

観測記録により推定された震源断層モデルに見られる特徴

CHARACTERISTICS OF THE SOURCE FAULT MODELS ESTIMATED BY OBSERVED DATA

引間和人^{*1}、三宅弘恵^{*2}

Kazuhito HIKIMA, Hiroe MIYAKE

We review source fault models of the foreshocks and mainshock for the 2016 Kumamoto earthquakes estimated from teleseismic, geodetic, and strong motion data. The characteristics of those source models are coincident with the most part. The models show that the main rupture propagate to the northeastward from the hypocenter along the Futagawa fault zone. The large slip area of the mainshock is estimated at the shallow part of the fault plane between about 10 to 25 km away from the rupture starting point. The relation between the rupture area and the seismic moment is basically consistent with the scaling relationship for crustal earthquakes in Japan. Furthermore, the stress drop of SMGAs, estimated by strong motion simulations, is almost the same as that for crustal earthquakes. These results indicate that the rupture process is not anomalous compared with the past crustal earthquakes.

1. はじめに

2016年熊本地震では4月16日1:25にM7.3の本震が、4月14日21:26にはM6.5の最大前震が発生し、いずれの地震でも震度7が観測された。これら以降も活発な地震活動が継続している。一方、この地震の震源域では布田川断層帯・日奈久断層帯の存在が知られており、今回の地震でも明瞭な地表地震断層が確認されている^{1,2)}。また、事前の活断層評価をもとに強震動評価も実施されており³⁾、熊本地震で実際に観測された地震動と対比し、予測結果に対する検証も行われつつある^{例えば4)}。これらの検討を進め、また、観測された大振幅の地震動および地震被害の要因を考察するためにも、規模の大きな地震について詳細な震源過程を知ることは重要である。

近年、国内ではK-NET、KiK-net等の強震観測網や地殻変動データの充実は目覚ましく、さらには汎地球的な地震観測データ等の流通も進み、大規模地震の発生後には間を置かずに震源過程解析の結果が公開されている。2016年熊本地震でも遠地地震波形や近地強震波形さらに地殻変動データなどの観測記録が多く得られ、これらを使った震源モデルが数多く公開されている。本稿では、学会や論文誌等で公開された震源モデルをレビューし、強震動との対応などの観点からそれらの特徴について考察する。なお、本震(M7.3)の震源モデルを中心に収集を行うが、M6.5の最大前震、4月15日0:03のM6.4の前震の震源モデルに関しても合わせて収集する。

2. 本震(M7.3)の震源断層モデル

まずははじめに本震(M7.3)の解析結果を収集する。通

常、地震発生後にはまず点震源としての解析が速報的に行われ、震源(破壊開始点)の位置、メカニズム解の推定結果が公表される。その後、規模が大きな地震では地殻変動データを用いた断層面の推定や地震波形を使った断層面上でのすべり分布の推定が行われる。以下では、これらの解析結果を順に示す。

2.1 点震源としての解析結果

本震のメカニズム解として、遠地波形を用いて決定されたCMT解(Global CMT Project⁵⁾、USGS[W-phase]⁶⁾および日本国内の広帯域地震波形を使って決められたモーメントテンソル解(F-net⁷⁾、気象庁⁸⁾)、さらに初動の押し引き分布から決められた発震機構解⁹⁾を表1に示す。求まった地震モーメントはほぼ同じ値であり、モーメントマグニチュードは7.0~7.1である。いずれの解も横ずれ成分が主体であるが正断層成分も多く含んでいる。余震分布や地表地震断層の走向を考慮すると、北東~南西方向の節面が断層面に相当することから、右横ずれ成分が卓越していることがわかる。

傾斜角は、国内のデータから求められた解^{7,8)}では鉛直に近い値が求まっているが、遠地波形による解⁹⁾ではそれよりも低角で北西に傾斜した面が想定される。一方、走向に関しては、モーメントテンソル解^{5,6)}では222~226°の概ね北東~南西であるが、初動発震機構解⁹⁾は193°と、北~南に近い値である。これらのことから、破壊開始点付近と主要な破壊を生じた断層とは走向が異なることが推定される。次節以降の断層モデルでは、これらの特徴も考慮して断層面が設定されている。

^{*1} 東京電力ホールディングス

Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

^{*2} 東京大学

The University of Tokyo

表1 熊本地震・本震のメカニズム解

	(Str, Dip, Rake) (°)	M_0 (N·m)	M_w	
GCMT ⁹	(128, 71, -14) (222, 77, -161)	4.51×10^{19}	7.0	
USGS ¹⁰ (W-phase)	(122, 64, -27) (224, 66, -152)	4.66×10^{19}	7.0	
E-net ¹¹	(131, 53, -7) (226, 84, -142)	4.42×10^{19}	7.1	
JMA ¹² (CMT)	(312, 87, 5) (222, 85, 177)	4.06×10^{19}	7.0	
JMA ¹³ (初動解)	(100, 71, -7) (193, 84, -161)	—	(Mj7.3)	

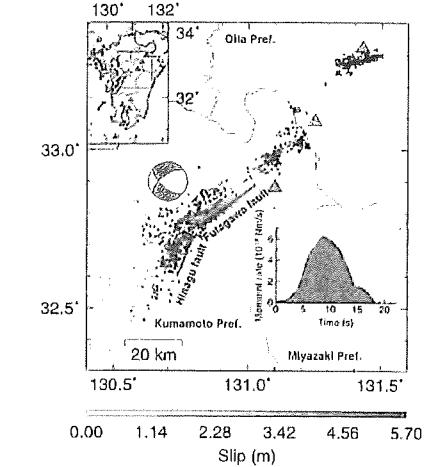
2.2 遠地波形によるインバージョン結果

本震の震源断層モデルとして、IRISにより公開されている広帯域地震記録を用いたインバージョン結果をまとめて示す^{14) 15) 16)}。表2には収集した断層モデルの主な諸元をまとめ、図1に断層面上でのすべり分布を示した。遠地波形を用いた解析では、観測波形の短周期成分が減衰しているため詳細なすべり分布を推定することは難しいが、震源過程を概観できる結果が安定して求められる。

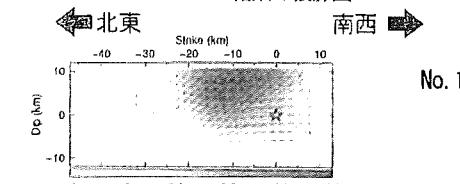
ここに示す3つのモデルはいずれも1枚の断層面を仮定しており、それらの走向、傾斜も概ね一致している。断層面の傾斜角は65°程度で北西に傾斜し、同様に遠地波形を用いて推定されたメカニズム解に近い値である。いずれの結果でもすべり量が大きな領域は、破壊開始点から北東側にかけて25km程度の範囲の浅部に推定されており、unilateral的な破壊過程であったことがわかる。また、すべり方向を見ると、右横ずれ成分だけでなく正断層成分も多く含まれていることも共通の特徴である。

