2016 年熊本地震の強震動と震源過程

青井 真 あおい しん
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター長

2016 年 4 月 14 日 21:26 に熊本地方を震央とする M_j 6.5（M_w 6.1）の地震が，またその 28 時間後の 16 日 1:25 には M_j 7.3（M_w 7.1）の地震が発生した。これは 1995 年兵庫県南部地震以来 21 年ぶりに発生した都市直下における M 7 クラスの活断層の地震であった。これらの地震ではともに熊本県益城町で，また M_j 7.3 の地震ではそれに加え熊本県西原村でも震度 7 を記録した。同一の地震で複数の観測点で震度 7 が記録されたのも，連続する複数の地震で震度 7 が記録されたのも初めてであった。一連の地震で死者は 81 人，住家の全半壊は 3 万 6000 棟を超える被害があった[1]。

これらの地震ではそれぞれ，日奈久断層帯（高野—白旗区間），布田川断層帯（布田川区間）が主に破壊したと考えられている。政府機関である地震調査研究推進本部が全国の活断層を対象に行っている地震発生可能性の長期評価では，両断層帯では事前に M 7 程度の地震発生が予測されており，それをもとにした地震ハザード評価では震度 6 強以上の発生が想定されていた[2]。

M_j 7.3 のイベントの発生に伴い，M_j 6.5 のイベントを前震とする考えかたもあるが，本稿では，別の断層帯で発生した地震であることからそれぞれ，M_j 6.5 イベント，M_j 7.3 イベントと呼ぶことにする。

Strong motion and source processes of the 2016 Kumamoto earthquake sequence
Shin AOI

強震動の特徴

これらのイベントでは共に防災科学技術研究所の KiK-net 益城（KMMH16）で 1000 gal（gal は cm/s/s）を大きく超える最大加速度が記録されたが[3, 4]，地震規模の違いにより，M_j 7.3 イベントにおける強震動の大きな領域の広がりは M_j 6.5 イベントに比べ格段に大きい（図 1）。K-NET, KiK-net, 自治体震度計で得られた両イベントの最大加速度（PGA）および最大速度（PGV）は距離減衰式[5]とおおむね整合しており，大局的には内陸地殻内地震における M_j 6.5 および M_j 7.3 の浅い強震動としては標準的なものであったといえる。M_j 7.3 イベントにおける大分県のいくつかの観測点では M_j 7.3 イベントに誘発されたイベントによる強震動が，見かけ上距離減衰式から大きく外れている。このほか，式の適用限界を外れる震源距離 200 km 程度より遠方では主に PGV の減衰が緩やかになっているが，これは主に卓越周期が 10 秒程度の Love 波によるものであると考えられる[4]（図 2）。特に M_j 7.3 イベントによる建物被害が甚大であった益城町役場では熊本県自治体震度計で波形記録が得られており，疑似速度応答スペクトル（5% 減衰）にみられる周期 1～2 秒のピークは，過去の代表的な被災地における記録である JR 鷹取（1995 年兵庫県南部地震）や新潟県自治体震度計川口町（2004 年新潟県中越地震）のレベルを包含するきわめて大きなものであった（図 3）。また，益城町役場の北東約 640 m に位置する KiK-net 益城でも，震度計に比べるとレベルが低いものの周期 1 秒にピークを持つ大きな強震動が観測された。低層の木造建築物に被

