

第1章 地震

1.1 主な地震の概要*

2016年4月14日21時26分(日本時間)、熊本県熊本地方を震源とするM6.5の地震が発生し、熊本県益城町で震度7を観測した。その約28時間後の4月16日01時25分、同じ熊本県熊本地方を震源とするM7.3の地震(以下「本震」という。)が発生し、熊本県西原村と熊本県益城町で震度7を観測した。このように、一連の地震活動のうちに2度も震度7が観測されたのは、気象庁の観測史上初めてのことであった。

本震の発生後、大分県中部でM5.7(参考値)、熊本県阿蘇地方でM5.9の地震が発生するなど、地震活動域は熊本県熊本地方から阿蘇地方、さらに大分県中部にまで帯状に広がり、長さは約150kmに及んだ(第1.5.1項参照)。気象庁は、この一連の地震活動を「平成28年(2016年)熊本地震」(英語名:The 2016 Kumamoto Earthquake)(以下、熊本地震)と命名した。

発震機構解(第1.5.1項参照)は、4月14日のM6.5の地震では概ね南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型、4月15日のM6.4の地震では概ね北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であった。また、4月16日の本震は、初動解が北西-南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型、CMT解が南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で非ダブルカップル成分として若干の正断層成分を含むものであった。震源分布と発震機構解より、4月14日のM6.5の地震及び4月15日のM6.4の地震は北北東-南南西走向の右横ずれ断層、4月16日に発生した本震は正断層成分を含む概ね北東-南西走向の右横ずれ断層が動いたものと推察された。

4月14日のM6.5の地震、4月15日のM6.4の地震、及び本震について、日奈久断層帯と布田川

断層帯のそれぞれに沿った2枚の断層面を仮定して震源過程解析(第1.3.1項参照)を行ったところ、日奈久断層帯沿いの断層面では破壊開始点より浅い領域、そして布田川断層帯沿いの断層面ではやや深い領域に主なすべり域が推定された。

バックプロジェクション解析(第1.3.2項参照)より、4月14日のM6.5の地震と本震の両方で、震央付近に大きい振幅を生じさせる波動の励起源があることがわかった。また、本震では、波動の励起源が日奈久断層帯に及んでいる可能性があるかと推察された。

2016年4月14日のM6.5の地震の発生以降、特に熊本県熊本地方の地震活動は活発となり、震度1以上を観測した地震の回数は、熊本地震の活動開始から約半年間で4,000回を超え、また、熊本地震の活動開始後1年間のM3.5以上の地震回数は300回を超えるなど、活発な余震活動が続いた平成16年(2004年)新潟県中越地震よりも地震回数が増えている(第1.5.1.5図参照)。2017年11月30日時点では、熊本県熊本地方及び阿蘇地方における地震活動は、全体として引き続き減衰しつつも継続している。大分県中部の地震活動は2016年5月には低下した(第1.5.1.1図参照)。

なお、熊本地震は、気象庁が複数の地震をより精度良く識別できるPF法(溜淵ほか、2016)を用いた自動処理による震源を一元化処理に活用し始めた2016年4月1日以降、最初に発生した最大震度5弱以上の地震であった(第1.5.2項参照)。自動処理による震源を活用できたことで、従来の手動検出による一元化処理ではリアルタイムで捉えられなかった小さな規模の地震まで震源決定できた他、ほぼリアルタイムで震源を把握できたことから、地震活動が既知の活断層に沿うように分

* 地震火山部地震予知情報課 鎌谷 紀子(現 東京大学地震研究所)

布していることや地震活動の範囲が広がったことを早期に把握することができた。また、報道発表資料に自動処理による震源データを含む図を掲載することにより、最新の地震活動状況について解説することができた。

参 考 文 献

溜瀧功史・森脇健・上野寛・東田進也 (2016) : ベイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法. 験震時報, 79, 1-13. (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/kenshin/vol79p001.pdf>)

1.2 主な地震の地震動*

1.2.1 地震動の概要

平成28年4月14日21時26分の地震(M6.5)では熊本県益城町において、4月16日01時25分の地震(M7.3)では熊本県益城町と西原村において、それぞれ震度7の揺れを観測した。また、最大震度6弱以上を観測した地震は平成29年8月31日までに7回発生している(第1.2.1表)。

第1.2.1表 最大震度6弱以上を観測した地震

発生日時	震央地名	M	最大震度
4月14日21時26分	熊本県 熊本地方	6.5	7
22時07分	熊本県 熊本地方	5.8	6弱
4月15日00時03分	熊本県 熊本地方	6.4	6強
4月16日01時25分 (本震)	熊本県 熊本地方	7.3	7
01時45分	熊本県 熊本地方	5.9	6弱
03時55分	熊本県 阿蘇地方	5.8	6強
09時48分	熊本県 熊本地方	5.4	6弱

1.2.1.1 震度7を観測した2つの地震の震度分布図

第1.2.1図～第1.2.4図に、最大震度7を観測した地震について震度分布図と推計震度分布図を示す。

4月14日のM6.5の地震では、震央に近い熊本県益城町で震度7、玉名市、西原村、嘉島町、宇城市及び熊本市で震度6弱を観測したほか、九州地方から中部地方の一部にかけて震度5強～1を観測した(第1.2.1図)。

4月16日01時25分には、4月14日の地震よりも規模の大きい熊本県熊本地方を震源とする地震(M7.3)が発生し、熊本県益城町及び西原村で震度7^{*1}、南阿蘇村、菊池市、宇土市、大津町、嘉島町、宇城市、合志市及び熊本市で震度6強を観測したほか、九州地方から東北地方の一部にかけて震度6弱～1を観測した。なお、このM7.3の地震の発生直後に大分県中部を震源とするM5.7(数字は参考値)の地震が発生しており、M7.3の地震の震度分布には大分県中部のM5.7の地震による揺れも含まれる。(第1.2.2図)。

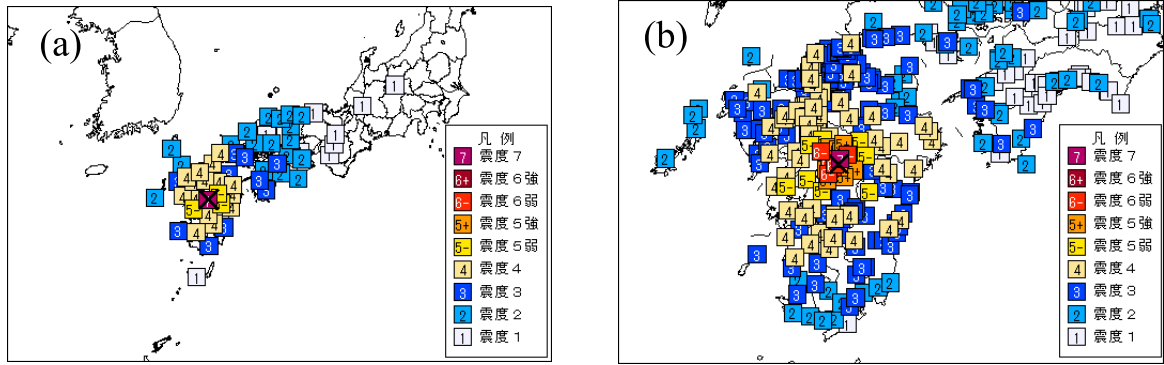
1.2.1.2 震度7を観測した2つの地震の推計震度分布図

4月14日のM6.5の地震の推計震度分布(第1.2.3図^{*2})を見ると、熊本県益城町付近に震度7の広がりが見え、推計震度分布では熊本市から益城町の北東の西原村付近にかけて震度6強の揺れが推定された。また、熊本県を中心に広い範囲で震度4以上の揺れが推定された。

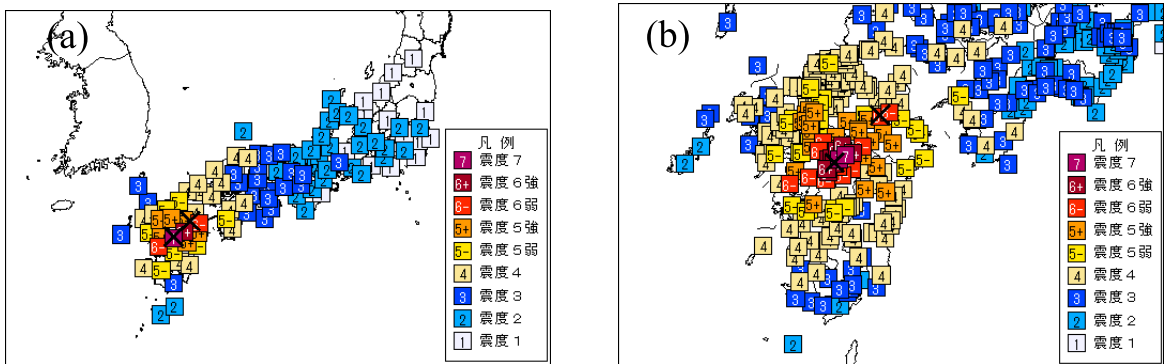
4月16日の本震の推計震度分布(第1.2.4図^{*2})では、益城町から西原村にかけて震度7の地域が推定されたほか、熊本県熊本地方で北東-南西に延びる震度6弱以上の地域が推定された。また、九州地方の広範囲で震度4以上の揺れが推定された。

* 地震火山部地震津波監視課 震度情報係

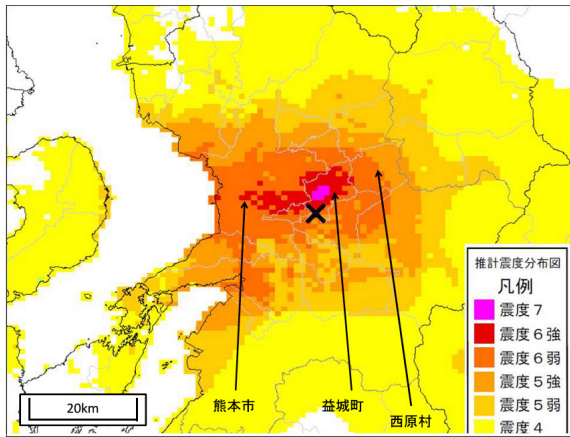
^{*1} 地震発生当初は震度計からデータが送信されず(原因不明)、最大震度を6強としていたが、後日の調査にてデータを収集し解析した結果、震度7であったことが判明した。



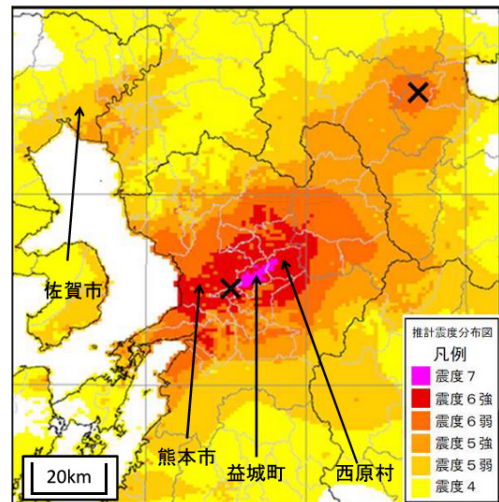
第 1.2.1 図 2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震の (a) 地域ごと及び (b) 市区町村ごとの震度分布図。
×印は震央を表す。



第 1.2.2 図 2016 年 4 月 16 日の M7.3 の地震の (a) 地域ごと及び (b) 市区町村ごとの震度分布図。
×印は本震の震央及び本震発生直後に発生した大分県中部の地震の震央を表す。



第 1.2.3 図^{※2} 4 月 14 日 21 時 26 分に発生した地震 (M6.5, 最大震度 7) の推計震度分布 (×印は震央を示す)



第 1.2.4 図^{※2} 熊本地震の本震 (M7.3, 最大震度 7) の推計震度分布 (×印は震央を示す)

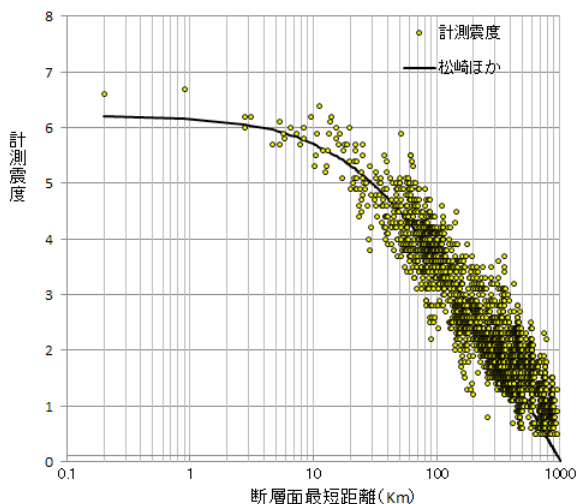
※2 この推計震度分布図は震度の精査後に再作成したものであり、地震発生直後に発表したものと一部異なる。

1.2.1.3 観測された震度の分析結果

一般に震源断層面からの距離と計測震度については、経験的な関係があることが知られている(例えば、松崎ほか, 2006)。第1.2.5図に本震で観測された計測震度と震源からの距離の関係を示す。松崎ほか(2006)による計測震度と距離の関係から得られた値と本震で実際に観測された計測震度を比較すると、多少のばらつきはあるものの、大局的にみると、おおむね一致していることがわかる。

本震で観測された計測震度と松崎ほか(2006)による経験的な関係から推定される震度(以下、計算値という。)との差を第1.2.6図に示す。計算値は地盤の増幅度等による補正を行っていないため、沿岸や平野など、堆積層が厚いと思われる地域で観測された震度は、計算値より大きい値となっている。

例えば、本震の推計震度分布図(第1.2.4図)では、震源から北西に約70km離れた佐賀県佐賀市付近で、周辺より少し強い揺れ(震度5強, 5弱)の広がりや推定されている。この地域は、地盤の揺れやすい地域と考えられる(第1.2.7図)が、今回本震で観測された震度5強, 5弱の揺れの広がりや地盤の揺れやすさの範囲はよく対応していることがわかる。



第1.2.5図 本震における断層面からの最短距離と計測震度の関係

黄丸(輪郭黒)は断層面からの最短距離における各観測点の計測震度、黒い曲線は震源断層面からの距離と計測震度についての経験的な関係(松崎ほか, 2006)を示す。

1.2.1.4 過去の顕著な地震との揺れの比較

過去の顕著な地震の揺れと、本震で震度7を観測した熊本県西原村及び益城町の揺れの最大加速度と最大速度(ともに三分合成値)の関係を第1.2.8図に示す。速度波形の算出には、周期30秒以上の波をカットするハイパスフィルターを使用した。

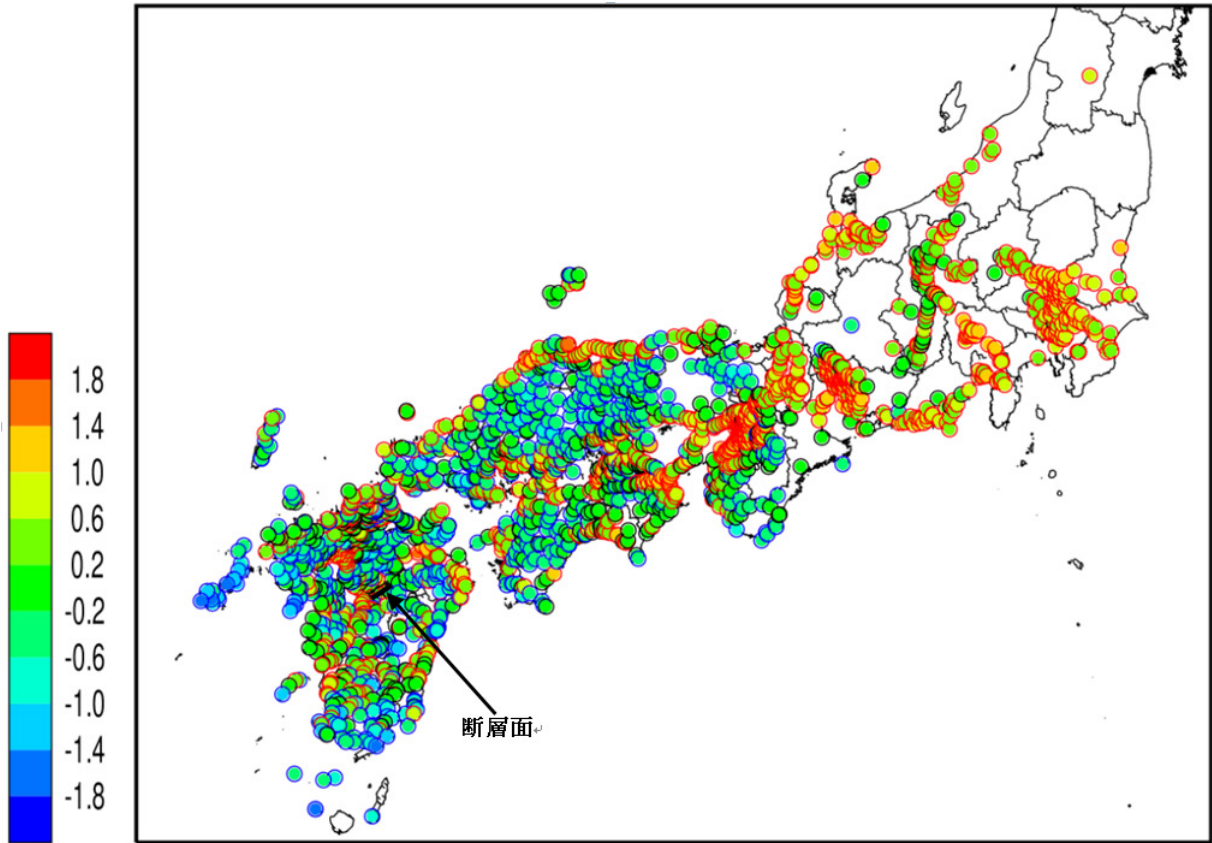
過去の顕著な地震の揺れと比較しても、本震における西原村と益城町で観測された揺れは、ともに非常に大きな速度であったことがわかる。特に西原村で観測された揺れの速度256cm/secは、これまでに得られた日本国内の観測値では、最大であった。

また、木造家屋への影響度を測る目安となる等価周期に注目すると、本震における西原村及び益城町の揺れの周期は1.2~2.0秒程度とこれまで観測される強震動の周期としては短周期であった。一般的に、木造家屋が全壊又は大破する目安は等価周期1秒~2秒の揺れとされており、また、両観測点における本震の揺れは、速度だけでなく加速度も約900galと大きいことから、標準的な木造家屋に大きな被害を与える地震動であった。

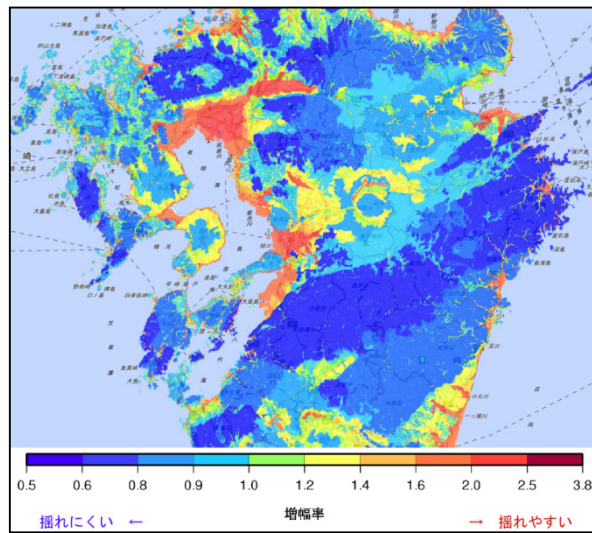
また、兵庫県南部地震におけるJR鷹取観測点で観測された揺れと熊本地震の本震における西原村と益城町の揺れの比較を行った。JR鷹取は兵庫県南部地震における震度7の帯の中にあり、大きな速度が観測されたことで知られており、等価周期も1.3秒前後である。今回の西原村及び益城町の揺れの特徴は、兵庫県南部地震におけるJR鷹取の揺れの特徴と似ており、兵庫県南部地震と同じく、熊本地震が木造家屋に多大な被害を与えた要因と推察できる。

参考文献

国土地理院(2016):平成28年(2016年)熊本地震。地震予知連絡会会報, 96, 557-589。
 石垣祐三(2006):リアルタイム震度算出のための時系列解析。験震時報, 第69巻, 155-169。
 松崎伸一・久田嘉章・福島美光(2006):断層近傍まで適用可能な震度の距離減衰式の開発。日本建築学会構造系論文集, 第604号, 201-208。

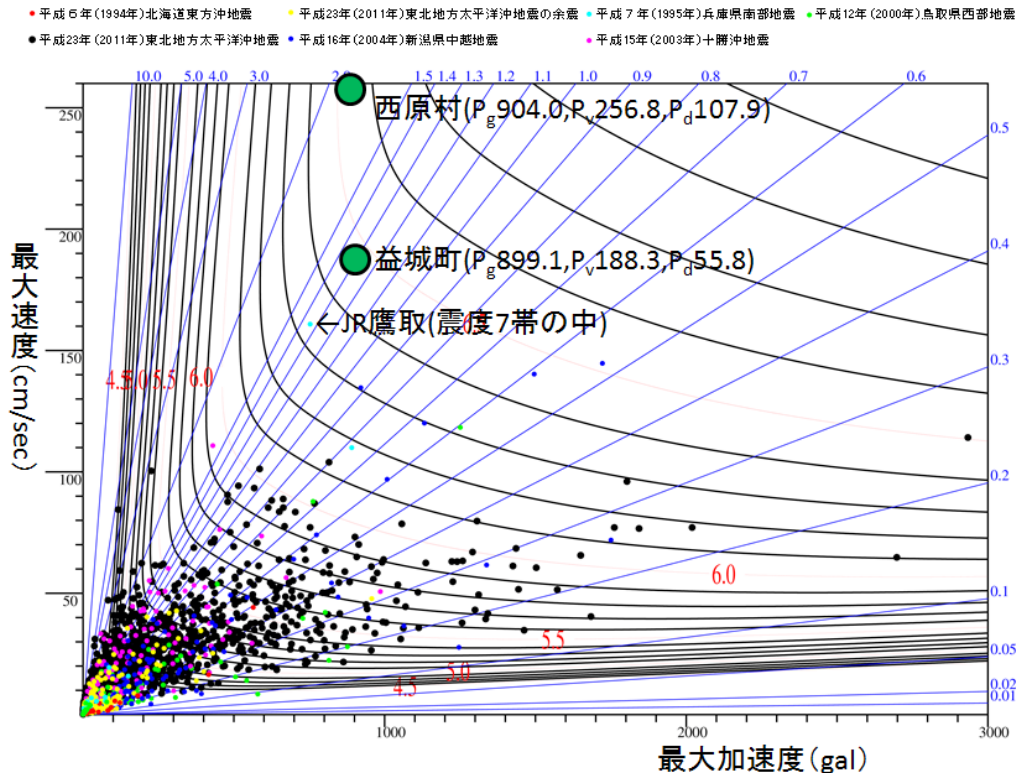


第 1.2.6 図 地震の規模と断層面からの最短距離に基づく経験式(松崎ほか, 2006)で推定される震度(計算値)と観測した計測震度の差. 正の値が計算値より観測値が大きい事を示し, 負の値が計算値より観測値が小さいことを示す.



第 1.2.7 図 地盤の揺れやすさ(防災科学技術研究所の地震ハザードステーション「J-SHIS MAP」より)
寒色系青色(左側)は揺れにくい, 暖色系赤色(右側)は揺れやすいことを示す.