2.3 強震波形・測地データによるインバージョン結果

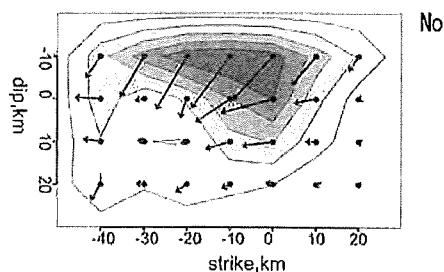
次に、強震波形や測地データ等の震源域近傍の観測記録を用いたインバージョンにより推定された震源断層モデルを示す^{17)~20)}。表3には収集した断層モデルの諸元と解析の際に設定したパラメータの一部をまとめた。ここ



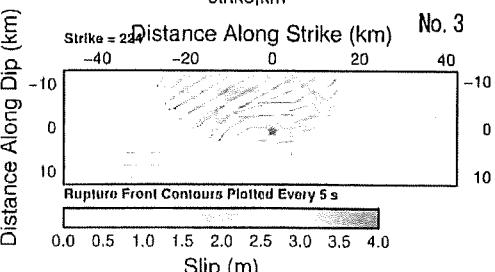
No. 1 の結果の投影図



No. 1



No. 2



No. 3

図1 遠地波形による本震の震源断層モデル
(各モデルの番号は表2に対応)

表2 遠地波形を用いた解析による本震の断層モデルの諸元

No.	解析者	データ	長さ×幅 (km)	(Str, Dip) (°)	M_0 (N·m)	M_w	最大すべり (m)	V_{ave} (km/s)
1	Yagi <i>et al.</i> ¹⁰⁾	遠地波形 (実体波)	40×15 (58×20) ^a	(234, 64)	5.1×10^{19}	7.0	5.7	2.4
2	伊藤 ¹¹⁾	遠地波形 (実体波)	70×40	(235, 67)	5.7×10^{19}	7.1	—	—
3	USGS ¹⁰	遠地波形 (実体波, 表面波)	90×27	(224, 66)	4.7×10^{19}	7.0	—	—

^a 解析の際に設定した断層面サイズ

表3 強震波形・測地データを用いた解析による本震の断層モデルの諸元

No.	解析者	データ	長さ×幅 (km)	(Str, Dip) (°)	M_h (N·m)	M_w	最大すべり (m)	対象周波数 (Hz)	V_{fes} (km/s)
4	国土地理院 ¹³⁾	測地 (GNSS, InSAR)	5.1×6.6; 20.0×12.5; 10.2×13.0	(56, 62); (235, 69); (205, 72)	5.1×10^{19}	7.1	4.1	—	—
5	Asano and Iwata ¹³⁾	近地強震波形 (理論的GF)	42×18	(235, 65); (205, 72)	4.5×10^{19}	7.0	5.1	0.05-0.5	2.4
6	Kubo et al. ¹⁴⁾	近地強震波形 (理論的GF)	54×24 ^{a)}	(224, 75); (235, 65); (215, 74) ^{a)}	5.5×10^{19}	7.1	3.8	0.05-1.0	2.6
7	吉田・他 ¹⁵⁾	近地強震波形 (理論的GF)	44×18 ^{a)}	(220, 65); (236, 65); (226, 77); (205, 72)	4.8×10^{19}	7.1	5.2	0.05-1.0	2.2
8	弓間 ¹⁶⁾	近地強震波形 (理論的GF)	44×20 ^{a)}	(233, 75); (193, 78)	4.7×10^{19}	7.0	3.5	0.05-0.8	2.7
9	気象庁 ¹⁷⁾	近地強震波形 (理論的GF)	52×20	(235, 60)	7.6×10^{19}	7.2	5.7	0.05-0.2	2.2
10	小林・他 ¹⁸⁾	近地、遠地、測地	54×16.5	3枚の平面で構成	4.6×10^{19}	7.0	8.3	—	—
11	芝 ¹⁹⁾	近地強震波形 (経験的GF)	40×18	(235, 60); (205, 70)	4.2×10^{19}	7.0	5.3	0.1-5.0	—
12	野津 ²⁰⁾	近地強震波形 (経験的GF)	40×20	(232, 84)				0.2-2.0	2.1

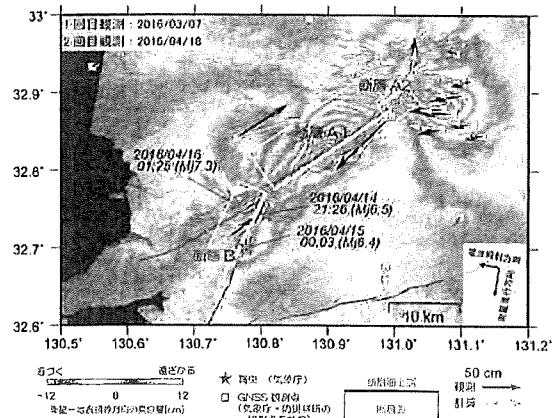
^{a)} 断層面は曲面として設定, ^{b)} 予備的解析の断層面サイズ

で、走向・傾斜 (Str, Dip) の値が複数あるものは、複数のセグメントで断層面が構成されているモデルであり、表3では北東側のセグメントから順に値を記した。また、 V_{fes} はマルチタイムウインドウ法による解析において、第一タイムウインドウの伝播速度の設定値である。

図2には、SAR (だいち2号) およびGNSSで観測された地殻変動を解析した結果による断層モデル¹²⁾を示す。布田川断層帶では北西傾斜の断層面とその東側延長に南東傾斜の断層面、日奈久断層帶では北西傾斜の断層面で、それぞれ右横ずれ的な動きが推定されている。なお、だいち2号のデータを使った解析により、右横ずれの断層面に加えて、阿蘇外輪山の南西側に正断層の面が存在する断層モデルを推定した結果もある²¹⁾。

図3には、主に強震波形を用いた解析結果^{[13]~[20]}の断層面上のすべり分布を、一部のモデルについては図4に地表への投影図を示した。No. 5~No. 9の5モデルはK-NET, KiK-net等の強震波形に対して、1次元水平成層モデルを仮定して計算した理論的グリーン関数を用いてインバージョンを行った結果である。No. 10では強震波形に加えて、遠地実体波、測地データもジョイントしてインバージョンを行っている。No. 11~12は強震波形を用いたインバージョンであるが、小地震観測記録を経験的グリーン関数として解析している。

