### 2016年熊本地震の地殻変動とサイスミシティ

神山 眞1・三神 厚2・小出 英夫3・沢田 康次4・秋田 宏5・千葉 則行6

<sup>1</sup>フェロー会員 東北工業大学名誉教授(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1) E-mail: mkamiyam@tohtech.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東海大学教授 工学部土木工学科(〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1) E-mail: atsushi.mikami@tokai.ac.jp

> 3フェロー会員 東北工業大学教授 工学部都市マネジメント学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

> > E-mail: koide@tohtech.ac.jp

4非会員 東北工業大学名誉教授(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: sawaday@m.tohoku.ac.jp

5正会員 東北工業大学名誉教授(〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: hakita@tohtech.ac.jp

6正会員 東北工業大学教授 工学部都市マネジメント学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: nchiba@tohtech.ac.jp

2016 年熊本地震による被害と地震発生の特徴把握のため GEONET を利用した地殻変動がサイスミシティ(地震発生の時間・空間分布)とともに統合的に考察される。最初に、GEONET により算定された地殻変動、特に変位とひずみの分布特性を利用して震源断層における食い違いメカニズムが逆解析される。この逆解析における震源断層面の推定のため、本震発生後の 24 時間サイスミシティ分布が詳しく解析される。逆解析された食い違いメカニズムによる理論的な地殻変動の変位分布は GEONET による実測変位分布と比較され、逆解析された震源断層における食い違い分布の妥当性が検証される。加えて、逆解析された震源断層破壊による各種ひずみ成分の分布が GEONET による実測ひずみ成分の分布と比較され、サイスミシティ分布とともに震央領域および震源断層変位の極大領域の事前予測の観点から議論される。

Key Words: Kumamoto Earthquake, damage, coseismic crustal deformation, GEONET, seismicity

#### 1. はじめに

2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分 (JST) 頃に熊本市付近で発生した M<sub>J</sub> 6.5 (震源深さ 11km) の地震, および約 2 8 時間後の 4 月 16 日 01 時 25 分 (JST) 頃発生した M<sub>J</sub> 7.3 (震源深さ 12km) の地震は 2016 年熊本地震として一まとめに統一的に呼称され, 比較的規模の大きい連続型の内陸地設内地震の珍しい発生パターンが注目されるとともに, 多くの人的被害と各種構造物の被害がもたらされた <sup>1),2)</sup>

この連続地震は日奈久断層帯,布田川断層帯という既知の活断層が動いたことにより発生したことが示唆されており<sup>3</sup>,活断層と内陸地殻内地震の発生との関係が改めて注目される。日本全国にこの種の活断層が分布しており、かつ規模の大きい内陸地殻内地震は震動による甚

大な被害が予想されるため、今後の日本における防災・ 減災対策の推進の観点から 2016 年熊本地震の各種特性 について詳しく分析する必要があると考えられる.

2016年熊本地震では K-NET, KiK-net, 震度情報ネットワークなどの強震観測網により構造物の被害解析などの各種分析に資する貴重な強震記録が取得されている <sup>4,5,6</sup>0. さらに, この地震では内陸直下型の震源を反映して国土地理院の高密度陸域地殻変動観測システム GEONET により地震発生に起因する震源近傍の地殻変動が明瞭に観測されている <sup>7</sup>. GEONET (GNSS Earth Observation Network)は GNSS (Global Navigation Satellite System)技術を駆使したわが国が世界に誇る地殻変動観測ネットワークであり、その観測データはインターネットを通じて公開されている。上述のように、この種の内陸地殻内地震は今後、日本各地で発生することが懸念されるが、GEONET はこ

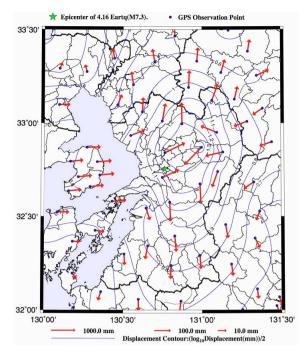
のような内陸地殻内地震の各種解析に強震観測網とともに大きく貢献することが期待される。特に、活断層に関連した内陸地殻内地震は断層変位に密接に関係するので地殻変位の情報を与える GEONET のデータは地震発生の予兆把握(地震予知)並びに各種構造物の地震被害解析に大きく寄与することが期待される。筆者らは既にGEONET データの被害解析に資する事例を 2016 年熊本地震への適用とともに過去の被害地震について報告している 8,9,10,11).

活断層の活動と内陸地殻内地震の発生との関係から言えば地殻変動観測システムのデータとともに重要なのは微小地震の発生環境(地震発生の時間・空間分布),すなわちサイスミシティのデータである.特に,それぞれの特性からサイスミシティと地殻変動は密接に関係していることが推定され,この異なった二種類のデータの統合解析は地震予知とともに地震発生による構造物被害地点の予測にとって有効であることが予想される.