熊本地震(4/16)の震度7の2観測点の加速度vs速度



第 1.2.8 図 今回の本震で観測された最大加速度と最大速度と過去の顕著地震の最大加速度と（横軸）—最大速度（縦軸）の関係。プロットは各地震ごとの観測値を示す。地震ごとに色を変え、黒線は過去の観測から得られた計測震度の回帰式（石垣，2006）による等震度線。青線は揺れの等価周期を示す。Pg は加速度（gal）、Pv は速度（cm/sec）、Pd は変位（cm）である。

1.2.2 長周期地震動の概要*

熊本地震の一連の地震活動において、平成 29 年 8 月 31 日までに長周期地震動階級[※]1 以上を観測した地震は 13 回であった（第 1.2.2 表のとおり）。4 月 15 日 00 時 03 分の地震（M6.4）では、平成 25 年 3 月の長周期地震動に関する観測情報（試行）発表開始後初めて長周期地震動階級 4 を観測した。また、4 月 16 日の本震においても震源近傍で長周期地震動階級 4 を観測し、震源から遠く離れた関西や関東を含む広い範囲において長周期地震動階級 1 以上が観測された。

震源に近い地域や震源から遠く離れた地域において、高層ビル等で実際にどのような揺れに見舞

われたかについては、気象庁でアンケートやインタビュー調査を行っており、これらの結果も参照

第 1.2.2 表 長周期地震動階級 1 以上が観測された地震

発生日時	震央地名	マグニチュード	最大長周期地震動階級
2016年4月14日21時26分	熊本県熊本地方	6.5	3
2016年4月14日22時07分	熊本県熊本地方	5.8	2
2016年4月15日00時03分	熊本県熊本地方	6.4	4
2016年4月16日01時25分	熊本県熊本地方	7.3	4
2016年4月16日01時44分	熊本県熊本地方	5.4	1
2016年4月16日01時46分	熊本県熊本地方	5.9	2
2016年4月16日02時04分	熊本県熊本地方	4.9	1
2016年4月16日03時03分	熊本県阿蘇地方	5.9	1
2016年4月16日03時55分	熊本県阿蘇地方	5.8	1
2016年4月16日07時11分	大分県中部	5.4	1
2016年4月18日20時42分	熊本県阿蘇地方	5.8	1
2016年4月19日17時52分	熊本県熊本地方	5.5	2
2016年8月31日19時46分	熊本県熊本地方	5.2	1

* 地震火山部地震津波監視課 久保 剛太（現 管理課地震津波防災対策室）、古謝 植之

※ 長周期地震動階級の詳細については、次の URL を参照。

https://www.data.jma.go.jp/svd/ew/data/ltpgm_explain/about_level.html

されたい（第2.4節：長周期地震動に関するアンケート調査結果）。

以下では、長周期地震動階級3以上を観測した3つの地震について、観測された長周期地震動階級の分布や、観測点における地震波形等の詳細を示す。

1.2.2.1 4月14日21時26分の地震（M6.5）

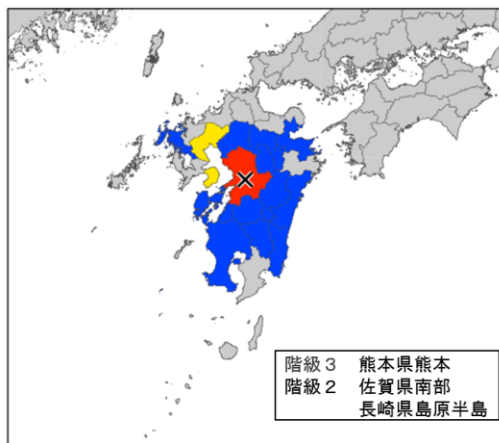
この地震により観測された地域ごとの最大の長周期地震動階級は、「熊本県熊本」で3、「佐賀県南部」と「長崎県島原半島」で2、九州地方の広い範囲で1であった（第1.2.9図）。九州地方で長周期地震動階級3が観測されたのは平成25年3月の長周期地震動に関する観測情報（試行）発表開始以来初めてである。

第1.2.10図に、気象庁観測点における絶対速度応答スペクトル分布（減衰定数5%、水平動合成、周期1.6秒、2.0秒、4.0秒、6.0秒、7.8秒）を示す。震源付近では、周期1.6秒、2.0秒で長周期地震動階級3のしきい値である50cm/s以上の値が観測された。周期1.6秒では、長周期地震動階級1のしきい値である5cm/s以上の観測点が九州全体に広がっており、周期2.0秒では値がやや小さくなるが5cm/s以上の観測点の広がりはい

変わらない。周期6秒以上の長い周期では震源近傍のみ5cm/s以上の値が観測された。

第1.2.11図に、気象庁観測点*及び震度7を観測した益城町宮園（熊本県観測点）における絶対速度応答スペクトル（減衰定数5%、水平動合成、周期1.6秒から7.8秒までを0.2秒ごとにプロット、グラフ中に各階級のしきい値を表示）のグラフを示す。震源から20km以内の熊本西区春日及び宇城市松橋町では、周期2秒前後までで長周期地震動階級3となっており、長周期側で徐々に減少している。なお、両観測点ともに震度6弱が観測された。震源から50km付近の雲仙市国見町や震源から75km付近の佐賀市駅前中央では、周期3秒付近が卓越しており長周期地震動階級2が観測された。震源から100km以上離れた薩摩川内市中郷では、周期2秒付近が卓越しており長周期地震動階級1が観測された。また、周期5秒付近でも比較的大きな値が観測されている。

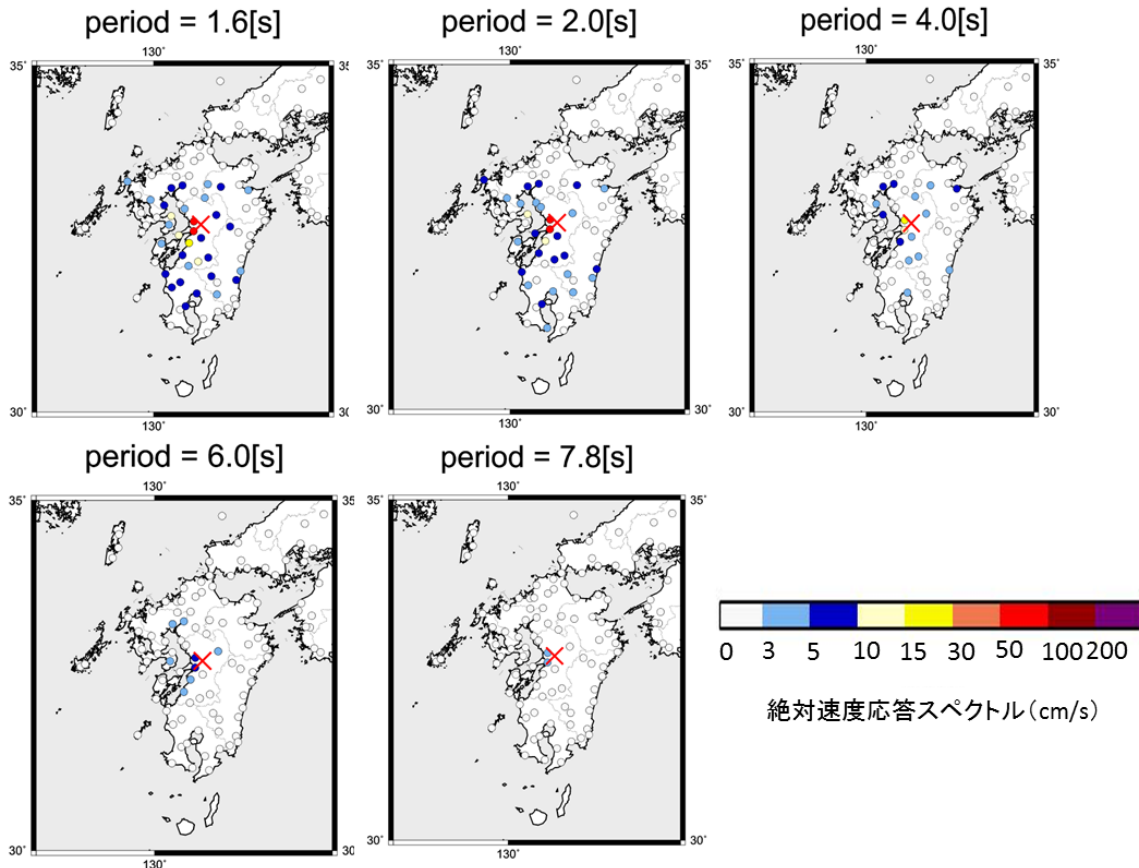
これらの観測点のうち、熊本西区春日、宇城市松橋町及び益城町宮園（熊本県観測点）の観測点における地震波形（加速度及び速度。速度については周期20秒以上をカットするハイパスフィルターを適用）を第1.2.12図～第1.2.14図に示す。



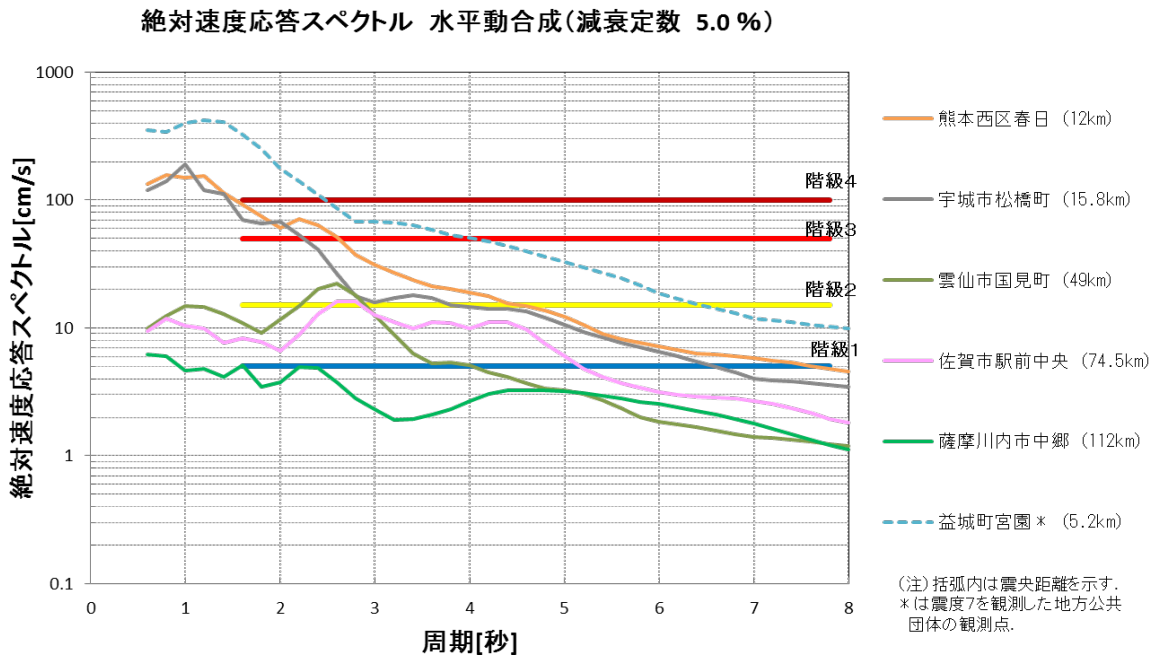
長周期地震動階級の凡例: ■ 階級1 ■ 階級2 ■ 階級3 ■ 階級4

第1.2.9図 4月14日21時26分の地震（M6.5）における長周期地震動階級1以上が観測された地域

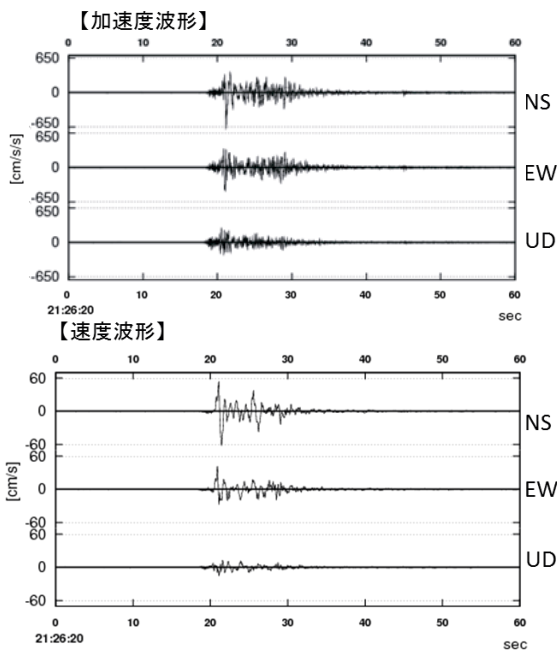
* 観測情報に利用しているのは気象庁観測点のみ。ここでは、参考に地方公共団体観測点についても記載した。



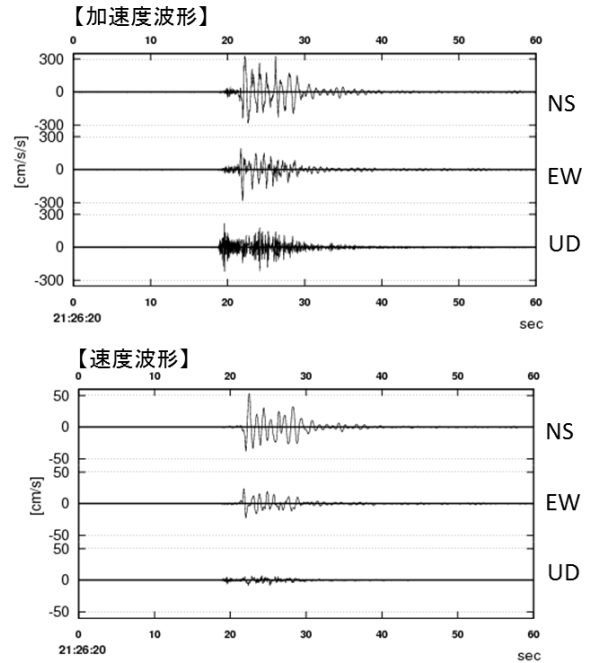
第 1.2.10 図 4 月 14 日 21 時 26 分の地震 (M6.5) における周期ごとの絶対速度応答スペクトルの分布



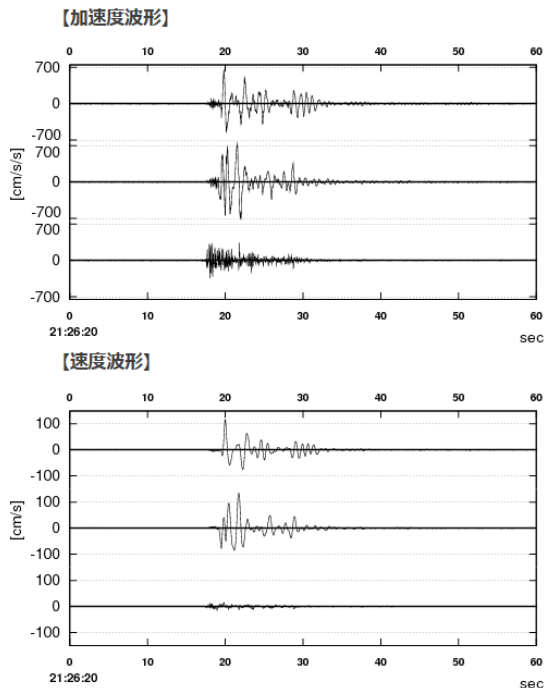
第 1.2.11 図 4 月 14 日 21 時 26 分の地震 (M6.5) における観測点ごとの絶対速度応答スペクトル



第 1.2.12 図 4 月 14 日 21 時 26 分の地震 (M6.5) における熊本西区春日で観測された波形 (21:26:20 から 1 分間)



第 1.2.13 図 4 月 14 日 21 時 26 分の地震 (M6.5) における宇城市松橋町で観測された波形 (21:26:20 から 1 分間)



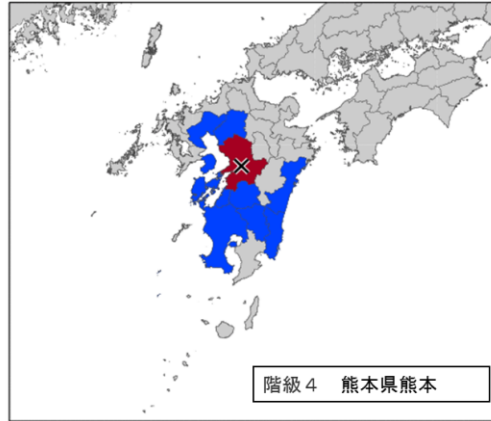
第 1.2.14 図 4 月 14 日 21 時 26 分の地震 (M6.5) における益城町宮園 (熊本県) で観測された波形 (21:26:20 から 1 分間)

1.2.2.2 4 月 15 日 00 時 03 分の地震 (M6.4)

この地震により観測された地域ごとの最大の長周期地震動階級は、「熊本県熊本」で 4、九州地方の広い範囲で長周期地震動階級 1 であった (第 1.2.15 図)。長周期地震動階級 4 が観測されたのは、平成 25 年 3 月の「長周期地震動に関する観測情報 (試行)」の発表開始以来初めてである。

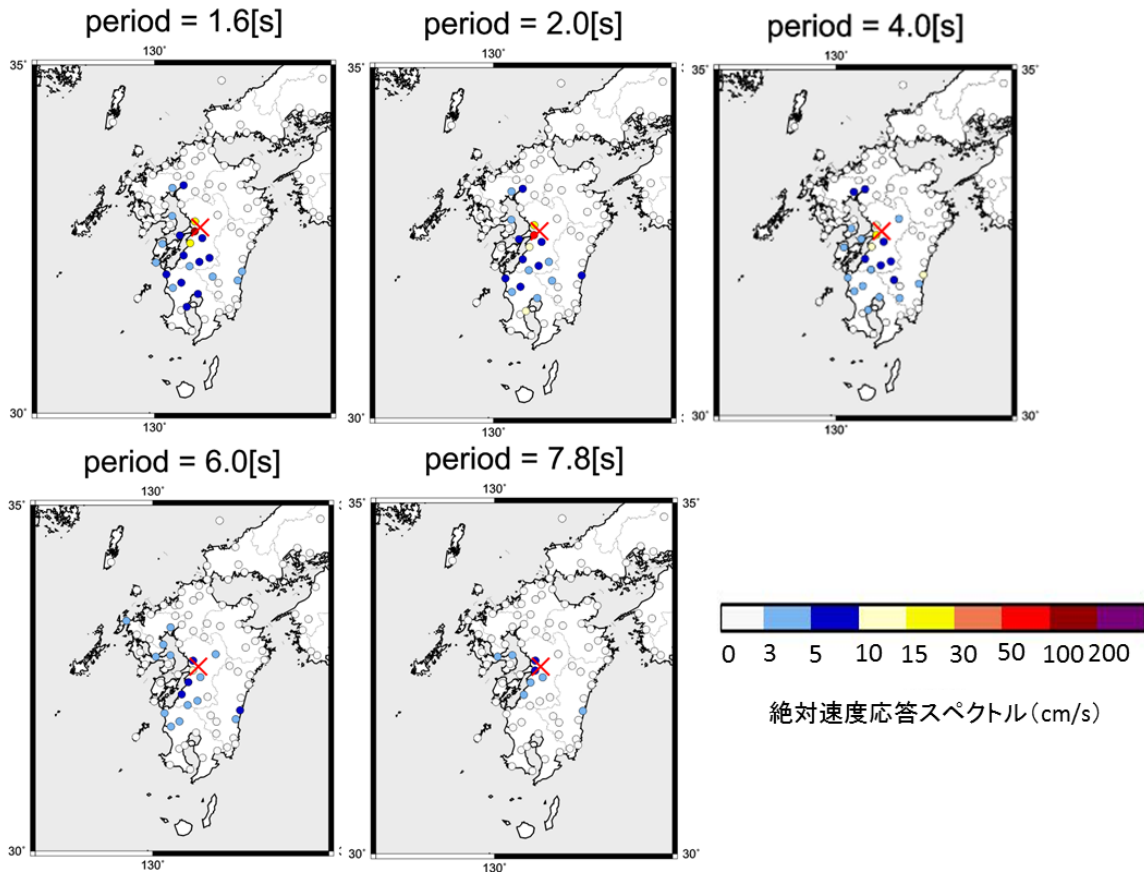
第 1.2.16 図に、気象庁観測点における絶対速度応答スペクトル分布 (減衰定数 5%、水平合成、周期 1.6 秒, 2.0 秒, 4.0 秒, 6.0 秒, 7.8 秒) を示す。周期 1.6 秒では、震源付近で長周期地震動階級 4 のしきい値である 100cm/s 以上の値が観測された。周期 2 秒でも長周期地震動階級 3 のしきい値である 50cm/s 以上となっており、隣接する観測点でも長周期地震動階級 2 のしきい値である 15cm/s 以上が観測されている。周期 6 秒以上でも熊本県内では長周期地震動階級 1 のしきい値である 5cm/s 前後の値が観測されているが、地域的な広がりはあまり見られず、佐賀県や宮崎県の一部の観測点のみ 5cm/s 前後の値が観測されている。

第 1.2.17 図に、気象庁観測点における絶対速度応答スペクトルのグラフ (減衰定数 5%、水平

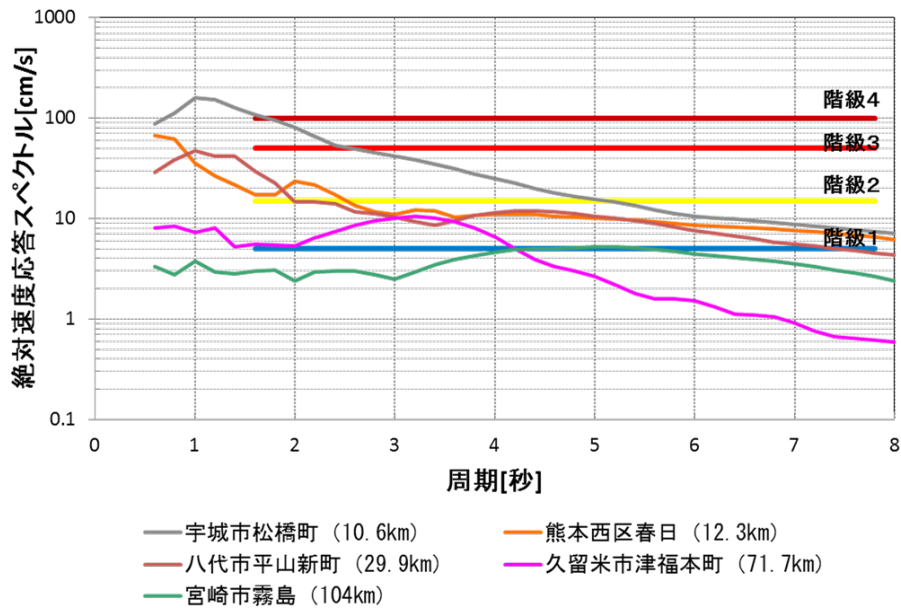


長周期地震動階級の凡例: ■ 階級1 ■ 階級2 ■ 階級3 ■ 階級4

第1.2.15図 4月15日00時03分の地震(M6.4)における長周期地震動階級1以上が観測された地域

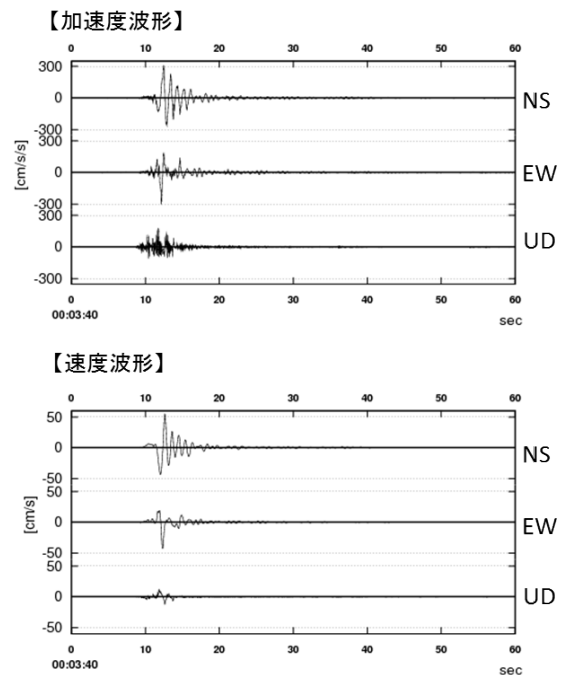


第1.2.16図 4月15日00時03分の地震(M6.4)における周期ごとの絶対速度応答スペクトルの分布



第1.2.17図 4月15日00時03分の地震(M6.4)における観測点ごとの絶対速度応答スペクトル

動合成, 周期1.6秒から7.8秒までを0.2秒ごとにプロット. グラフ中に各階級のしきい値を表示)を示す. 震源から10km付近の宇城市松橋町では, 周期1.6秒付近で長周期地震動階級4となっており, 長周期側で徐々に減少している. 震源から12km付近の熊本西区春日, 30km付近の八代市平山新町では, 周期2秒付近までで長周期地震動階級2が観測された. 震源から70km付近の久留米市津福本町では, 周期3秒付近が卓越しており長周期地震動階級1が観測された. 震源から100km以上離れた宮崎市霧島では, 周期5秒前後が卓越しており長周期地震動階級1が観測された. これらの観測点のうち, 長周期地震動階級4が観測された宇城市松橋町の観測点における地震波形(加速度及び速度. 速度については周期20秒以上をカットするハイパスフィルターを適用)を第1.2.18図に示す.



