3 に示す。それぞれの波形は熊本地震の P 波初動から 60 秒間を示している。24 秒付近から大分県中部の地震の S 波が到達している。加速度波形を見ると、Satoh-A モデルと Satoh-Y モデルは熊本地震の振幅の最大値や包絡形状は概ね一致しており、観測記録を再現できている。速度波形を見ると、Satoh-A モデルが Satoh-Y モデルよりも振幅の最大値を最も再現できている。また、Irikura et al. (2017)の特性化震源モデルから算出した合成波形と比較しても、Satoh-A モデルが最も良く観測波形を再現した。以上の結果より、本研究では Satoh-A モデルを熊本地震の特性化震源モデルとして用いた。OITOBS から KMMSYN を引くことにより 2016 年熊本地震の影響を除いた大分県中部の地震の波形 (RESIDUAL) を算出した結果を図 4 に示す。

## 4. 大分県中部の地震の震源特性の推定

### 4.1. 解析手順

震源モデルの構築手順を三宅・他 (1999) の手法に従い、①小地震の選定②波形合成のパラメータ  $N$  と  $C$  の値 ( $N$ : 大地震と小地震の断層面の長さの比、 $C$ : 応力降下量の比) の推定③その他のパラメータの推定、の手順で解析を行う。

①小地震には、観測点数、SN 比および大地震と小地震のメカニズム解の比較から、2016 年 4 月 29 日 15 時 9 分に発生した M4.5 の地震 (以後、この地震を大分小地震と呼ぶ) を使用する。震源のモデル化には大分県中部の地震の震央に対して空間的な偏りがないように、K-NET、KiK-net の OIT003 (豊後高田)、OIT010 (大分)、OIT012 (直入)、OITH11 (九重) の 4 観測点を使用する (図 2)。

② $N$  と  $C$  の値を推定する。まず、大分県中部の地震と OITEGF における各観測点での S 波の到達時間を目視で決める。このとき、大地震の波形には RESIDUAL を用いる。次に、2 つの地震の観測記録の S 波部分 20 秒間のフーリエスペクトルの比を  $\omega^{-2}$ 震源モデル <sup>13)</sup>に

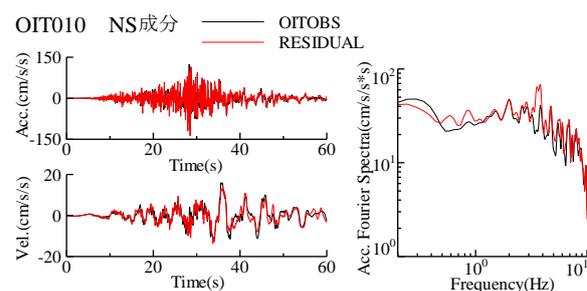


図 4 OITOBS と RESIDUAL の比較

基づく理論震源スペクトル比関数 (Source Spectral Ratio Function; SSRF) にフィッティングさせることで大地震と小地震のコーナー周波数の値およびパラメータ  $N$  と  $C$  を試行錯誤的に推定する。以上の解析より、モデル化に使用する 4 観測点の観測スペクトル比とそれらの対数平均値、および得られた SSRF を図 5 に示す。また、既往研究による大分県中部の地震の  $M_j$  (表 1) を用いて、武村 (1990) <sup>14)</sup> に基づき  $M_0$  に換算して比較したところ、内出・他 (2016) <sup>15)</sup> による値を用いた場合が最も観測スペクトル比と一致し、 $N=5$ 、 $C=3.0$  となった。

③その他のパラメータを推定する。強震動生成領域は、藤原・他 (2009) <sup>16)</sup> による大分平野-湯布院断層帯西部の地震の震源断層モデルを参考に設定した。震源位置、走向と傾斜角とすべり角は宮澤 (2016) による値 (表 1) を用いる。震源の S 波速度 ( $V_S$ ) は地震調査研究推進本部 (2017) <sup>17)</sup> による OIT009 直下の速度構造の本地震の震源位置での値を用い、強震動生成領域内の破壊の伝播速度 ( $V_R$ ) は Geller (1976) <sup>18)</sup> による地震発生層の S 波速度の経験式により算出する。また、立ち上がり時間 ( $T_R$ ) は Brune (1970) <sup>19)</sup> に基づき算出する。最後に、強震動生成領域の大きさ (長さ  $L$ 、幅  $W$ )、破壊開始点の強震動生成領域内での位置を未知変数として、対象としている 4 つの観測点での加速度、速度波形の S 波部分 20 秒間の合成波形を観測波形と合致させるフォワードモデリングを行う。

#### 4.2. 大分県中部の地震の特性化震源モデルの推定

前節の解析手順によって得られた最適な震源モデルを図 6 と表 2 に示す。強震動生成領域の大きさは 10 km × 10 km、小断層の大きさは 2.0 km × 2.0 km、立ち上がり時間 ( $T_R$ ) は 0.98 秒であった。破壊開始点は強震動生成領域の北西部に位置しており、大局的には北西から南東へ破壊が進行したことが分かる。強震動生成領域の大きさと破壊の伝播速度から、大分県中部の地震の破壊の継続時間は 4 秒程度であると考えられる。

