

近地強震記録を用いた平成28年（2016年）熊本地震（4月16日1時25分、M7.3）の震源インバージョン解析（2016/8/9再改訂版）

はじめに

一連の平成28年（2016年）熊本地震のうち、4月16日1時25分の地震（M7.3; 気象庁）について、強震波形記録を用いた震源インバージョン解析を行った。

データ

図1に示す防災科学技術研究所のK-NET観測点13点、KiK-net地中観測点9点、KiK-net地表観測点2点、F-net観測点3点の計27観測点での強震加速度波形記録を積分して得た速度波形を用いた。これらの速度波形に0.05–1.0Hzのバンドパスフィルタをかけ、5Hzにリサンプリングし、S波到達1秒前から30秒間を切り出し解析データとした。

断層面の設定と断層破壊過程のモデル化

地震後の余震活動分布及び地表地震断層の分布、InSARやGNSSで捉えられた地震前後の静的地表変位を参考に、上端長さ53km、幅24kmの曲面断層面を仮定した。図2に仮定した曲面断層面モデルを示す。破壊開始点は、DD法で再決定された震源位置に基づき、北緯32.7557度、東経130.7616度、深さ13.58kmにおいた。

本解析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（Olson and Apsel, 1982; Hartzell and Heaton, 1983）に基づき、断層破壊過程を時空間的に離散化した。空間的には、断層面を長さ約2km、幅2kmの小断層で、走向方向28個、傾斜方向12個に分割した。時間的には、各小断層でのすべり時間関数を、破壊開始点から一定速度 V_{ftw} で広がる同心円が到達した時刻から、0.8秒幅のスムーズランプ関数を0.4秒ずらして13個並べることで表現した。これにより、各小断層からの要素波形（グリーン関数）を通じて、断層破壊過程と各観測点での波形は線型の方程式で結び付けられる。

各小断層からの要素波形は、一次元地下構造モデルを仮定し、離散化波数積分法（Bouchon, 1981）と反射・透過係数行列法（Kennett and Kerry, 1979）により点震源の波形を計算し、小断層内部の破壊伝播の効果を25個の点震源（走向方向、傾斜方向それぞれ5列）を分布させることにより表現した。地下構造モデルは、藤原・他（2009）による三次元地下構造モデルの各観測点直下の情報を用いて観測点ごとに構築した。KiK-net観測点については速度検層の情報も利用した。

2016年8月9日再改訂

2016年9月6日修正

以前の震源モデル（2016年5月12日改訂）は[こちら](#)です。

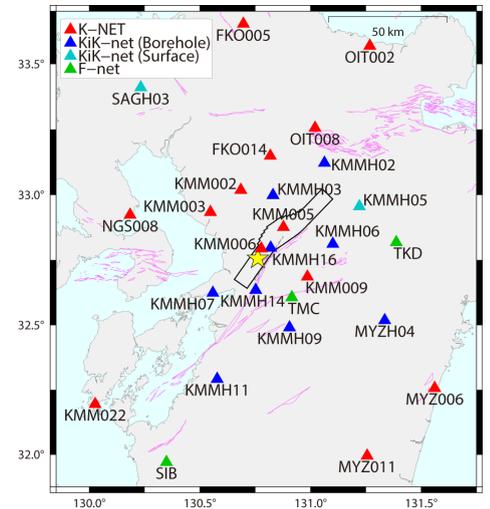


図1：観測点。星印は破壊開始点を示す。

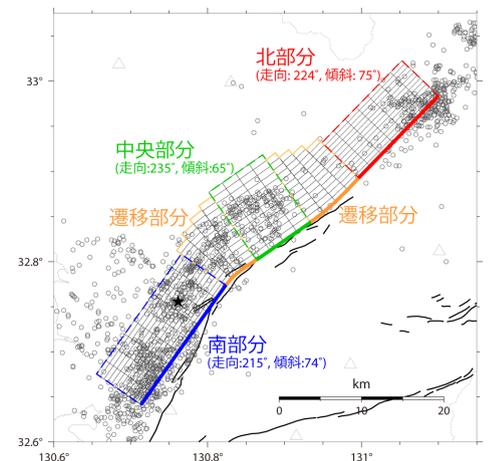


図2：曲面断層面モデルの地表投影。曲面断層面モデルは三つの主要部分（北・中央・南）とそれらをつなぐ遷移部分で構成される。星印は破壊開始点を示す。

波形インバージョン解析

各小断層の各タイムウィンドウでのすべり量を、観測波形と合成波形の差を最小とするように、最小二乗法を用いて求めた。不等式拘束条件をつけた最小二乗法 (Lawson and Hanson, 1974) を用いて、各小断層でのすべり方向の変化を、F-netメカニズム解のすべり角である -142 度の ± 45 度に収めた。また時空間的に近接するすべりを平滑化する拘束条件 (Sekiguchi et al., 2000) を付加した。平滑化の強さはABIC (Akaike, 1980) を基準に決定し、Vftwは残差を最小とするものを選んだ。

結果

図3にすべり分布の地表投影を、図4にすべり分布の斜視図を、図5にすべり分布の平面投影を示す。図6に観測波形と理論波形の比較を示す。図7に断層破壊の時間進展過程を示す。図8に各小断層でのすべり速度時間関数を示す。Vftwは 2.6 km/s 、最大すべり量は 3.8 m 、断層面全体での地震モーメントは $5.5 \times 10^{19}\text{ Nm}$ ($M_w 7.1$) である。 2.4 m を越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ぶ。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。また、破壊開始2秒以降に破壊開始点から地表の方向へ進み、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。

注：なお、本解析は今後改訂される可能性がある。

(文責：久保久彦、鈴木巨、青井真 (防災科学技術研究所)、関口春子 (京都大学防災研究所))