第1.2.18図 4月15日00時03分の地震における宇城市松橋町で観測された波形(00:03:40から1分間)

1.2.2.3 4月16日01時25分の地震(M7.3)

この地震により観測された地域ごとの最大の長周期地震動階級は, 「熊本県熊本」と「熊本県阿蘇」で4, 「福岡県筑後」と「大分県中部」, 「大分県西部」で3, 九州地方から関東・中部, 北陸地方の広い範囲で1であった(第1.2.19図). また, 震源から離れた「大阪府南部」, 「千葉県北西部」等でも

長周期地震動階級2が観測された.

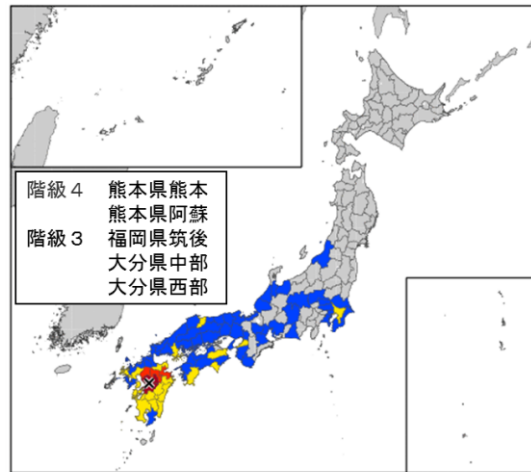
第1.2.20図に, 気象庁観測点における絶対速度応答スペクトル分布(減衰定数5%, 水平動合成, 周期1.6秒, 2.0秒, 4.0秒, 6.0秒, 7.8秒)を示

す。周期 1.6 秒, 2.0 秒及び 4.0 秒では, 震源付近の複数の観測点で長周期地震動階級 4 のしきい値である 100cm/s 以上の値が観測されている。熊本県, 大分県, 福岡県で長周期地震動階級 3 のしきい値である 50cm/s 以上の値が観測されている。

周期 6 秒でも熊本県, 大分県では 50cm/s 以上の値が観測されている。また, 大阪府では周期 4

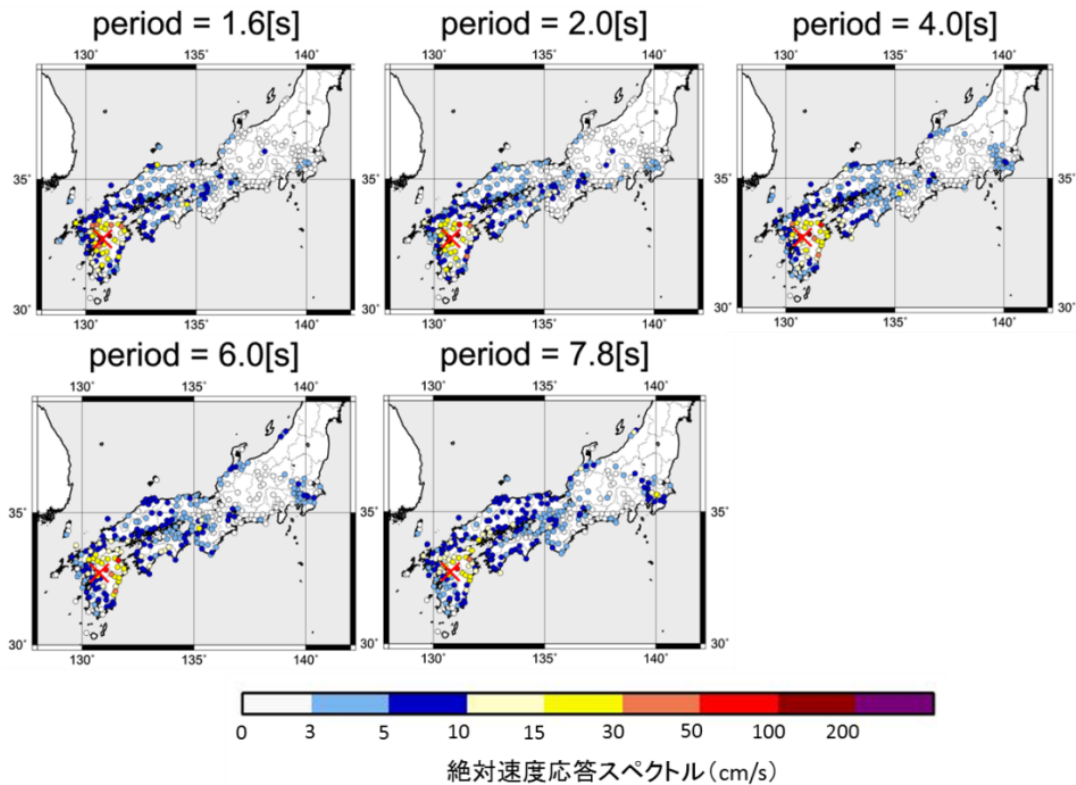
秒及び 6 秒で 15cm/s 以上と他の周期に比べて卓越している。関東地方や北陸地方では長周期側でスペクトルが大きくなる傾向があり, 周期 7.8 秒では千葉県北西部で長周期地震動階級 2 のしきい値である 15cm/s 以上の観測点も見られる。

第 1.2.21 図に, 気象庁観測点, 震度 7 を観測した益城町宮園及び西原村小森 (いずれも熊本県観



長周期地震動階級の凡例: ■ 階級1 ■ 階級2 ■ 階級3 ■ 階級4

第 1.2.19 図 本震における長周期地震動階級 1 以上が観測された地域



第 1.2.20 図 本震における周期ごとの絶対速度応答スペクトルの分布

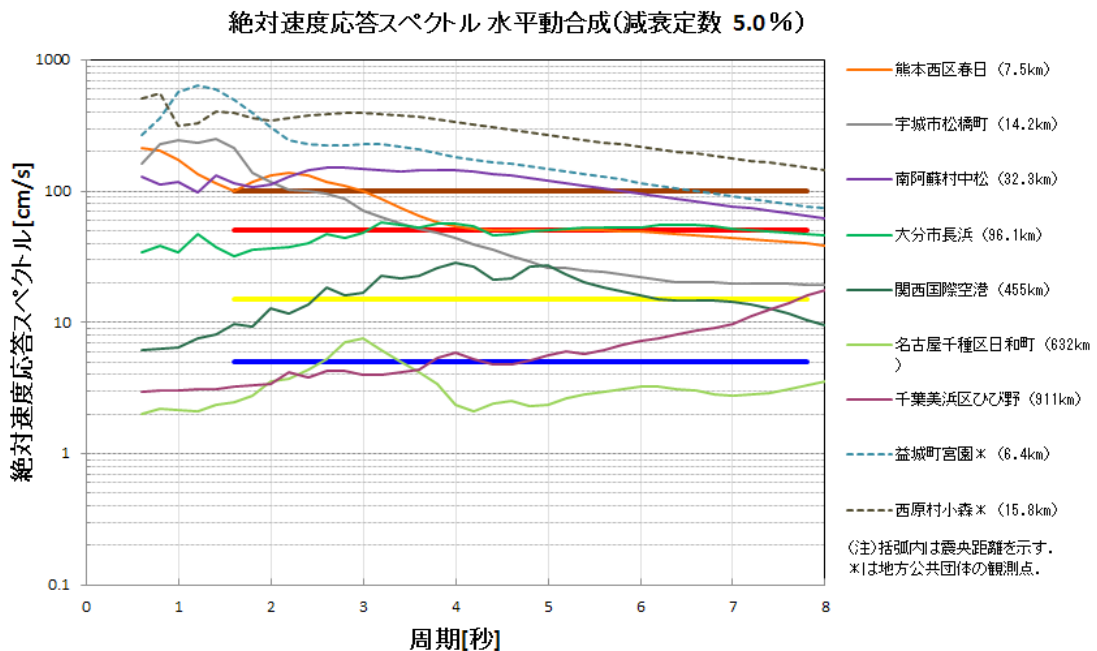
測点)における絶対速度応答スペクトルのグラフ(減衰定数5%, 水平動合成, 周期1.6秒から7.8秒までを0.2秒ごとにプロット。グラフ中に各階級のしきい値を表示)を示す。震源から10km前後の熊本西区春日, 宇城市松橋町では, 周期1.6秒から3秒付近で長周期地震動階級4となっており, 長周期側で徐々に減少している。震源から30km付近の南阿蘇村中松では, 周期1.6秒から5秒前後の広い周期帯域で大きな値をとり, 長周期地震動階級4が観測されている。震源から100km付近の大分市長浜でも, 広い周期帯域で大きな値をとり, 長周期地震動階級3が観測されている。震源から450km程度近く離れている関西国際空港では, 周期3秒から6秒付近が卓越しており長周期地震動階級2が観測された。震源から600km以上離れている名古屋千種区日和町では, 周期3秒付近が卓越しており長周期地震動階級1が観測された。震源から900km以上離れた千葉美浜区ひび野では, 長周期側になるほど値が大きくなっており, 周期7.8秒で長周期地震動階級2のしきい値である15cm/s以上の値が観測された。これ

らの気象庁観測点の地震波形(加速度及び速度。速度については周期20秒以上をカットするハイパスフィルターを適用)を第1.2.22図~第1.2.30図に示す。[†]

なお, 震源近傍の西原村小森の速度波形において周期3秒程度のパルス状の波形が観測された。

これについては断層のずれにより震源ごく近傍でパルス状の長周期の揺れが発生したといわれており, 堆積層の表面波等による継続時間の長い長周期地震動とは異なる長周期地震動であるということ注目されることとなった。

気象庁は, 長周期地震動の観測の強化を目的として, 平成25年度に首都圏の沿岸部等に7地点の新設点の整備を行った(第1.2.31図)。この地震において, 新設した7地点でいずれも長周期地震動階級1以上を観測しており, 第1.2.32図で示す絶対速度応答スペクトルのグラフ(減衰定数5%)において周辺の既設観測点と比較しても, 長周期地震動をよく捉えていることが確認された(千葉美浜区ひび野は第1.2.28図で示した加速度記録を基に算出)。



第1.2.21図 本震における観測点ごとの絶対速度応答スペクトル

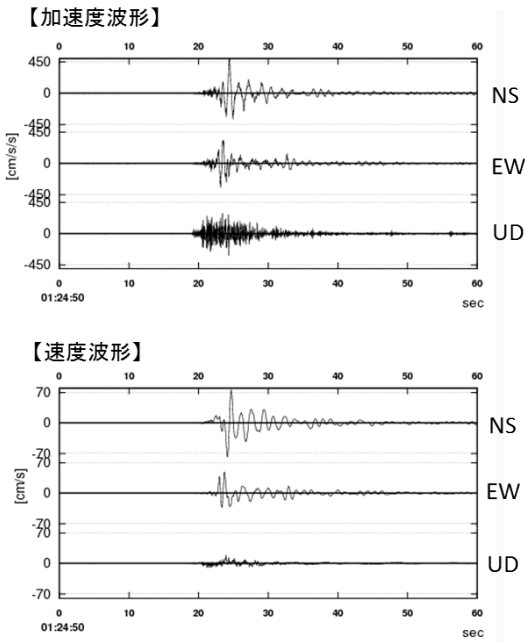
[†] 震源から離れた観測点の場合, P波到達時の波形がない場合がある。

謝辞

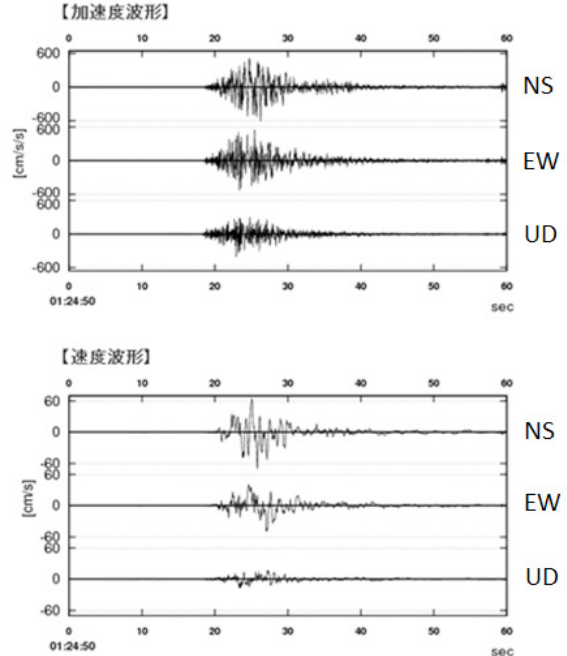
益城町宮園及び西原村小森の観測記録は熊本県に提供いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

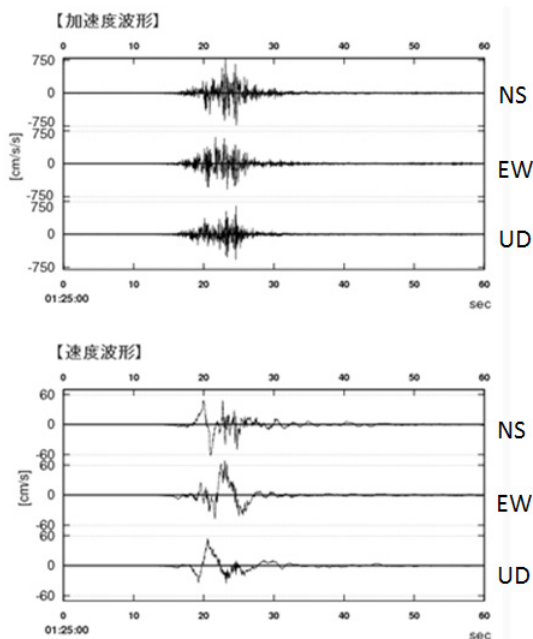
北村春幸 (2017) : 今後の長周期地震動対応に求められること. 建築技術 2017年12月号, 78-84.



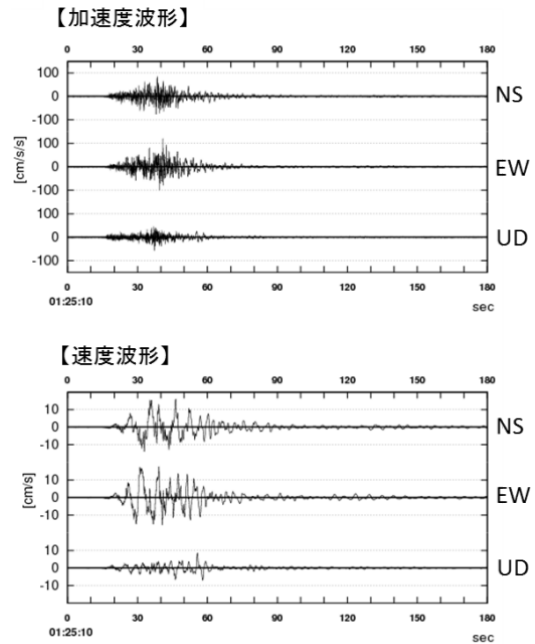
第 1.2.22 図 本震における宇城市松橋町で観測された波形 (01:24:50 から 1 分間)



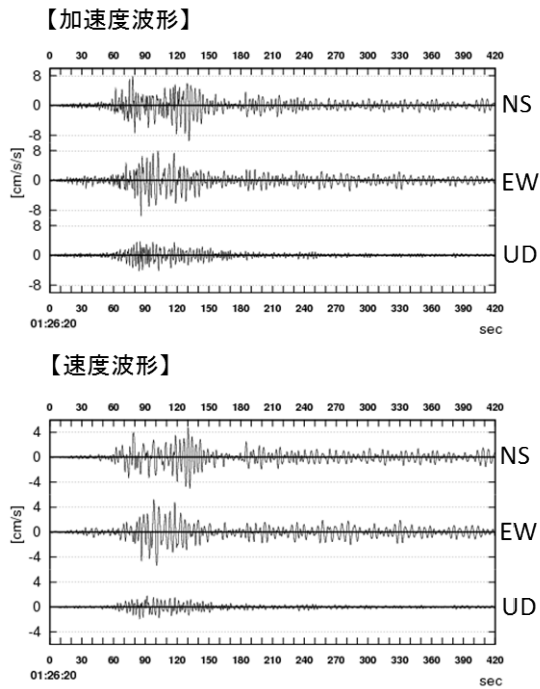
第 1.2.23 図 本震における熊本西区春日で観測された波形 (01:24:50 から 1 分間)



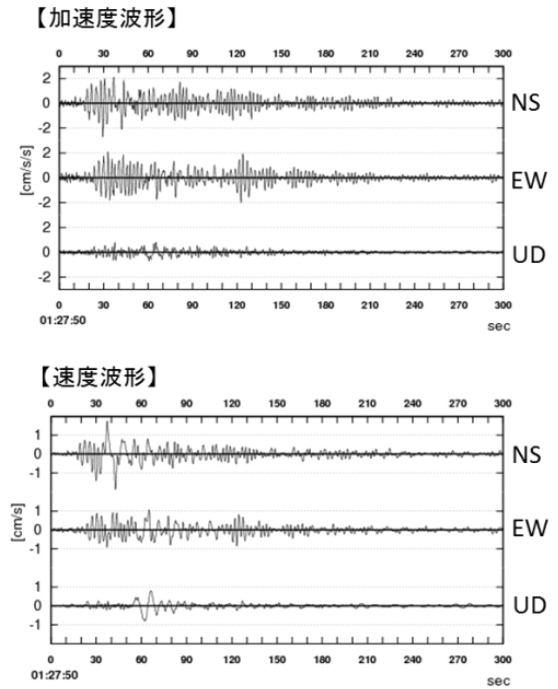
第 1.2.24 図 本震における南阿蘇村中松で観測された波形 (01:25:00 から 1 分間)



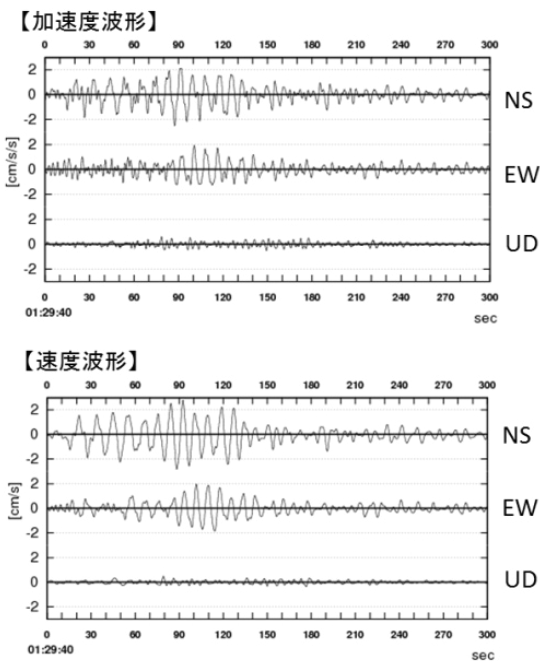
第 1.2.25 図 本震における大分市長浜で観測された波形 (01:25:10 から 3 分間)



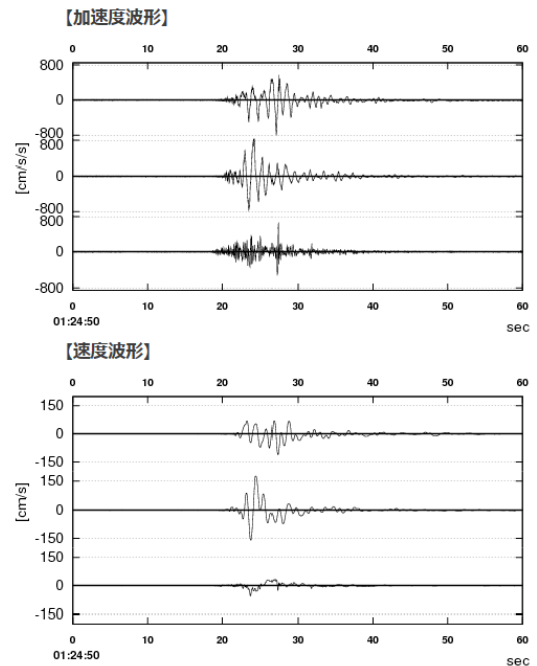
第 1.2.26 図 本震における関西国際空港で観測された波形
(01:26:20 から 7 分間)



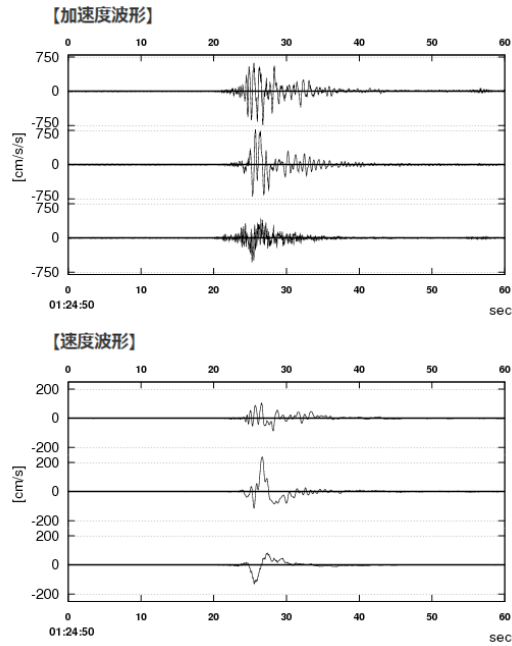
第 1.2.27 図 本震における名古屋千種区日和町で観測された波形
(01:27:50 から 5 分間)



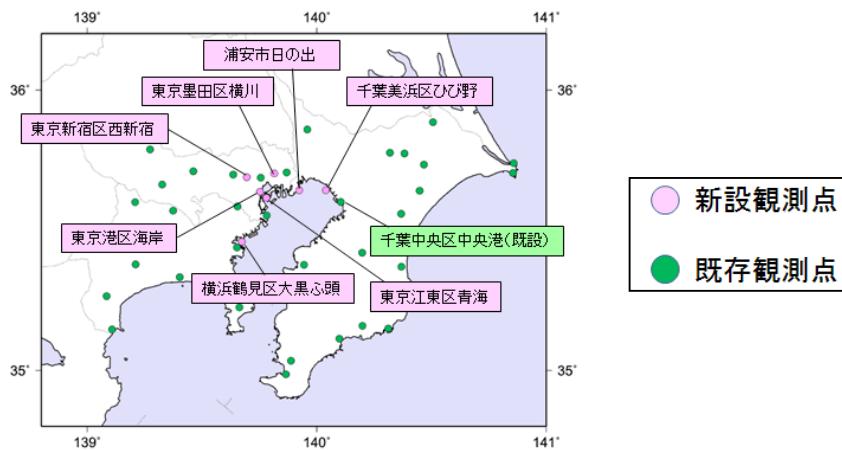
第 1.2.28 図 本震における千葉美浜区ひび野で観測された波形
(01:29:40 から 5 分間)



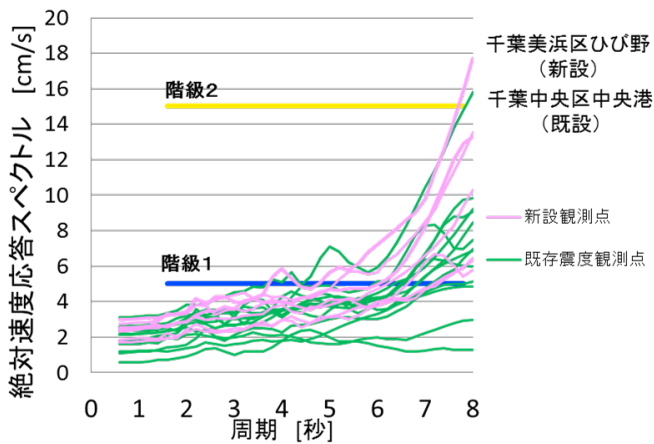
第 1.2.29 図 本震における益城町宮園（熊本県の観測点）で観測された波形
(01:24:50 から 1 分間)



