

# 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

神山 眞<sup>1</sup>・三神 厚<sup>2</sup>・小出英夫<sup>3</sup>・沢田康次<sup>4</sup>・秋田 宏<sup>5</sup>・千葉則行<sup>6</sup>

<sup>1</sup>フェロー 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

<sup>3</sup>フェロー 東北工業大学教授 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

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>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

<sup>6</sup>正会員 東北工業大学教授 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 年熊本地震は  $M_j6.5$ 、 $M_j7.3$  という内陸地殻内地震としては比較的大きな規模をもって連続的に発生したことにより各種構造物に甚大な被害を与えた。本稿は国土地理院の展開する Continuous GNSS システムである GEONET データによる地震時地殻変動と各種構造物被害との関係を考察したものである。本稿では土木構造物、自然斜面を含む土構造物などの平面的な広がりを持つ構造物の被害は加速度を中心とした慣性力の効果もさることながら変位の空間微分である各種ひずみ量がより強い影響を及ぼすとの観点から強震観測網データによる計測震度分布と GEONET データによるひずみ量分布の違いと相似が考察される。また、これらの量の比較を基に各種構造物の被害分布と地震時地殻ひずみとの関係が解析される。

**Key Words:** Kumamoto Earthquake, damage, acceleration, coseismic crustal deformation, GEONET

## 1. はじめに

2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分 JST 頃に熊本市付近を震源とする気象庁マグニチュード  $M_j6.5$  (震源深さ 11km) の内陸地殻内地震が発生した。さらに、その約 28 時間後の 4 月 16 日 01 時 25 分 JST 頃に  $M_j7.3$  (震源深さ 12km) という内陸地殻内地震としては最大級規模の地震が連続して発生した。この地震は気象庁により平成 28 年 (2016 年) 熊本地震と命名された<sup>1)</sup>。この一連の地震により震源付近の益城町で最大震度階 7 が連続して観測されるとともに、地震動の大きさを反映して 50 名の人的被害がもたらされ、各種構造物に甚大な被害が発生した。

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>2)</sup>、気象庁により南北方向に張力軸を持つ、右横ずれ断層型のメカニズムで、北東-南西方向に伸びる震源断層が推定されている<sup>3)</sup>。この一連の地震で 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震源近傍において最大加速度が 1,000 ガルを越える強震記録が取得されている<sup>4)</sup>。さらに、この地震は震源が内陸直下であることから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。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<sup>5)</sup>。この連続地震のような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

直下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。その一方、重要性を秘めているにも関わらず GEONET のデータは地震工学の分野では K-NET, KiK-net などの強震データに比較して利用が少ない現状である。これは、既往の耐震設計、地震被害分析などにおいて加速度による慣性力が重要な位置を占めてきたことの反映と考えられるが、構造物被害がどのような地震外力でもたらされるかは古くて新しい課題である。質点系で被害を支配するパラメータとして加速度などのベクトル量が重要視されるのに対して、連続系構造物に対する被害分析からひずみなどのテンソル量を重要とする立場もあり得る。このような観点から、地震時永久変位によるひずみ量を与える GEONET データは各種構造物の被害解析で重要な情報を提供することが期待される。

本稿は筆者らが進める GEONET データを用いた地殻変動解析の総合的な研究<sup>6)</sup>の一環として地震時地殻変動による地盤のひずみの大きさと構造物被害との関係を2016年熊本地震に絞って考察したものである。これまで、甚大な被害を与えた代表的な二つの地震(2008年岩手・宮城内陸地震, 2011年東北地方太平洋沖地震)を対象に GEONET により得られた測位データから算定したひずみ特性と構造物被害について考察した<sup>7)</sup>。2016年熊本地震でも各種構造物の被害が多くの研究チームにより場所を特定して調査されていることから、本稿ではこれらの各種被害調査結果を参考に被害分布と地震時地盤ひずみ分布との相関を追加的に考察する。

