# 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*<sub>0</sub>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*<sub>j</sub> 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	$\mathcal{O}$	諸	元	

	2016年	大分県中部	大分小地震	
	熊本地震	の地震		
<b>恣</b> 雪哇刻	2016-04-16 <sup>I</sup>	2016-04-16 <sup>I</sup>	2016-04-29 <sup>I</sup>	
无展时刻	01:25:05	01:25:37	15:09:34	
雪山位罟 (°)	32.7530N <sup>II</sup>	33.2747N <sup>I</sup>	33.2578N <sup>Ⅱ</sup>	
辰八匹邑 ( )	130.7620E	131.3532E	131.3680E	
深さ(km)	12.45 <sup>Ⅲ</sup>	11.79 <sup>1</sup>	7.44 <sup>Ⅲ</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 <sub>i</sub>	7.3 <sup>I</sup>	5.7-6.5 <sup>v</sup>	4.5 <sup>I</sup>	
$M_0(Nm)$	$4.42E+19^{V}$	$2.11E+18^{V}$	$7.08E+15^{V}$	

\_\_\_\_\_M<sub>0</sub>(Nm) | 4.42E+19<sup>v</sup> | 2.11E+18<sup>v</sup> | 7.08E+15<sup>v</sup> I JMA ⅡNIED<sup>8)</sup> Ⅲ F-net<sup>9)</sup> Ⅳ宫澤(2016) Ⅴ本研究



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(OITOBS)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 fmax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80km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。ぞ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)。

②N 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



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*Mj*(表 1)を用いて、武村(1990)<sup>14)</sup>に基づき*M*<sub>0</sub>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10km ×10km、小断層の大きさは2.0km×2.0km、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 (Δσ<sub>a</sub>)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 3.57×10<sup>18</sup> Nm/s<sup>2</sup>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*<sub>0</sub>-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*<sub>0</sub>-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*<sub>0</sub>-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<sub>0</sub>-A* 関係は、壇・他(2001) の地殻内地震の平均の *M<sub>0</sub>-A* 関係の式の 0.53 倍、福島 浜通りの正断層の地震の *M<sub>0</sub>-A* 関係の 1.23 倍となる。 佐藤(2012)において、*M<sub>w</sub>*5.7 以上の地震は同じ断層 型の *M<sub>0</sub>-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。



# 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 *Mo-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 *Mo-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<sub>0</sub>-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<sub>w</sub>*5.7 以上の正断層型地殻内地震の *M<sub>0</sub>-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.ht ml、(2017.08.31 閲覧)
- 2)宮澤理稔: 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\_furo ku3.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リング則、日本 建築学会構造系論文集、第651号、pp.923-932、2010
- 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-nat)、
- 8)防災科学技術研究所:強震観測網(K-net、KiK-nat) http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoushin/、 (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、pp1707-1717、2017.11
  12)三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次朗:経験的グリーン関
- 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<sub>JMA</sub> 6.5)及び 5 月 13 日(M<sub>JMA</sub> 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
- 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
- 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、 <u>http://www.jishin.go.jp/database/project\_report/beppu\_hane</u> yama-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.)