第 1.2.30 図 本震における西原村小森（熊本県の観測点）で観測された波形（01:24:50 から 1 分間）



第 1.2.31 図 千葉県，東京都，神奈川県気象庁観測点配置図



第 1.2.32 図 本震における千葉県，東京都，神奈川県気象庁観測点における絶対速度応答スペクトル

1.3 主な地震の震源過程

1.3.1 近地強震波形を用いた震源過程解析*

2016年4月14日21時26分、15日00時03分、16日01時25分（日本時間）に熊本県熊本地方で発生した3つの地震（以下、14日M6.5の地震、15日M6.4の地震、16日M7.3の地震）について、近地強震波形を用い、震源過程を推定した。

1.3.1.1 解析方法

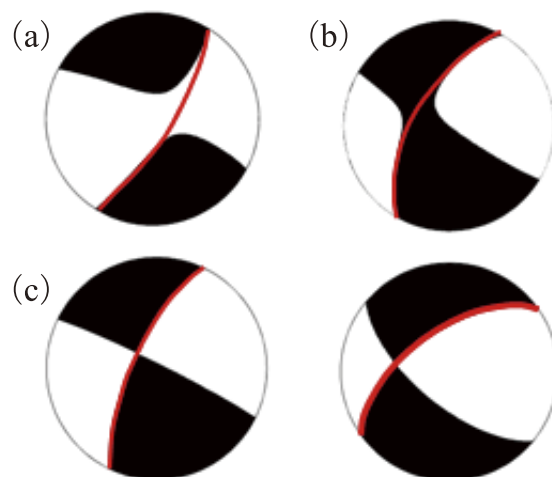
解析には、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET（Kinoshita, 1998）、KiK-net（Aoi *et al.*, 2000））及び気象庁震度計の近地強震波形を用いた。これらの加速度記録に14日M6.5、15日M6.4の地震については0.05Hz～0.33Hz、16日M7.3の地震については0.05～0.2Hzのバンドパスフィルターをかけて1回積分し、P波到達5秒前からの速度波形を用いた。

3つの地震とも破壊開始点は気象庁による一元化震源の位置とした（詳細な値は第1.3.1.1表を参照）。14日M6.5の地震の断層面は、第1.5.1.2目に示される震源分布と整合性がとれるよう、Global CMT（Ekström *et al.*, 2012）によるCMT解の2枚の節面のうち周辺の活断層（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013）の走向に整合的な面を仮定した（第1.3.1.1図（a））。15日M6.4の地震の断層面は、気象庁CMT解の2枚の節面のうち周辺の活断層の走向に整合的な面を仮定した（第1.3.1.1図（b））。16日M7.3の地

震の断層面は、地殻変動解析結果（国土地理院, 2016）等を参考に、日奈久断層帯と布田川断層帯に対応する2枚の断層面からなる震源断層モデル（以下、それぞれ断層面①と断層面②）を仮定して解析した（第1.3.1.1図（c））。

断層面②は断層面①の破壊開始点から連続的に破壊が伝わると仮定した。

理論波形の計算に用いるGreen関数は波数積分法（Bouchon, 1981）、透過・反射係数行列法（Kennett



第1.3.1.1図 解析に用いた発震機構解

(a) 14日M6.5の地震の解析に用いた節面（走向31°、傾斜80°、すべり角-169°）を赤線で示す。(b) 15日M6.4の地震の解析に用いた節面（走向211°、傾斜63°、すべり角-178°）を赤線で示す。(c) 16日M7.3の地震の解析に用いた節面（左:断層面①:走向205°、傾斜72°、すべり角176°、右:断層面②:走向235°、傾斜60°、すべり角209°）を赤線で示す。

第1.3.1.1表 解析に用いたパラメータ

破壊開始点の欄は左から、緯度、経度を表す。深さは破壊開始点の深さを表す。断層面の大きさは（走向方向）×（傾斜方向）。走向、傾斜は仮定した断層面の走向、傾斜を表す。震源時間関数の欄は左から、震源時間関数の表現に用いた三角形の底辺、三角形をずらす時間間隔、三角形の個数を表す。

	14日 M6.5 の地震	15日 M6.4 の地震	16日 M7.3 の地震
破壊開始点	32° 44.5' N, 130° 48.5' E	32° 42.0' N, 130° 46.6' E	32° 45.2' N, 130° 45.7' E
深さ	11 km	7 km	12 km
断層面の大きさ	24×18 km ²	18×15 km ²	①24×15 km ² ②27×15 km ²
走向、傾斜	31°、80°	211°、63°	① 205°、72° ② 235°、60°
最大破壊伝播速度	2.4 km/s	2.4 km/s	2.2 km/s
震源時間関数	1.2秒、0.6秒、4個	1.2秒、0.6秒、3個	1.6秒、0.8秒、9個

* 地震火山部地震予知情報課 田中美穂（現 総務部企画課国際室）

第 1.3.1.2 表 解析に用いた速度構造モデル

深さは各層の上端の深さを表す。

¹: M6.5 の地震, ²: M6.4 の地震, ³: M7.3 の地震の解析に用いた。

P 波速度 (km/s)	S 波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	深さ ¹ (km)	深さ ² (km)	深さ ³ (km)
1.8	0.5	1.95	0.00	0.00	0.00
2.2	0.8	2.07	0.02	0.50	0.16
2.7	1.3	2.20	—	—	0.23
3.5	2.0	2.35	0.07	0.52	0.25
4.2	2.4	2.45	0.88	1.38	0.93
5.5	3.2	2.65	2.27	2.77	2.04
5.8	3.4	2.70	2.84	2.83	16.08
6.4	3.8	2.80	16.36	16.64	32.25
7.5	4.5	3.20	32.74	33.34	76.98

and Kerry, 1979) を用い, 全国 1 次地下構造モデル (Koketsu *et al.*, 2012) を参考に, 各地震の破壊開始点での水平成層構造 (第 1.3.1.2 表) を仮定して計算した. 最大破壊伝播速度, 各小断層での震源時間関数は第 1.3.1.1 表のとおりとした. 解析に用いた観測点は第 1.3.1.2 図に示す.

解析方法は岩切ほか (2012) に従い, multiple time window 法を用い, 時空間のすべりが滑らかなような拘束条件を与えた. 時空間のすべりの滑らかさの程度を表すパラメータを赤池ベイズ情報量基準 (ABIC) (Akaike, 1980) の値が最小になる条件のもとで決定した.

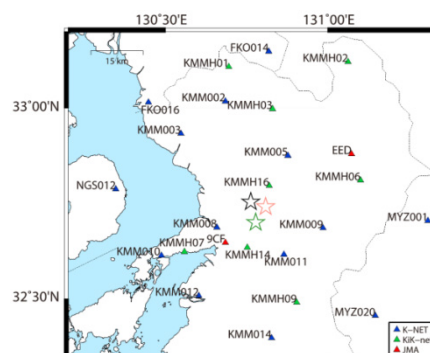
1.3.1.2 解析結果

(1) 4月14日21時26分のM6.5の地震

主なすべり域は破壊開始点周辺に広がり, 最大すべり量は 0.72m であった (第 1.3.1.3 図 (a) 及び (b)). ただし, 周辺の構造から剛性率は 31GPa として計算した. 第 1.3.1.3 図 (a) 及び (b) から, M6.5 の地震発生後から M6.4 の地震発生までの地震は, 主なすべり域の周囲で活発に発生していることが分かる. 主な破壊継続時間は約 6 秒であった (第 1.3.1.3 図 (c)). また, モーメントマグニチュード (Mw) は 6.2 であった. 解析に用いた観測点の観測波形と理論波形を第 1.3.1.3 図 (d) に示す.

(2) 4月15日00時03分のM6.4の地震

主なすべり域は破壊開始点周辺に広がり, 最大すべり量は 0.39m であった (第 1.3.1.4 図 (a)



第 1.3.1.2 図 観測点分布図

赤, 緑, 黒の星印はそれぞれ M6.5, M6.4, M7.3 の地震の震央を表す. 青, 緑, 赤の三角はそれぞれ K-NET, KiK-net, 気象庁観測点を表す.

及び (b)). ただし, 周辺の構造から剛性率は 31GPa として計算した. 第 1.3.1.4 図 (a) 及び (b) から, M6.4 の地震発生後から M7.3 の地震発生までの地震は, 主なすべり域より深い領域で活発に発生しており, これらの領域は隣り合っていることが分かる. 主な破壊継続時間は約 5 秒であった (第 1.3.1.4 図 (c)). また, モーメントマグニチュード (Mw) は 5.9 であった. 解析に用いた観測点の観測波形と理論波形を第 1.3.1.4 図 (d) に示す.

(3) 4月16日01時25分のM7.3の地震

第 1.3.1.5 図 (a) 及び (b) に断層面①, ②のすべり量分布を示す. 断層面①の主なすべり域は, 仮定した断層面の北側に広がっている. また, 南西方向へは約 12km 広がっている. 最大すべり量は 7.3m であった. ただし, 周辺の構造から剛性

率は 27GPa として計算した。主なすべりは日奈久断層帯高野一白旗区間に見られ、日奈久区間はすべりが小さいか破壊しなかったと考えられる。M7.3 の地震発生後 1 日間の地震は、主なすべり域の周囲で活発に発生している。断層面②の主なすべり域は、北東方向に約 25km 広がっており、約 10km の深さの領域に推定された。最大すべり量は 12.5m であった。ただし、周辺の構造から剛性率は 27GPa として計算した。主なすべり域は布田川断層帯布田川区間及び宇土区間の一部に広がっている。M7.3 の地震発生後 1 日間の地震は、布田川断層帯に沿って広がっているが、断層面②の北東側では活発ではない。第 1.3.1.5 図 (c) には断層面上のすべり分布の時間変化を示す。断層面①の北東端から破壊が開始し、断層面①上では破壊開始から 4～6 秒後に主なすべりが見られる。その後、断層面②上では破壊開始から 5～14 秒後のおよそ 9 秒間に主なすべりが北東方向に連続して広がって見られる。

地震全体の主な破壊継続時間は約 20 秒であった。また、地震全体のモーメントマグニチュード (Mw) は 7.2 であった。(断層面①:6.9,断層面②:7.1) (第 1.3.1.5 図 (d)) 解析に用いた観測点の観測波形と理論波形を第 1.3.1.5 図 (e) に示す。

Asano and Iwata (2016) や Kubo *et al.* (2016) では本解析結果より浅い領域にすべりの大きな領域が推定された。この違いは主に解析に用いた周波数帯や観測点ごとの重みづけの違いによると考えられる。地殻変動解析結果との比較は第 1.4.6 図及び第 1.4.7 図に示されたとおりである。

14 日 M6.5, 15 日 M6.4, 16 日 M7.3 の地震の主なすべり域を第 1.3.1.6 図に示す。14 日 M6.5 の地震では日奈久断層帯の北端が布田川断層帯と接する付近で主なすべりが生じ、15 日 M6.4 の地震ではその南方の日奈久断層帯北部で主なすべりが生じた。その後、16 日 M7.3 の地震では、日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて大きなすべりが生じた。これら 3 つの地震の主なすべり域は隣接して分布しており、およそ 28 時間のうちに複雑な断層破壊が生じたことを示している。

謝辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET, KiK-net) を使用しました。また、図の作成には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を利用した。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

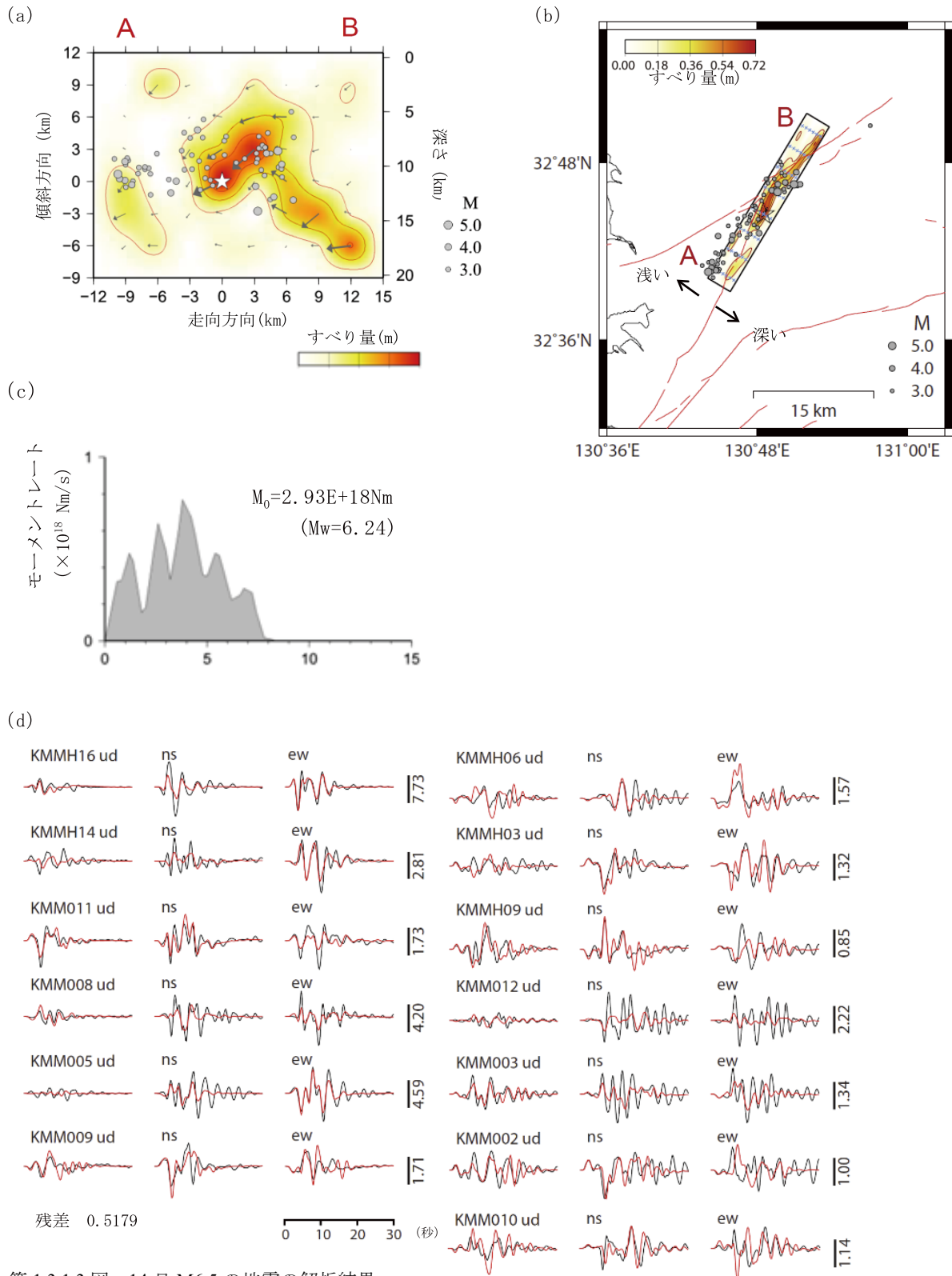
- Akaike, H. (1980) : Likelihood and the Bayes procedure. Bayesian statistics. J. M. Bernardo, M. H. DeGroot, D. V. Lindley, and A. F. M. Smith. University Press, Valencia, Spain, 143-166.
- Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara, and Y. Okada (2000) : New Strong-Motion Observation Network: KiK-net. EOS Trans. AGU, 329.
- Asano, K. and T. Iwata (2016) : 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 Space, 68:147.
- Bouchon, M. (1981) : A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 959-971.
- Ekström, G., M. Nettles and A. M. Dziewonski (2012) : The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9.
- 岩切一宏・川添安之・長谷川嘉臣 (2014) : 地震波形を用いた気象庁の震源過程解析—解析方法と断層すべり分布のスケーリング則—。験震時報, 78, 65-91.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013) : 九州地域の活断層の地域評価。(http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/regional_evaluation/kyushu-detail/, 2017年6月20日参照)
- Kennett, L. N. and N. J. Kerry (1979) : Seismic waves in a stratified half space. Geophys. J. R. Astr. Soc., 57, 557-583.
- Kinoshita, S. (1998) : Kyoshin Net (K-NET) . Seism. Res. Letter, 69, 309-332.
- Koketsu, K., H. Miyake and H. Suzuki (2012) : Japan Integrated Velocity Structure Model Version 1, paper

no. 1773. Paper Presented at the 15th World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, Lisbon, 24-28 Sept. 2012.

国土地理院 (2016) : 平成 28 年熊本地震に関する情報. <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html> (2017 年 6 月 20 日閲覧).

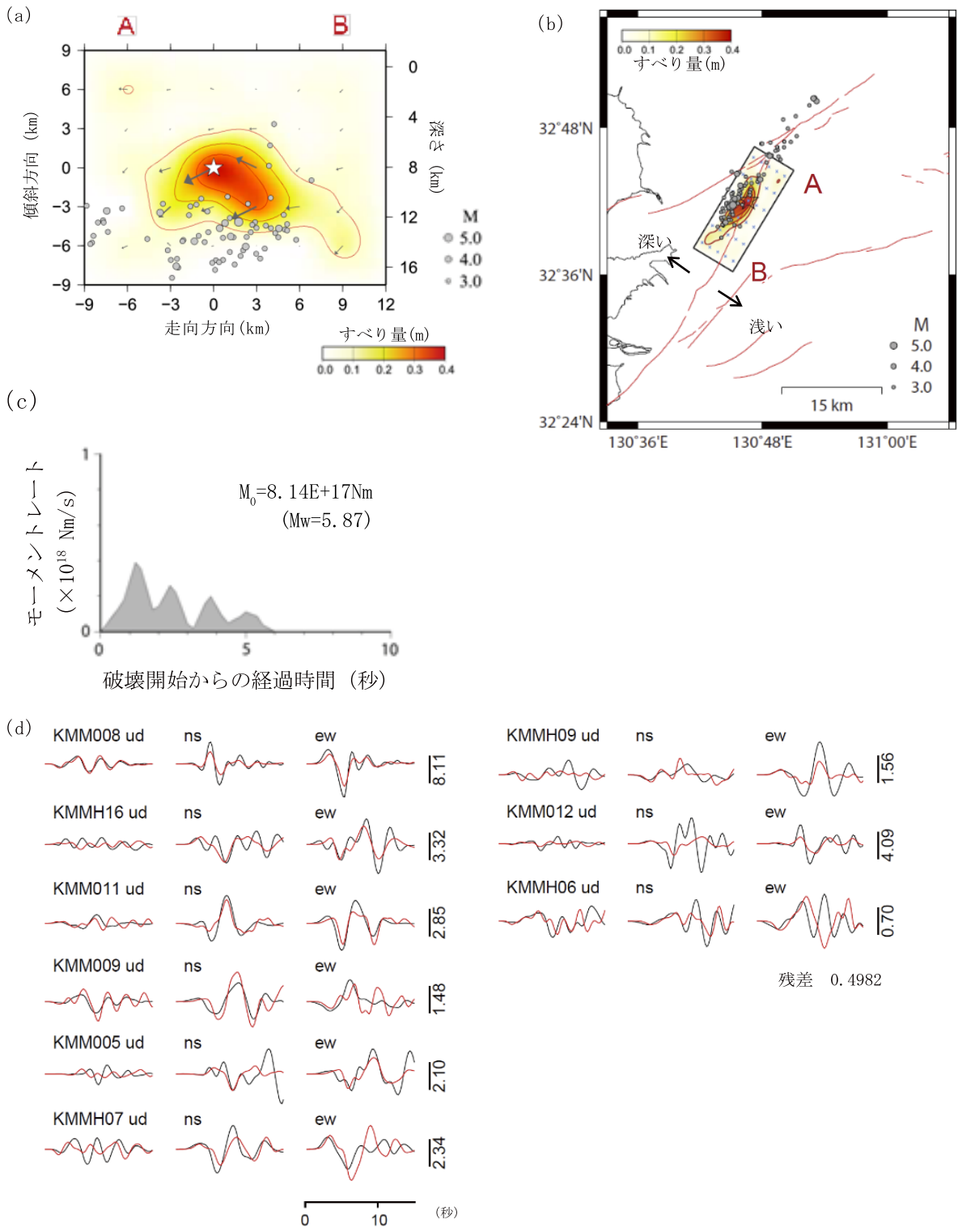
Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi and H. Sekiguchi (2016) : Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms. *Earth Planets Space*, **68**:161.

Wessel P. and W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of the generic mapping tools released. *EOS Trans. AGU*, **79**, 579.



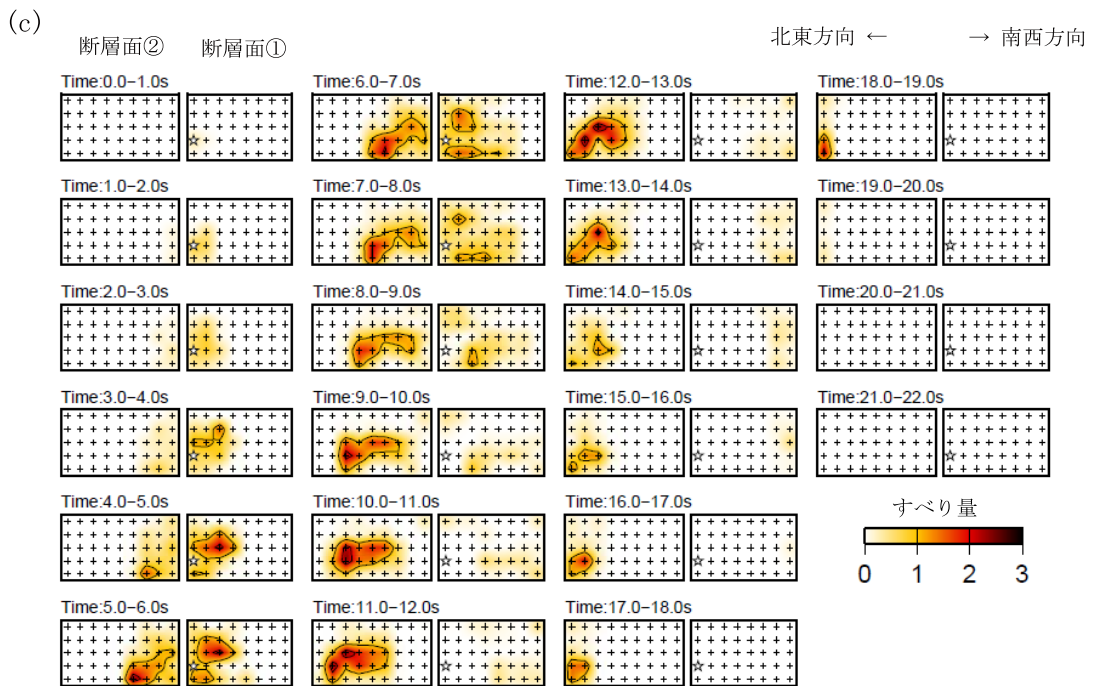
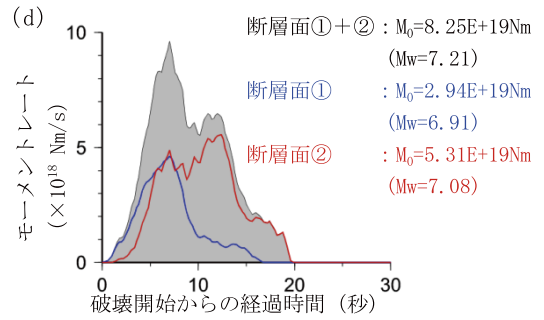
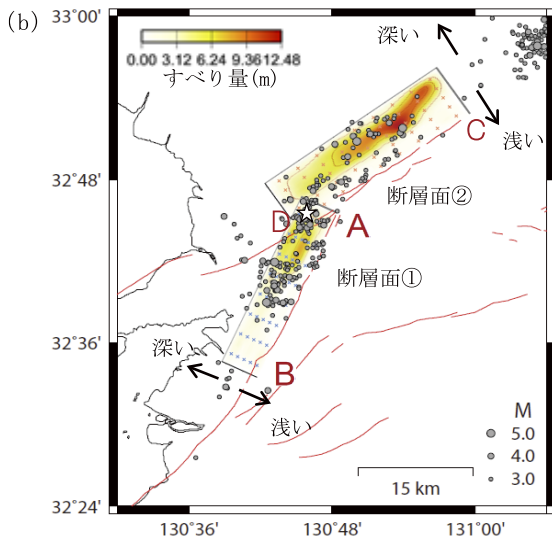
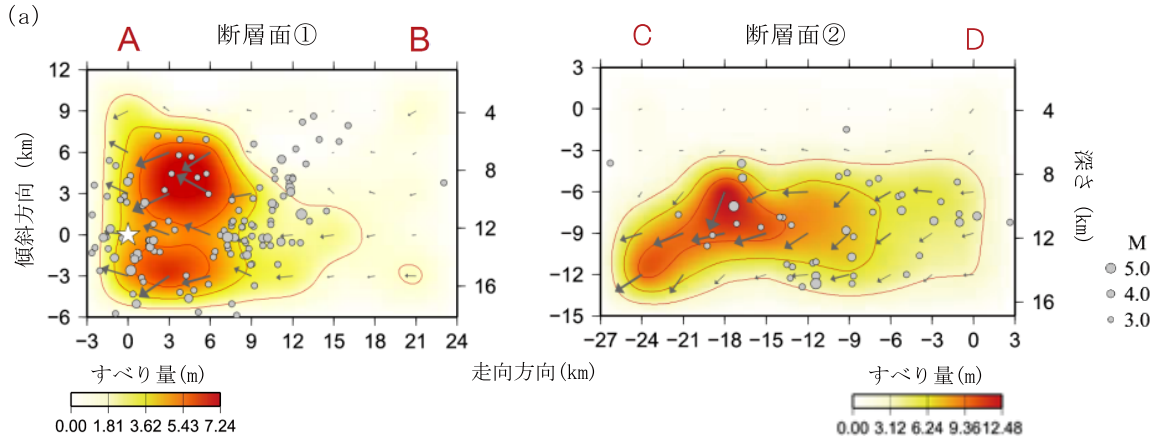
第 1.3.1.3 図 14 日 M6.5 の地震の解析結果