## 2. 熊本地震における地震動分布と地殻変動分布

図-1は4月14日21時26分の最大前震 M<sub>6.5</sub> 発生から4月16日01時25分の本震 M<sub>7.3</sub> 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>8)</sup>を用いてプロットしたものである。最大前震, 本震を含めて余震群は北東-南西方向の向きで線状に伸びていることがわかる。この分布は気象庁解析による震源断層の形状を反映したものと考えられる。一方、図-2は K-NET, KiK-net, 震度情報ネットワークによる4月16日の本震の強震加速度記録から算定した計測震度の分布をプロットしたものである。図-2では4.14最大前震, 4.16本震の震央とともに計測震度の大きさがコンターを有するカラーイメージで表示されている。計測震度は全体に図-1の地震分布を反映して北東-南西方向の向きに伸びた分布を示しているが、その他にローカルサイト効果を反映した結果と思われる局所的な極大の地域もみられる。また、最大震度階7の領域は最大前震, 本震の北東側に本震震源からかなり離れて存在する様相がみえ、この地震の断層破壊が震源から北東方向に向かって進行したことを推定させる。

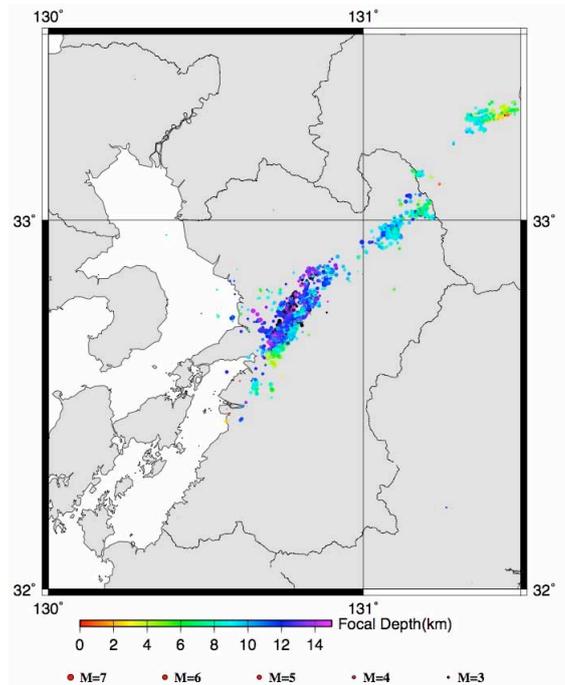


図-1 2016年熊本地震の最大前震, 本震, 余震の分布

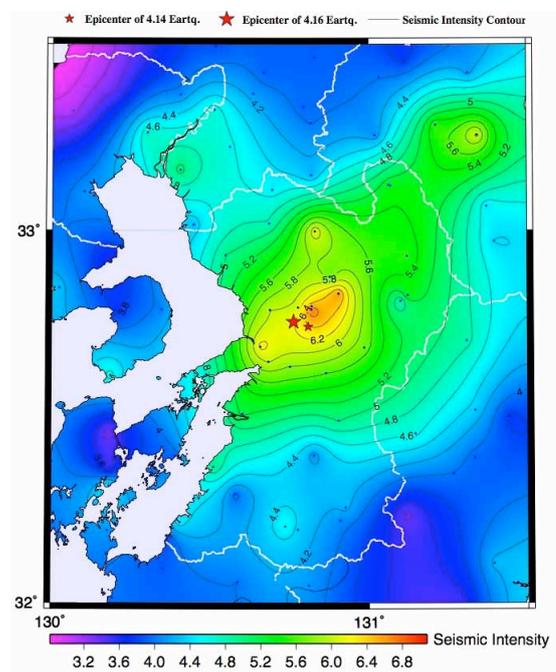


図-2 2016年熊本地震の計測震度分布

一方、GEONET による地震時地殻変動は以下のように国土院提供の F3 解<sup>9)</sup>を利用して算定された。4.16本震は4月16日01:25 (JST) に発生している。これに対して F3 解は 21:00 (JST) の時刻をもって各日の座標が算定される。したがって、4月16日と4月15日の F3 解は本震発生を24時間中央時に近い時刻に挟むことから、その座標差は本震発生による地震時地殻変動を比較的正確に与えるものと考えられる。そこで、本研究では4月16日と4月15日の F3 解の座標差に固定点