図1に示した遠地波形を用いた解析結果に比べると、より詳細な震源象が得られていることがわかる。断層面に関しても、地表地震断層の出現位置や余震分布などを考慮して複数枚を設定しているものが多い。大まかな特徴としては、遠地波形の結果と同様に破壊開始点より北東側に向かってすべりが進展した様子が推定されている。

図2 測地データによる本震の震源断層モデル¹²⁾

が、震源から北東に10~25km程度の位置の浅部の狭い範囲で特にすべり量が大きく求まっている。すべり方向は正断層成分が多く含む横ずれ成分が卓越している。断層の北東端の位置は、解析者によって仮定する断層面のサイズが異なるものの、すべり量が大きな部分は阿蘇カルデラの南西側の外輪山付近までで、カルデラの中央部には延びていないように見える。

得られた結果の主要な特徴は概ね一致しているが、細部では断層モデル間での相違も見られる。また、最大すべり量もかなり大きくなっているが、一方で地震モーメントの差はそれほど大きくはない。このような相違は、震源インバージョン手法や解析に用いる観測記録の違い、すべり量については、地震モーメントとすべり量を換算するときに仮定する地盤の剛性率の設定値などの影響と考えられる。

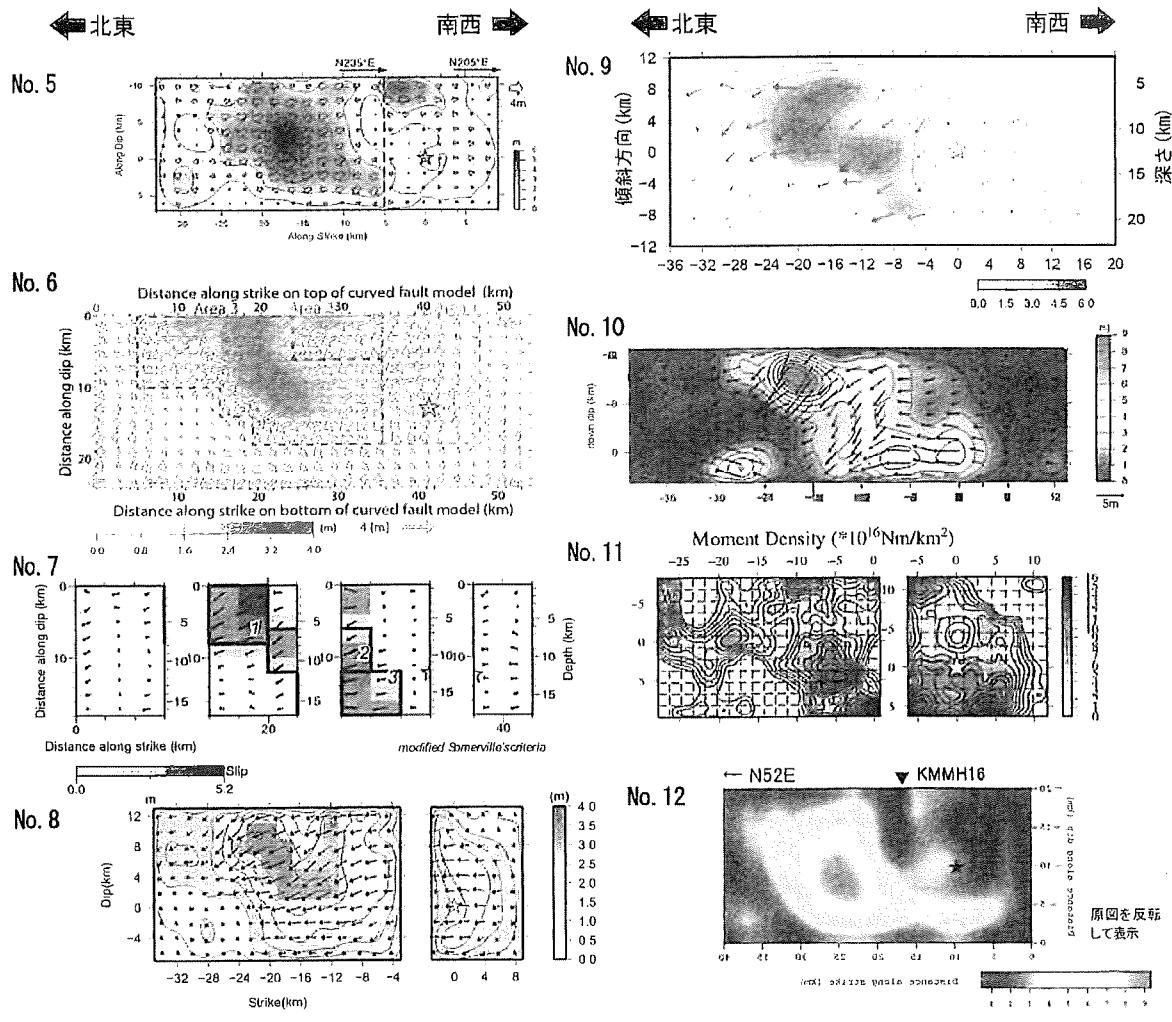


図3 強震波形による本震の震源断層モデル（各モデルの番号は表3に対応）

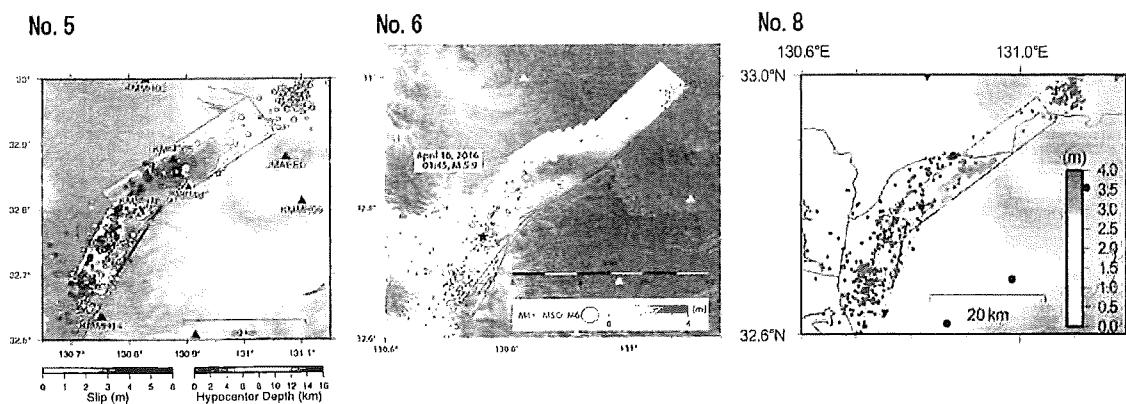


図4 本震の震源断層モデルの地表面への投影図（各モデルの番号は表3に対応）

2.4 強震動シミュレーションによる震源断層モデル

震源インバージョンにより断層面上での不均質すべり分布が求まるが、そこで対象とする周波数は 0.5 ないし 1.0 Hz 以下である。そのため、強震動との対応を考えるために、強震動生成域 (SMGA: Strong Motion Generation Area) に注目した検討も行われている。