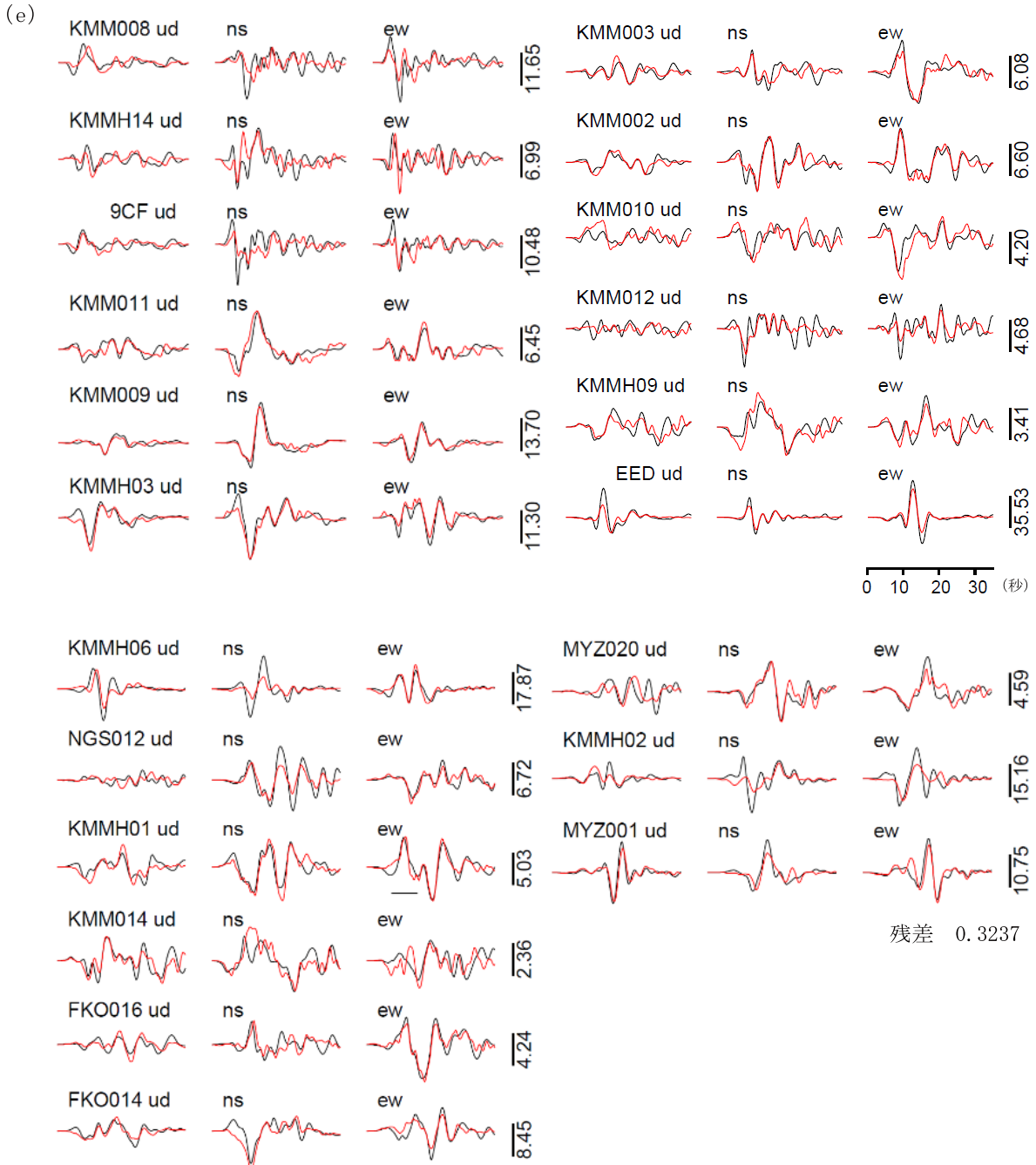
(a) 断層面上のすべり量分布。星印は破壊開始点，矢印は下盤側に対する上盤側の動きを表す。灰色の丸は 14 日 M6.5 の地震発生から 15 日 M6.4 の地震発生までの地震 (M3.0 以上) のうち，断層面から 3km 以内の地震の震央を示す。(b) 地図上のすべり量分布。矩形断層面内の星印は破壊開始点を示す。赤線は，地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層を示す。(c) 震源時間関数。(d) 観測波形 (黒: 0.05Hz-0.33Hz) と理論波形 (赤) の比較。振幅の単位は cm/s。



第 1.3.1.4 図 M6.4 の地震の解析結果

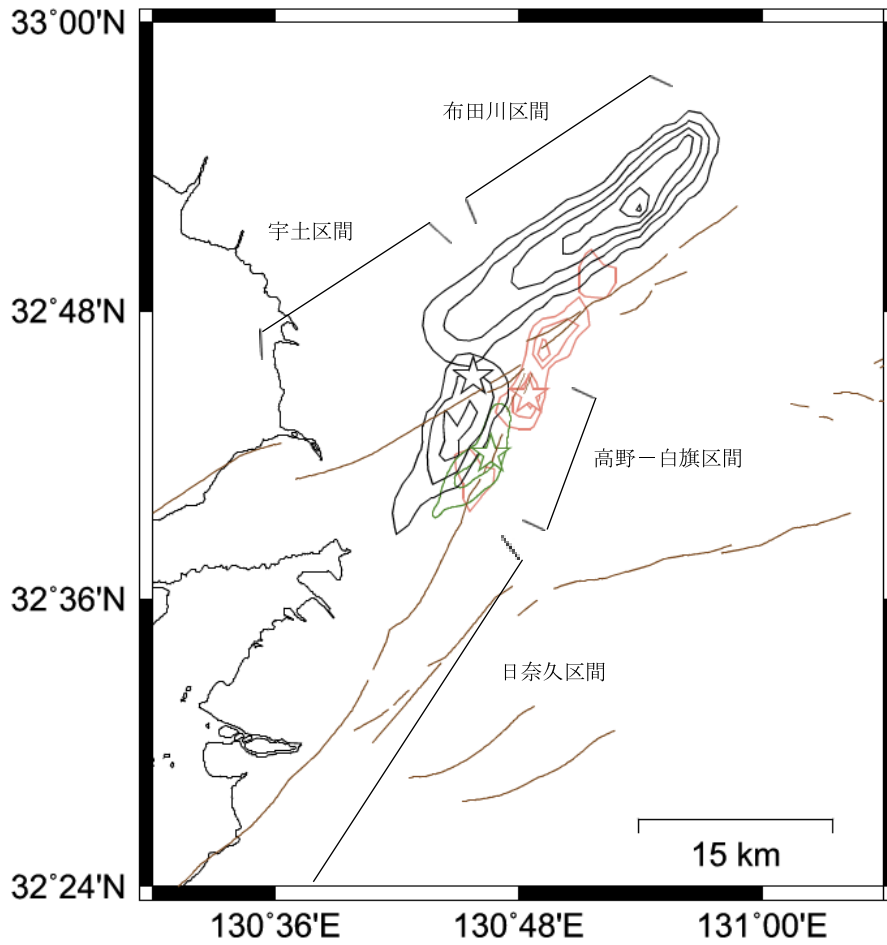
(a) 断層面上のすべり量分布。第 1.3.1.3 図と同様。灰色の丸は 15 日 M6.4 の地震発生から 16 日 M7.3 の地震発生までの地震 (M3.0 以上) のうち、断層面から 3km 以内の地震の震央を示す。(b) 地図上のすべり量分布。第 1.3.1.3 図と同様。灰色の丸は M6.4 の地震発生から M7.3 の地震発生までの地震 (M3.0 以上) の震央を示す。赤線は、地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層を示す。(c) 震源時間関数。(d) 観測波形 (黒: 0.05Hz-0.33Hz) と理論波形 (赤) の比較。振幅の単位は cm/s。





第 1.3.1.5 図 M7.3 の地震の解析結果

(a) 断層面上のすべり量分布. 第 1.3.1.3 図と同様. 灰色の丸は 16 日 M7.3 の地震発生から 1 日間の地震 (M3.0 以上) のうち, 各断層面から 3km 以内の地震の震央を示す. (b) 地図上のすべり量分布. 第 1.3.1.3 図と同様. 赤線は, 地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層を示す. (c) 断層面上のすべり量分布の時間変化. “Time” は破壊開始からの時間を表す. (d) 震源時間関数. 青線は断層①, 赤線は断層②の震源時間関数を表す. 黒線は地震全体の震源時間関数を表す. (e) 観測波形 (黒: 0.05Hz-0.2Hz) と理論波形 (赤) の比較. 振幅の単位は cm/s.



第 1.3.1.5 図 3つの地震の主なすべり域

赤は14日 M6.5の地震, 緑は15日 M6.4の地震, 黒は16日 M7.3の地震の破壊開始点とすべり量の等値線を表す. 赤線と緑線は0.15m 間隔, 黒線は2m 間隔. 茶線は地震調査研究推進本部の長期評価による活断層を示す.

1.3.2 バックプロジェクション解析*

2016年4月14日、16日に発生した熊本地震のM6.5とM7.3の地震のバックプロジェクション法による解析結果を報告する。バックプロジェクション法では想定される震源域に、地震波の励起源を仮定し、励起源に地震波形記録を逆投影して足し合わせることで地震波の励起源を推定する手法である。本稿で用いた手法はバックプロジェクション法の一つであるKao and Shan (2004)によるSource-Scanning-Algorithm (SSA法)である。この手法では、解析対象の時空間領域内にグリッドを配置し、観測点のS波到達時刻付近の波形記録を重ね合わせ、Brightnessという値(Br値)を求める。あるグリッド ϕ 、ある時刻 τ のBr値を次の(1)式で定義する。

$$Br(\phi, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i(\tau) u_i(\tau + t_{i\phi}) \quad (u_i \geq 0) \quad (1)$$

$$f_i(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq t_{oi} - T/2) \\ \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[\frac{2(t - t_{oi})\pi}{T} \right] + 1 \right\} & (t_{oi} - T/2 < t < t_{oi}) \\ 1 & (t \geq t_{oi}) \end{cases}$$

N は観測点数、 u_i は観測点 i での規格化された波形、 $t_{i\phi}$ はグリッド ϕ から観測点 i までのS波の理論走時である。ここでは解析対象ではない相やノイズの影響を低減するために、Kiser *et al.* (2011)によるtaper関数 $f_i(t)$ をBr値の計算に組み込んだ。 t_{oi} は一元化震源の位置から観測点 i までのS波の理論走時で、 T はtaper関数の周期である。ここでは $T=8.0$ 秒とした。上式で計算したBr値の大きな領域を地震波の励起源として推定する。Br値は(1)式で解析対象の波形データの振幅が大きくなるほど高値となる。つまり、ここで求めるBr値の高い領域とは最大振幅の励起源であると考えられる。

本稿では、S波の波形でBr値を計算するため、データには余震域周辺のK-NET、KiK-net(地中)観測点の水平動成分2成分の強震波形記録を利用した。まず各観測点の2成分の波形に2.0-8.0Hzのバンドパスフィルタ、100Hzから20Hzへのリサンプリング処理を施し、2成分ベクトル合成を

行い、二乗平均平方根(RMS)値を求めて解析に用いた。そのためここで u_i は0以上の数値となる。各グリッドから観測点までのS波の理論走時計算には気象庁で使用している地震波速度構造であるJMA2001(上野ほか(2002))に基づく走時表を使用し、(1)式に従い0.05秒間隔で全てのグリッドに対してBr値を計算した。

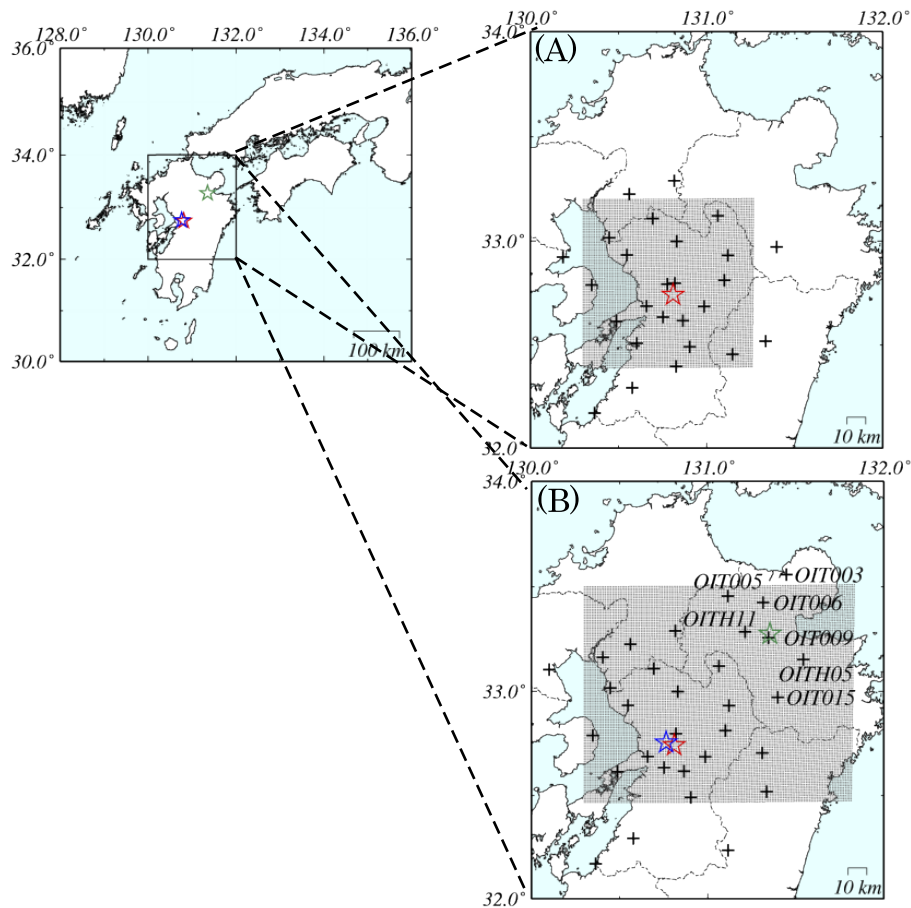
2016年4月14日のM6.5の地震の解析に用いた観測点、グリッドの配置を第1.3.2.1図(A)に、解析結果を第1.3.2.2図に示す。グリッドの間隔は水平方向1.0km、鉛直方向に2.0km(深さ0~20km)である。第1.3.2.2図でBr値を水平面に投影する際には、(1)式で計算したBr値にグリッドの深さごとにスムージングを施し、鉛直方向に最大値フィルタをかけプロットしている。まず、最初にSSA法による解の妥当性の検討を行うために簡単な解像度テストを行った。解像度テストは、解析対象の地震の震源から第1.3.2.2図(C)に示したテスト波形(1/2周期のsin波)が励起され、実際の解析に用いる観測点セットで観測されたと仮定して、震源(地震波の励起源)とBr値について比較を行った。なお、解像度テストは単に震源位置と観測点配置の組み合わせによるBr値の妥当性を検証するために行っているため、実際に観測された地震波にみられる減衰やランダムノイズの影響は考慮していない。解像度テストの結果(第1.3.2.2図(A))では、実データによる解析結果(第1.3.2.2図(B))より1秒程早い、震央位置付近に高Br値の領域がある。Br値は一元化震源の震央付近を中心として同心円状に分布し、その後の時刻において高Br値の領域は消散している。このことから、本稿の解析結果は地震波の励起源の推定手法として十分な信頼性があると考えられる。実データによる解析結果では(第1.3.2.3図)、高Br値の領域が日奈久断層帯の北部にある。この高Br値の領域は、一元化震源の震央位置とほぼ一致しており、この地震については初期破壊開始点と対応していると考えられる。本報告書第1.3.1項の近地強震波形を用いた震源過

* 地震火山部地震予知情報課 森脇 健 (現 地震津波監視課)
地震津波監視課 山本 麦 (現 地震予知情報課)

程解析では、2016年4月14日のM6.5の地震の主たるすべり域は破壊開始点付近に分布していることを指摘している。この地震については主たるすべり域と高Br値の領域が対応している。

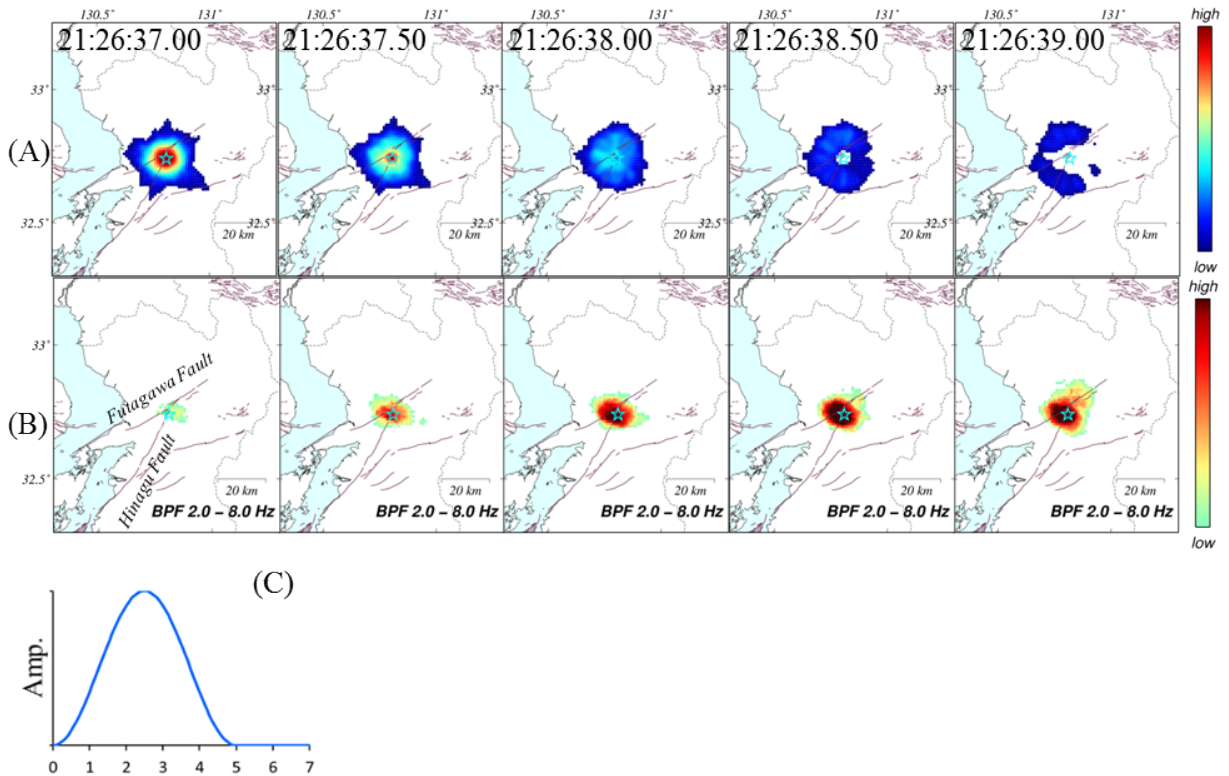
2016年4月16日のM7.3の地震（本震）の解析結果を第1.3.2.3図に示す。解析に用いた観測点、グリッドの配置は第1.3.2.1図（B）に示す。この地震は4月14日に発生した地震より規模が大きく、余震の震源が広域に分布し、地震波の励起源が広域にわたることが想定されたので、4月14日の地震より広い範囲の観測点のデータを解析に用いた。グリッドも余震の震源分布を包含するように配置した。グリッドの間隔は水平方向1.0km、鉛直方向5.0km（深さ0～20km）とし

て、グリッドごとのBr値には4月14日の解析結果と同様の処理を施した。高Br値の領域は、震源時から約5秒後（01時25分10秒頃）に一元化震源付近の布田川断層帯に生じ、その後で日奈久断層帯の北部方向に励起源が進行しているようにも見える。国土地理院によるSAR（Synthetic Aperture Radar / 合成開口レーダー）及びGNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）データ解析結果では、布田川断層帯だけではなく日奈久断層帯の北部でも断層の動きが生じたことが示唆されている（国土地理院, 2016）。本報告書の震源過程解析の結果でも日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて大きなすべりが生じたことを指摘している。本稿での解析



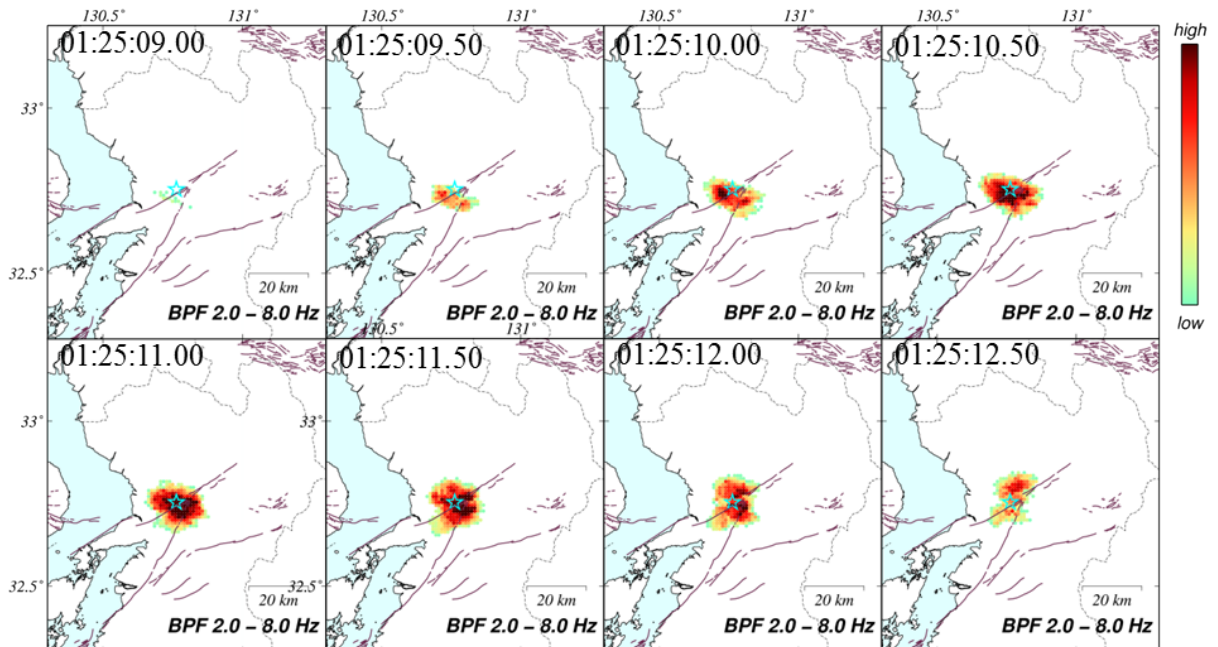
第1.3.2.1図 解析を行った地震の震央と使用した観測点、グリッドの分布

赤色の星印が2016年4月14日21時26分34秒のM6.5、青色の星印が4月16日01時25分05秒のM7.3、緑色の星印が4月16日01時25分37秒のM5.7の地震の震央を示す。黒色の+印が観測点で、灰色ハッチがグリッドを配置した領域を示す。(A)が2016年4月14日の地震の解析に用いたもので、(B)が2016年4月16日の地震のものである。第1.3.2.4図に波形を示した大分県内の観測点には、観測点コードを記載している。