として観測点 950388（島根県三隅）を採用して本震による地震時地殻変動を求めた。図-3 はそのようにして求めた地震時地殻変動を水平成分，鉛直成分別に示したものである。図-3 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，その値を定数2で除した大きさに基準化して表示している。実際の大きさは図のスケールで判定できる。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。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。両成分ともこの地震の震源メカニズムを反映した特徴的な分布を示している。水平成分では，概ね南北方向に伸張，東西方向に短縮の変位分布で，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。これに対して，鉛直成分は震央近傍で隆起，沈降と複雑な変位分布を示すとともに，変位の大きさの分布は全体に北東-南西方向の線状傾向を有し，上述の震源断層の形状分布と整合している。ここに，鉛直成分の変位分布から震源断層の破壊には鉛直成分が含まれており，右横ずれ型に加えて縦ずれ成分も存在したことが推定される。既往の被害地震の地震時地殻変動の分布<sup>7)</sup>と同様に水平成分において震源断層におけるすべり量の大きさと向きなどの力学的特性の反映，鉛直成分において震源断層の形状などの幾何学的特性の反映という特徴が熊本地震でもみられる。なお，上述の地震時地殻変動の結果から震源メカニズムの詳しい逆解析が可能であるが，ここでは主題と離れるので割愛する。

### 3. 地震時地殻ひずみの算定

前章で述べた計測震度，地震時地殻変動は構造物被害に大きく関与すると考えられるが，両者の分布特性には違いがみられることから影響の質は異なると予想される。特に地震時地殻変動は水平，鉛直両成分で分布傾向の差異が見られることから両成分を合体させた特性値が望まれる。また，ベクトル量としての地震時地殻変動の空間変化は物理的な量としては最終的にひずみに集約されるので，地震時地殻変動に基づく地震時ひずみ量の算定が望ましい。地盤ひずみの重要性についての指摘は地下構造物を対象に古くからなされており（たとえば，高田<sup>10)</sup>），1995年阪神・淡路大震災後の動きの中で「土木構造物の耐震基準等に関する提言」<sup>11)</sup>として，地盤ひずみが耐震基準で見直すべき項目として加えられた経緯もある。このようなことを考慮して，ここでは図-3の地震時地殻変動をから地震時ひずみを算定する。