本論文は筆者らが進める GEONET データを用いた地 殻変動解析の総合的な研究 <sup>12)</sup> の一環として 2016 年熊本 地震を対象とした地殻変動とサイスミシティとの統合解析による地震被害の発生領域および本震発生領域の事前 予測可能性について検討したものである.本論文では GEONET データの逆解析から震源断層における断層滑りの食い違い変位が同定され,その結果の妥当性が変位とひずみの観測結果との相関比較から議論される. さらに、本震前のサイスミシティ、本震での震源断層の食い違い分布と地表でのひずみ分布、および本震後のサイスミシティはそれぞれ空間的に相補的関係を有して分布することなどが明らかにされる.

#### 2. 2016 年熊本地震における地殻変動分布

図-1 は GEONET による 2016 年 4 月 15 日と 4 月 16 日 の F3 解の座標差に固定点として MISUMI 観測点 (観測 点番号 953088, 島根県三隅) を採用して 4 月 16 日 01 時 25分 (JST) 頃発生した M<sub>1</sub> 7.3 の本震による地震時地殻 変動の空間分布を水平成分、鉛直成分別に求めたもので ある 8. 図-1 では変位ベクトル分布が見易い工夫として, 各点の変位ベクトル (mm) の常用対数を取り、その値 を整数 2 で除したベクトルの大きさに基準化している (実際の大きさは図のスケールで判定されたい). また、 分布傾向を明瞭にするため基準化された値のコンターが プロットされている. 図-1 では本震の震央もプロット されているが、震央近傍での変位ベクトルの大きさは水 平成分で最大約 1m, 鉛直成分で最大約 27cm の値が算 定されている. 震央近傍での変位ベクトル分布には両成 分とも特徴的様相がみられる. 水平成分では、震央近傍 で明瞭に右横ずれ断層の影響がみられるとともに、変位



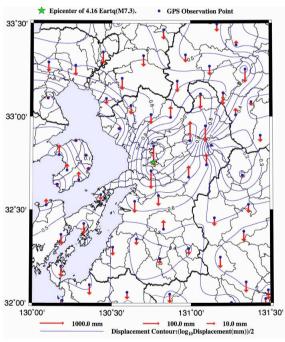
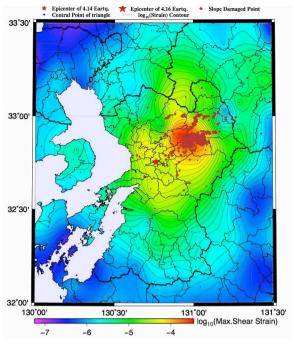


図-1 2016年熊本地震の本震による熊本県域の地震時地設変動(上図:水平成分,下図:鉛直成分)

の大きさは全体に南北方向に長辺を有する楕円状の分布傾向を示している。一方、鉛直成分は震央近傍で隆起、 沈降と複雑な変位分布とともに、変位の大きさの分布は全体に北東-南西方向の線状傾向示している。図-2 は図-1 の地震時地殻変動から FEM 手法を用いて各種の地殻ひずみを求め、2016 年熊本地震の特徴となった甚大な土砂災害の発生地点とともにそれらの分布をプロットしたものである 8. 図-2 では各種ひずみ成分のうち地表面内の工学的最大せん断ひずみと体積ひずみ(dilatation)の結果が示されている。文献 8)では 2016 年熊本地震の



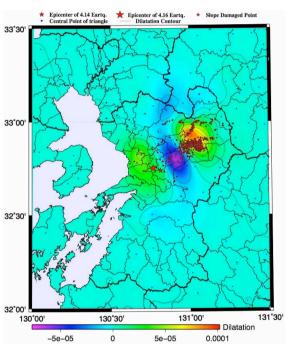


図-2 地殻ひずみと斜面被害の分布の比較 (上図:工学的最大せん断ひずみの場合) (下図:体積ひずみ(dilatation)の場合)

土砂災害は計測震度のような地震動パラメータよりも各種成分の地殻ひずみの分布特性により説明されると結論されている.一方,このような土砂災害に関連する特徴的な地殻ひずみ分布は震源断層における破壊パターンと密接に関係すると推定される.特に,断層面における断層滑りの食い違い分布を反映したものと考えられる.加えて,本震による地震時地殻変動の他に最大前震や本震前の地殻変動も地震発生の先行過程として興味深い.次章以下ではこれらの解析結果について述べる.

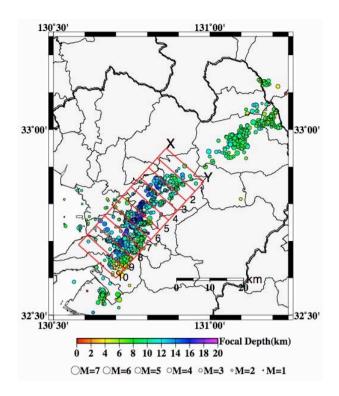


図-3 24 時間余震分布と断面分割のための矩形

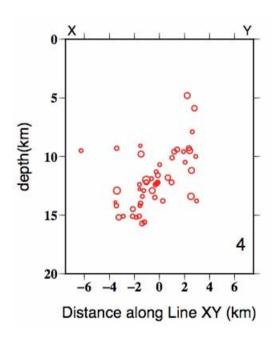


図4 矩形領域4での余震の深さ方向断面分布

#### 3. 本震の震源断層面の推定

震源断層における食い違いパターンを逆解析するためには先ず震源断層の幾何形状を推定する必要がある。ここでは、本震から 24 時間内に発生した余震の分布から震源断層の幾何形状を推定した。