第1.3.2.2図 2016年4月14日21時26分34秒のM6.5の地震のSSA法による解析結果

青緑色の星印はM6.5の地震の震央を示す。(A) 解像度テストの結果。青色、緑色、赤色の順でBr値が高いことを示す。(B) SSA法により求めた2016年4月14日21時26分37秒から21時26分39秒まで(0.5秒ごと)のBr値の分布である。赤色が濃くなるほどBr値が高いことを示す。活断層を茶色の実線で示す。(C) 解像度テストで入力データとして用いたテスト波形である。

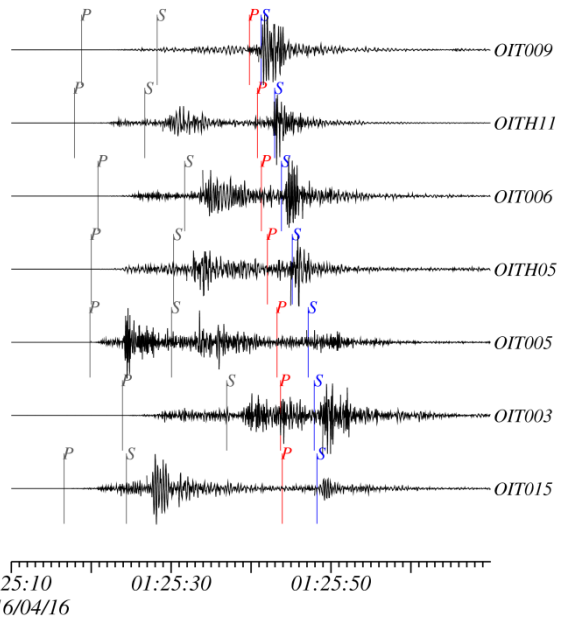


第1.3.2.3図 2016年4月16日01時25分05秒のM7.3の地震(本震)のSSA法による解析結果

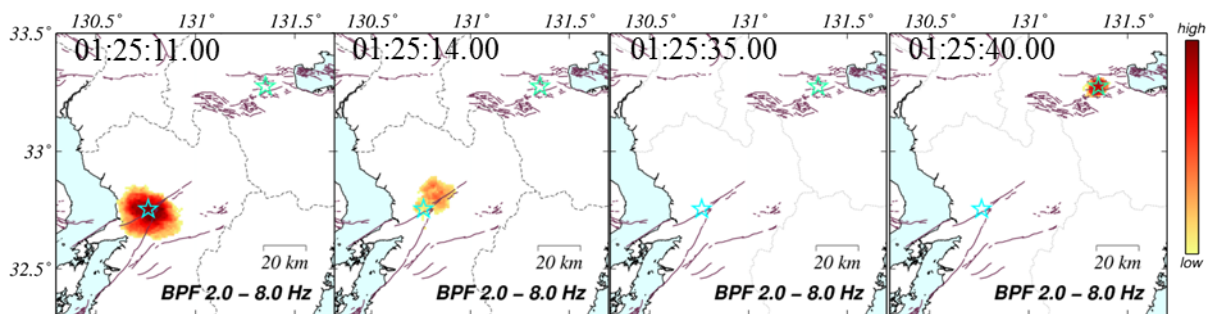
青緑色の星印はM7.3の地震の震央を示す。地震発生後の2016年4月16日01時25分09秒から01時25分12.5秒まで(0.5秒ごと)のBr値の分布である。赤色が濃くなるほどBr値が高いことを示す。活断層の位置を茶色の実線で示す。

による日奈久断層帯の北部の高 Br 値の領域は、断層の動きに伴い発生した地震波の励起源の移動を見ている可能性があると考えられる。解析対象である M7.3 の地震の約 32 秒後に大分県中部で M5.7 の地震が発生している。第 1.3.2.4 図に M5.7 (参考値) の地震の大分県内の 7 観測点における南北成分の波形記録を示す。波形記録では M5.7 の地震により生じた S 相を認識することができるものの、本震により生じた相やコーダ波が混在し、一部では地震波形が重なっている。このように解析対象の相が認識困難な状況ではあるが、地震発生時刻付近の Br 値の分布 (第 1.3.2.5 図) を見ると、01 時 25 分 40 秒に大分県中部に高 Br 値の領域がある。その高 Br 値の領域は、一元化震源の震央位置とほぼ一致している。Nakamura and Aoi (2017) では、本稿と同様に K-NET, KiK-net 観測点の波形データを用いてバックプロジェクション解析を行い、大分県中部の地震の震源決定に成功している。

本稿の SSA 解析により、2016 年 4 月 14 日の M6.5、本震の両方で一元化震源の震央付近に高 Br 値の領域があることが明らかとなった。本震では、高 Br 値の領域が布田川断層帯のほか、日奈久断層帯の北部に及んでいるように見え、地震波の励起源が日奈久断層帯にも及んでいる可能性があると考えられる。



第 1.3.2.4 図 2016 年 4 月 16 日 01 時 25 分 37 秒に大分県中部で発生した M5.7 の地震の大分県内の 7 観測点の南北成分の地震波形である (観測点の位置については第 1.3.2.1 図参照)。赤線、青線は大分県中部の地震の P 相、S 相の理論到達時刻を示す。灰色の線は同日の 1 時 25 分に熊本県熊本地方で発生した M7.3 の地震の P 相、S 相の理論到達時刻を示す。本図のプロットには、防災科学技術研究所のデータを使用している。



第 1.3.2.5 図 2016 年 4 月 16 日 01 時 25 分 37 秒に大分県中部で発生した M5.7 の地震の SSA 法の解析結果である Br 値の分布

図の左上に解析時刻を示す。緑色の星印が大分県中部の地震の震央で、青緑色の星印が同日同時刻に熊本県熊本地方で発生した M7.3 の地震の震央である。赤色が濃くなるほど Br 値が高いことを示す。活断層を茶色の実線で示す。

参 考 文 献

- 上野寛・島山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信夫 (2002) :
気象庁の震源決定方法の改善－浅部速度構造と重
み関数の改良－. **65**, 123-134.
- 国土地理院 (2016) : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震.
地震予知連絡会会報, **96**, 557-589.
- Kao, H. and S. -J. Shan (2004) : The Source-Scanning
Algorithm:mapping the distribution of seismic sources
in time and space. *Geophys J Int* **157**(2), 589-594.
doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x
- Kiser, E., M. Ishii, Langmuir, C.H., Shearer, P.M., and
Hirose, H (2011) : Insights into the mechanism
of intermediate-depth earthquakes from source
properties as imaged by back-projectin of multiple
seismic phases. *J. Geophys. Res.* **116**, B06310,
doi:10.1029/2010JB007831.
- Nakamura, T. and Aoi, S. (2017) : Source location and
mechanism analysis of an earthquake triggered by the
2016 Kumamoto, southwestern Japan, earthquake. *Earth
Planets Space* **69**:6. doi: 10.1186/s40623-016-0588-9

1.4 地殻変動*

陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2/PALSAR-2)を用いた合成開口レーダ(SAR)干渉解析

1.4.1 はじめに

「だいち2号」(Advanced Land Observing Satellite 2, 以下, ALOS-2 という.) は2014年5月24日に種子島宇宙センターから打ち上げられた陸域観測技術衛星である。先代の「だいち」(以下, ALOS という.) に引き続き, 衛星に搭載されたマイクロ波センサ(PALSAR-2)を用いた位相情報を使い, 干渉処理を行うことで地殻変動を計測することが可能である。ALOS-2は, ALOSに比べて回帰日数が大幅に短縮されており, 最短で14日後に同一地域を同じモードで撮像することが可能となった。このため, 災害時における観測はアーカイブデータさえ存在すれば, 迅速な解析が可能となった。また, ALOS-2では, 軌道進行方向に対して左側の観測も可能となり, 対象エリアについて観測の選択肢が大幅に増えたことや, ALOS時には仕様の関係で干渉処理解析に制約のあった広域観測モード(以下, ScanSAR という.) についても, 原則すべてのデータで解析可能となり, 規模の大きな地震などによる広範にわたる地殻変動についても, 容易なSAR干渉解析が可能になった。

本報告では, 熊本地震に伴う地殻変動の解析結果について記載する。

1.4.2 使用データ

気象庁及び気象研究所は国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下, JAXA という.) が主体となって進めている地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ(地震SAR解析WG)に参加しており, 今回の地震に関するPALSAR-2データは, この枠組みで観測要求・提供が行われた。解析に使用したデータは, この枠組みで提供されたもののほか, 一部については, 東京大学とJAXAによる共同研究(以下, PIXEL という.) を通じて提供されたデータを使用した。な

お, SAR干渉解析についてはRINC(Ozawa *et al.*, 2016)という解析ツールを使用した。処理過程で必要な地形データについては, 国土地理院が発行している10mメッシュ(標高)を基にした楕円体標高モデルを用いた。SAR干渉解析を行うには地震発生前後に観測された一対の「干渉ペア」と呼ばれる2つのデータが必要である。本報告で使用したペアを第1.4.1表に示す。

1.4.3 SAR干渉解析結果

規模の大きな地震が複数発生した場合, 選択する干渉ペアによっては, 必ずしも個々の地震に対応する地殻変動が得られるとは限らない。熊本地震の場合においても, 多くの干渉ペアがやや規模の大きな地震(4月14日:Mj6.5と15日:Mj6.4)と規模の大きな地震(4月16日:Mj7.3)の両方を含む解析結果となってしまうため, 本報告では, これらの各々を挟むペアのみに絞り, 以下に結果を記載する。

(1) 4月14, 15日に発生した地震に伴う地殻変動

第1.4.1図に主に14日(Mj6.5)と15日(Mj6.4)の地震活動に伴うと考えられるSAR干渉解析結果を示す。解析に使用したデータは南行軌道の左観測のみで, 震源域を西側上空から撮像した2014年11月14日(今回の一連の地震前)と2016年4月15日(Mj6.4の地震後かつMj7.3の地震前)を用いた。その結果, 2つの震央の南西側で約15cmの衛星視線方向伸長, 北西側で約8cmの短縮の位相変化が検出された。また, 南東側においても2-3cm程度の伸長位相変化が検出されたほか, 布田川断層帯と日奈久断層帯沿いにおいても衛星視線方向伸長の位相変化が検出された。なお, 位相の不連続は確認できないことから, 地表面まで達している断層はないと考えられる。

(2) 4月16日に発生した地震に伴う地殻変動

第1.4.2図に主に16日(Mj7.3)の地震活動に伴うSAR干渉解析結果を示す。解析に用いたデータは, 4月15日0時3分に発生したMj6.4の地震後かつ16日1時25分に発生したMj7.3の地

* 気象研究所地震津波研究部 安藤 忍

震前に撮像されたデータと4月29日に撮像されたデータを用いた。

南行軌道左観測（震源域の西側上空）の解析では、布田川断層帯沿いの北側で、2m弱の衛星視線方向伸長位相変化と阿蘇山北側で20cm以上の衛星視線方向短縮の位相変化が検出された。また、断層帯の南側では、大局的には短縮の位相変化が検出されているが、断層帯近傍を細かく見ると、位相短縮と伸長が混在しており、複雑な地殻変動の結果が判読できる。

北行軌道左観測（震源域の東側上空）の解析では、布田川断層帯の北側で約150cmの衛星視線方向伸長の位相変化が検出されたが、その西側の熊本市の市街地付近では、15cm程度、東側の阿蘇山の北西側では、50cm弱の衛星視線方向短縮の位相変化が検出された。さらに阿蘇山付近と布田川断層帯の南側では、60cm程度、日奈久断層の西側では、10cm程度の衛星視線方向伸長の位相変化が検出された。また、2方向からのSAR干渉解析結果が得られたので、2つの解析を合成した2.5次元解析（Fujiwara *et al.*, 2000）も行った（第1.4.3図）。国土地理院の電子基準点「五木」付近を無変動と仮定すると、準東西方向では、布田川断層帯に沿って、北側で東向き、南側で西向き成分の顕著な地殻変動が得られた。また、準上下方向では、布田川断層の北側で顕著な沈降成分の変動が得られたほか、断層の南側と阿蘇山の北西側で、隆起成分の変動が検出された。また、2.5次元解析で計算された範囲内における国土地

理院のGNSS観測点における変位量との比較を第1.4.4図に示す。熊本県北などで一部変位量の不一致があるが、断層近傍では概ね整合的であり、今回の地震が右横ずれ断層運動であることと調和的である。

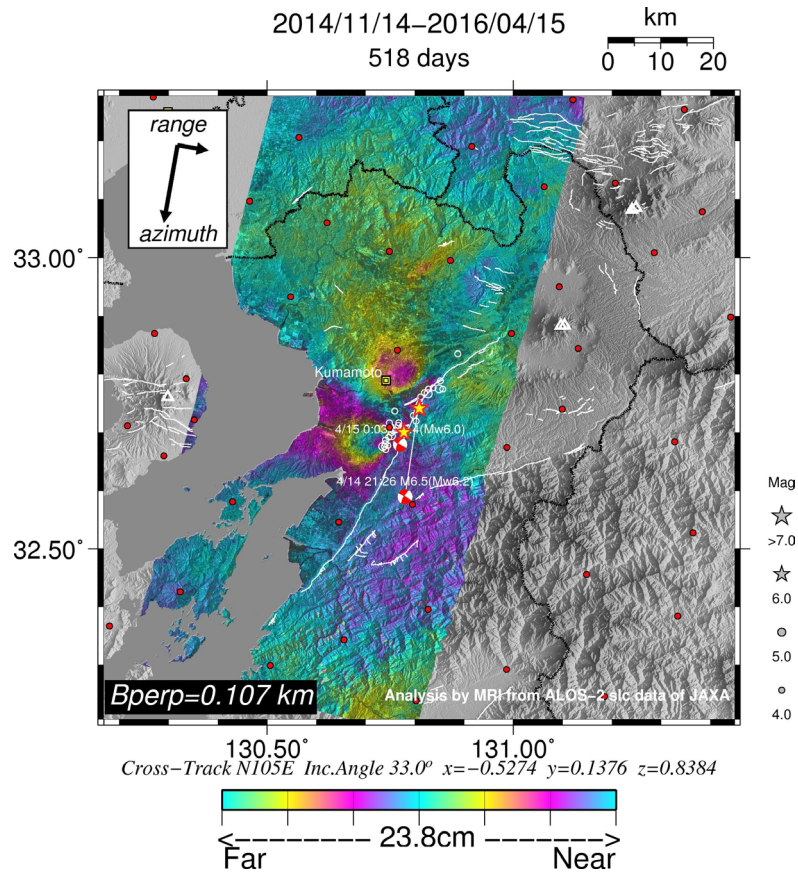
(3) 余効変動

第1.4.5図に本震以降に撮像されたデータを用いたSAR干渉解析結果を示す。前震及び本震を挟むパスとは異なり、衛星視線方向の入射角などが異なるが、主に布田川断層沿いに熊本市から阿蘇山にかけて顕著な位相変化が検出された。最短ペア（14日）の変化量は最大で5cm程度の衛星視線方向伸長であった。また、布田川断層帯の南側に位置する緑川断層帯付近においても、衛星視線方向伸長の位相変化が見られるが、標高に相関した位相変化の可能性もあり、実際の地殻変動かどうかは不明である。なお、本震を挟むペアと同様に、2方向からのSAR干渉解析結果が得られたため、2.5次元解析を行った（第1.4.6図）。無変動と仮定した場所は、同じく国土地理院の電子基準点「五木」付近とした。その結果、準東西方向の結果では、全体的に東向きの変動が主体であるが、布田川断層帯と日奈久断層帯が交じわる地域で西向きの変動が検出された。また、日奈久断層の南西端部分においても西向きの変動が顕著である。一方、準上下方向の結果では、布田川断層帯の南側では、隆起傾向があるものの、日奈久断層帯との交差付近の北側では、沈降成分が卓越していることがわかった。また、阿蘇山カルデラ内

第1.4.1表 解析に使用したSARデータ

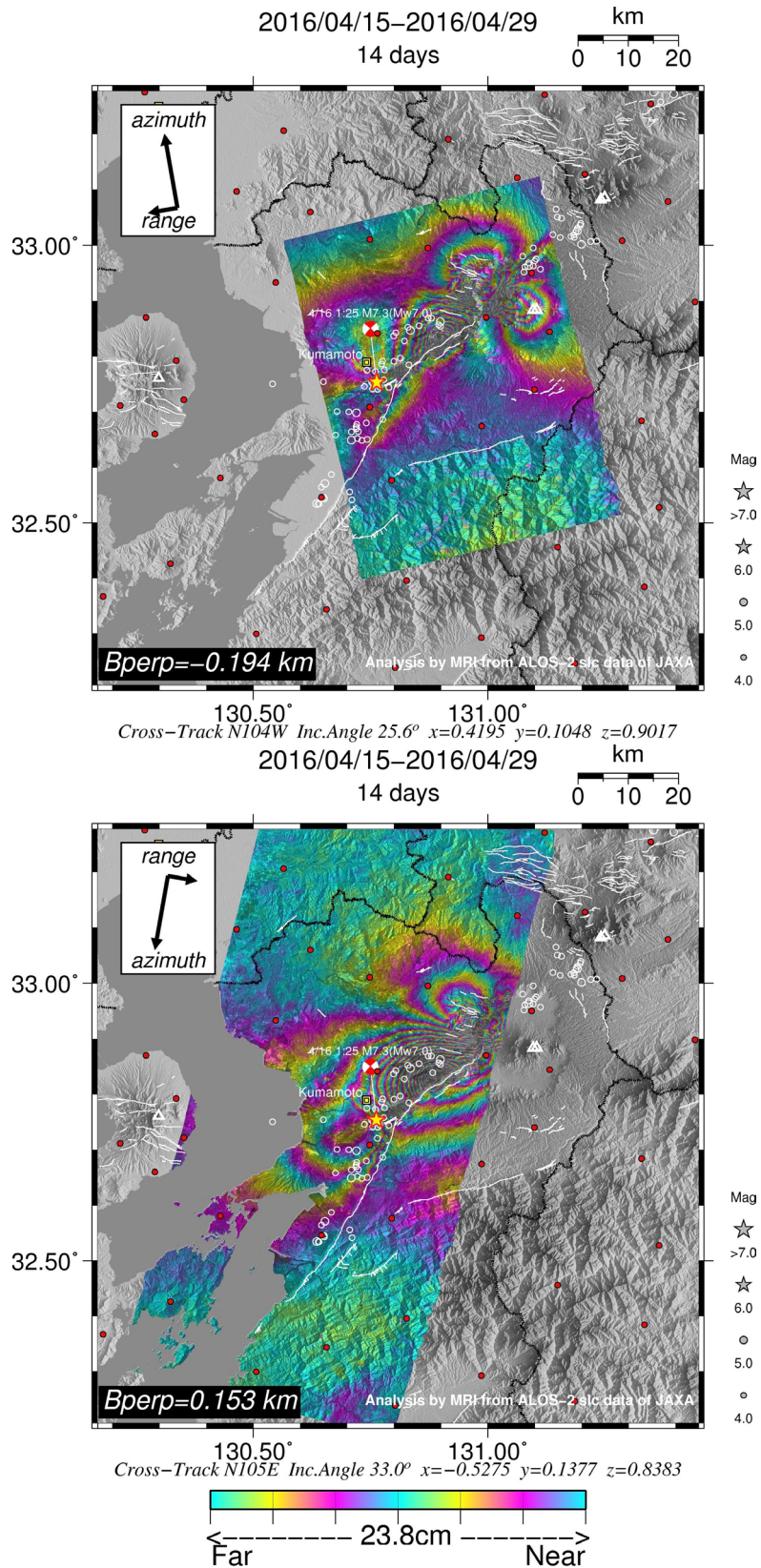
Path	Frame	Data1 (JST)	Data2 (JST)	Orbit	Obs.	Inc. Angle	Figure	Memo
28	2920, 2930	2014.11.14 (12:53)	2016.04.15 (12:52)	Des.	L	33.4°	Fig.1.4.1	Including Mj6.5 and Mj6.4
28	2920, 2930	2016.04.15 (12:52)	2016.04.29 (12:52)	Des.	L	33.0°	Fig.1.4.2, 3	Including Mj7.3
126	670	2016.04.15 (23:44)	2016.04.29 (23:44)	Asc.	L	25.6°		
129	650	2016.04.17 (00:04)	2016.05.01 (00:04)	Asc.	R	19.5°	Fig.1.4.5, 6	After Mj7.3
23	2950, 2960	2016.04.18 (12:18)	2016.05.02 (12:18)	Des.	R	37.3°		
130	650	2015.12.04 (00:11)	2016.04.22 (00:11)	Asc.	R	32.6°	Fig.1.4.9	Cohrence images
		2016.04.22 (00:11)	2016.05.06 (00:11)					

※ Des. : Descending (南行軌道), Asc. : Ascending (北行軌道), L : Left (左観測), R : Right (右観測)



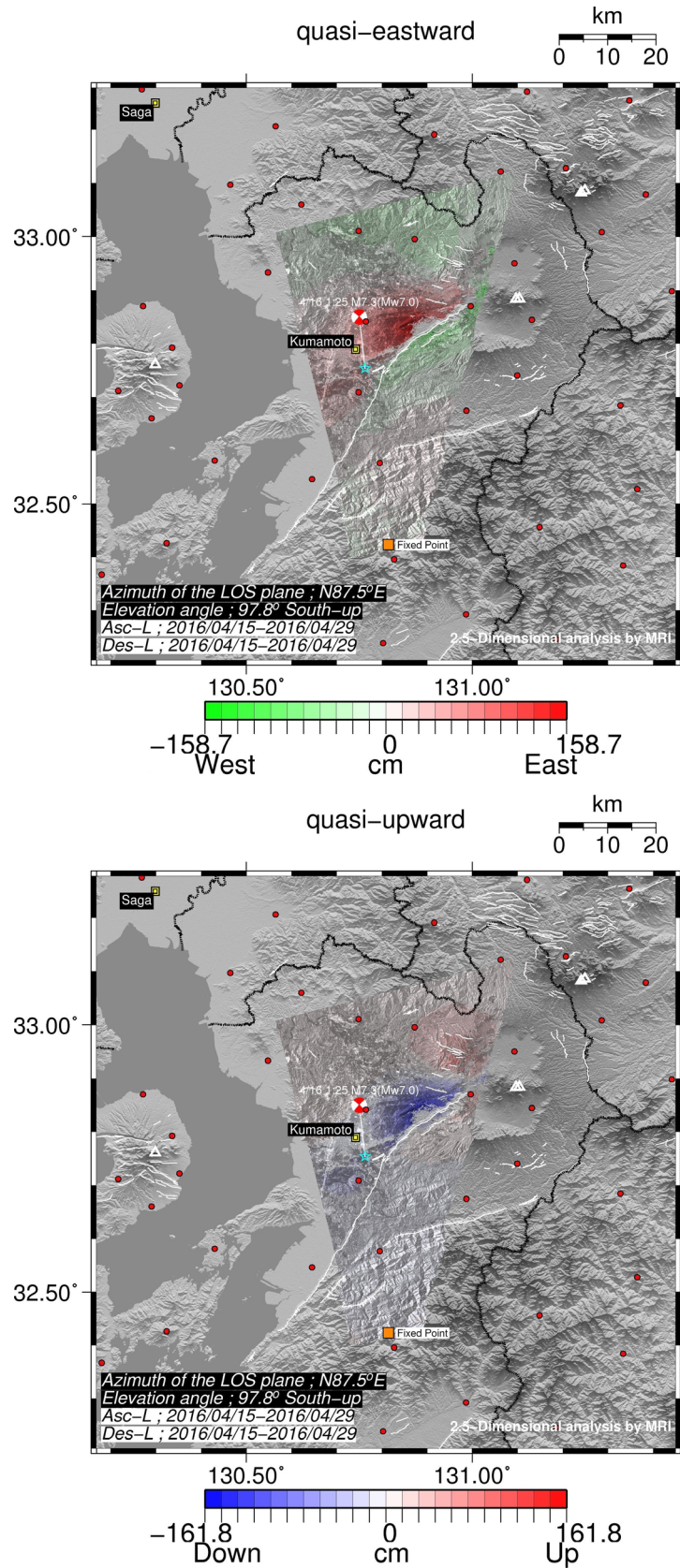
第 1.4.1 図 2つの地震（4/14:Mj6.5, 4/15:Mj6.4）を含む SAR 干渉解析結果（南行軌道左観測）