ここでのひずみ算定は地震前後の変位の差分からなされるものでいわば静的なひずみに属するものである。こ

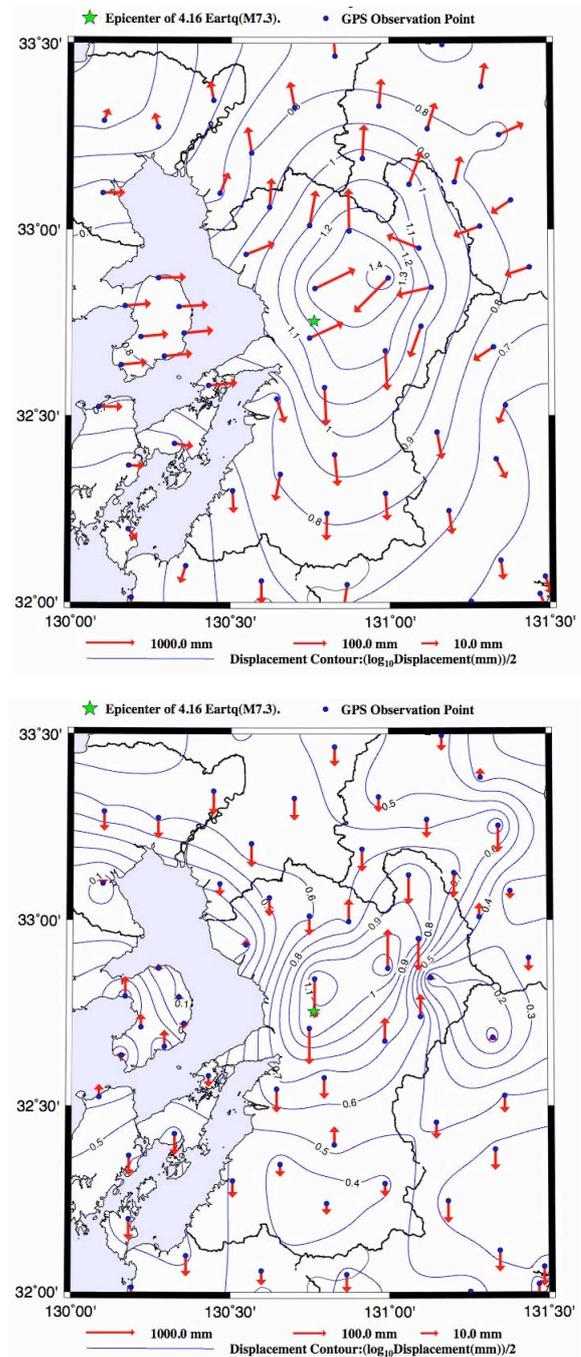


図-3 2016年熊本地震の本震による地震時地殻変動（上図：水平成分，下図：鉛直成分）

れに対して，地震時の動的な変位の時刻歴から算定される動的なひずみがあり，実際には動的ひずみが構造物被害に関与すると考えられるが，動的ひずみと静的ひずみの大きさには比例関係が存在する<sup>7)</sup>。また，ここでのひずみ算定は図-3のような大きさの間隔の離散点での変位の空間微分によりひずみを算定するものであるが，これに対して実際の構造物被害はもっと細かな局所的な変位の空間微分によるひずみによって決せられると考えられる。ただし，この場合においても局所的な最大ひずみ値の大きさは局所的な範囲を上回る大きさの領域での

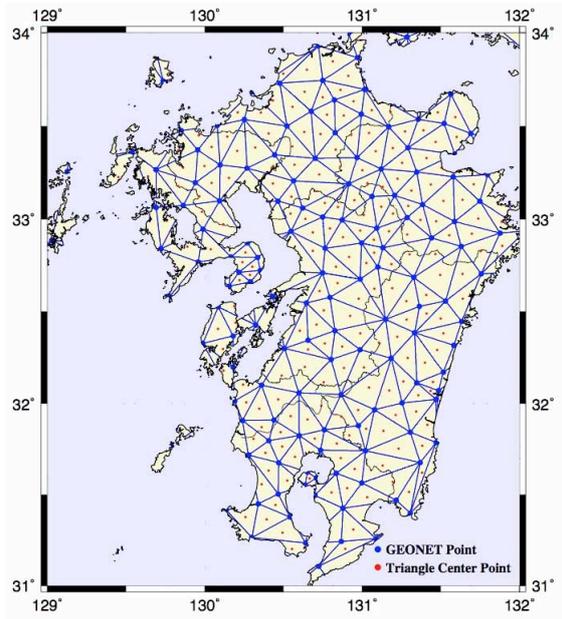


図4 GEONET観測点を対象としたデローニー三角分割

平均的な最大ひずみと比例的な関係を有する<sup>7)</sup>。以上から、図-3のような観測点間隔からの空間微分によるひずみ算定は被害分析に一定の合理性を与えるものと考えられる。

本研究では図-3のように地表離散点で東西(EW)、南北(NS)、鉛直(UD)の3方向で与えられる変位成分に対して一般化平面ひずみ条件により空間微分を施すことで各種ひずみ成分を求める。ここでは、有限要素法FEMによく使われる三角形要素を用いた手法<sup>12)</sup>でひずみを算定した。三角形要素による有限要素法を適用するためには最初に図-3のようにランダムに分布するGEONET観測点を対象に三角網を構成する必要がある。本研究ではデローニ三角分割(Delaunay Triangulation)のアルゴリズム<sup>13)</sup>を用いて三角形網を作成した。