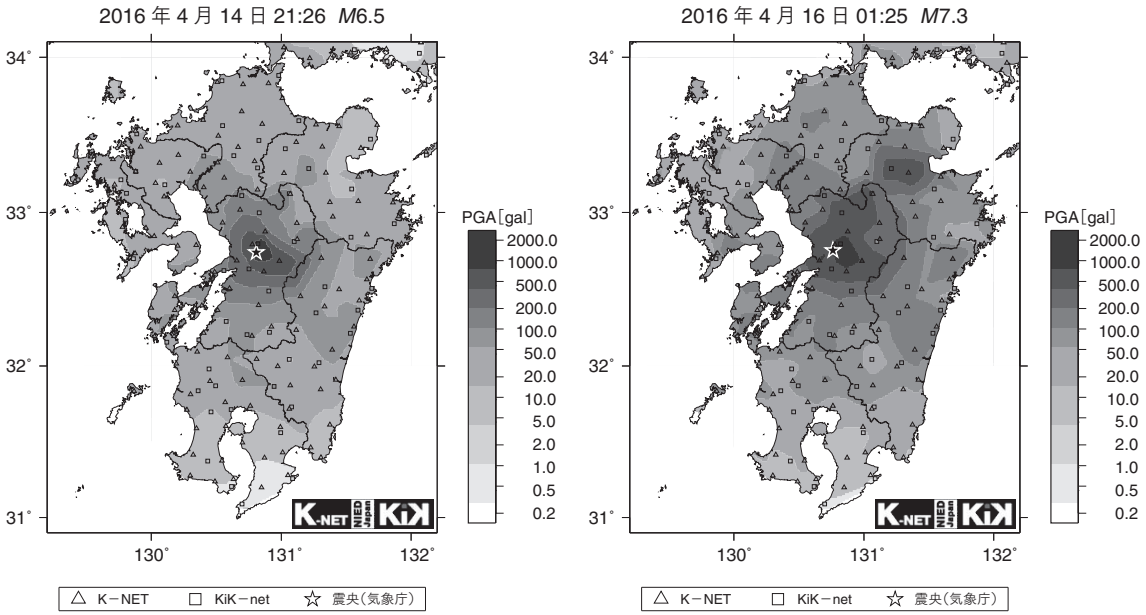


図 1―平成 28 年(2016 年)熊本地震の M_j 6.5 イベント(左)および M_j 7.3 イベント(右)で観測された地表最大加速度の分布
913 ページのカラー版も参照。

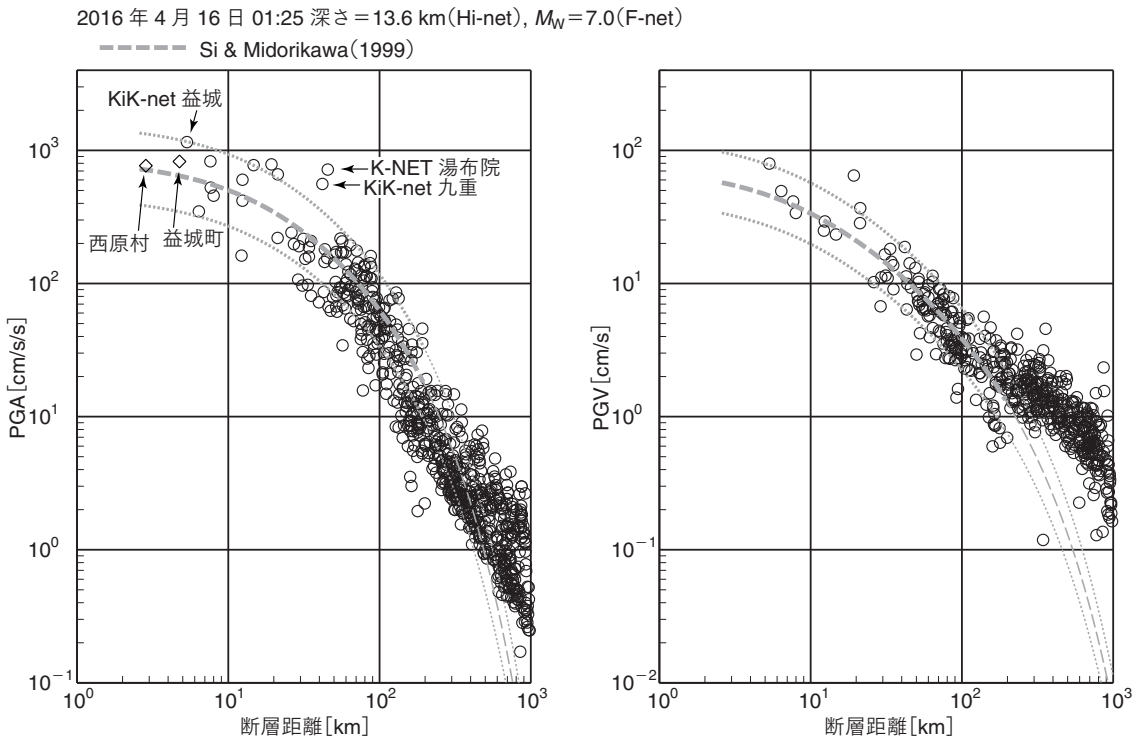


図 2―平成 28 年(2016 年)熊本地震(M_j 7.3 イベント)の最大加速度および最大速度の観測値と距離減衰式[5]の比較
左図は地表における最大加速度，右図は S 波速度が 600 m/s の工学的基盤相当に変換した最大速度。ここでの最大加速度，最大速度はいずれも水平動二成分のうちの大きいほうの値を用いている。