図中の星印は2つの前震の震央位置，白丸はM4以上の一元化震源による震央位置，震源球はセントロイド位置を示す．白線は活断層，白三角は火山の山頂位置を示す．赤丸は国土地理院のGNSS観測点を示す．なお，本節のデータのプロットにあたってはPALSAR-2のデータ等，気象庁以外の機関のデータを使用している（第1.4.2項使用データ参照）．

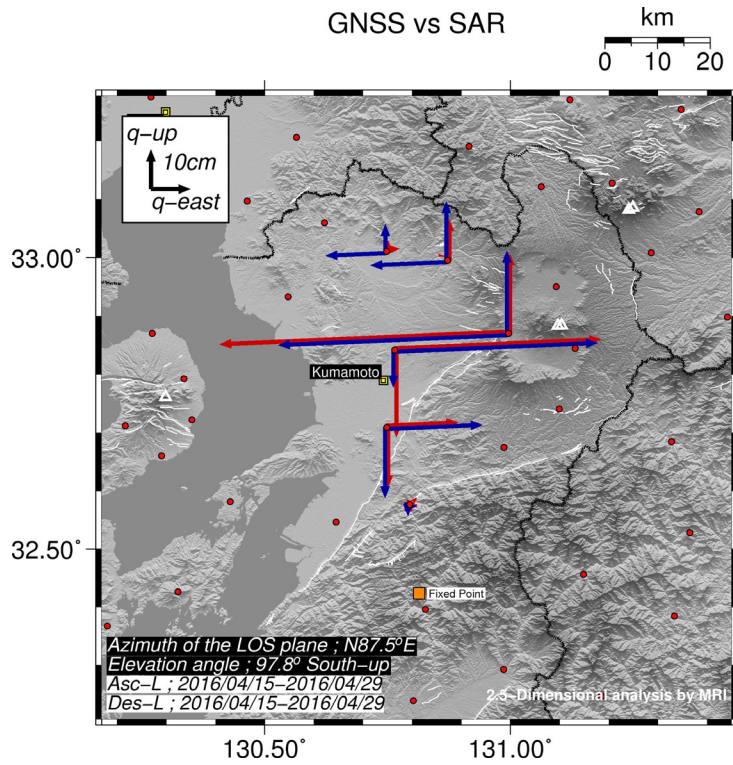


第 1.4.2 図 4/16 (Mj:7.3) に発生した地震における SAR 干渉解析結果 (上: 北行軌道左観測, 下: 南行軌道左観測)

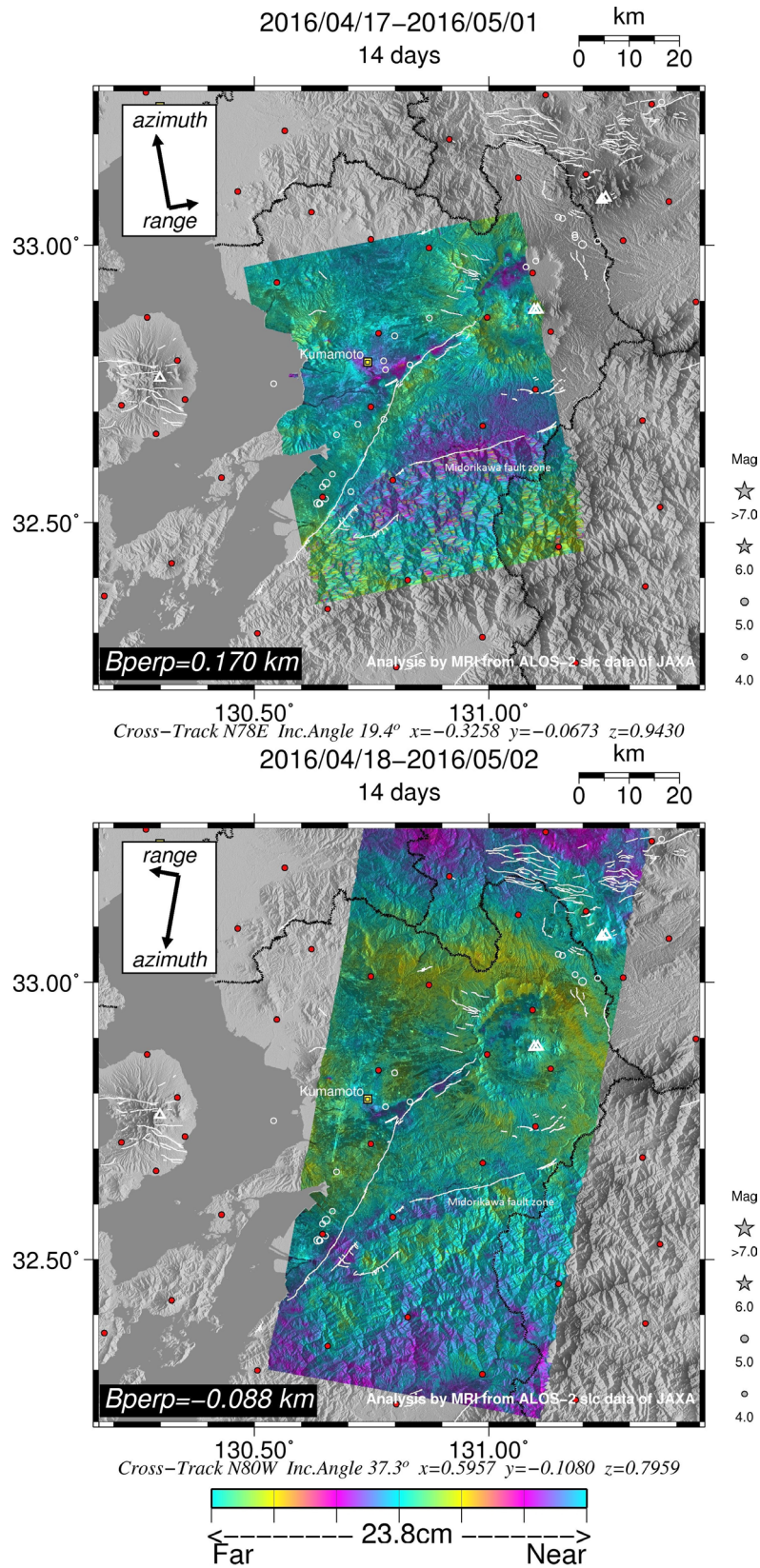
図中の凡例は, 第 1.4.1 図と同じ.



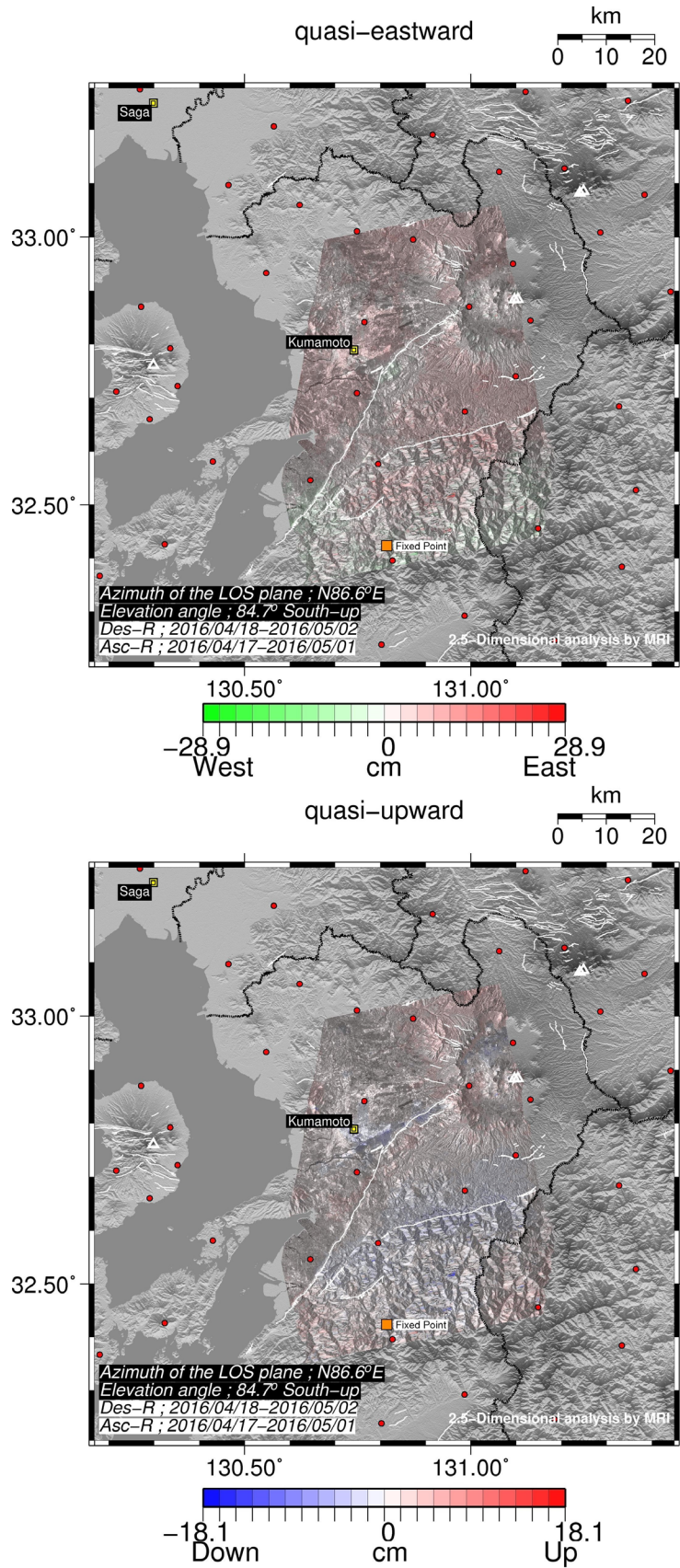
第 1.4.3 図 4/16 (Mj7.3) に発生した地震における 2.5 次元解析結果 (上: 準東西方向, 下: 準上下方向)
 図中の星印は震央, 震源球はセントロイド位置を示す. 白線は活断層, 白三角は火山の山頂位置を示す.
 赤丸は国土地理院の GNSS 観測点, 橙四角は無変動と仮定した地点を示す.



第 1.4.4 図 国土地理院の GNSS 観測点における 2.5 次元解析結果と GNSS 変位量の比較
赤矢印：GNSS 観測点「五木」を基準とした各 GNSS 観測点の変位量。青矢印：橙四角を基準とした各 GNSS 観測点における 2.5 次元解析結果から計算された変位量。



第 1.4.5 図 4/16 (Mj7.3) に発生した地震後の SAR 干渉解析結果 (上:北行軌道右観測,下:南行軌道右観測)
図中の凡例は, 第 1.4.1 図と同じ.



第1.4.6図 4/16 (Mj7.3) に発生した地震後の2.5次元解析結果 (上: 準東西方向, 下: 準上下方向)
図中の凡例は, 第1.4.3図と同じ.

の北側部分でも沈降成分が検出された。なお、緑川断層帯付近に沿っても沈降成分が確認できるが、北行右観測の観測結果を踏まえるとノイズの可能性を否定できない。

1.4.4 震源過程解析（第1.3.1項）結果との比較

次に、近地の地震波形を用いた震源過程解析結果により推定された震源断層モデルを使った干渉縞を作成し、観測結果と比較した。

2つの前震に伴う地殻変動では、震源過程解析で推定された震源断層モデルにより得られた干渉パターンの方が位相変化量は過小であるが、衛星視線方向伸長及び短縮の領域は概ね整合性がとれていることがわかった（第1.4.7図）。

同じく本震に伴う地殻変動でも、大局的な干渉パターンは調和的であるものの、震源過程解析で得られた震源断層モデルによる位相変化では特に断層帯近傍において過小評価となった（第1.4.8図）。これらの原因のひとつとしては、干渉処理に用いたペアの期間内には、多くの余震活動が含まれていることや、地震発生後に二次的に引き起こされた地表面変化（例えば、地滑りなど）が含まれることに対し、震源過程解析では、対象地震の波形に限定された解析であることや解析に使用した周波数帯が限定されていることが考えられる。また、南行左観測では、観測領域外のため不明瞭であるが、北行左観測において、阿蘇山周辺の干渉縞がモデルと不整合となっていることが明らかである。矢来ほか（2016）の報告では、阿蘇山のカルデラ内に南東傾斜の別の矩形断層を仮定することで干渉縞の説明が可能としており、震源過程解析の推定では、この辺りが表現されていない可能性がある。しかしながら、2つの前震に伴う地殻変動、本震に伴う地殻変動のいずれについても、変位量の差こそ大きいものの、震源過程解析で推定された断層面から得られた大局的なパターンは合致していることがわかった。

1.4.5 相関画像を用いた被害地域の推定

干渉画像を解析する際、画像ピクセル単位での位置合わせが非常に重要な作業となる。この位置

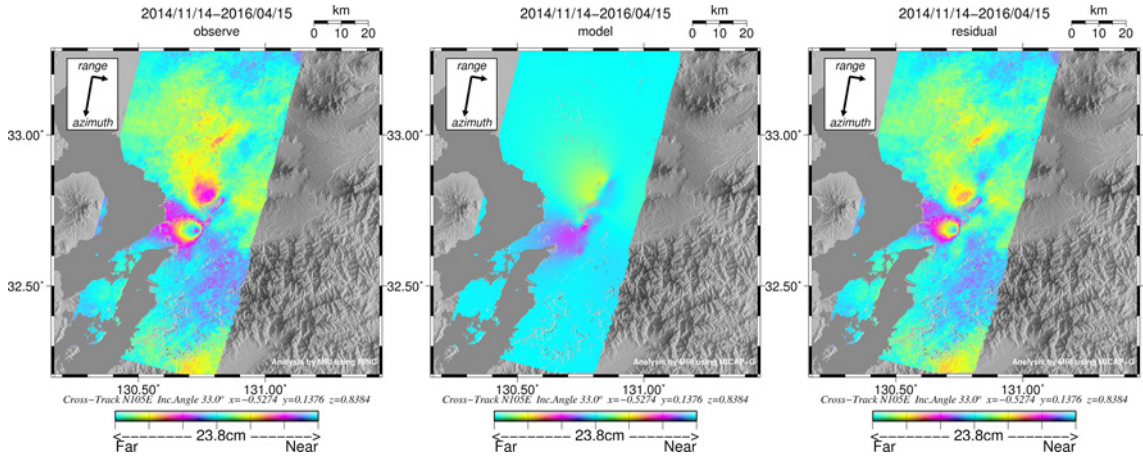
合わせにおいて、出力される2枚の画像の相関度を用いて、地震の影響による地形変化、すなわち被害地域の検出を試みた。計算には Watanabe *et al.* (2015) による次式のインデックスを利用した。

$$\text{Index} = (\text{data2} - \text{data1}) / (\text{data1} + \text{data2}) \dots \textcircled{1}$$

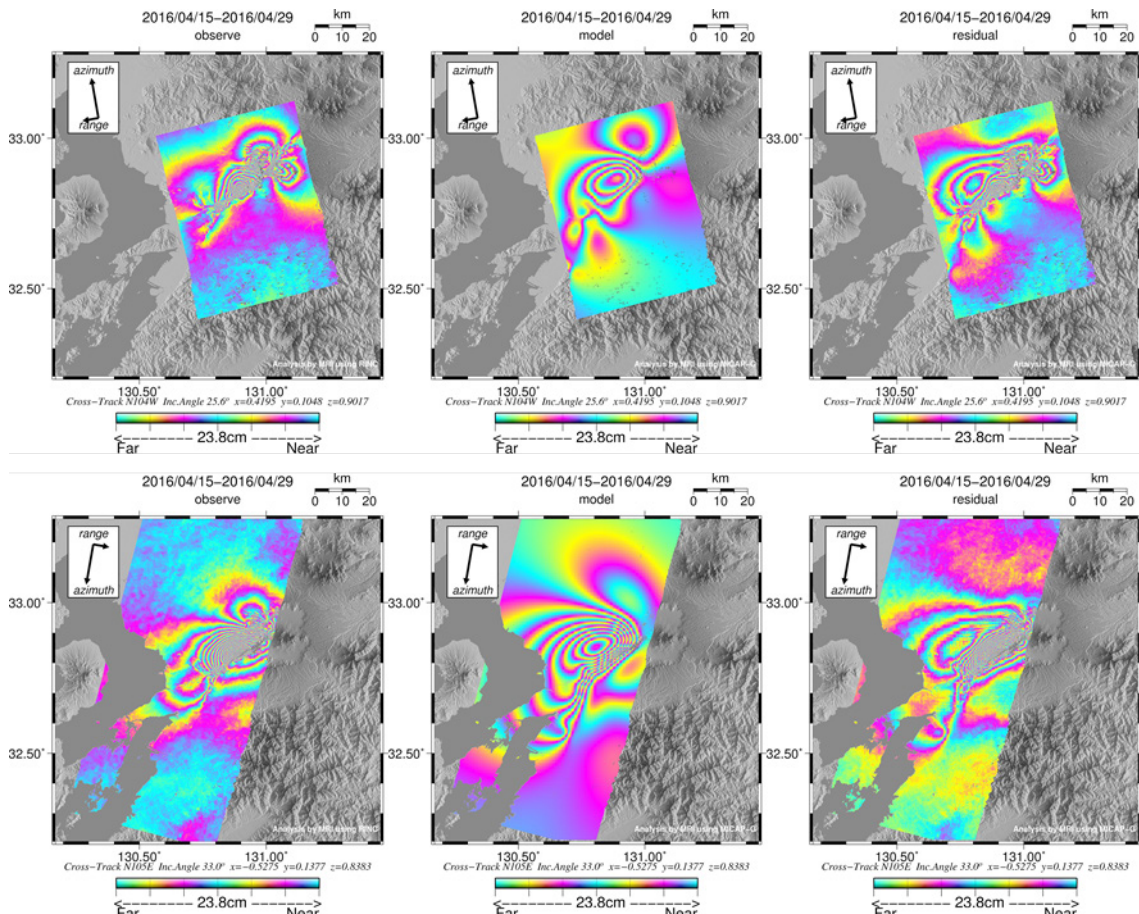
一般的に相関画像の出力値は低い相関を示す0から高い相関を示す1までの値をとる。地震前後（data1）及び地震後（data2）の相関画像を用いて①式を利用することで、より相関度の低い部分（Index 値は正）を明瞭に抽出することができる。その結果、布田川断層帯に沿って、より相関度の低い場所が検出され、東端は阿蘇山のカルデラ内にまで到達していることがわかった（第1.4.9図）。これらの結果は、国土地理院による航空写真判読で得られた布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図（国土地理院，2016）ともよく一致しており、地表地震断層や斜面の崩落などにより生じたものであると考えられる。

謝辞

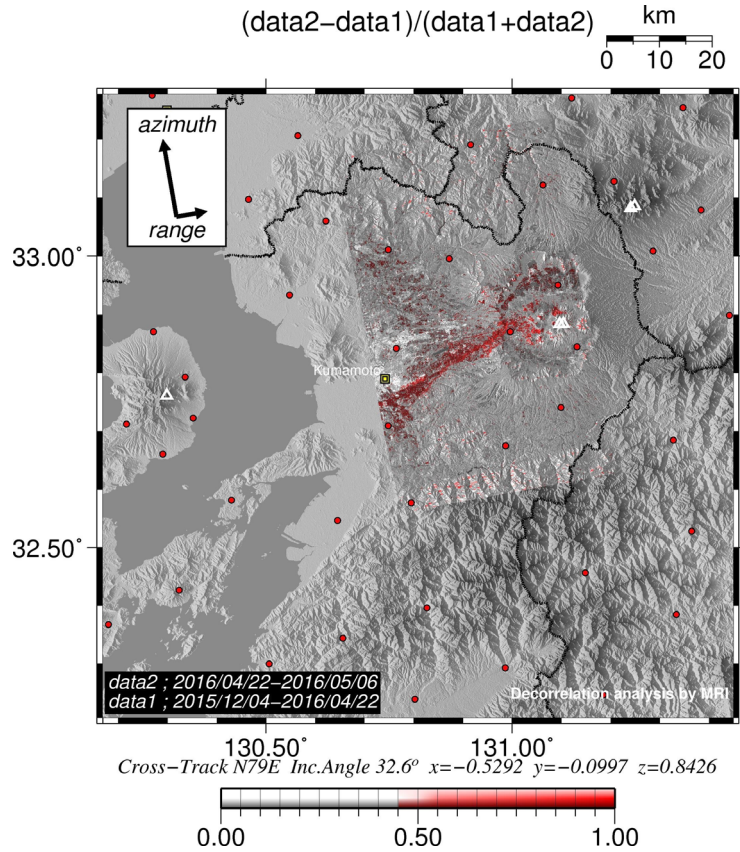
本解析で用いた PALSAR-2 データの一部は、国土地理院が中心となって進めている防災利用実証実験（地震 SAR 解析 WG）に基づいて、JAXA にて観測・提供されたものである。また、一部は PIXEL で共有しているものであり、JAXA と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである。PALSAR-2 に関する原初データの所有権は JAXA にある。なお解析には、国立研究開発法人防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発された RINC を使用させていただいた。また、干渉処理過程において、国土地理院が発行している数値標高モデル 10m メッシュを元にした楕円体標高モデル（DEHM）を使用し、干渉画像結果の表示は GMT（Wessel and Smith, 1998）を用いた。関係者各位におかれては、ここに記してお礼申し上げます。



第 1.4.7 図 2つの前震に伴う干渉パターンの比較結果（左：観測値，中：震源過程解析で得られた断層モデルから得られる干渉パターン，右：残差）



第 1.4.8 図 本震に伴う干渉パターンの比較結果（上段：北行左観測，下段：南行左観測，左：観測値，中：震源過程解析で得られた断層モデルから得られる干渉パターン，右：残差）



第 1.4.9 図 前震と本震を挟むペアと本震後のペアを用いた相関度結果
図中の凡例は、第 1.4.1 図と同じ。

参 考 文 献

Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa, M. Tobita, and P. A. Rosen (2000) : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, **27** (14), 2049-2052, doi:10.1029/1999GL011291.

国土地理院 (2016) : 布田川断層帯周辺の地方の亀裂分布について。 (<http://www.gsi.go.jp/common/000145493.pdf>, 2018年3月29日参照)

Ozawa, T., E. Fujita, and H. Ueda (2016) : Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano. *Earth Planets Space*, **68**:186, doi: 10.1186/s40623-016-0563-5.

矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智・檜山洋平・川元智司・上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅 (2016) : 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. *国土地理院時報*, **128**, 169-176.

Watanabe, M., R. B. Thapa, T. Ohsumi, H. Fujiwara, C. Yonezawa, N. Tomii, and S. Suzuki (2016) : Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2. *Earth, Planets and Space*, **68**:131, doi: 10.1186/s40623-016-0513-2.

Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos Trans. AGU*, **79**, 579.