図-3 は 2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分の最大前 震 M<sub>J</sub> 6.5 発生から 4 月 16 日 01 時 25 分の本震 M<sub>J</sub> 7.3 発生の翌日 4

月17日24時00分までに発生した全ての地震の震源を Hi-net カタログ <sup>13)</sup>を用いてプロットしたものである. 図-3 では地震震源に加えて後述の震源断層を推定するのに利 用する領域分割の矩形が赤線でプロットされている. 図 -3 を見ると非常に特徴的に 24 時間余震が分布している ことが理解される.特に、余震群が南西から北東に至る 線状で明確に二つに分離して存在しており、その二つの 余震群の間に空白部分が認められる. 図-3 の空白部分 は図-1 における地殻変位分布での大きな変位が生じた 領域、および図-2 における極大の工学的最大せん断ひ ずみとプラスの体積ひずみ(dilatation)が存在する領域 とおおむね重なる。 さらには、図-2 にプロットされた 土砂災害の発生地点も図-3 の余震分布に明瞭に認めら れる空白領域とほぼ一致している。何れにしても、図-3 からそれぞれ南北に分離して位置的に独立した大小二つ の余震領域が存在しており、震源断層の推定には二つの 異なる考え方が成り立ちそうである. 一つは従来から想 定されている余震分布を震源断層の地震時滑りにおける 「滑り残り」14とする考えであり、この場合は震源断層 の想定は余震分布に沿って大小二つの面で構成されると 仮定される. 他は、第一の考えに正反対の仮定をするも のであり、余震を本震断層の地震時滑りの余波で誘発さ れるものと捉えて14, 余震発生の相対的に少ない空白領 域に本震の震源断層を想定する. いずれの断層面の想定 が妥当かについての比較検討は今後の継続的な課題とし て、本論文では前者の考えに従った解析結果のみを述べ る. 後者の考えによる解析結果は後続論文として報告す る. ここでは、前者の考えに従い、余震分布に素直に沿 って震源断層を二つ仮定する. 大きい方を震源断層 A, 小さい方を震源断層 B と仮称する. 図-3 では本震震央 の近傍で想定される大きい方の震源断層 A の矩形分割 領域が赤線で表示されている. このうち、領域番号4の 矩形領域での深さ方向の地震分布を示したのが図4で ある. 図4 から北西方向落ちの傾斜角 65° 程度の断層面 が想定される. これから震源断層 A として, 後述の図-6 に平面表示されているような長さ:38km,幅:22km,走 向: N216°E, 傾斜角: 65°の形状が仮定された. 一方, 震源断層 B として後述の図に平面表示されているよう な長さ: 22km, 幅: 18km, 走向: N56°E, 傾斜角: 60°の 形状が仮定された.

#### 4. 断層震源の食い違い理論による逆解析

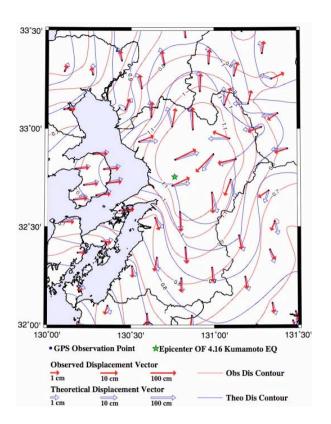
上述の震源断層面の設定に従い、岡田 <sup>15</sup> による半無限体中の震源断層食い違い理論を用いて地殻変動の逆解析を行った。岡田理論は多くのソフトウエアとしてコード化されている。ここではソフトウエア 3d-def <sup>16</sup> を筆者らの使いやすいように修正した上で利用した。岡田理論

では震源断層面における食い違い変位を適宜設定して半無限弾性の媒体中の任意点での変位, ひずみなどの物理量を算定する. ここでは, 上述の震源断層 A を 20×10 の部分要素に分割して, その中心に適宜食い違い変位を与えた. 一方, 震源断層 B は面積が小さいことから 5×5 の部分要素により構成し, 同様に適宜食い違い変位を与えた. なお, 半無限弾性体の弾性係数はヤング率: 7.0 GPa, ポアソン比: 0.25 を仮定した.

以上のような設定による逆解析では GEONET により 観測された変位などの観測値をターゲットとしてそれに 最適な地殻変動の変位を与える理論食い違い変位を震源 断層面で同定する必要がある.これは非線形な最適解探 索過程であり、数値定量的な最適解を得るのに困難が多 い.ここでは震源断層面で総計 100 パターンの食い違い 変位を仮定した試行錯誤法により理論地殻変動の算定を 繰り返して、実測地殻変動に最適と思われる収束結果を 得た.