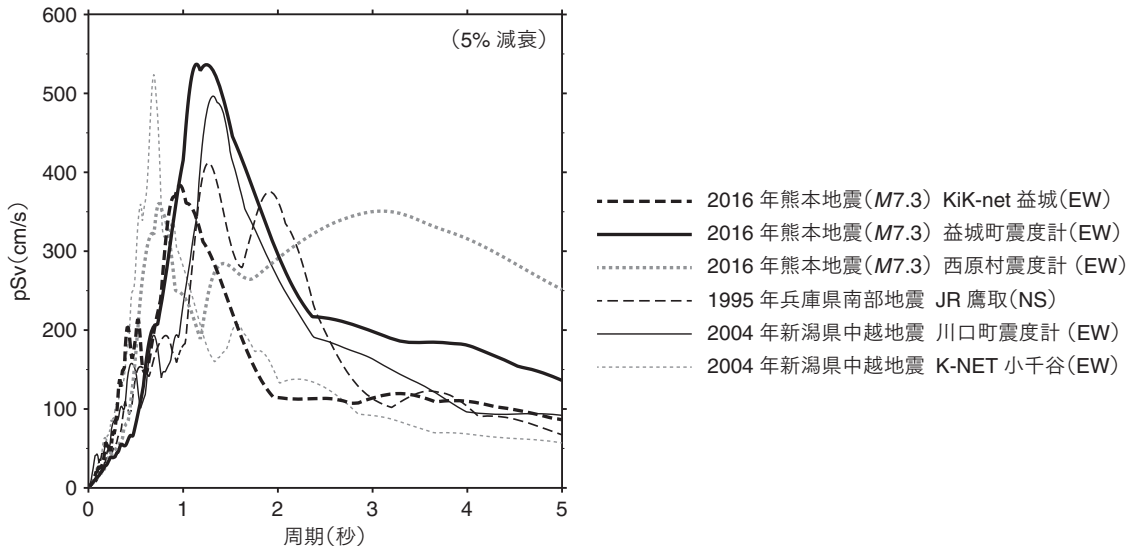


図 3―平成 28 年（2016 年）熊本地震（M_j 7.3 イベント）および日本で起きた顕著な地震で記録された強震記録による疑似速度応答スペクトル（5% 減衰）

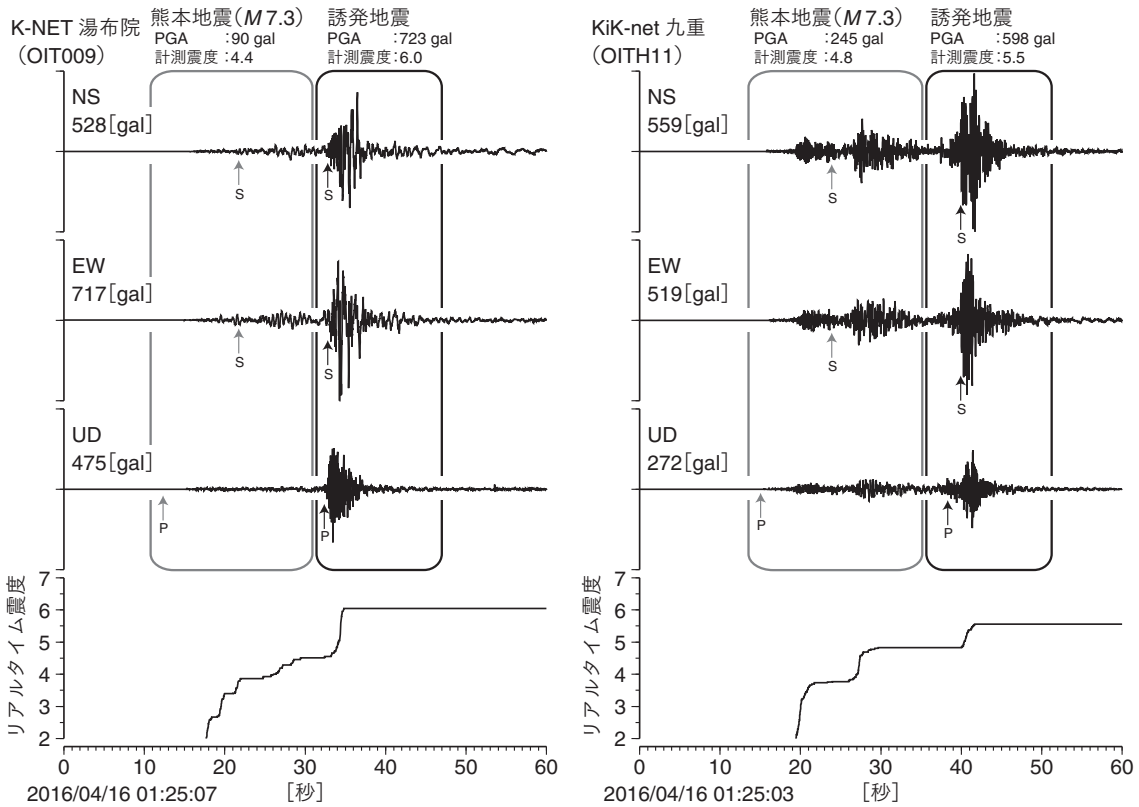


図 4―K-NET 湯布院（OIT009，左）および KiK-net 九重（OITH11，右）における M_j 7.3 イベントおよびそれに伴う誘発地震の強震波形記録とリアルタイム震度[9]

