

熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル

Source fault models of the 2016 Kumamoto Earthquake inverted from crustal deformation

地理地殻活動研究センター 矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Hiroshi YARAI, Tomokazu KOBAYASHI, Yu MORISHITA and Satoshi FUJIWARA

測地観測センター 檜山洋平・川元智司

Geodetic Observation Center Yohei HIYAMA and Satoshi KAWAMOTO

測地部 上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅

Geodetic Department Haruka UESHIBA, Yuji MIURA and Basara MIYAHARA

要 旨

熊本地震では、国土地理院が運用する GEONET やだいち 2 号の干渉 SAR により、地震に伴う地殻変動が詳細に捉えられた。これらの地殻変動に基づき、震源断層モデルの推定を行った。

前震（4月14日、M6.5及び4月15日、M6.4）では日奈久断層帯の高野―白旗区間に相当する位置に震源断層が推定された。西に傾き下がる高角の右横ずれ断層で、滑り量は約 1.1m、地震規模は Mw6.2 と推定された。本震（4月16日、M7.3）については布田川断層帯布田川区間とその東側延長部、及び日奈久断層帯の高野―白旗区間に相当する位置に震源断層が推定された。布田川区間に相当する断層面は北西傾斜、東側延長部は南東傾斜で、両者は直接的には連続していない。断層の滑り方向は右横ずれで、最も大きな変位が推定された布田川区間は顕著な正断層成分を伴っている。布田川区間では滑り分布モデルで最大約 5m の滑りが推定された。推定された地震規模は Mw7.1 である。

地殻変動から推定された断層変位や地震規模は、本震については、地震調査研究推進本部地震調査委員会による長期評価と概ね調和的である。一方、前震については断層変位方向は整合するものの、地震規模は長期評価に比べて小さい。

これらの前震及び本震の震源断層モデルは、地震調査委員会や地震予知連絡会に報告され、熊本地震の地震活動の評価に活用された。

1. はじめに

2016年4月14日21時26分に熊本県熊本地方で M6.5 の地震が発生し、最大震度 7 を記録した。この地震以降、熊本地方及び阿蘇地方において地震活動が活発化し、M6.5 の地震から約 2 時間半後の 4 月 15 日 0 時 3 分には M6.4 の地震、さらに約 25 時間半後の 4 月 16 日 1 時 25 分には M7.3 の地震が発生し、再び最大震度 7 を記録した。気象庁はこれら一連の活動を「平成 28 年（2016 年）熊本地震」（以下「熊本地震」という。）と命名した。

熊本地震の震源域には、地震調査研究推進本部地震調査委員会が長期評価（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2013）（以下「長期評価」という。）を行った布田川断層帯・日奈久断層帯が分布している。長期評価では、当該断層帯をいくつかの活動区間に区分し、想定される地震規模やずれの向き等を評価しているが、個々の区間が単独で活動するだけでなく、複数の区間が同時に活動する可能性も否定できないとしている。

今回の地震活動でどの区間が活動したのかを把握することは、地震活動の評価や未活動区間への影響の検討を行う上で重要である。

熊本地震では、国土地理院が運用する GNSS 連続観測システム（以下「GEONET」という。）及び陸域観測技術衛星「だいち 2 号」（以下「だいち 2 号」という。）によって地殻変動が捉えられた（檜山ほか、2016、上芝ほか、2016）。国土地理院は、これらの地殻変動に基づいて震源断層モデルの推定を行い、その結果を地震調査委員会や地震予知連絡会等に報告した。これらの震源断層モデルは、地震活動の評価の際に活用された。本稿では、これら地殻変動から推定された震源断層モデルについて報告する。

なお、本稿では、熊本地震のうち最大規模である 4 月 16 日の M7.3 の地震を本震、それ以前に発生した 4 月 14 日の M6.5 の地震と 4 月 15 日の M6.4 の地震を前震と呼ぶこととする。

2. 地震に伴う地殻変動

2.1 GNSS

GEONET の定常解析には、最終解（F3 解）、速報解（R3 解）、迅速解（Q3 解）の 3 種類がある（中川ほか、2009）。このうち、F3 解及び R3 解は UTC0 時からの 24 時間の観測データを単位とした解である。Q3 解は 6 時間の観測データを単位とし、3 時間ごとに 1 回算出される解であり、精度は F3 解や R3 解に比べて劣るものの、迅速性や時間分解能に優れている。

熊本地震では、4 月 14 日の M6.5 の前震から 4 月

16日のM7.3の本震までの間が28時間と短いため、地殻変動を求める際に通常用いられるF3解やR3解では、複数の地震を含んだ地殻変動しか得られない。前震と本震の地殻変動を分離するため、Q3解も用いてそれぞれの地震に伴う地殻変動を求めた。