そのような震源断層モデルとして、表 4 および図 5 に 2 つのモデル^{22) 23)}を示した。これらの解析では、既存の震源インバージョン結果を参考にいくつかの SMGA を仮定し、経験的グリーン関数法により波形合成を行う。そして、観測波形との一致度を考慮して、SMGA の面積および応力降下量(比)を推定している。

これらのモデルの特徴は概ね一致している。いずれも 3 か所の SMGA を設定し、1 つは日奈久断層帶沿いに、2 つは布田川断層帶沿いに位置している。布田川断層帶側では、震度 7 を観測した益城町の近傍にやや小さな SMGA を、そして、インバージョンで大きなすべりが求まった付近に、より大きな SMGA が推定されている。SMGA の総面積や応力降下量はほぼ同じ値である。これらは過去の内陸地震で推定された値と同程度である。

2.5 震源断層モデルの特徴と強震動との関係

熊本地震の本震の震源断層モデルを概観して改めて主な特徴をまとめておく。

断層面の形状としては布田川断層帶および日奈久断層帶に沿った、2 枚またはそれ以上の複数の面を仮定しているモデルが多い。破壊開始点は日奈久断層帶側に位置しているが、最大すべりは布田川断層帶の断層面上の破壊開始点から北東側に 10~25km 程度離れた場所で生

じており、破壊は主に北東側に伝播したと推定される。主要な破壊は阿蘇カルデラの中心部には及んでおらず、外輪山付近で破壊は停止したように見える²⁴⁾。インバージョンにより大きなすべり量が推定された範囲と明瞭な地表地震断層が確認された地点は概ね対応している。

本震では益城町および西原村の震度計で震度 7 に達する地震動が観測されている。益城町では 1 Hz 程度の地震動が卓越したのに対して、西原村では最大速度で 250 cm/s を超える長周期パルスが卓越する波形であった。大振幅の地震動と震源過程との関連を検討する際に、フォワードディレクティビティ効果に注目されることが多い。しかし、震源インバージョン結果を見ると、これらの地点は震源から見ると大すべり域の手前に位置しており、ディレクティビティが大きく影響する地点では無い。西原村は比較的大すべり域に近いが、現在の震源モデルでは観測された振幅を十分に説明することはできていない(例は^{13) 16)})。益城町での強震動に関しては、強震動シミュレーションによる震源モデルでは、直下に SMGA を推定することで、観測された主要動の部分は説明可能であるとされている^{22) 23)}。インバージョン結果でもこの付近で相対的に大きなすべり量が推定されている結果はあり^{13) 16) 18)}、最終すべり量はそれほど大きくはないが、短周期成分を比較的多く放出するような破壊があった可能性がある。なお、応力降下量は過去の内陸地震の平均的な値と同程度であり^{22) 23)}、この地震が特に大きな地震動を放出したとは考えられていない。

ここで挙げた本震の震源断層モデルに関しては、主な特徴は概ね一致しており、大局的な震源過程は把握できているものと思われる。しかし、益城町や西原村での

表 4 強震動シミュレーション解析による本震の断層モデルの諸元

No.	解析者	データ	SMGA の数	総面積 (km ²)	$\Delta\sigma$ (MPa)	対象周波数 (Hz)	V _r (km/s)
13	染井・他 ²²⁾	近地震波形	3	203.6	13.4, 13.4, 13.4	0.2-10.0	2.8
14	佐藤 ²³⁾	近地震波形	3	276.58	12.6, 15.8, 7.9	0.2-10.0	3.0

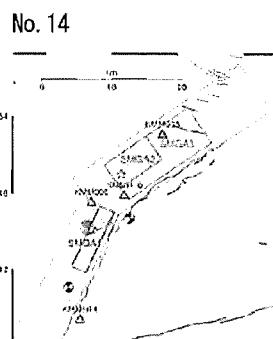
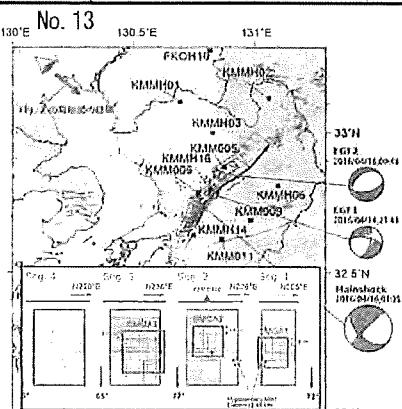


図 5 強震動シミュレーションによる本震の震源断層モデル（各モデルの番号は表 4 に対応）

大振幅の地震動に対しては、地盤構造等の影響も考慮する必要はあるが、震源断層モデルとして十分に説明するに至っていない。これらは震源のごく近傍の地点であり、観測された地震動を説明するためには、よりローカルな震源過程を考慮する必要があるのかもしれない。

3. 前震の震源断層モデル

4月14日21:26のM6.5の地震、および4月15日0:03のM6.4の震源断層モデルについても収集を行った。

3.1 最大前震(M6.5)の震源インバージョン結果

最大前震(M6.5)の震源断層モデルについて、主要なパラメータと断層面上でのすべり分布を表5および図6に示す^{13) 14) 16) 19)}。これらのモデルでは断層面の設定にF-netのメカニズム解を参照しているため、ほぼ同じような形状である。走向は日奈久断層帶に沿い、傾斜角はほぼ鉛直の平面が設定されている。ただし、モデルD¹⁹⁾では北部で布田川断層帶の走向に近い面が仮定されている。

すべり分布を見ると破壊開始点付近で最大のすべりを生じており、北側の浅部でも比較的大きなすべりが求まっている。南西側でもやや大きなすべりが見られる結果もある。観測波形には少なくとも2つの波群が見られるものが多く^{例えば16)}、複雑な震源過程が推定される。