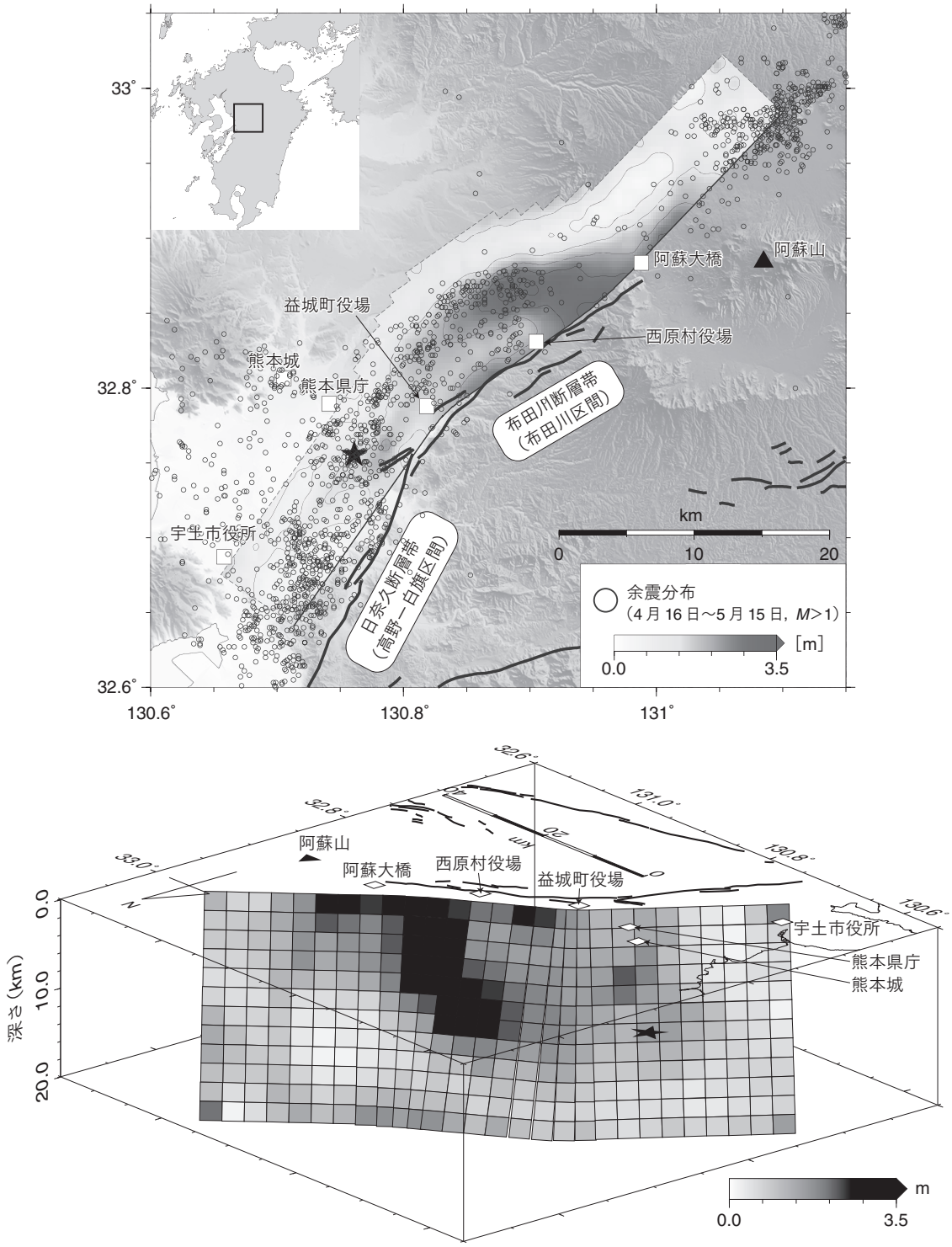


図 5―平成 28 年（2016 年）熊本地震（M_j 7.3 イベント）のすべり分布の地表投影（上）および斜視図（下：方位角 310°，仰角 20°）
星印は破壊開始点を，黒線は活断層トレースを，四角は主要なランドマークを示す。914 ページのカラー版も参照。