前震に伴う地殻変動を図-1に示す。地震前の4月1日～13日のR3解の平均値と地震後の15日3:00～23:59の1セッションのQ3解を比較している。日奈久断層帯周辺の観測点で地殻変動が観測され、日奈久断層帯の西側の観測点では北向き、東側の観測点では南向きの地殻変動成分を含んでおり、日奈久断層帯で右横ずれの断層運動が生じたと考えられる。なお、4月14日のM6.5の地震及び約2時間半後に発生した4月15日のM6.4の地震のそれぞれで、GNSSで検出可能な地殻変動が生じたことがリアルタイム解析の結果から分かっているが(檜山ほか, 2016, Kawamoto et al., 2016), Q3解ではこれら2つの地震の地殻変動を区別することができない。そのため、図-1はこれら2つの地震の地殻変動の合計を示している。

4月16日に発生したM7.3の本震については、後述のだいち2号の干渉SARの結果と時期を揃えるため、前震前の4月1日～10日のF3解の平均値と本震後の4月18日～26日のR3解の平均値を比較し、前震も含めた地殻変動を求めた。なお、国土地理院では、気象庁や防災科学技術研究所が火山周辺に設置したGNSS観測点のデータを用いて、GEONETと整合する測位解を求める統合解析技術(畑中, 2011)により定常的に解析を行っており、これらの結果も用いた。

本震に伴う地殻変動を図-2に示す。本震では、主に布田川断層帯に沿って大きな地殻変動が観測された。熊本観測点の変動方向は、前震による変動方向(北北西)とは異なっており、本震が東西に近い走向の布田川断層帯での右横ずれの断層運動が主体であったことを示している。一方で、布田川断層帯の南側に位置する城南観測点は東北東方向の変動を示しており、日奈久断層帯でも右横ずれ断層運動が生じたことを示唆している。

2.2 干渉 SAR

熊本地震に関しては、だいち2号により多数の観測が行われ、これらのデータを用いたSAR干渉解析により4月14日のM6.5の前震や4月16日のM7.3の本震などに伴う地殻変動が詳細に捉えられている(Kobayashi, 2016, 上芝ほか, 2016, 藤原ほか, 2016)。

本稿では、震源断層モデル推定のための地殻変動データとして、前震については、4月15日のM6.4の地震直後の観測データをスレーブ画像とするペア(前震ペア)(図-3, 表-1)、本震については、4月1

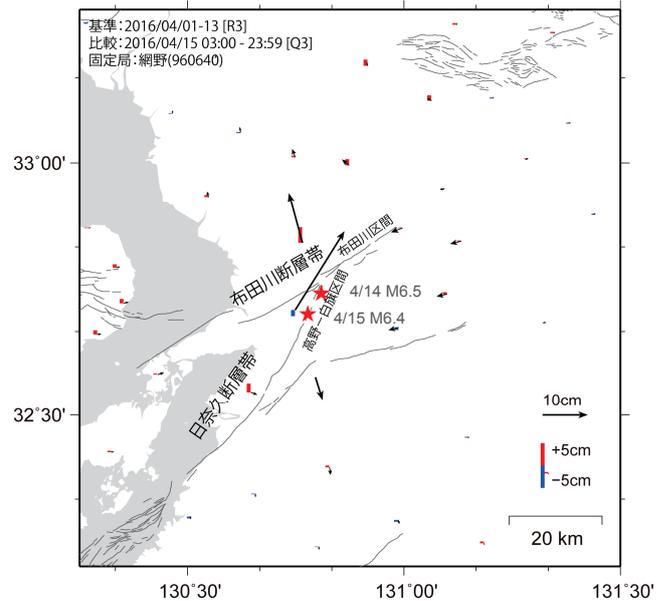


図-1 GEONETの定常解析による4月14日のM6.5の地震及び4月15日のM6.4の地震に伴う地殻変動(黒矢印: 水平成分, 赤及び青: 上下成分). 赤色の★は、それぞれの地震の震央を示す。

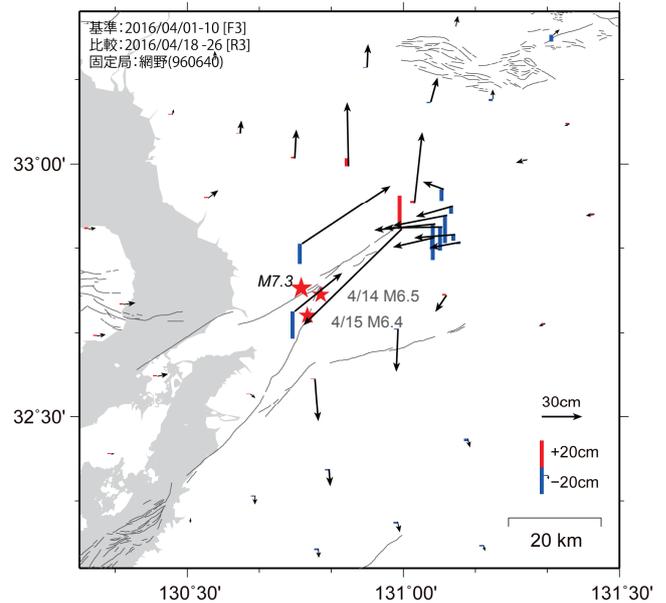


図-2 GEONETの定常解析による4月16日のM7.3及び4月14日、15日の地震に伴う地殻変動(黒矢印: 水平成分, 赤及び青: 上下成分). 赤色の★は、地震の震央を示す。