最大前震ではKiK-net益城(KMMH16)の地表観測点で1580cm/s²の大加速度が記録され、益城町役場の震度計では震度7が観測された。この原因として、断層北端付近の浅部の大きなすべりが益城町に近かったこと、さらに、震源付近の破壊域からの地震波のフォワードディレクティビティ効果が重なった影響が指摘されている¹⁴⁾。

表5 最大前震(M6.5)の震源断層モデルの諸元

No.	解析者	データ	長さ×幅 (km)	(Str, Dip) (°)	M ₀ (Nm)	M _w	最大すべり (m)	対象周波数 (Hz)	V _{ave} (km/s)
A	Asano and Iwata ¹³⁾	近地強震波形 (理論的GF)	14×13	(212, 89)	2.0×10 ¹⁸	6.1	1.2	0.05-1.0	2.2
B	Kubo <i>et al.</i> ¹⁴⁾	近地強震波形 (理論的GF)	22×14	(212, 89)	1.7×10 ¹⁸	6.1	0.7	0.1-1.0	2.5
C	引間 ¹⁶⁾	近地強震波形 (理論的GF)	18×16	(220, 89)	2.3×10 ¹⁸	6.2	0.7	0.05-0.8	2.4
D	芝 ¹⁹⁾	近地強震波形 (経験的GF)	7.2×12.6; 11.4×13.3	(225, 87); (215, 80)	1.7×10 ¹⁸	6.1	0.6	0.1-5.0	---

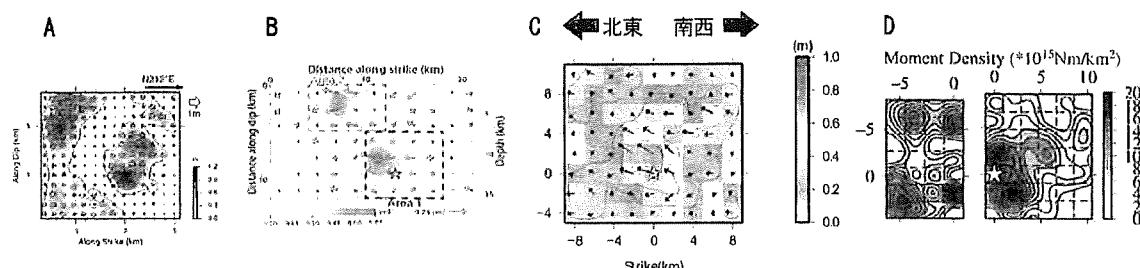


図6 震源インバージョンによる最大前震(M6.5)の震源断層モデル（各モデルの番号は表5に対応）

3.2 前震(M6.4)の震源インバージョン結果

最大前震の約2.5時間後の4月15日0:03に発生したM6.4の地震についてもいくつかインバージョン解析が行われており、その結果を表6および図7に示す^{19) 25)}。

この地震の走向・傾斜は最大前震のものと近い値である。震源は最大前震の震源より南の浅部にある。ここに示した震源モデルでは、若干印象が異なるが、ともに震源から南西側の浅部に破壊が広がっている。最大前震に比べると破壊は単純であり、震源時間関数も短い²⁵⁾。最大前震では破壊開始点から主に北東側に破壊が伝播し、M6.4の地震は反対側の南西側の領域を破壊したとすれば、一連の活動と考えることができるかもしれない。

4. 熊本地震から考える地震動予測への課題

一連の熊本地震では数多くの観測記録が得られ、それらから推定される震源断層モデルは、主要な特徴に関しては概ね一致した結果が得られている。一方で、震源ごく近傍で観測された地震動に対しては、推定された震源モデルでも再現は十分ではなく、より詳細なモデルの検討が必要である。

そのような検討の一例として、複数の解析結果で指摘されているように^{例えば15) 16)}、断層面上の最終すべり量分布に注目するだけでなく、すべり速度時間関数と強震動との関係についても定量的な検討を行うことも有効と思われる。図8は震源インバージョンによって得られた本震のすべり速度時間関数の例¹⁶⁾であるが、時間幅や最大速度が断層面上で大きく変化していることがわかる。例えれば、益城町の直下に相当する北側断層の南側付近(Bの範囲)では時間幅が短いことから、短周期成分を大きく

表 6 前震(M6.4)の震源断層モデルの諸元

No.	解析者	データ	長さ×幅 (km)	(Str, Dip) (°)	M_0 (N·m)	M_w	最大すべり (m)	対象周波数 (Hz)	V_{fw} (km/s)
E	引間 ²⁹⁾	近地強震波形 (理論的GF)	12×10	(211, 89)	1.2×10^{18}	6.0	0.8	0.05-0.8	2.4
F	芝 ¹⁹⁾	近地強震波形 (経験的GF)	16.1×16.1	(211, 86)	1.1×10^{18}	6.0	0.3	0.1-5.0	—

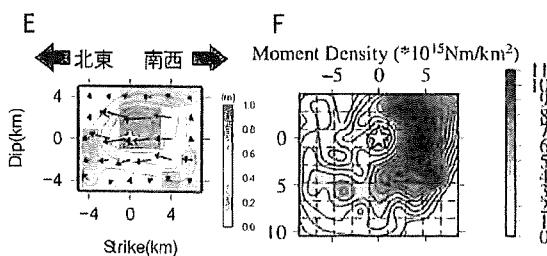
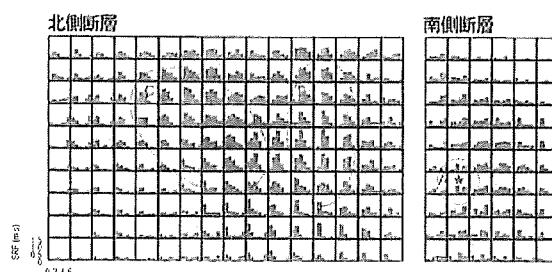


図 7 前震(M6.4)の震源断層モデル

放出した可能性がある。一方で、断層の浅部では時間幅が長く、最大速度は相対的に小さいことから、短周期成分の放出は少ないが、最終すべり量は大きいと解釈するともできる。地震動予測精度の向上のためには、震源での時間変化に関する情報についても整理が望まれる。

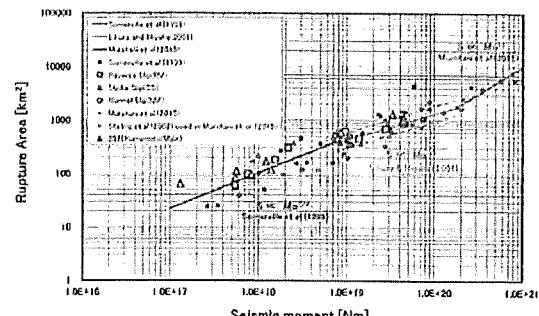
なお、震源インバージョンの解析での技巧的な課題とも言えるが、震源ごく近傍の地震動との関連を考慮するためには、解析の時の断層面浅部の扱いについて注意を要する。地震発生層よりも上部には断層面を仮定しない場合もあるが、震源近傍の地震動を考える上では、地震発生層よりも浅部から生じる地震動の性状についても検討事例を増やす必要があろう。