図-5 は上述の方法で最終的に求められた理論的な地 殻変動の変位を GEONET により実測で得られた観測変 位と比較して、水平成分、鉛直成分別に示したものである. 図-5 から理論地殻変動は実測の変位分布と全体的 にかなり整合していることがわかる. ただし、詳細にみると震源から北東に離れた観測点、特に上述の図-3 の余震分布に明瞭に認められる空白領域の近傍における観測点での変位ベクトルの大きさと方位の差異が目立つようである. このようなことから、実行した震源断層の理論的な逆解析結果の妥当性には議論の余地があると考えられる. 図-6 は議論の余地を残すものの逆解析で同定された震源断層食い違い分布を地表面投影図として示したものである. 大きな断層食い違いは震源断層 A で発生しており、正断層型を含む右横ずれ断層が逆解析されている

図-5は逆解析の最適解探索でターゲットにされた変位 を対象に理論解と実測値とを比較した分布図として示し たものであるが、ターゲットとしない物理量の比較も興 味のあるところである. 特に、上述のようにひずみ量は 土砂災害地点との相関が高いことから理論と実測におけ る比較は興味深い. 図-7 および図-8 は各々工学的最大 せん断ひずみ、体積ひずみ(dilatation)を対象として実測値 と理論値の分布を比較して示したものである. 工学的最 大せん断ひずみ、体積ひずみ(dilatation)とも全体として理 論と実測の分布の特徴が相似しており,整合性が認めら れる. 特に, 工学的最大せん断ひずみの整合性は値の大 きさ、分布特性とも体積ひずみ(dilatation)のそれより整合 性が高い様相がみられる, ただし, 工学的最大せん断ひ ずみについても詳細にみると理論解において本震震源近 傍で実測値よりも著しく大きいようである. 体積ひずみ (dilatation)については膨張、収縮の分布が4象限性状を示



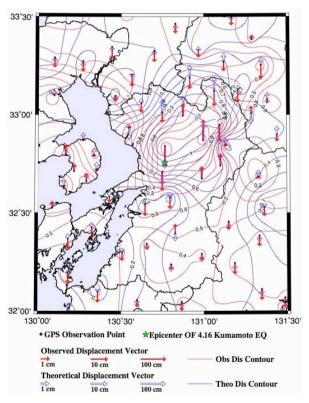
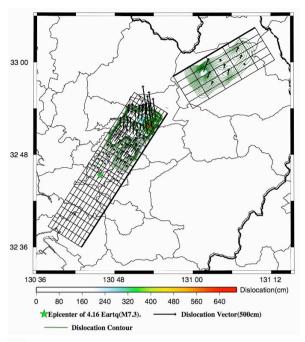


図-5 食い違い理論による理論変位と実測変位の比較

(上図:水平成分) (下図:鉛直成分)

すなど理論, 実測には共通性が認められるものの, 分布の違いは工学的最大せん断ひずみの比較よりも大きい様



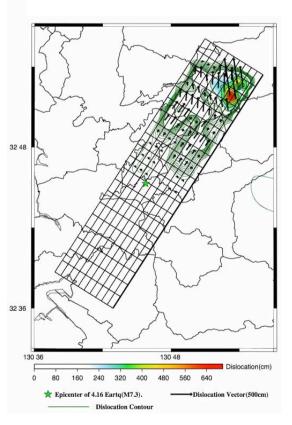


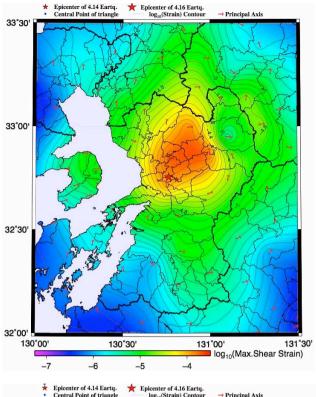
図-6 逆解析された震源断層での変位分布 (上図:二つの断層面における食い違い変位)

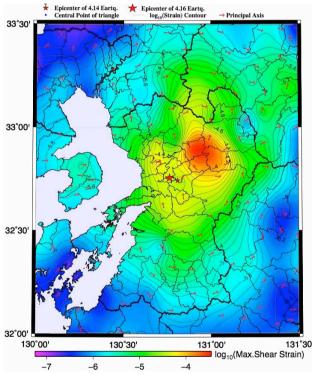
(下図:震源断層 A のみを拡大した分布)

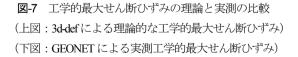
相がみられる.