6日のM7.3の本震の直後に観測されたデータをスレーブ画像とするペア(本震ペア)(図-4, 表-1)を用いた。これらの解析の詳細については上芝ほか(2016)を参照されたい。

前震ペア(図-3)では、日奈久断層帯北部の西側において、北部で衛星に近づく向き(隆起もしくは

東向き), 南部で衛星から遠ざかる向き (沈降もしくは西向き) の変動が見られる. その特徴から, 日奈久断層帯に沿ったやや西側に傾斜した高角の断層が右横ずれしたと考えられる. なお, 前震ペアは, 前述の GNSS による結果と同様, 4月14日 M6.5 及び 4月15日 M6.4 の地震を合わせた地殻変動を示している.

本震ペア (図-4) では, 布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿って最大で 1m を越えるような顕著な地殻変動が検出された. 地殻変動分布は複雑であるが, 概ね布田川断層帯及び日奈久断層帯での右横ずれ断層運動と調和的な地殻変動を示している. また, 本震の断層運動による地殻変動だけでなく, 多数の小変位の地表断層 (藤原ほか, 2016) など, 複雑な地殻変動が生じたことが明らかとなっている. なお, 本震ペアは4月16日の本震だけでなく前震による地殻変動を含んでいるが, 地震規模が大きく異なり, 捉えられている地殻変動のほとんどは本震に伴う地殻変動と考えられる.

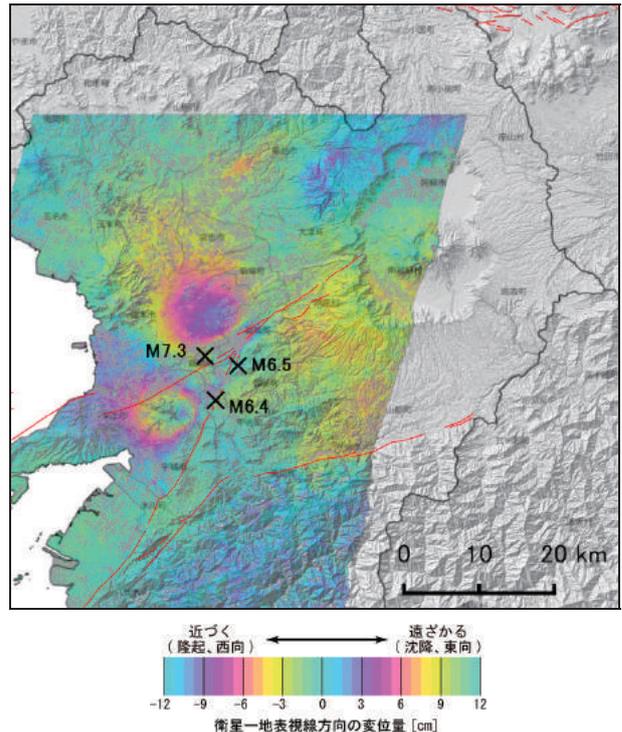


図-3 だいち 2号の干渉 SAR で得られた前震 (4/14 M6.5 及び 4/15 M6.4) に伴う地殻変動.