このようなアルゴリズムを用いて作成された九州地域における三角形網を図-4に示す。図-4における三角形網の各三角形頂点である地表離散点で東西(EW)、南北(NS)、鉛直(UD)の3方向変位が与えられるひずみ算定であることから、水平面内で求められるひずみ成分は東西方向の直ひずみ $\epsilon_{EW}$ 、南北方向の直ひずみ $\epsilon_{NS}$ およびせん断ひずみ $\gamma_{NE}$ である。本研究では、これら3成分ひずみから水平面内の最大主ひずみ $\epsilon_{max}$ 、最小主ひずみ $\epsilon_{min}$ 、最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ 、体積ひずみ $\epsilon_{volume}$ および主ひずみ軸方向を求めた。なお、ここでの三角形要素による有限要素法では三角形頂点で付与される変位の三角形内部での空間的線形変動が仮定され、求められる各種ひずみ成分は三角形内部で一定の性質を有する。本研究では、このように三角形内部で一定のひずみ値を三角形重心位置での値として代表させて空間的な分布特

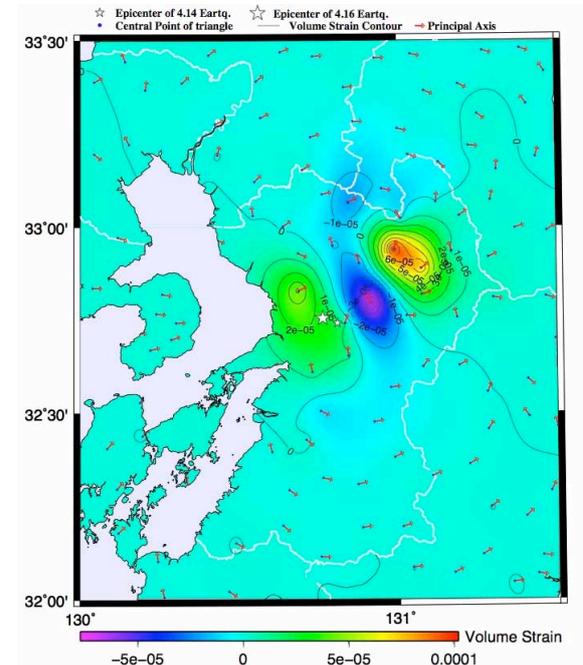
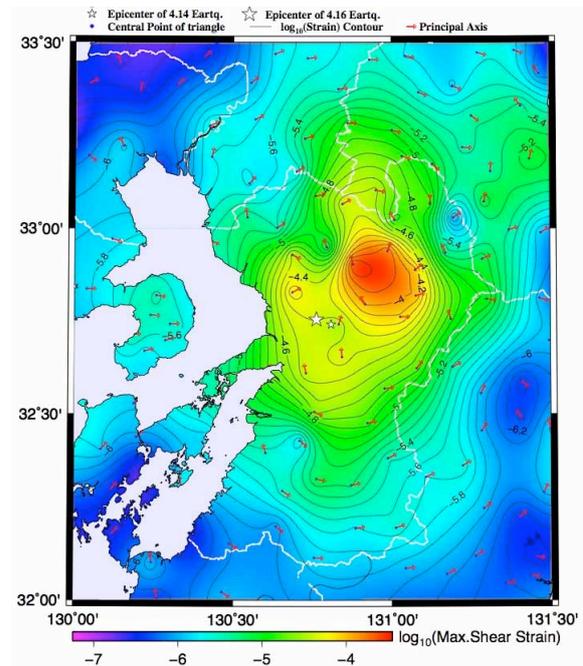


図-5 地震時地殻変動によるひずみ分布  
(上図：最大せん断ひずみ，下図：体積ひずみ)

性を解析する。上述のように、本研究での三角形網は一辺の長さが20数kmを有する三角形から構成されるので算定されるひずみ量もこのスケール長での平均的な値を意味することになり、例えば熊本地方全体のような広域的な地域での分布特性の解析に向いたものであり、数mから数十m程度の局所的領域でのひずみ分布解析は対象外であることに注意されたい。