最後に、熊本地震と内陸地殻内地震のスケーリング則の関係について簡単に触れておく。地震モーメントは強震動予測を行う際の基本となるパラメータであり、震源の破壊面積と地震モーメントとの関係を整理してこれらのパラメータ間の関係式が作られている²⁶⁾。熊本地震の本震の地震波形のインバージョン解析よって得られた震源断層モデルの断層面積と地震モーメントの関係を既存の関係式²⁶⁾と比較すると、良く一致している²⁷⁾²⁸⁾(図9)。このことから、熊本地震の震源パラメータは、これまで知られている内陸地殻内地震のスケーリング則と比較しても特異なものでは無かったと言える。

図 8 本震時の断層面上でのすべり速度時間関数¹⁶⁾

なお、熊本地震で得られた震源パラメータからスケーリング則²⁶⁾により地震モーメントを求めるとき実際の値よりも過小評価になるとの指摘がある²⁹⁾。さらに、事前に知られている活断層の長さからスケーリング則²⁶⁾で地震規模を推定すると、実測より地震規模が小さいとの報告もある²⁸⁾。しかし、実際には前述のように関係式²⁶⁾は熊本地震に対しても有効である。

但し、断層長さをもとに関係式²⁶⁾を適用するためには断層幅を仮定する必要があるが、熊本地震のインバージョン解析から推定される断層幅は、事前に地震発生層から予測された値よりも広いものであった。このために、予測される地震規模と実際の規模とが乖離したものと考えられている²⁸⁾。これらは、スケーリング則自体の問題ではなく、活用方法の課題と言える。容易に結論が出せることではないが、今後も広く議論が必要であろう。

図 9 断層面積-Mo とスケーリング則との比較(本震)²³⁾

5. まとめ

本報告では、熊本地震の本震および前震の震源断層モデルを収集し、それらの比較検討を行った。本震ではいずれの震源モデルも主要な特徴は概ね一致していることが確認された。また、断層面積と地震モーメントとの関係や SMGA での応力降下量は過去の内陸地殻内地震の値と概ね整合しており、今のところ、震源特性として特異なものは見られない。一方で、これらの震源モデルでも震源近傍で観測された地震動を十分説明するには至っておらず、震源近傍での強震動との関係を検討するためには、さらに検討を継続する必要がある。

謝辞

原稿の作成にあたり、電力中央研究所 芝良昭氏、地域地盤環境研究所 吉田邦一氏、染井一寛氏より、日本地

震学会 2016 年度秋季大会でのポスター発表資料を提供頂きました。ここで収集した震源モデルの多くは、気象庁一元化震源や防災科学技術研究所 K-NET、KiK-net、気象庁、熊本県による強震記録等を使用した解析結果です。関係諸機関に感謝致します。

参考文献

- 1) 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), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/93_futagawa_hinagu_2.pdf, 2013.
- 2) 吉見雅行, 白濱吉起, 丸山正, 栗田泰夫, 宮下由香里: 2016 年熊本地震の地表地盤断層と活断層の長期評価, 第44回地盤震動シンポジウム資料, pp.11-17, 2016.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 全国地震動予測地図, pp.43-50, 2010.
- 4) 森川信之, 藤原広行, 岩城麻子, 前田宜浩: 長期評価に基づく震源断層モデルと強震動予測, 第44回地盤震動シンポジウム資料, pp.18-25, 2016.
- 5) Global CMT Web Page: <http://www.globalcmt.org/>, 2016.
- 6) USGS Earthquake Hazards Program: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20005iis#executive>, 2016.
- 7) F-net: <http://www.fnet.bosai.go.jp/>, 2016.
- 8) 気象庁 CMT 解: <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/cmt201604.html>, 2016.
- 9) 気象庁初動発震機構解: <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/ini/mc201604.html>, 2016.
- 10) Yagi, Y., R. Okuwaki, B. Enescu, A. Kasahara, A. Miyakawa, and M. Otsubo: Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano, *Earth, Planets and Space*, 68:118, doi:10.1186/s40623-016-0492-3, 2016.
- 11) 山中佳子: 4月16日熊本地震(M7.3), NGY 地震学ノート, No.60, http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2016/NGY60.html, 2016.
- 12) 国土地理院: 平成28年熊本地震の震源断層モデル(暫定), <http://www.gsi.go.jp/common/000140781.pdf>, 2016.
- 13) Asano, K., and T. Iwata: Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, 68:147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
- 14) Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi: Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from the strong-motion waveforms, *Earth, Planets and Space*, 68:161, doi:10.1186/s40623-016-0536-8, 2016.
- 15) 吉田邦一, 宮腰研, 染井一寛: 強震記録から求めた2016年熊本地震(M7.3)の運動学的震源モデル(その2), 日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会, S15-P02, 2016.
- 16) 引間和人: 強震波形を用いた 2016 年熊本地震の本震・前震の震源過程解析, 日本地震工学会・大会-2016 梗概集, P4-17, 2016.
- 17) 気象庁: 2016 年4月 16 日 熊本県熊本地方の地震—近地強震波形による震源過程解析(暫定)ー, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/20160416near.pdf>, 2016.
- 18) 小林広明, 繁顕一起, 三宅弘恵: 強震、遠地、測地データのジョイントインバージョンによる 2016 年熊本地震の震源過程, 日本地震惑星科学連合 2016 年大会, MIS34-P65, 2016.
- 19) 芝良昭: 経験的グリーン関数法による 2016 年熊本地震の本震および前震の震源モデル, 日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会, S21-P01, 2016.
- 20) 野津厚: 2016 年熊本地震(本震)の震源モデル(第二版), http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2016/jr_47.html, 2016.
- 21) Himematsu, Y., and M. Furuya: Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: evidence for dynamic slip partitioning, *Earth, Planets and Space*, 68:169, doi:10.1186/s40623-016-0545-7, 2016.
- 22) 染井一寛, 吉田邦一, 宮腰研: 経験的グリーン関数法を用いた 2016 年熊本地震の震動シミュレーション, 日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会, S21-P06, 2016.
- 23) 佐藤智美: 経験的グリーン関数法に基づく熊本地震の強震動生成域の推定, 日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会, S21-P01, 2016.
- 24) Lin, A., T. Satsukawa, M. Wang, Z. Mohammadi Asl, R. Fueta, F. Nakajima: Coseismic rupturing stopped by Aso volcano during the 2016 M_w 7.1 Kumamoto earthquake, Japan, *Science*, doi:10.1126/science.aah4629, 2016.
- 25) 引間和人: 強震波形を用いた 2016 年熊本地震の震源過程解析～M 6 以上の 3 地震の解析結果～, 日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会, S21-P03, 2016.
- 26) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875, 2001.
- 27) Irikura, K., K. Miyakoshi, and S. Kurahashi: Methodology of simulating ground motions from crustal earthquake and mega-thrust subduction earthquakes: Application to the 2016 Kumamoto earthquake (crustal) and the 2011 Tohoku earthquake (mega-thrust), 5th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 2016.
- 28) 繁顕一起: 「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」と熊本地震, 日本地震学会講演予稿集 2016 年度秋季大会, S15-06, 2016.
- 29) 島崎邦彦: 最大クラスではない日本海「最大クラス」の津波, 科学, 86, No.7, pp.653-660, 2016.