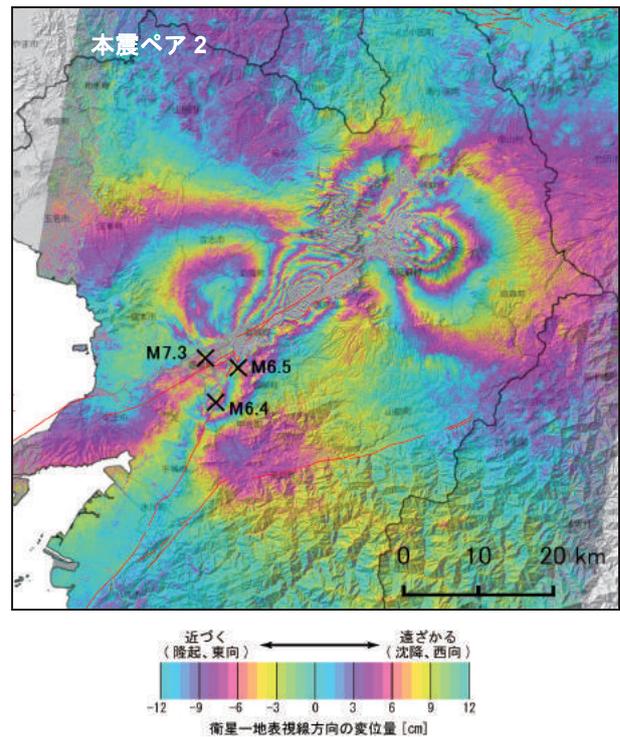
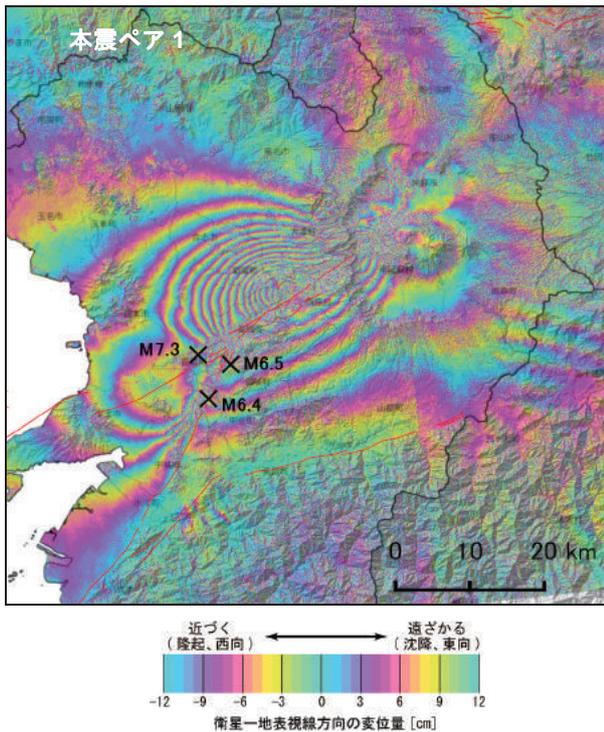


図-4 だいち 2号の干渉 SAR で得られた前震及び本震 (4/16 M7.3) に伴う地殻変動.

表-1 震源断層モデルの推定に用いた干渉ペア

	2回目観測 日時(JST)	1回目観測 年月日	衛星進 行方向	電波照 射方向	観測モード	入射角(シ ーン中心)	垂直 基線長
前震ペア	4/15 12:53	2014/11/14	南行	左	高分解能(3m)	32.4°	-104m
本震ペア 1	4/18 0:25	2015/ 5/18	北行	右	高分解能(3m)	50.7°	+175m
本震ペア 2	4/18 12:18	2016/ 3/ 7	南行	右	高分解能(3m)	36.3°	-124m

3. 震源断層モデル

GEONET 及びだいち 2 号の干渉 SAR により得られた地殻変動に基づき、震源断層モデルの推定を行った。なお、干渉 SAR についてはそのままではデータ量が膨大なため、Quadtree アルゴリズム (Jonsson et al.,2002) を適用してデータ量を削減した上で推定に用いた。

震源断層モデルの推定にあたっては、前震については一様滑りの矩形断層モデル、本震については矩形断層モデルに加え、断層面上での滑りの分布を推定する滑り分布モデルの 2 種類のモデルで推定を行った。

断層運動による地表面変動の計算は Okada (1985) に基づいて計算を行った。矩形断層モデルの各パラメータの推定では、Simulated Annealing (焼きなまし法) (Cervelli et al.,2001, Kobayashi et al., 2012) により解の探索を行った。

滑り分布モデルの推定では、Kobayashi et al. (2012) の手法を用いた。各断層の傾斜角を変更して滑り分布を推定し、残差が最小となる組み合わせを最適解として採用した。断層面上の滑りはラプラスアンオペレータを用いて平滑化し、滑らかさの超パラメータは Akaike (1980) のベイズ情報量規準 (Akaike's Bayesian Information Criterion) を用いて決定した。

3.1 前震の震源断層モデル

前述の通り、前震については 4 月 14 日 M6.5 及び 4 月 15 日 M6.4 の 2 つの地震による地殻変動を分離することができない。そのため、前震の震源断層モデルは、これら 2 つの地震を合わせて 1 枚の矩形断層を仮定して推定を行った。

推定の結果、日奈久断層帯に沿った北東-南西走向のやや西に傾き下がる高角の断層が右横ずれ運動したと推定された (図-5、表-2)。断層の走向は日奈久断層帯と平行であるが、上端位置は日奈久断層帯の地表トレースとは一致せず、やや西にずれた位置に推定された。滑り量は約 1.1m と推定され、断層パラメータから計算される地震規模はモーメントマグニチュード (以下「Mw」という。) 6.2 となった。