各種成分のひずみのうち代表的なものとして最大せん断ひずみと体積ひずみの算定結果を分布図として図-5

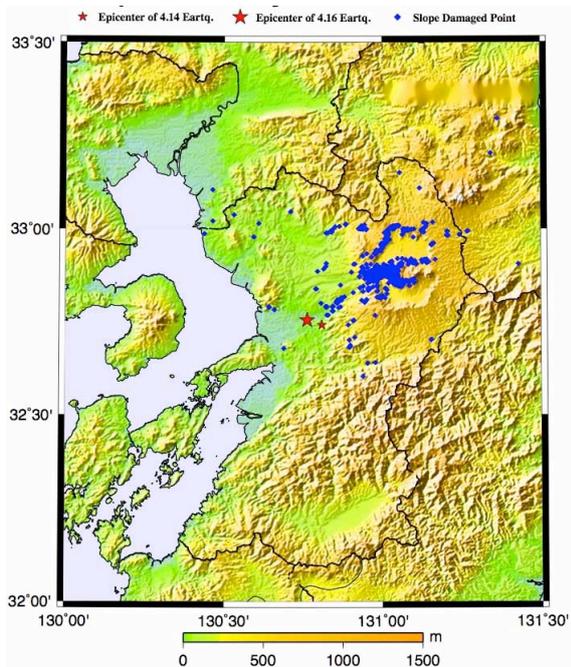


図-6 斜面被害地点の分布

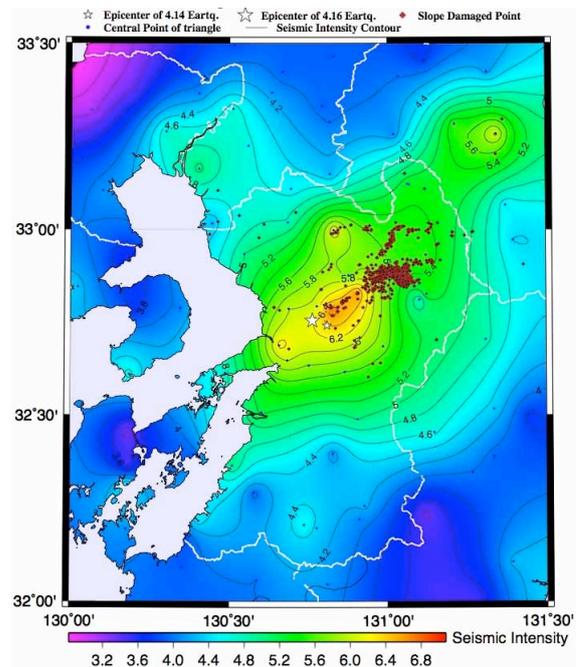


図-7 斜面被害地点の分布と計測震度分布

に示す。図-5 の最大せん断ひずみの分布は常用対数の値がコンターを付したカラーイメージとしてプロットされている。同図では主ひずみ軸の方向も示されている。同図の分布から最大せん断ひずみは図-3 の水平、鉛直両成分の変位分布をミックスしたような分布特性を有することがわかる。極大領域が本震震央からかなり離れて北東方向に存在する。一方、図-5 の体積ひずみは膨張と収縮領域が極めて規則的に分布しており、震源メカニズムを反映したものとなっている。ただし、体積ひずみの分布においても最大せん断ひずみ分布と同様に本震震央から離れた北東方向に極大が存在する。

#### 4. 計測震度、ひずみ分布の被害分布との比較

2016 年熊本地震では多くの機関、研究グループにより各種構造物の被害調査が行われており、部分的公表がなされているものの、全体の調査結果の取りまとめは現在進行中である。構造物別の考察は今後も継続することとして、ここでは、第 1 の対象として自然斜面の崩壊を例に被害分布と計測震度、ひずみの両分布との比較を考察する。その理由は、熊本地震において土砂災害が家屋倒壊とともにクローズアップされたことによる。