害を及ぼす1〜2秒の周期帯の大きな強震動に加え，二度にわたる震度7の揺れが起こったことが益城町における大きな被害につながったと考えられる。

またM_j 7.3イベントにおける西原村の熊本県自治体震度計の記録(震度7)の疑似速度応答スペクトル(5%減衰)は周期3〜4秒が卓越しており，約350 cm/sのピークをもっていた。幸い西原村ではこのような長周期地震動に応答する固有周期の長い建築物はほとんどなかったが，中高層建物が多数存在する首都圏をはじめとする大都市が同様の地震動におそわれると大きな被害が生じる懸念がある。

さらに大分県湯布院近傍でM_j 7.3イベントに誘発されたイベントによる強震動が記録され，震源からの距離が極めて近いことから，大分のいくつかの観測点ではM_j 7.3イベントによる直接の強震動に比べ大きい，ないし同等であった。M_j 7.3イベントの強震動が北東方向に大きく広がっているのはこの誘発地震の影響である(図1)。例えば，K-NET湯布院(OIT009)では，M_j 7.3イベントによるPGAが90 gal，計測震度が4.4(震度4)であったが，誘発地震による強震動は723 gal，計測震度6.0(震度6強)であり，誘発地震による強震動のほうが遥かに大きかった(図4)。S-P時間が約1秒程度であることから誘発地震はK-NET湯布院の極めて近傍で発生しており，この観測点を震源と仮定してペーストアップを作成すると，九州の比較的広い範囲でほぼ直線的に誘発されたイベントによる波群が見られ，距離減衰による検討により，地震の規模であるマグニチュードは5.5程度と推定される。

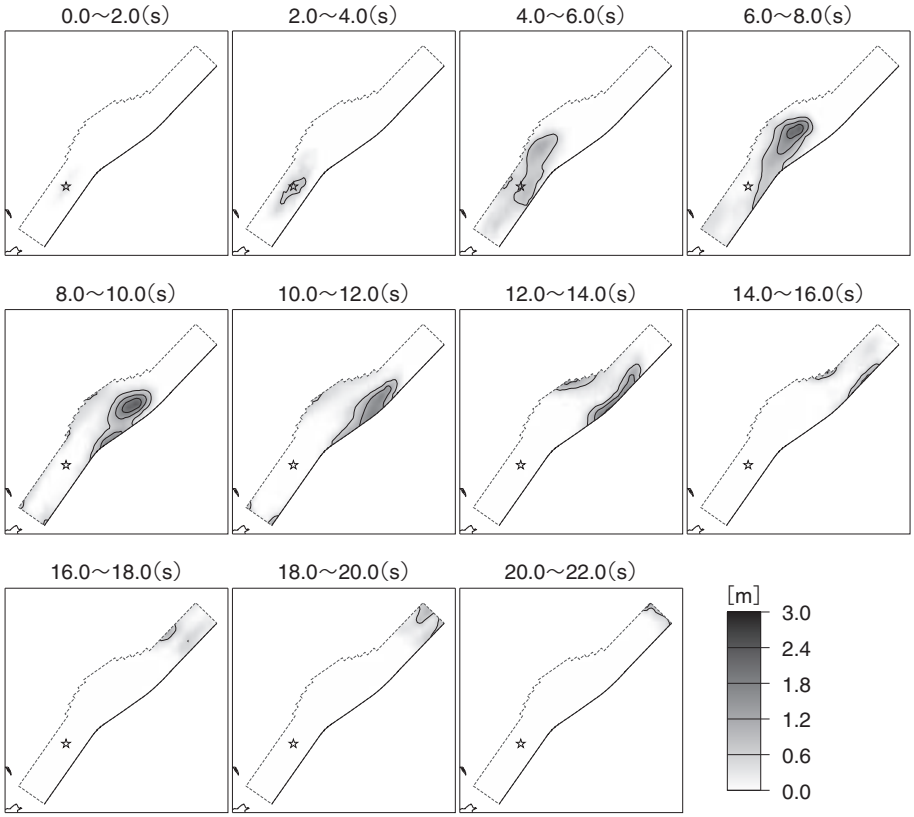


図6—平成28年(2016年)熊本地震(M_j 7.3イベント)の破壊の時間進展過程
各図は破壊開始から2秒ごとのすべり分布を示しており，星印は破壊開始点を表す。913頁のカラー版も参照。