推定された震源断層は、日奈久断層帯の高野-白旗区間にほぼ相当している。布田川断層帯・日奈久断層帯の長期評価では、同区間は南東側隆起を伴う右横ずれ断層で、1 回のずれの量は 2m 程度、発生する地震の規模は M6.8 程度と評価している。地殻変動から推定された断層変位は右横ずれで、長期評価と調和的である。一方、地震規模や変位量は長期評価に比べて小さい。

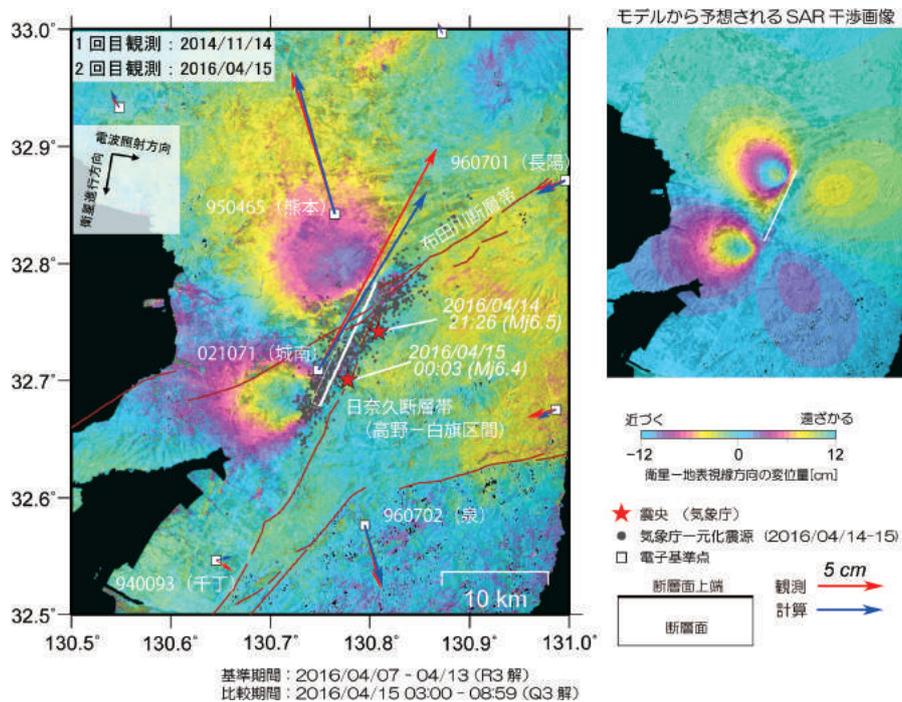


図-5 前震の矩形断層モデルと地震時の地殻変動の観測値，計算値の比較

表-2 推定された前震の震源断層パラメータ (矩形断層)

経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	滑り角	滑り量	M _w
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	
130.806	32.784	1.4	12.8	6.4	205	83	173	1.1	6.23

※矩形断層 1 枚での推定結果。位置は断層の左上端を示す。

3.2 本震の震源断層モデル

3.2.1 本震の震源断層モデル (矩形断層モデル)

本震については、SAR 干渉画像及び余震分布から、布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿った震源断層が想定されたことから、これらの断層帯に沿って3枚の断層面を仮定して推定を行った。なお、推定に用いた地殻変動データは本震だけでなく前震の地殻変動も含んでおり、厳密には前震と本震を合わせたモデルとなる。

推定の結果、布田川断層帯及び日奈久断層帯に沿った位置に震源断層が推定された (図-6, 表-3)。布田川断層帯では北西傾斜の断層 (A1) とその東側延長に南東傾斜の断層 (A2)、日奈久断層帯では北西傾斜の断層 (B) で、それぞれ右横ずれ運動が生じたと推定された。A1 断層は正断層成分も含んでいる。

なお、A2 断層は、傾斜が A1 断層と逆になっているだけでなく、上端位置が A1 断層とは直接接続しておらず、やや北にオフセットしている。

推定された滑り量は、A1 断層で最も大きく、約 4.1m である。また、日奈久断層帯の高野-白旗区間に相当する B 断層でも約 2.7m の滑りが推定された。この滑りは前震の震源断層モデルで推定された滑り量 (約 1.1m) に比べてかなり大きく、この区間は前震だけでなく本震でも活動したと考えられる。

断層パラメータから計算される地震規模は Mw 7.1 であり、地震波から推定される規模と同程度である。なお、A1 断層は布田川断層帯布田川区間、B 断層は日奈久断層帯高野-白旗区間にほぼ相当している。布田川断層帯・日奈久断層帯の長期評価では、これらの区間は南東側隆起を伴う右横ずれ断層で、