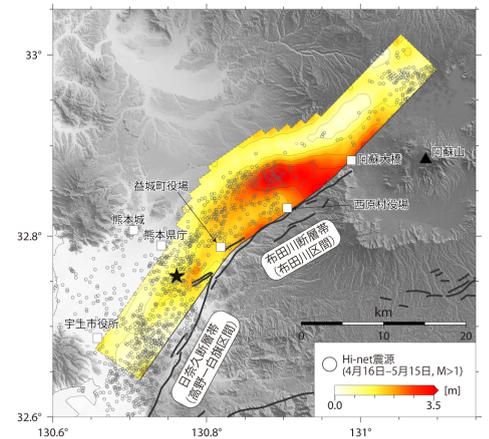


図3：すべり分布の地表投影。星印は破壊開始点を、灰色丸は地震発生後一ヶ月間の地震活動のHi-net震源位置を、黒線は活断層トレースを、四角は主要なランドマークを示す。

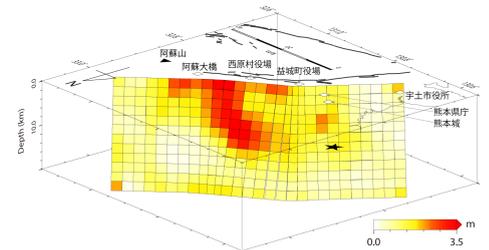


図4：すべり分布の斜視図 (方位角 310 度、仰角 20 度)。星印は破壊開始点を、黒線は活断層トレースを、四角は主要なランドマークを示す。

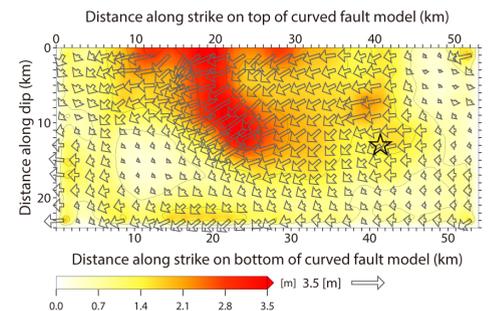


図5：すべり分布の平面投影。ベクトルは上盤のすべり方向とすべり量を示している。星印は破壊開始点を示す。

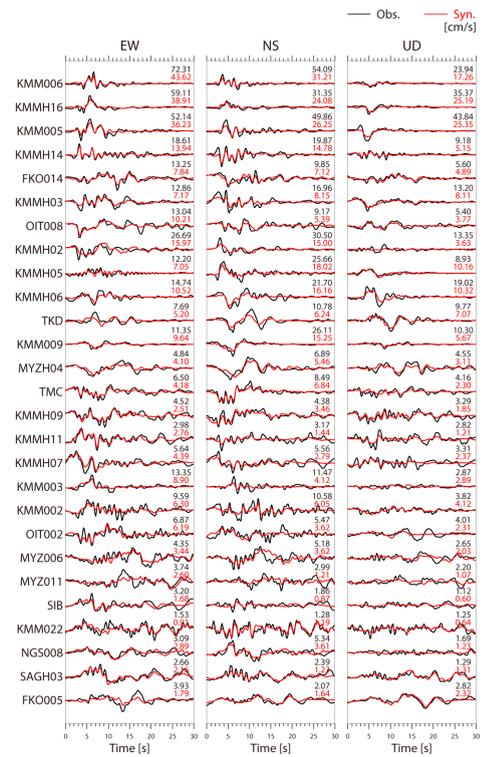


図6：観測波形（黒線）と理論波形（赤線）の比較。波形の右上にそれぞれの最大値を示す。

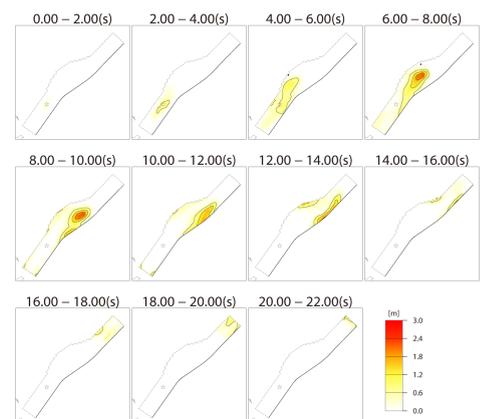


図7：破壊の時間進展過程。2秒ごとのすべり分布を示す。

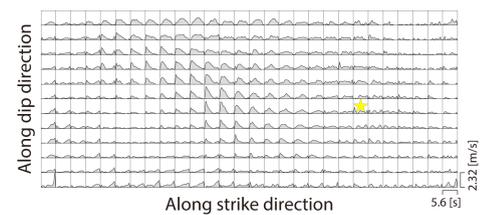


図8：各小断層でのすべり速度時間関数。星印は破壊開始点を示す。

【References】

- Akaike, H. (1980), Likelihood and the Bayes procedure, in Bayesian statistics, edited by J. M. Bernardo, M. H. DeGroot, D. V. Lindlely, and A. F. M. Smith, University Press, Valencia, Spain.

- Bouchon, M. (1981), A simple method to calculate Green's function for elastic layered media, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 71, 959-971.
- Kennett, B. L. N. and N. J. Kerry (1979), Seismic waves in a stratified half space, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 57, 557-583.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・早川 讓・遠山信彦・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・劉瑛 (2009), 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, No.337.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton (1983), Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 73, 1553-1583.
- Lawson, C. L., and R. J. Hanson (1974). *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 340 pp.
- Olson, A. H. and R. J. Apsel (1982), Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1969-2001.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, and T. Iwata (2000), Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 117-133.