国土地理院は熊本地震直後、災害救助支援の一環として甚大な土砂災害の地点を特定すべく空中写真調査を実施して斜面被害地点の情報を提供している<sup>14)</sup>。これらの地点は熊本県の現地調査で確認されており、数値位置の情報提供、調査結果の精度と網羅性などの観点から総合的に貴重な被害分布の解析資料と考えられる。図-6

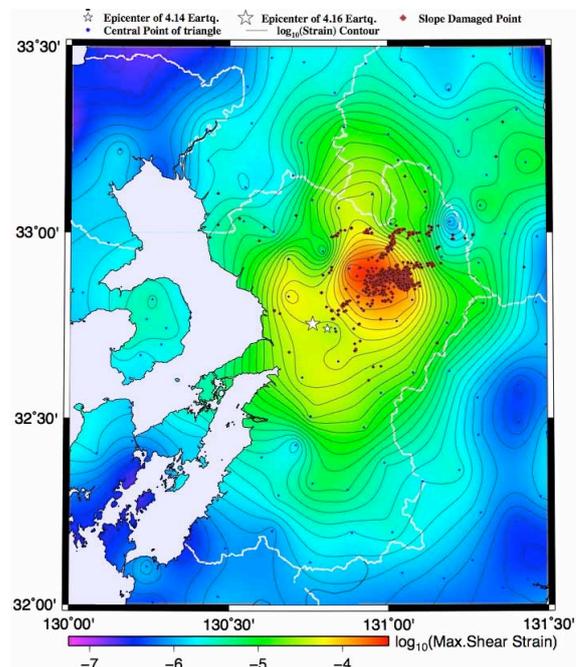


図-8 斜面被害地点の分布と最大せん断ひずみ分布

は同調査を引用して斜面被害と判定された地点を地形分布とともに示したものである。ここでの斜面被害の被害程度は区別することなく、何らかの被害が認定された被害地点を平等にプロットしている。被害箇所は全部で 1044 箇所を数える。図-6 から、斜面被害は震央からやや離れた北東方向に多く分布していること、阿蘇山のカルデラ地形など地形分布と相関をもって存在しているこ

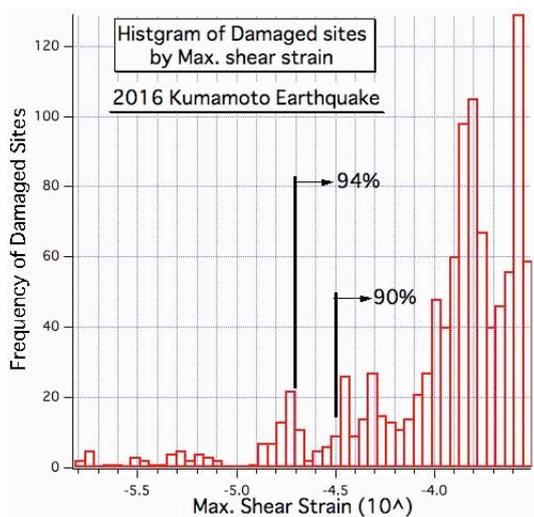


図-9 斜面被害地点の最大せん断ひずみによるヒストグラム

と、などが観察される。

図-7、図-8 はこれらの斜面被害箇所をそれぞれ計測震度分布、最大せん断ひずみ分布と重ねてプロットしたものである。斜面被害という性質から予想されることであるが、全体に計測震度の分布よりも最大せん断ひずみの分布の方が被害分布と整合している。このことは、そもそも計測震度と最大せん断ひずみに代表される地震時地殻変動は物理的に発生メカニズムが異なっており、その違いが整合性の結果に表れていると考えられる。すなわち、各種構造物の被害解析も誘因としての入力時震動の特性を十分に考慮してなされるべきことを示しているものといえよう。このような斜面被害を含む土木構造物の被害が計測震度よりも地震時地殻変動によるひずみ量に強い相関を有することは 2008 年岩手・宮城内陸地震の調査でも示されている<sup>7)</sup>。図-7、図-8 の結果は改めて地震時地殻変動によるひずみ解析が被害調査に有用な資料であることを示すものと考えられる。