震源モデルの推定に使用した 4 観測点のうち、OIT010 と OIT012 における震源モデルのフォワード計算による合成波形 (OITSYN) と OITOBS の加速度波形と加速度フーリエスペクトルの比較を図 7 に示す。この際、OITSYN には KMMSYN を加えており、周期 0.1~5 秒を対象としている。加速度波形を見ると、振幅の最大値や包絡形状は概ね一致しており、観測記録を再現できている。加速度フーリエスペクトルを見ると、2 Hz 以上の周波数帯域において観測波をおおよそ再現できている。

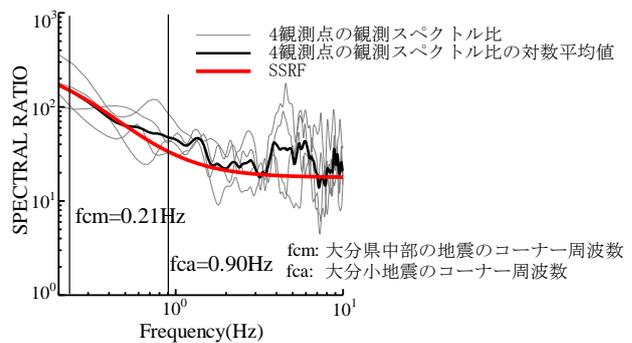


図 5 SSRF によるフィッティング

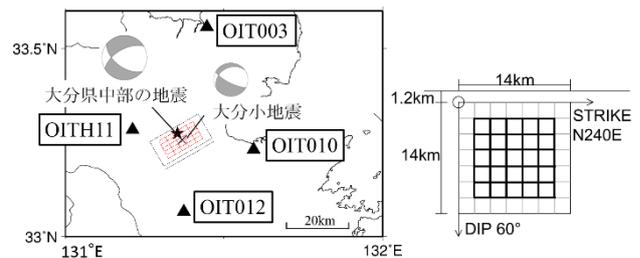


図 6 震源モデルの大きさと位置

表 2 強震動生成領域のパラメータ

強震動生成領域	長さ/幅 (km)	$V_S$ (km/s)	$V_R$ (km/s)	$T_R$ (s)	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	$A$ ( $\text{Nm/s}^2$ )
	10.0/10.0	3.80	2.74	0.98	3.49	$3.57\text{E}+18$

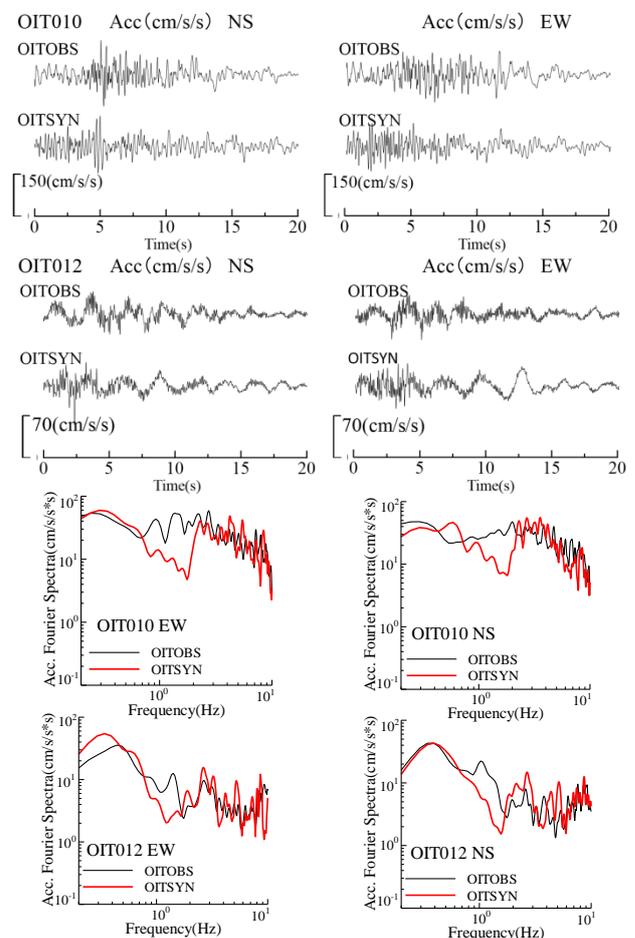


図 7 OITOBS と OITSYN の比較

## 5. 短周期レベルの比較

推定した大分県中部の地震の震源モデルから短周期レベルを推定する。はじめに、Brune (1970)に基づきアスペリティの静的応力降下量 ( $\Delta\sigma_a$ ) を算出する。その値を用いて壇・他 (2001) に基づき短周期レベル (A) を推定し、得られたパラメータを表 2 に示す。アスペリティの静的応力降下量は 3.49 MPa、短周期レベルは  $3.57 \times 10^{18} \text{ Nm/s}^2$  であった。