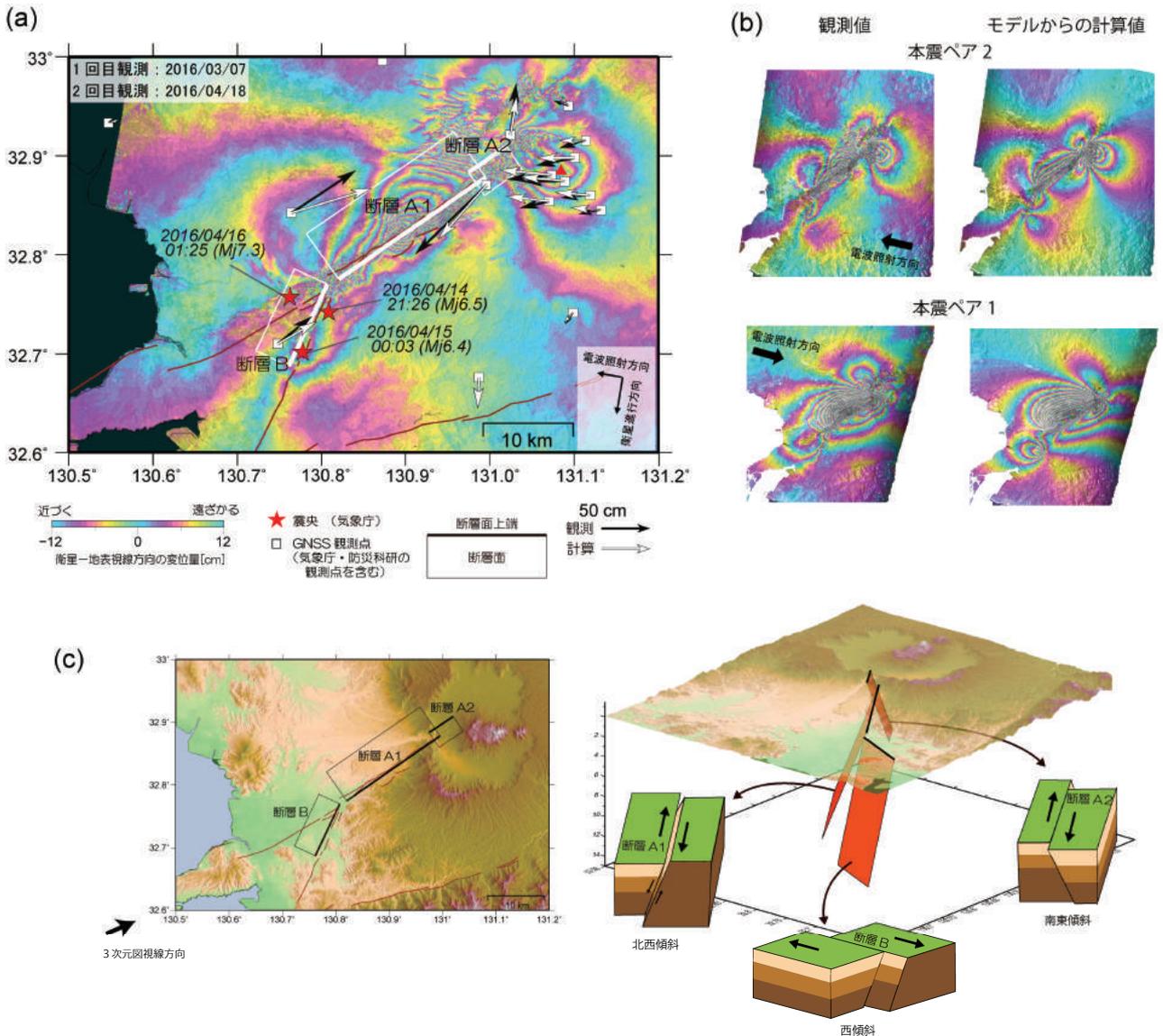


図-6 本震の矩形断層モデル (a)干渉 SAR (観測値) と GNSS (観測値・計算値), (b)干渉 SAR (観測値・計算値), (c)矩形断層モデルの概念図。

表-3 推定された本震の震源断層パラメータ (矩形断層)

	経度 [°]	緯度 [°]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [°]	傾斜 [°]	滑り角 [°]	滑り量 [m]	M _w
断層 A1	130.996	32.878	0.6	20.0	12.5	235	60	209	4.1	6.96
断層 A2	130.975	32.883	0.2	5.1	6.6	56	62	178	3.8	6.36
断層 B	130.807	32.770	0.8	10.2	13.0	205	72	176	2.7	6.65

1 回のずれの量は 2m 程度、発生する地震規模は布田川区間が M7.0 程度、高野-白旗区間は M6.8 程度と評価しており、地殻変動から推定された断層変位や地震規模などの特徴は長期評価と概ね調和的といえる。

3.2.2 本震の震源断層モデル (滑り分布モデル)