#### 5. 地殻変動とサイスミシティの分布関係

上述のように、2016 年熊本地震の本震から 24 時間の 期間に発生した 24 時間余震分布と地殻変動のひずみ分

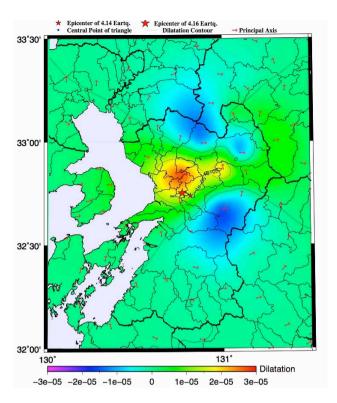






布との比較から、地殻変動とサイスミシティの空間分布 関係には相補的特性が考えられる。前章における地殻変 動の震源断層理論による逆解析結果を受けて、本章では 地殻変動とサイスミシティの分布関係を本格的に検討す る。

最初にサイスミシティの空間分布における時間経過を



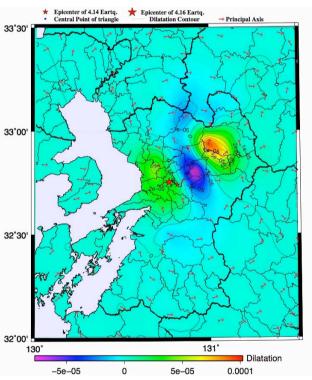


図-8 体積ひずみ(dilatation)の理論と実測の比較 (上図:3d-defによる理論的な体積ひずみ)(下図:GEONETによる実測体積ひずみ)

考える. **図-9** は気象庁の地震カタログ (一元化処理の震源要素) <sup>17</sup> により 2000 年 1 月 1 日から 2016 年熊本地震の最大前震発生時 (4 月 14 日 21 時 26 分) の前の 2016 年 4 月 13 日 24:00 までの約 16 年間における全ての地震を熊本県中心の領域でプロットしたものである. 同図には震源が規模と深さを識別して行政区画(県境界:黒太線,

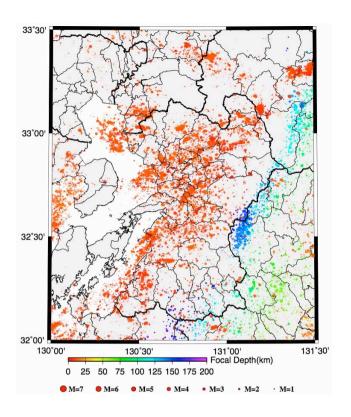


図-9 2000年1月1日から2016年4月13日までの地震分布

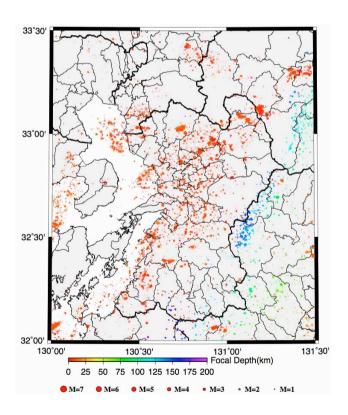
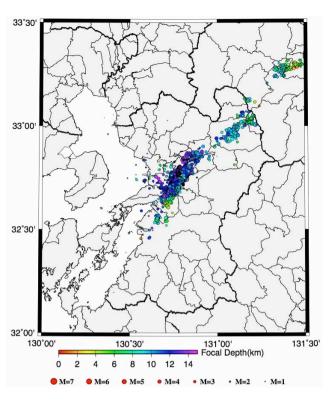


図-10 2011年3月12日から2016年4月13日までの 地震分布

市区町村境界:黒細線)を付してプロットされている. 図9 では一見して概ね南西から北東に伸びた線状に地震の固まりが分布しているようにみえる. 同時に, このよう



**図-11** 2016年4月14日 (最大前震の発生) から2016年4月17日までの地震分布

な線状の固まりには疎ら模様も散見される. 特に, 熊本 市を通る南西-北東の線状に分布する震源深さ 10 km 未 満の地震密度に精粗が見られることは注目される. 一方 では、このような 2000 年 1 月 1 目から 2016 年 4 月 13 日の期間は 2011 年 3 月 11 日に発生した 2011 年東北地 方太平洋沖地震の特別な影響混入が考えられる. そこで, 同地震の翌日 2011 年 3 月 12 日以降で 2016 年 4 月 13 日 24:00 までの約5 年間における全ての地震を同様にプロ ットしたものが図-10 である. 図-10 はおおむね図-9 と 同じ分布傾向と認められる. これらに対して, 2016年 熊本地震の最大前震(4月14日21時26分発生)から本 震発生(4月16日01時25分)を経て4月17日24時00 分) までの全ての地震をプロットしたものが図-11 であ る. この期間に発生した地震は全て 15km 未満の浅い地 震であることから図-11 では震源深さを 15km 未満で識 別している. これを見ると, 先述したように, 最大前震, 本震を含めて 24 時間余震は南西から北東に伸びた線状 分布するとともに、この線状に明白な空白領域が存在す る.