S15-P02

強震記録から求めた2016年熊本地震(Mj7.3)の運動学的震源モデル(その2) #吉田邦一・宮腰研・染井一寛(地域地盤環境研)

**Kinematic Source Model of the 2016 Kumamoto Earthquake (Mj7.3)
Inverted from Strong-Motion Records (ver. 2)**
#Kunikazu Yoshida, Ken Miyakoshi, and Kazuhiro Somei (GRI)

■はじめに 2016年熊本地震(Mj7.3)では、震源近傍で多くの強震動記録が観測された。この地震では、主に布田川断層ないしは地表地震断層が出現したことが多くの研究者により報告されており、前報(吉田・他, 2016, JGU)では、主要なすべりの見られた布田川断層に沿つて断層面を設定したもの、断層面の南北西側の観測点での記録の再現性に問題があった。本報では、日奈久断層にも沿つて断層面を設定し、速度構造モデルを改良して解析した結果を報告する。

■断層面の設定 断層面の設定では、既存の活断層情報(例えば、産総研活断層DB)や、地震直後の地表地震断層の調査結果を参考に、布田川断層および日奈久断層に沿うように、走向の変化を加味して3枚からなる断層面を設定した。断層の長さは、トリミングを前提に、東西に若干延長した。

■観測データ 防災科学技術研究所K-NETおよびKiK-netの22観測点の加速度記録を用いた。KiK-netについては、地中記録を用いて非線形応答の影響を少なくしている。

■速度構造モデル グリーン関数の計算に用いた速度構造モデルは、K-NETおよびKiK-netのPS検層、J-SHISの各観測点直下の構造モデル、および地殻+上部マントル構造モデルをつないで作成した。地殻+上部マントル構造モデルには、1次元モデルを仮定した。震源域およびその周辺で発生した余震のP波、S波を読み取り、気象庁一元化震源位置および発震時から計算される理論走時との差が小さくなるように、焼きなまし法で各層のP波、S波速度および観測点補正値を求めて、それをもとに設定した。

■震源モデルの逆解析

Hartzell and Heaton, 1983)により求めた。断層面上のすべりは、空間方向には走方向 $4\text{ km} \times \text{傾斜方向 } 2\text{ km}$ の小断層に、時間方向には $0.9\text{ 秒間隔に並べた幅 } 1.8\text{ 秒の } 7\text{ つのスムーズドランプ} \times \text{列数} \times \text{離散化して表現した。観測加速度記録は積分して速度波形(周$ 期 $0.05\sim0.5\text{ 秒})$ として、主要動を含むようP波から30秒を解析対象とした。すべり量を平滑化するハラメータおよび第1タイムウインドウの伝播速度 V_{FT} は、ABIC最小となるものを選択した。 V_{FT} は 2.8 km/s が最小値を示した。

■結果 得られた断層面の最終すべり分布およびモーメントレートを図1に示す。

Somerville et al. (1999)の基準でトリミングすると、南西端の4kmがトリミングされる。また、アスペリティは、主に布田川断層西端の浅部に同定され、その大きさは長さ $20\text{ km} \times \text{幅 } 10\text{ km}$ である。なお、日奈久断層(図1中Hセグメント)北東端にてもある程度すべりがみられる。すべり時間関数は、浅部(図1中1の領域)で継続時間が長いが、深部(図1中2の領域)では、Kostrov的であり、継続時間が短い、浅部で継続時間が長く、深部で短い傾向は、2008年岩手・宮城内陸地震(吉田・他, 2015)や、2014年長野県・北部地震(例えば、引間・他, 2015)など類似の傾向を示している。

謝辞 防災科学技術研究所K-NET, KiK-netの記録を使用しました。本研究は、平成28年度原子力施設等防災対策委託(地盤動評価における不確かさの評価手法の検討)事業による成果の一節である。

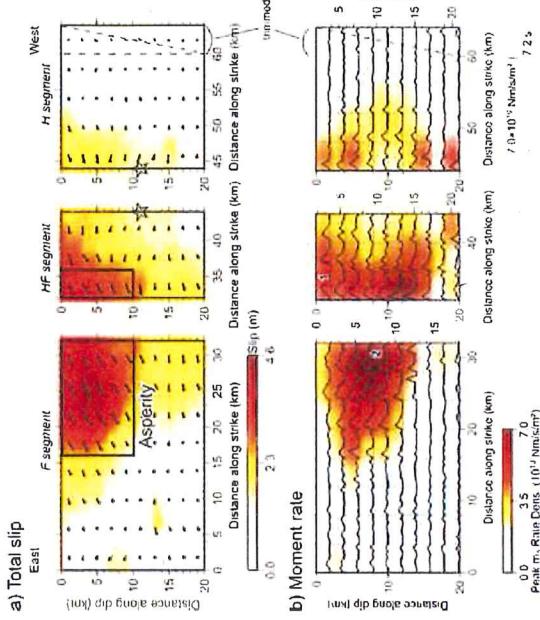


図1 解析で得られた震源モデル。(a)すべり分布、(b)すべり時間関数。図中1, 2は本文を参照。

平成28年4月16日の熊本県熊本地方の地震 (Mj7.3) 震源断層モデル (暫定)

GNSSで観測された地殻変動から、東北東—西南西走向の北側に傾き下がる断層が右横ずれ的に動いたと推定される。

基準期間： 2016/04/15 03:00 — 23:59 (Q3解)
比較期間： 2016/04/16 02:00 — 05:59 (S3解)