震源過程

地震は断層がずれ動く断層破壊によりエネルギーが放出される現象であるが，断層面全体が均質に破壊するわけではない。M_j 7.3 イベントに関して，震源から 100 km 程度以内の 27 地点で観測された近地強震波形を用いて，震源過程の推定を行った[6]。ここでは，マルチタイムウィンドウ線型波形インバージョン法にもとづき断層破壊過程を時空間的に離散化し，各小断層からの要素波形（グリーン関数）の重みの線形方程式を解くことで求める。この手法では，空間の離散化にあたりあらかじめ断層面を設定する必要があるが，これはあくまですべりが許される空間的な候補点であり，設定した断層面全体がエネルギーを放出することを意味するわけではない。逆に，設定していない箇所からはエネルギーは放出されない。ここでは，地震後の余震活動分布および地表地震断層の分布，InSAR（衛星干渉合成開口レーダ）や GNSS（全球測位衛星システム）で捉えられた地震前後の静的地表変位[7,8]を参考に，上端長さ約 53 km，幅 24 km の曲面からなる断層面（上端深さ約 1 km）を設定し，長さ方向・深さ方向にそれぞれ 28 個および 12 個の小断層（約 2 km×2 km）に分割した。震源過程解析の結果，2.4 m を超える比較的大きなすべりの領域は震央の北東約 10 km から約 30 km の深さ約 15 km 以浅の領域に広がり，その北東端は阿蘇山付近にまで及んでいることがわかった（図 5）。最大すべり 3.8 m のこの大きなすべり領域は，破壊開始 4 秒から 16 秒までにおいて，北東の浅い側に向かって進展した主たる断層破壊によって生じた（図 6）。また，破壊開始 2 秒以降に破壊開始点から地表の方向へと進み，その後地表に沿って北東方向に進展していった断層破壊も見られた。推定された浅い領域の大きなすべりの位置は，地表踏査で確認された地表地震断層と整合的である。

＊　＊

2016 年熊本地震は，事前に想定された活断層で発生した地震であり，震源近傍で震度 7 を含む多くの強震動が記録され，詳細な断層のすべり分布が提示された。これらは 1995 年兵庫県南部地震以降，取り組んできた施策や観測網の効果であるとともに，今後の地震災害軽減の方向性を検討する糧となる。また，内陸地殻内地震に誘発された地震によって大きな地震動が生じることも記録として確認された。顕著な被害のあった益城町における震度 7 の連発や，西原村における比較的周期の長い震度 7 の強震記録などは，M7 クラスの内陸地殻内地震での従来の経験を超えており，今後の強震観測や強震動予測，防災対策など行う上で十分に検討していくことが期待される。

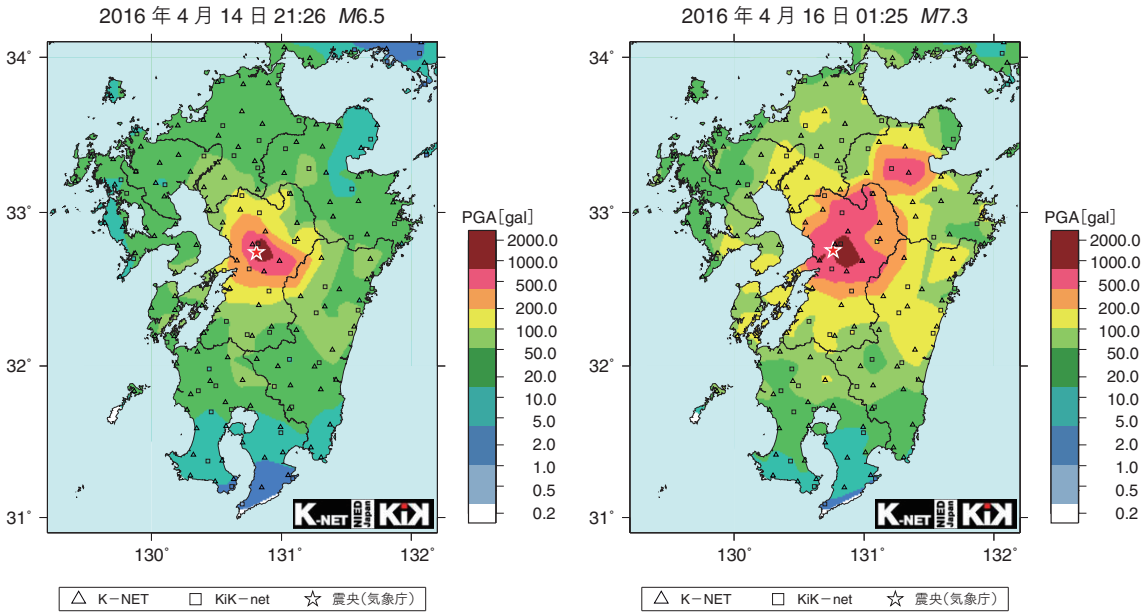
謝辞　新潟県，熊本県，JR のデータを使用させていただきました。記して感謝いたします。