次に、図 8 に大分県中部の地震の地震モーメントと短周期レベルの関係 ( $M_0$ -A 関係) を、既往の逆断層型・横ずれ断層型の地殻内地震の  $M_0$ -A 関係、佐藤 (2012) が推定した福島浜通りの正断層の地震の  $M_0$ -A 関係とともに示す。このとき、壇・他 (2001) データベースには正断層型の地震は含まれていない。

大分県中部の地震の  $M_0$ -A 関係は、壇・他 (2001) の地殻内地震の平均の  $M_0$ -A 関係の式の 0.53 倍、福島浜通りの正断層の地震の  $M_0$ -A 関係の 1.23 倍となる。佐藤 (2012) において、 $M_w$  5.7 以上の地震は同じ断層型の  $M_0$ -A の関係式より短周期レベルが大きくなると推察しており、本研究も同様の特徴が見られた。

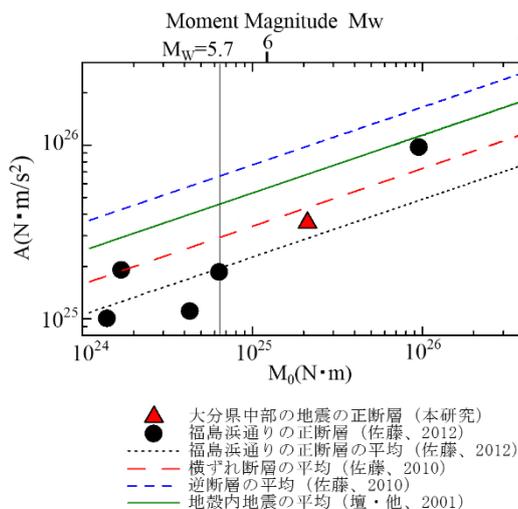


図 8 短周期レベルの比較

## 6. まとめ

本研究では、大分県中部の地震による地震動を、2016 年熊本地震の影響を除去することにより推定した。さらに、経験的グリーン関数法により OITOBS を用いて大分県中部の地震の震源特性を推定することで短周期レベルを算出した。大分県中部の地震の  $M_0$ -A 関係は、佐藤 (2012) が推定した福島浜通りの正断層の地震の  $M_0$ -A 関係に調和的な結果が得られ、壇・他 (2001) の地殻内地震の横ずれ断層と逆断層の平均の  $M_0$ -A 関係の式の 0.53 倍となった。今後、データ数が増えていくと、 $M_w$  5.7 以上の正断層型地殻内地震の  $M_0$ -A 関係を推定できると考えられる。

## 謝辞

本研究で用いらせてもらった観測記録は、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net で観測された記録である。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 気象庁：震度データベース検索、<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>、(2017.08.31 閲覧)
- 2) 宮澤理絵：全波動シミュレーションを用いた 2016 年 Mw7.0 熊本地震による大分県中部の地震の遠地誘発過程、日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会、S21-19、2016
- 3) 地震調査研究推進本部：全国地震動予測地図 付録 3. 震源断層を特定した地震の強震動予測手法、平成 21 年 12 月 21 日改訂、[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/g\\_furoku3.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf)、(2017.08.31 閲覧)
- 4) Irikura, K. and H. Miyake : Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios, Pure Appl. Geophys., Vol.168, pp.85-104, 2011
- 5) 佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケールング則、日本建築学会構造系論文集、第 651 号、pp.923-932、2010
- 6) 壇一男・他：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 545 号、pp.51-62、2001
- 7) 佐藤智美・堤英明：2011 年福島県浜通り付近の正断層の地震の短周期レベルと伝播経路・地盤増幅特性、日本建築学会構造系論文集、第 12 巻、第 7 号、2012
- 8) 防災科学技術研究所：強震観測網 (K-net, KiK-net)、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>、(2017.08.31 閲覧)
- 9) 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網 (F-net)、<http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/top.php>、(2017.08.31 閲覧)
- 10) Irikura *et al.*: Applicability of source scaling relations for crustal earthquakes to estimation of the ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake, Earth, Planets and Space (2017), 69, 2017.01.03
- 11) 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、第 82 巻、第 741 号、pp.1707-1717、2017.11
- 12) 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次朗：経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 ( $M_{JMA}$  6.5) 及び 5 月 13 日 ( $M_{JMA}$  6.3) 鹿児島県北部地震の強震動シミュレーションと震源モデル、地震 2、第 51 巻、pp.431-442、1999
- 13) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 14) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係、地震、第 2 輯、第 43 巻、pp.257-265、1990
- 15) 内出崇彦・他：2016 年熊本・大分地震活動：複雑な断層系と火山地域の影響、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、MIS34-P09、2016
- 16) 藤原広行・他：全国地震動予測地図作成手法の検討、巻末付録、pp.172、2009
- 17) 地震調査研究推進本部：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 26~28 年度成果報告書、[http://www.jishin.go.jp/database/project\\_report/beppu\\_haneyama-h28/](http://www.jishin.go.jp/database/project_report/beppu_haneyama-h28/)、(2017.12.01 閲覧)
- 18) Geller, R.J. : Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes. Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1501-1523, 1976
- 19) Brune, J.N. : Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, Issue 26, pp.4997-5009 1970., (correction, *ibid*, 76, 5002, 1971.)