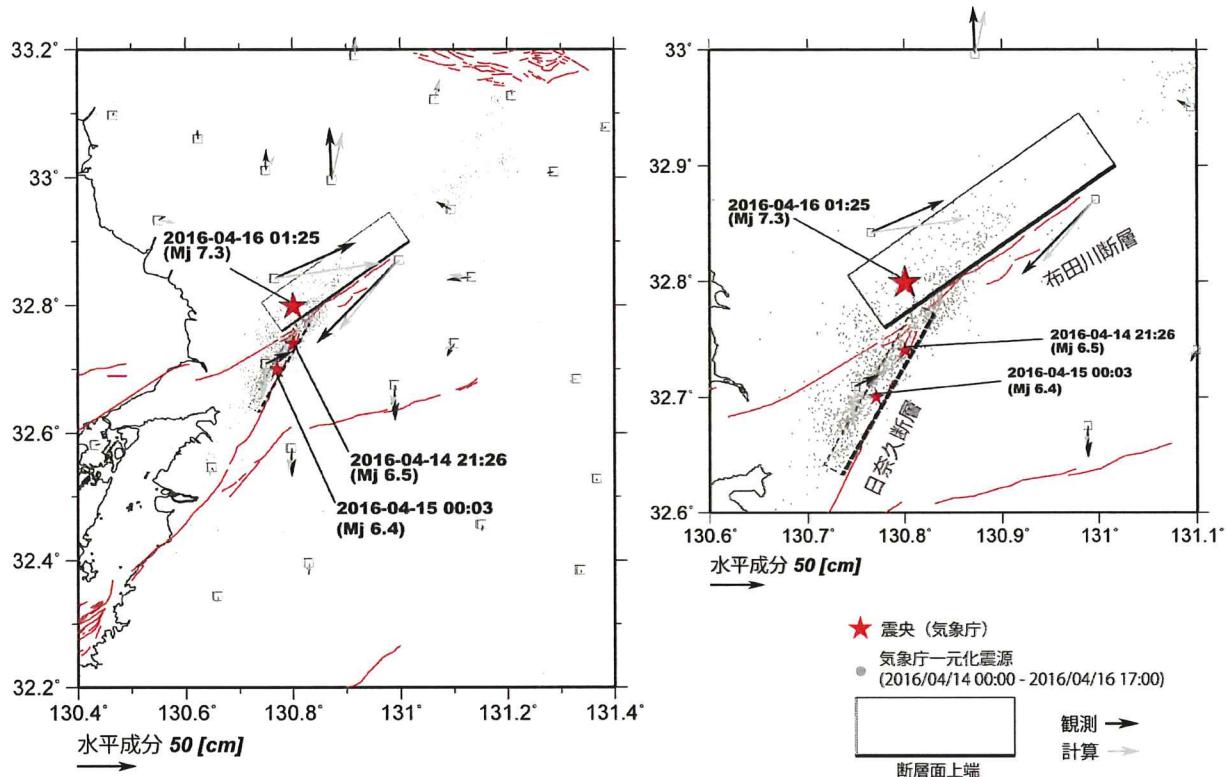


図1 震源断層モデル (左) 広域図 (右) 拡大図

※1 地殻変動には余震の影響も含まれる。

※2 点線で示す断層モデルは4月14日(Mj6.5)の地震で推定されたモデル

推定された震源断層モデルパラメータ

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
131.017	32.900	0.1	27.1	12.3	235	60	-161	3.5	7.0

※位置は断層の左上端

上下動成分との比較

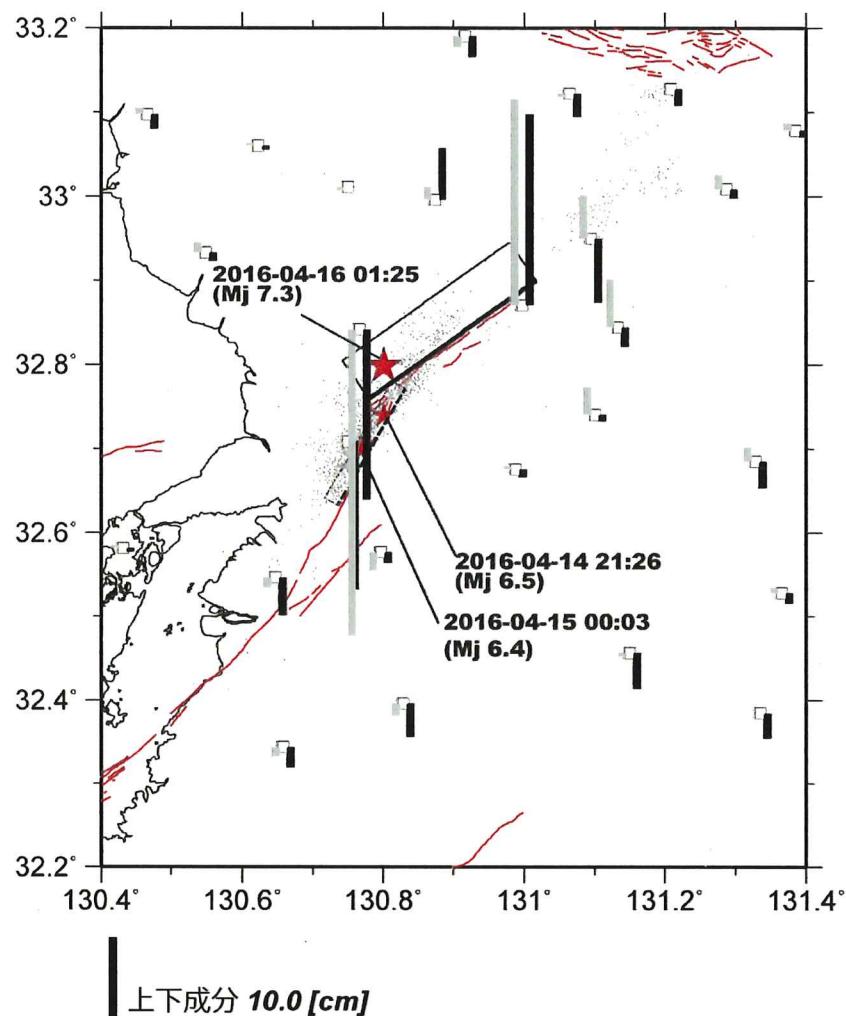


図2 震源断層モデル（観測データ：上下動）

※1 地殻変動には余震の影響も含まれる。

※2 点線で示す断層モデルは4月14日(Mj6.5)の地震で推定されたモデル