図-9 は図-8 の分布を基に斜面被害箇所の最大せん断ひずみによるヒストグラムを求めたものである。総じて、被害数は最大せん断ひずみの大きさに比例すること、最大せん断ひずみ  $10^{-4.7}$  (0.00002) ~  $10^{-4.5}$  (0.00003) の大きさは自然斜面被害を含めた土木構造物被害を決する一種のしきい値を与えるとの既往の調査結果<sup>7)</sup>とおおむね一致している。

## 5. むすび

本稿では 2016 年熊本地震における地震時地殻変動を算定するとともに、その結果に基づき、各種ひずみ量を FEM の手法で求め、その空間分布を計測震度のそれと比較しながら、構造物被害との相関を考察した。種々の

構造物の被害分布との関係は今後継続するとして、本稿では斜面被害に絞って空間分布特性を論じた。それらの結論をまとめると以下のようである。

1) 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。

2) 地震時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。本稿では最大せん断ひずみと体積ひずみの分布が整理されたが、それらの極大は震央からかなり離れた北東方向に存在する。

3) K-NET, KiK-net, 震度情報ネットワークによる強震記録から計測震度が算定され、その分布が地震時地殻変動およびひずみの分布と比較された。両者の分布にはかなりの違いがみられる。

4) 空中写真調査による斜面被害の地点分布が地形、計測震度、最大せん断ひずみなどの分布と比較された。斜面被害は震央からかなり離れた北東方向に多く集中して分布すること、地形との相関が強いこと、計測震度の分布との相関は少ないこと、最大せん断ひずみの極大分布領域と斜面被害の集中領域はおおむね重なること、などが指摘される。

5) 斜面被害箇所の最大せん断ひずみによるヒストグラム解析結果から最大せん断ひずみ  $10^{-4.7}$  (0.00002) ~  $10^{-4.5}$  (0.00003) の大きさは自然斜面被害を含めた土木構造物被害を決する一種のしきい値を与えるとの既往の調査とおおむね一致する結果が得られた。

**謝辞：**本稿では気象庁、国土地理院、防災科研の提供するデータを利用した。特に、骨子をなすデータとして国土地理院 GEONET データに多くを依存した。関係各位に心からの謝意を表す。なお、本研究は平成 27 年度 JSPS 科研費 (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\\_menu.html](http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html), 2016.
- 2) 地震調査本部：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) 防災科学研究所：強震観測網ホームページ, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- 5) 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.
- 6) Makoto Kamiyama, Masata Sugito, Masumitsu Kuse, AI-

- exander Schekotov and Masashi Hayakawa: 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.
- 7) 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 卷, 第 7 号, pp.428-443, 2015.
  - 8) 防災科学研究所.: Hi-net ホームページ, <http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>.
  - 9) 国土地理院ホームページ : <http://www.gsi.go.jp/>.
  - 10) 高田至郎 : ライフライン地震工学, 共立出版, pp.7-27, 1991.
  - 11) 浜田政則、大町達夫 : 直下地震による表層地盤の変位量とひずみ量の検討、阪神・淡路大震災に関する学術論文集, pp.70-80, 1996.
  - 12) 吉識雅夫監訳 : マトリックス有限要素法, 培風館, pp.1-312, 1970.
  - 13) 谷口健男: FEM のための要素自動分割 デローニー三角分割法の利用, 森北出版株式会社, pp.1-208, 1992.
  - 14) 国土地理院ホームページ : 熊本地震に関する情報. <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>.

(2016.9.2 受付)

## DAMAGE ANALYSES FOR THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE USING GEONET DATA

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. We further estimate coseismic strains of ground from the deformations. The seismic intensities due to the earthquake are also obtained with use of strong motions by K-NET, KiK-net and other observation systems. Both parameters of the coseismic strain of ground and seismic intensity present comparisons between each other and between them and earthquake damages to various structures. This paper especially focuses on a comparison between both parameters and earthquake damages of ground slope.