以上に整理した 2016 年熊本地震の最大前震,本震の 以前の期間とそれ以降の期間でのサイスミシティを分布 特性として比較すると,最大前震,本震以降の期間にお ける地震分布は以前の期間における分布密度の精粗のう ち粗領域に一致しているようである.このような大きな 地震発生の以前と以後の各期間におけるサイスミシティ

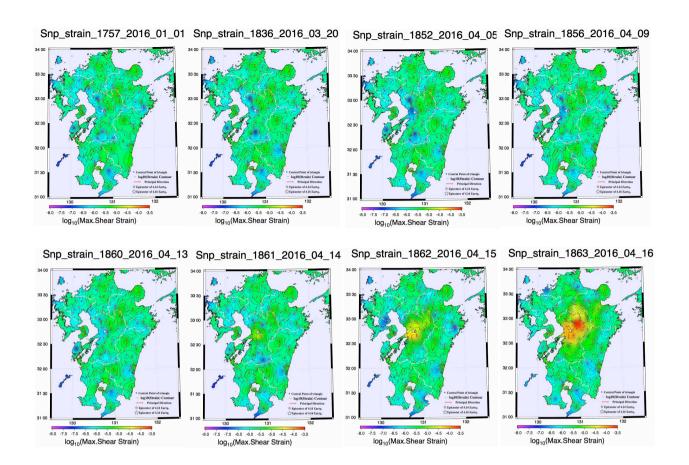


図-12 工学的最大せん断ひずみの分布における日変化(代表的な日にち) (工学的最大せん断ひずみは 2011 年 3 月 12 日を起算日とする累積値. 2016 03 20 などは年 月 日を意味)

空間分布の相補関係は 2011 年東北地方太平洋沖地震のサイスミシティ分析でも認められる <sup>18)</sup>.

次に、上述のようなサイスミシティ空間分布の相補関 係および本震から 24 時間余震分布にみられる空白領域 を物理的に解釈するため地殼変動とサイスミシティの相 関を考察する. ここでは地殻変動のうち サイスミシテ ィとの比較で妥当なパラメータとして地殻ひずみを取り 上げる. 先述のように、筆者らは 2016 年熊本地震を対 象に GEONET で算定された地殻変位から FEM 手法を用い て各種の地殻ひずみ成分の空間分布とその時間変化を求 めている<sup>8</sup>. その際の地殻変位は 2011 年東北地方太平 洋沖地震の影響を考慮して同地震発生の翌日の 2011 年 3月12日を起点として累積変位を求め、さらに、その ような累積変位から各種のひずみ成分を累積ひずみとし て日毎に算定している. 図-12 は代表日における工学的 最大せん断ひずみの分布変化を九州全域で表示したもの である. 日毎に分布が変化して4月14日の最大前震,4 月 16 日の本震によるひずみ分布に至る経過が明瞭であ る. 図-12 には各日の分布図に本震震央もプロットされ ているが、4月14日の最大前震発生以前の期間では本 震の震央近傍で工学的最大せん断ひずみ値は他の領域に 比して相対的に小さく, 最大前震以降に大きく増大して

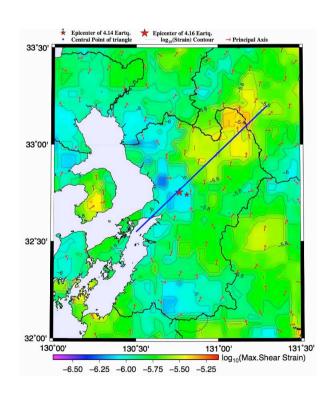


図-13 2016年3月30日における工学的最大せん断ひ ずみの分布と断面値を検討する直線

いることが明確に認められる. 図-13 は最大前震の以前 の代表として 2016 年 3 月 30 日の工学的最大せん断ひず みの分布を熊本県域に拡大して表示したものである. 同 図には後述するサイスミシティ密度と断面比較するため の直線が青色で示されている. 図-13 を最大前震発生前 の期間における地震分布をプロットした図-9 および図-10 と比較すると地震発生数が多い領域で工学的最大せ ん断ひずみが大きく, 逆に発生数の小さい領域で小さな 工学的最大せん断ひずみを示す傾向がみられて、一定の 相関が存在するようである. このことを詳しく分析する ために、図-10 の地震分布のうち震源深さ 10km 以下の地 震を対象に東経、北緯方向をそれぞれで 0.03 度区間の 小領域に分割して、これらの区間領域での地震発生密度 (サイスミシティ密度) を算定した. ここに、地震発生 密度は気象庁地震マグニチュードを宇津の式 <sup>19</sup>によりモ ーメントマグニチュードに変換して、それらを各区間領 域で総和して、その常用対数により表現した。なお、震 源深さ 10km 以下とした理由は図-13 のような地表面にお ける工学的最大せん断ひずみとの比較を念頭に置いたこ とによる. 図-14 はそのように算定された 2011 年 3 月 12 日から日から 2016 年 4 月 13 日までの期間の地震発生 密度を分布図として示したものである. 図-14 には図-13 と同じ断面比較するための直線が青色でプロットされて いる. 図-14 から地震発生密度の大きな領域は南西から 北東に向かってほぼ線状に分布する傾向がみられると同 時にこの線状に密度の精粗が散見される.