文献

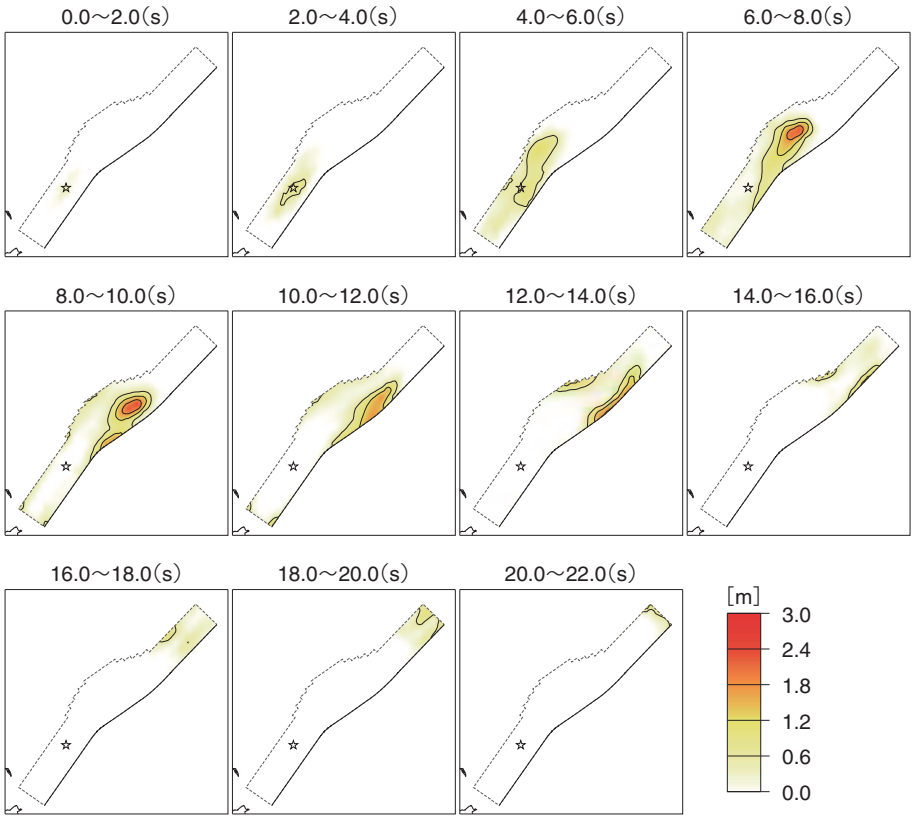
1—消防庁災害対策本部: 熊本県熊本地方を震源とする地震（第 68 報）（2016）
2—地震調査研究推進本部地震調査委員会: 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価（一部改訂）（2013）
3—S. Aoi et al.: Proceedings of ESG5（2016）
4—W. Suzuki et al.: Earth Planets Space, submitted（2016）
5—司宏俊・翠川三郎: 日本建築学会構造系論文集，**523**, 63–70（1999）
6—H. Kubo et al.: Earth Planets Space, submitted（2016）
7—T. Ozawa et al.: Earth Planets Space, submitted（2016）
8—矢来博司・他: 日本地球惑星科学連合 2016 年大会，MIS34–03（2016）
9—功刀卓・他: 地震第 2 輯，**65**, 223–230（2008）