本震については、さらに滑り分布モデルの推定も行った。矩形断層モデルで得られた知見を基に、布田川断層帯の布田川区間とその東側延長の 2 枚の断層及び日奈久断層帯側の断層を設定した。この日奈久断層帯の断層については、SAR 解析で見られる変位の急変帯を参考にして、走向がやや異なる北側と南側の 2 枚に分割し、計 4 枚の矩形断層を設定して推定を行った。

各断層の走向は震源分布や矩形断層モデルを参考に固定した。滑り分布の推定にあたっては、Kobayashi et al. (2012) に倣い、各断層の傾斜角を 10° 刻みで変更して滑り分布を推定し、残差が最小となる組み合わせを最適解として採用した。特に、布田川断層帯の東側延長の断層 (A2) では北西及び南東傾斜の両方を考慮した。また、滑り角については、布田川断層帯 (A1) 及び日奈久断層帯 (B1, B2) では左横ずれは生じないとして拘束した。布田川東側延長部の断層 (A2) については滑り角の拘束はしていない。なお、日奈久断層帯の 2 枚の断層については、北側断層 (B1) と南側断層 (B2) の滑りが空間的に滑らかに接続するようにラプラスアンオペレータにより平滑化した。得られた結果を図-7 に示す。

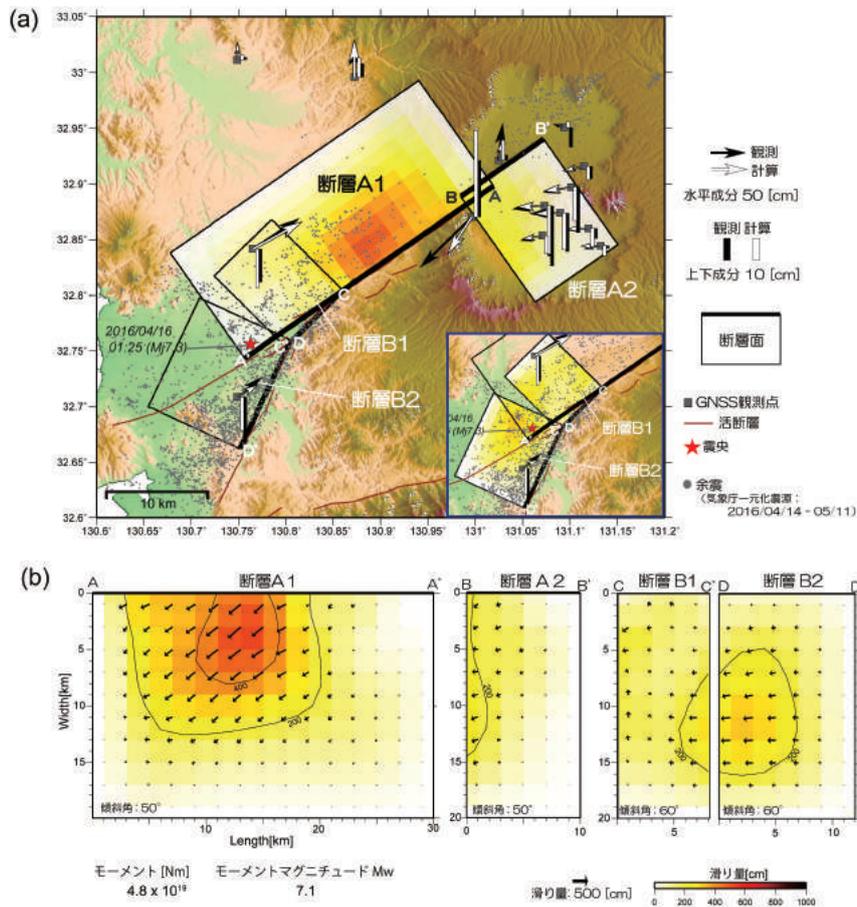


図-7 本震の滑り分布モデル (a)断層モデルの位置と GNSS データ (観測値・計算値), (b)推定された断層面上の滑り分布

布田川断層帯布田川区間に相当するA1断層では、布田川区間の中間付近の地表浅部から深さ数 km にかけての領域で最大約 5m の大きな滑りが推定された。正断層成分を有意に含む右横ずれ運動となっている。一方、深部や日奈久断層帯との接合域より西には顕著な滑りは見られない。布田川断層帯の東側延長の断層 (A2) は南東傾斜 (50°) が推定され、阿蘇カルデラの西縁付近に右横ずれ運動が推定された。日奈久断層帯の断層面 (B1 及び B2) では、震源 (深さ 12km) 近傍の深さ約 10km の領域に、右横ずれ運動の大きな滑りが推定された。滑り分布モデルから計算される地震規模は Mw7.1 であり、矩形断層モデルの結果と同様である。

4. まとめ

熊本地震の前震 (4月14日, M6.5 及び 4月15日, M6.4) 及び本震 (4月16日, M7.3) に伴う地殻変動に基づき、震源断層モデルの推定を行った。