以上に求められた図-13 および図-14 のそれぞれの地 殻変動ひずみと地震発生密度の分布の相関を直接的に比 較するために各図にプロットされた同じ青色の直線に沿 った断面値として示したのが図-15 である. 図-15 で地 殻変動ひずみと地震発生密度の両者にほぼ同じ増減傾向 の相似相関が認められる. このような最大前震および本 震の発生前期間における地殻変動ひずみ(工学的最大せ ん断ひずみ) と地震発生密度の分布に対して本震発生時 の地殻変動ひずみ(工学的最大せん断ひずみ)を比較す るため先に示した図-7の下図を改めて見てみる.図-7 の下図の本震時地殻変動ひずみの極大部分は図-15 にお ける地殻変動ひずみと地震発生密度の大きさがともに極 小部分となる横軸 Distance(km)の 60~80 km に対応する. さらに、本震の震央や最大前震の震央が存在する位置は 図-15 の Distance(km)20~30 km の極小部分に対応する. ここで言う本震震央は一定の広さ有する震源断層の破壊 が始まった位置であり、本震時地殻変動ひずみの極大部 分は不均一な震源断層破壊が最も顕著に発生した位置に 相当すると考えられることから、ここでの対応関係は地 震発生のメカニズムおよび地震発生地点の予測を解釈す る上で極めて示唆的である. 何れにしても、将来の地震 発生地点の予測という観点から考えれば、地殻変動ひず

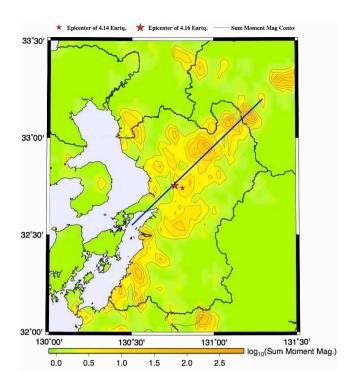


図-14 2011 年 3 月 12 日から 2016 年 3 月 30 日までに発生した地震のモーメント M の密度分布と断面値を検討する直線)

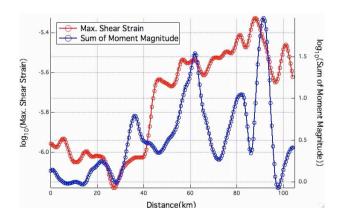


図-15 工学的最大せん断ひずみと地震モーメント M の密度の分布における断面値の比較

みとサイスミシティの統合解析は今後ともさらに深く検 討する必要があろう.

#### 6. むすび

本論文では 2016 年熊本地震における地震時地殻変動を各種ひずみ成分量として求めるとともに,並行してサイスミシティ解析を行い,これらを統合して地震被害の発生領域および本震発生領域の事前予測可能性について検討した.最初に地震時地殻変動の特徴が地殻変位と地殻ひずみの両分布から明らかにされ,続いて,本震において大きな断層滑りが発生したと考えられる領域が

GEONET データの逆解析から理論的に求められた. その逆解析結果の妥当性は変位とひずみの理論解と観測値との相関比較から議論された. さらに, 本震前のサイスミシティと地殻ひずみ, 本震での震源断層の食い違い分布と地表でのひずみ分布, および本震後のサイスミシティと地殻ひずみがそれぞれ空間的分布として検討された. それらの結論をまとめると以下のようである.

- 1) GEONET で観測された 2016 年熊本地震による地震時地殻変動は水平成分で約 1m, 鉛直成分で約 26cm の最大変位が震央付近で生じた. それらの分布は水平, 鉛直量成分とも震源メカニズムを反映したと考えられる特徴的な分布を示す. また, FEM 手法を利用して地殻変動の空間微分による各種ひずみ成分が算定された. 本論文では工学的最大せん断ひずみと体積ひずみの分布を中心に整理された.
- 2)各種ひずみの空間分布は極めて特徴的な様相を示す.特に,大きな工学的な本震時最大せん断ひずみとプラスの体積ひずみ(dilatation)が存在する領域は土砂災害が多く発生した領域とおおむね重なる.さらには,サイスミシティのうち最大前震および本震発生以降の24時間の期間に発生した地震分布に明瞭な空白領域が存在して,この空白領域は大きな工学的最大せん断ひずみの存在領域,プラスの体積ひずみ(dilatation)が存在する領域,および土砂災害が多く発生した領域とほぼ一致する.
- 3) GEONET で観測された本震時地殻変動をターゲットとして地震断層食い違い理論により震源断層での食い違い変位が理論的に逆解析された. その際, 震源断層面の想定に余震分布の解釈から二つの正反対の考えがあり得ることが言及され, そのうちの余震分布を包含する大小二つの震源断層モデルを仮定した逆解析結果が示された. その結果による理論的な地殻変位, 地殻ひずみはそこそこに観測値を説明できることが示されるとともに, 不十分な点も合わせて指摘された.
- 4) 気象庁の地震カタログ (一元化処理の震源要素)を利用して、2000年1月1日から2016年4月17日の期間を対象に、2016年能本地震の最大前震、本震を中心にそれ以前と以降の各期間におけるサイスミシティの空間分布の特性が比較考察された。この結果、最大前震、本震に対してそれ以前と以降の各期間におけるサイスミシティは相補的な位置関係を有しており、本震前および本震時の地殻ひずみ分布とも関係が深い。特に、本震震央、本震において大きな地殻ひずみをもたらして震源断層の最大滑りを与えたと考えられる領域は本震前の地殻ひずみ分布の極小部分に対応するなど、本震震央、本震最大滑りの位置などの事前予測に本震前のサイスミシティと地殻ひずみの両分布が利用できる可能性が示唆された。