青井 真 あおい しん

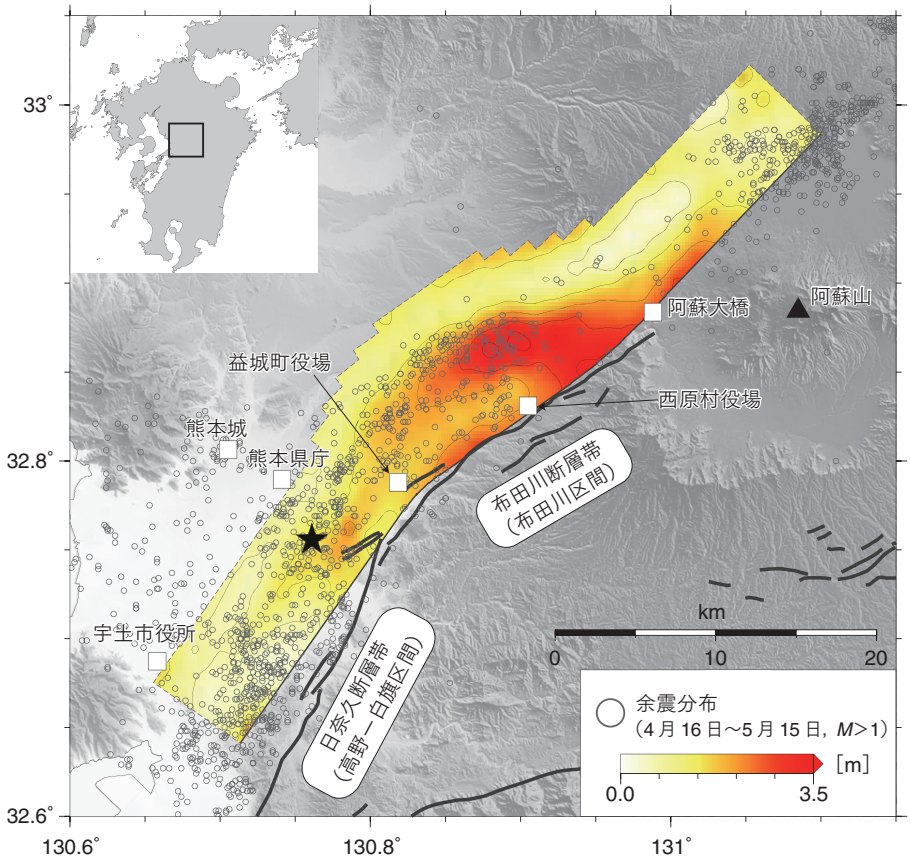
国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター長。SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」津波予測技術の研究開発の研究責任者。1996 年京都大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了。専門は強震動地震学。全国に設置した 2000 地点余りからなる陸域及び海域における地震観測網の運用及びそこから得られる観測データを用いた地震や津波の研究を行っている。また，スーパーコンピュータを用いた大規模な波動伝播シミュレーションモデルの開発及びハザードマップの作成に関する研究を行っている。

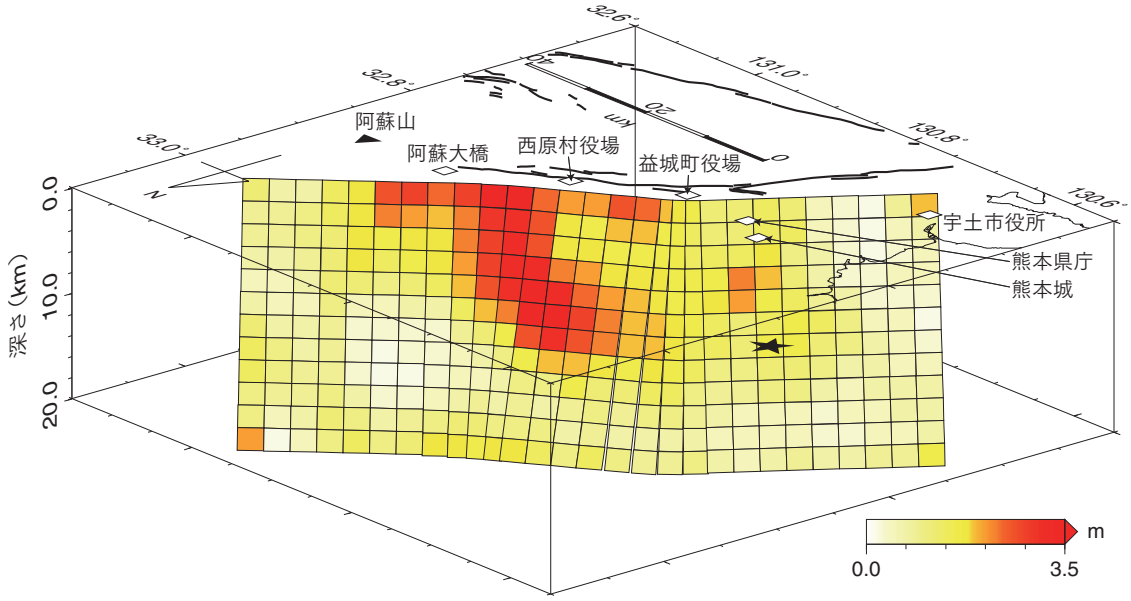


特集青井論文図 1—平成 28 年(2016 年)熊本地震の M_j 6.5 イベント(左)および M_j 7.3 イベント(右)で観測された地表最大加速度の分布



特集青井論文図 6—平成 28 年(2016 年)熊本地震(M_j 7.3 イベント)の破壊の時間進展過程
各図は破壊開始から 2 秒ごとのすべり分布を示しており，星印は破壊開始点を表す。





特集青井論文図 5―平成 28 年（2016 年）熊本地震（M_j 7.3 イベント）のすべり分布の地表投影（上）および斜視図（下：方位角 310°，仰角 20°）

星印は破壊開始点を，黒線は活断層トレースを，四角は主要なランドマークを示す。