前震については矩形断層で推定を行った。日奈久断層帯の高野一白旗区間に相当する位置に震源断層モデルが推定された。西に傾き下がる高角の右横ずれ断層が推定され、滑り量は約 1.1m、地震規模は Mw6.2 と推定された。

本震については矩形断層及び滑り分布モデルで推定を行った。布田川断層帯の布田川区間及びその東側延長、さらに日奈久断層帯の高野一白旗区間に相当する位置に震源断層が推定された。布田川区間に相当する断層面は北西傾斜、東側延長部は南東傾斜で、両者は直接連続していない。推定された断層滑りは右横ずれを示し、布田川区間では正断層成分を顕著に含んでいる。高野一白旗区間については、地震時の地殻変動や推定された滑り量等から、前震だけでなく、本震でも活動したと考えられる。滑り量は布田川区間で最も大きく、滑り分布モデルでは最

大よ 5m の滑りが推定された。推定された地震規模は Mw7.1 である。また、前震で活動した高野一白旗区間は、地震時の地殻変動や推定された滑り量等から、前震だけでなく、本震でも活動したと考えられる。

地殻変動から推定された断層変位や地震規模等は、本震については長期評価と概ね調和的である。一方、前震については断層変位方向は整合するものの、地震規模等は長期評価に比べて小さい。

これらの前震及び本震の震源断層モデルは、地震調査委員会や地震予知連絡会に報告され、熊本地震の地震活動の評価に活用された。

なお、本稿で推定した震源断層モデルは、前震については4月14日の M6.5 と4月15日の M6.4 の地震を合わせた地殻変動、また本震については4月16日の M7.3 の地震に加えて上記の前震2つを含んだ地殻変動から推定しており、複数の地震を含んだモデルとなっている。前震と本震の関係等、詳細な分析を行うためには、今後、それぞれの地震の地殻変動をより正確に求め、震源断層モデルの推定を行う必要がある。

謝 辞

本稿で使用いただいたいち2号の原初データの所有権は JAXA にあります。これらのデータは、いち2号に関する国土地理院と JAXA の間の協定及び地震 SAR 解析 WG の活動に基づき提供されたものです。また、気象庁の火山 GNSS 観測点及び防災科学技術研究所の GNSS 観測点のデータを解析に用いました。この場を借りて、御礼申し上げます。

(公開日：平成 28 年 12 月 28 日)

参 考 文 献

- Akaike H (1980): Likelihood and the Bayes procedure. In: Bernardo JM, DeGroot MH, Lindley DV, Smith AFM (eds) Bayesian Statistics. University Press, Valencia.
- Cervelli, P., M. H. Murray, P. Segall, Y. Aoki, and T. Kato (2001): Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 11217-11237.
- 藤原智, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 中埜貴元, 宇根寛, 宮原伐折羅, 仲井博之, 三浦優司, 上芝晴香, 攬上泰亮 (2016): だいち 2 号干渉 SAR による熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出, *国土地理院時報*, 128, 147-162.
- 畑中雄樹 (2011): GPS 統合解析技術の高度化 (第3年次), *国土地理院平成 23 年度調査研究年報*, 112-115.
- 檜山洋平, 川元智司, 古屋智秋, 甲斐玲子, 山口和典, 鈴木啓, 菅富美男, 嵯峨諭 (2016): GEONET による熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 128, 163-168.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013): 布田川断層帯・日奈久断層帯の長期評価 (一部改訂), 66p.
- Jonsson S, Zebker H, Segall P, Amelung F (2002): Fault slip distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California,

- earthquake, estimated from satellite radar and GNSS measurements. *Bull Seismol Soc Am* 92:1377-1389.
- Kawamoto, S., Hiyama, Y., Ohta, Y., Nishimura, T. (2016) : First Result from the GEONET Real-time Analysis System (REGARD): the Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 68: 190, doi: 10.1186/s40623-016-0564-4.
- Kobayashi T, Tobita M, Koarai M, Okatani T, Suzuki A, Noguchi Y, Yamanaka M, Miyahara B (2012): InSAR-derived crustal deformation and fault models of normal faulting earthquake (Mj7.0) in Fukushima-Hamadori area. *Earth Planets Space*, 64: 1209-1221, doi:10.5047/eps.2012.08.015.
- Kobayashi T (2016): Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (*M* j 6.5 and *M* j 6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, *Earth Planets Space*, doi 10.1186/s40623-016-0594-y.
- 中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯通堂亨, 石倉信広, 菅原安広 (2009) : GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, 118, 1-8.
- Okada Y (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace. *Bull Seismol Soc Am* 75:1135-1154.
- 上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅, 仲井博之, 本田昌樹, 攪上泰亮, 山下達也, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊 (2016) : だいち 2 号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, *国土地理院時報*, 128, 139-146.