謝辞:本論文では気象庁,国土地理院,防災科学技術研

究所の提供するデータを利用した. 特に, 国土地理院 GEONET データに多くを依存した. 貴重なデータを提供されている関係各位に心からの謝意を表する. なお, 本研究は平成 29 年度日本学術振興会科学研究費助成 (課題番号 15K06190) のもとに行われたものであることを付記して謝辞とする.

#### 参考文献

- 1) 気象庁:平成28年(2016年)熊本地震の関連情報, http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28\_kumamoto\_jishin\_m enu.html (2017年2月1日最終閲覧)
- 地震調査研究推進本部:平成28年(2016年)熊本地震の評価,平成28年5月13日発表資料,pp. 1-23, 2016
- 3) 気象庁:平成28年(2016年)熊本地震について(第8報),平成28年4月16日報道発表資料,pp.1-14,2016.
- 4) 防災科学技術研究所:強震観測網ホームページ, http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/ (2016年11月1 日閲覧)
- 5) 気象庁:強震波形(熊本県熊本地方の地震), http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/16 04160125\_kumamoto/index.html (2016年11月1日閲 覧)
- 6) 気象庁:地方公共団体震度計の波形データ, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/16 04160125\_kumamoto/index2.html (2016年11月1日閲覧)
- 7) 国土地理院測地観測センター:電子基準点 1,200 点の 全国整備について、国土地理院時報、No. 103, pp. 1-52,2004.
- 8) 神山 眞, 三神 厚, 小出英夫, 沢田康次, 秋田宏, 千葉則行: GEONET の地殻変動データを利用した 2016 年熊本地震の被害解析, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4, 2017.
- 9) 神山 眞,小出英夫,沢田康次,秋田 宏,千葉則行:GPS 観測による地震時地盤ひずみと地震被害との関係,日本地震工学会論文集,第15巻,第7号,pp. 428-443, 2015.
- 10) 神山 眞, 杉戸真太, 久世益充: GPS データによる 変位・ひずみ時刻歴の算定, 日本地震工学会第 10 回 年次大会概要集, pp. 171-172, 2013.
- 11) Makoto KAMIYAMA, Hideo KOIDE, Yasuji SAWADA, Hiroshi AKITA and Noriyuki CHIBA: MONITORING OF CRUSTAL DEFORMATION AND ITS APPLICATION TO MITIGATION OF EARTHQUAKE DISASTERS, Journal of JSCE (Japan Society of Civil Engineers), Division A: Structural Engineering/Earthquake Engineering & Applied Mechanics, pp.1-20, 2017.
- 12) Kamiyama, M., Sugito, M., Kuse, M., Schekotov, A. and Hayakawa, M.: On the Precursors to the 2011 Tohoku Earthquake: Crustal Movements and Electromagnetic Signatures, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, DOI: 10.1080/19475705, pp. 1-23, 2014.
- 13) 防災科学技術研究所: Hi-net ホームページ, http://www.hinet.bosai.go.jp (2016年11月1日閲覧)
- 14) 地震の事典(第2版): 5.2 余震, pp.166-174, 2001.

- 15) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, pp. 1018-1040, 1992.
- 16) Gomberg, J. and Ellis, M.: Topography and tectonics of the central New Madrid seismic zone: Results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program, Journal Geophysical Research, Vol. 99, No. 20, pp. 299-310.1994.
- 17) 気象庁ホームページ: 一元化処理震源要素の情報, http://www.jma.go.jp/jma (2016年10月1日閲覧)
- 18) 神山 眞,小出英夫,沢田康次,秋田 宏,千葉則行:サイスミシティと GNSS データの時空間変動からみた 3.11 地震の先行過程:平成28年度土木学会全国大会(東北大学,仙台市),第71回年次学術講演集,pp.1-2,2016.
- 19) 宇津徳治:各種マグニチュード間の関係, 震研彙報. 57, pp.465-497, 1982.

(2017.9.1 受付)

# COOPERATIVE ANALYSES OF CRUSTAL DEFORMATIONS AND SEISMICITY FOR THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE WITH EMPHASIS ON PREDICTION

## Makoto KAMIYAMA, Atsushi MIKAMI, Hideo KOIDE, Yasuji SAWADA, Hiroshi AKITA and Noriyuki CHIBA

The coseismic crustal deformations due to the 2016 Kumamoto Earthquake are numerically obtained using GEONET data. In addition, we also analyze the seismicity in the region related with the earthquake. Both parameters of the coseismic strains of ground and seismicity are used cooperatively to estimate focal mechanism based on the dislocation theory of seismic source and to predict the main breaking part of the fault plane.