1.5 地震活動等

1.5.1 平成28年(2016年)熊本地震の地震活動

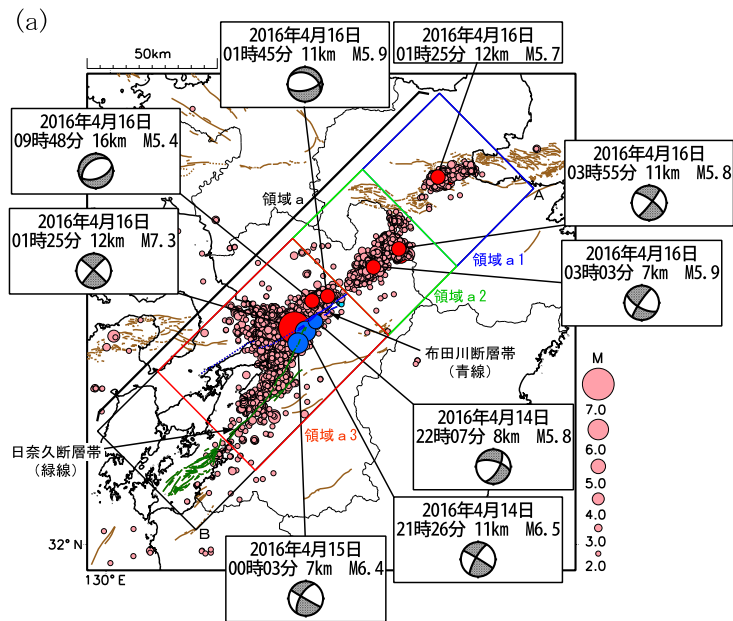
1.5.1.1 地震の発生状況と分布*

(1) 一連の地震の発生状況

2016年4月14日21時26分に、熊本県熊本地方でM6.5の地震(深さ11km, 最大震度7)が発生した。また、この約28時間後の4月16日01時25分に、M6.5の震央付近でM7.3の地震(深さ12km, 最大震度7)が発生した。これらの発

震機構(CMT解)は、いずれも横ずれ断層型で、張力軸の向きは、前者が北北西-南南東方向、後者が南北方向である(第1.5.1.1図(a))。

4月14日のM6.5の地震発生以降、熊本県熊本地方(領域a3)で地震活動が活発になり、約3時間後の15日00時03分にもM6.4の地震(最大震度6強)が発生し、その後、4月16日01時25分に一連の地震活動の本震であるM7.3の地震が発生した。本震発生以降は、熊本県熊本地方に加え、熊本県阿蘇地方(領域a2)、大分県中部



第1.5.1.1図 熊本地震の地震活動(深さ20km以浅, M ≥ 2.0)

(a) 震央分布(2016年4月14日21時26分~2017年4月30日24時00分)

2016年4月16日01時25分以降の震源を赤、それ以前を青で表示し、M5.0以上の地震を濃く、前面にしている。なお、2016年4月16日01時25分の大分県中部の地震は、M7.3の地震の発生直後に発生したものであり、Mの値は参考値である。

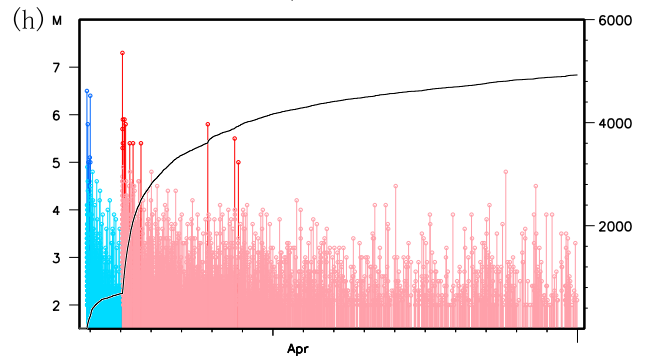
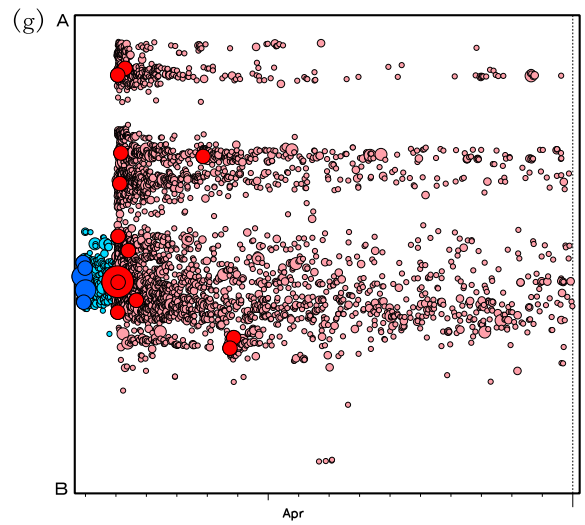
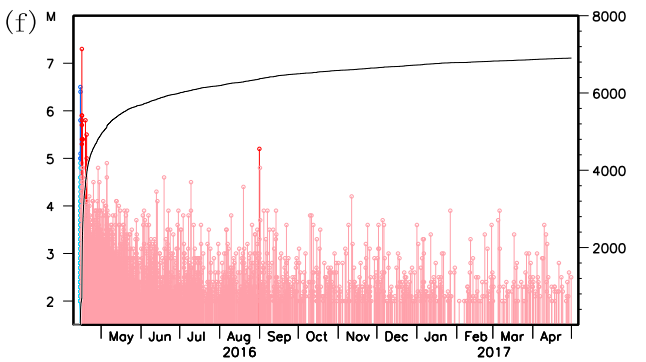
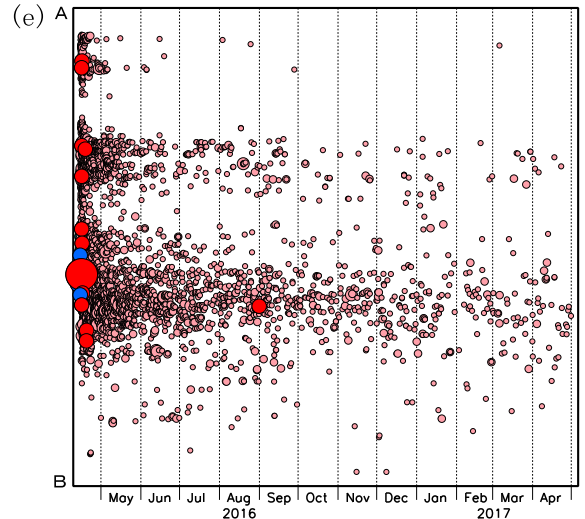
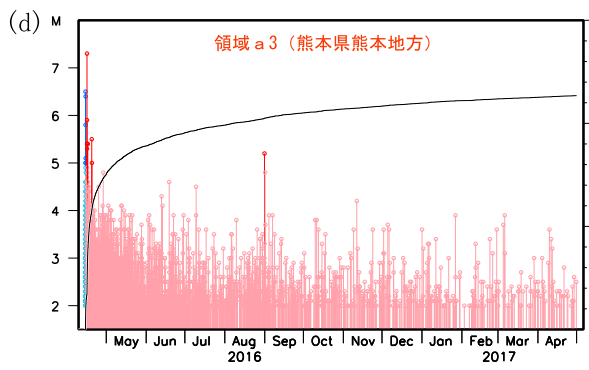
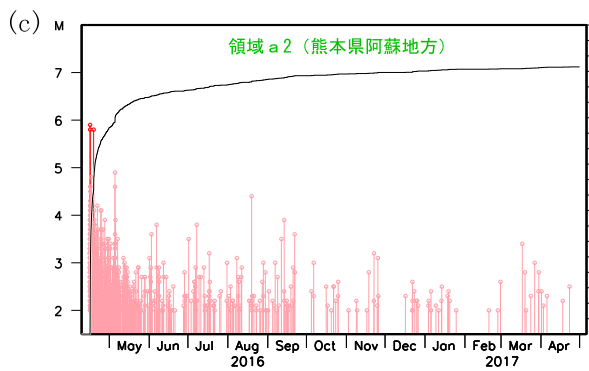
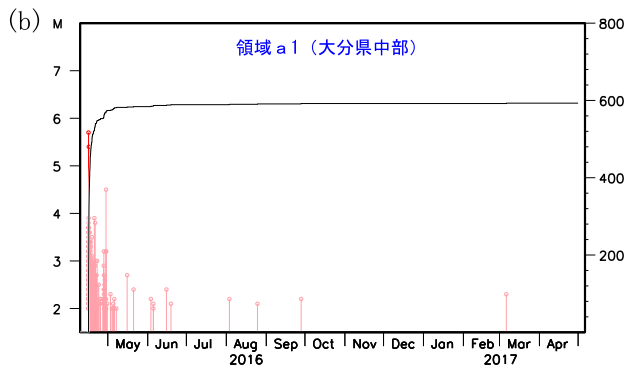
吹き出しは、以下のいずれかに該当する地震に付加した。

- ・最大震度6弱以上を観測した地震
- ・領域a1~a3内のそれぞれで最大規模の地震

発震機構解はCMT解を表示している。図中の青、緑、茶色の線は、地震調査委員会の長期評価(https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/)による活断層を示している。

- (b) 領域a1(大分県中部)内のMT・回数積算図
- (c) 領域a2(熊本県阿蘇地方)内のMT・回数積算図
- (d) 領域a3(熊本県熊本地方)内のMT・回数積算図
- (e) 領域a内の時空間分布(A-B方向投影)
- (f) 領域a内のMT・回数積算図
- (g) 領域a内の時空間分布(A-B方向投影, 2016年4月14日21時26分~4月30日24時00分)
- (h) 領域a内のMT・回数積算図(2016年4月14日21時26分~4月30日24時00分)

* 地震火山部地震予知情報課 武田 清史



第1.5.1.1 図 続き 熊本地震の地震活動 (深さ 20km 以浅, $M \geq 2.0$)

(領域 a1) 等にかけての広い範囲で地震活動が活発となった(第 1.5.1.1 図 (e) ~ (h)). 4月16日01時25分(M7.3の地震発生の約30秒後)に大分県中部でM5.7(参考値)の地震, 同日03時55分に熊本県阿蘇地方でM5.8の地震(最大震度6強)が発生するなど, 2017年4月30日までに最大震度5弱以上を観測した地震が24回, M5.0以上の地震が20回発生した. また, 2017年4月30日までに一連の活動域(領域 a)で発生したM2.0以上の地震は約6,900回である. 一連の地震活動は, 2016年4月は活発な状態であったが, 2016年5月以降は全体として減衰傾向となった. 2017年4月30日現在, 熊本県熊本地方(領域 a3)及び熊本県阿蘇地方(領域 a2)の活動は減衰しつつも継続しており, 大分県中部(領域 a1)の活動は2016年5月以降低下した状態が続いている(第 1.5.1.1 図 (b) ~ (d)).

今回の一連の活動では, 4月14日のM6.5の地震後, 2日以内でM6.0以上の地震が2回発生しており, これまでの最大規模の地震は4月16日に発生したM7.3の地震である. 気象庁震源カタログが整備されている1923年以降で, 内陸及び沿岸の深さ30km以浅に発生したM6.5以上の地震後の地震活動(地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016a)の表2に記載された熊本地震を含む36事例)をみると, 最初の地震後30日以内でM6.0以上の地震が2回以上発生したのは, 他に4事例ある(1927年3月7日北丹後地震:2回, 1939年5月1日男鹿地震:2回, 1943年9月10日鳥取地震:2回, 平成16年(2004年)新潟県中越地震:3回). このうち, 北丹後地震を除く3事例では, いずれも当初4日以内にM6.0以上の地震が発生している. 一方, 同表の全36事例で後続の地震の規模が最初の地震の規模を上回ったのは今回が初めてであった. また, 一連の活動で最大震度7を2回観測したのは, 観測点密度の差はあるが, 震度階級に震度7が加わった1949年以降で初めてのことであった.

(2) 熊本県熊本地方の地震活動

一連の地震活動において, 最初に活動が始まった熊本県熊本地方では, 発生当初2~3日で特に

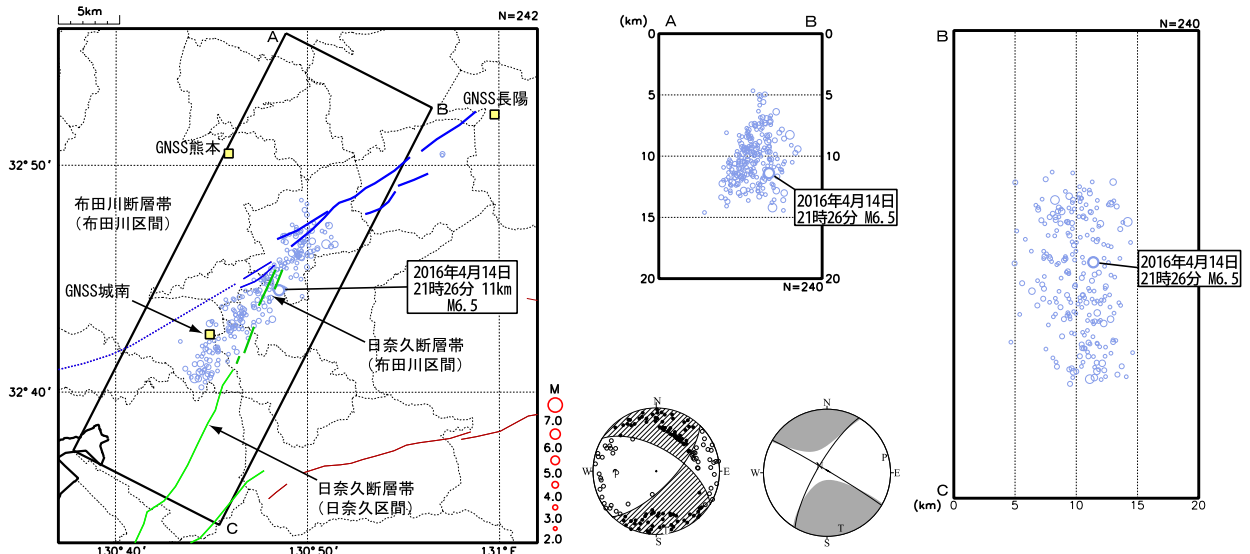
活発な活動がみられ, 以下3回のM6.0以上の地震が発生した.

- ① 2016年4月14日21時26分34.4秒
北緯32度44.5分, 東経130度48.5分
深さ11km, M6.5 【最大震度7】
- ② 2016年4月15日00時03分46.4秒
北緯32度42.0分, 東経130度46.7分
深さ7km, M6.4 【最大震度6強】
- ③ 2016年4月16日01時25分5.5秒
北緯32度45.3分, 東経130度45.8分
深さ12km, M7.3 【最大震度7】

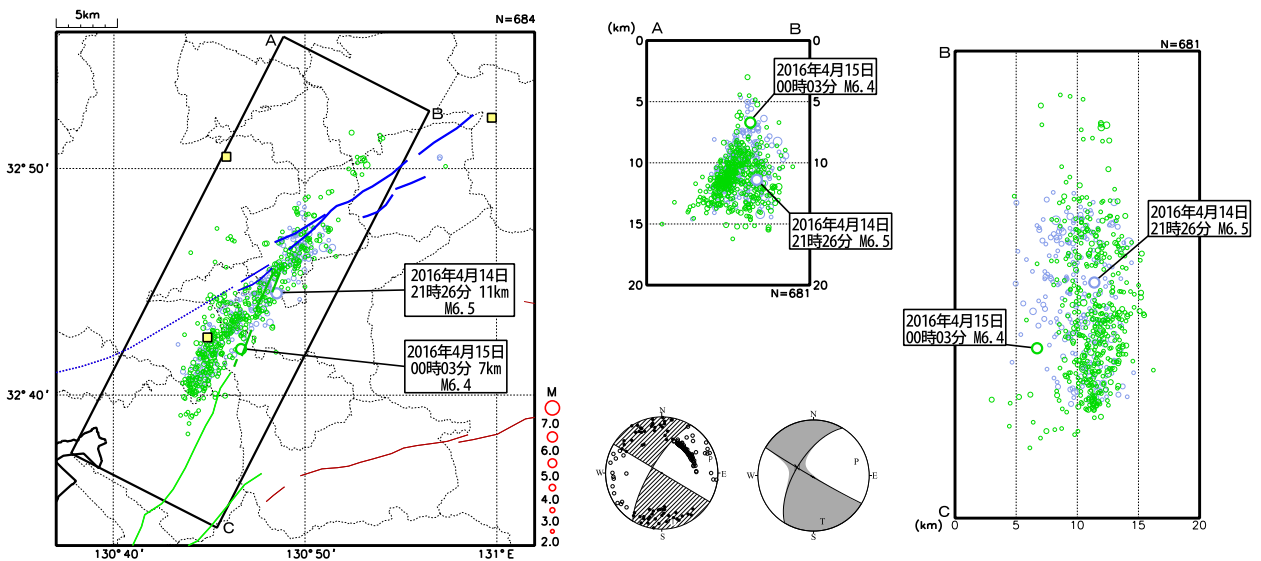
①の地震は, 日奈久断層帯(高野-白旗区間)の北東端付近を震源として発生した. その後, ②の地震が発生するまでに布田川断層帯(布田川区間)の南西部から日奈久断層帯(日奈久区間)の北東端付近にかけ, 北北東-南南西方向に延びる長さ約17km, 幅約3kmの範囲で地震活動が活発となった. ①の地震の発震機構は, 初動解, CMT解ともに概ね南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で, CMT解析によって求められたモーメントマグニチュード(Mw)は6.2であった. 地震活動の分布の方向に近い走向の節面は, 初動解が南東傾斜, CMT解が北西傾斜と傾斜方向は異なるもののいずれも高角であり, 日奈久断層帯の走向に直交してとった鉛直断面図でみえる高角な震源分布と整合している(第 1.5.1.2 図).

これに続き, ②の地震は, 日奈久断層帯(高野-白旗区間)の南西端付近を震源として発生し, 地震活動が活発な領域は, ③の地震が発生するまでに, 長さ約20km, 幅約5kmの範囲に広がった. ②の地震の発震機構は, 初動解, CMT解ともに概ね北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で, CMT解析によって求められたMwは6.0であった. 地震活動の分布の方向に近い走向の節面は, 日奈久断層帯の走向に直交してとった鉛直断面図にみられる概ね北西傾斜の高角な震源分布と整合している(第 1.5.1.3 図).

③の地震は, それまでの活発な前震活動の領域に隣接する布田川断層帯(布田川区間)の西端付近を震源として発生し, 活発な地震活動は③の震央を中心に北東-南西方向及び北北東-南南西方向に延びる約30kmの範囲のほかにも, 熊本県阿



第 1.5.1.2 図 2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震とその後の地震活動の震央分布 (2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分 ~ 15 日 00 時 02 分, 深さ 20km 以浅, $M \geq 2.0$), 矩形内の断面図 (中図: A-B 方向, 右図: B-C 方向), M6.5 の地震の発震機構 (左: 初動解, 右: CMT 解)

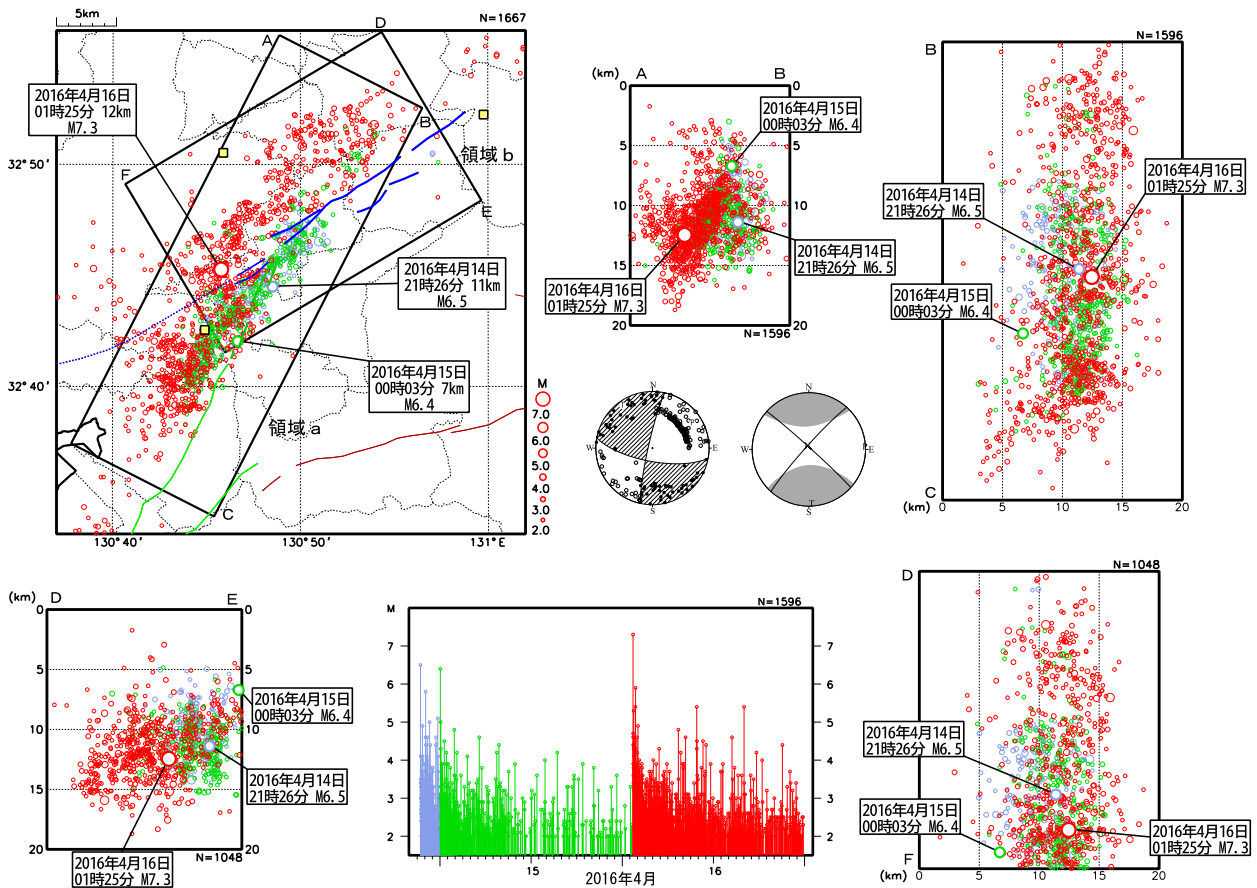


第 1.5.1.3 図 2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震及び 4 月 15 日の M6.4 の地震とその後の地震活動の震央分布 (2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分 ~ 16 日 01 時 24 分, 深さ 20km 以浅, $M \geq 2.0$), 矩形内の断面図 (中図: A-B 方向, 右図: B-C 方向), M6.4 の地震の発震機構 (左: 初動解, 右: CMT 解)
M6.4 の地震発生以降の震源を緑, それより前を薄い青で示した。

蘇地方や大分県中部など広範囲に拡大した。また、深さ方向でも15kmを超え、より深部まで活動域が広がった。③の地震の発震機構は、初動解は北西-南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であった。一方、CMT解は南北方向に張力軸を持つ型で、非ダブルカップル成分比(ϵ)が+0.28(第3.3.3図参照)と大きく、 M_w は7.0であった。 $\epsilon > 0$ は伸張力が卓越している場合に対応する(川勝, 1991)。③の地震後の活発な活動では、③の震央を中心に、布田川断層帯・日奈久断層帯の両方に沿う分布が認められる。このうち、布田川断層帯沿いの分布断面には、はっきりとした傾斜方向は認められないが、日奈久断層帯沿いでは②の地震後と同様、概ね北西傾斜の高角な震源分布となっており、発震機構解の節面の1つと整合して

いる(第1.5.1.4図)。

これらの震源分布と発震機構より、①、②の地震の震源断層は、北北東-南南西走向の高角な右横ずれ断層、③の地震は、概ね北東-南西走向の右横ずれ断層が推定される。国土地理院のGNSS観測結果では、①、②の地震後に、震央の西に位置する城南観測点で北北東方向に約20cmの移動などの地殻変動、③の地震後に、布田川断層帯をはさんで南側の長陽観測点で南西方向に約98cmの移動と上下方向に約24cmの隆起、北側の熊本観測点で東北東方向に約76cmの移動と上下方向に約19cmの沈降などの地殻変動がそれぞれ観測された(檜山ほか, 2016)。また、前項で示されたとおり、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」による合成開口レーダー画像の解析結果でも、①、



第 1.5.1.4 図 2017 年 4 月 14 日の M6.5 の地震、4 月 15 日の M6.4 の地震及び 4 月 16 日の M7.3 の地震とその後の地震活動の震央分布 (2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分～16 日 24 時 00 分、深さ 20km 以浅、 $M \geq 2.0$)、矩形内の断面図 (中上図：領域 a 内 A-B 方向、右上図：領域 a 内 B-C 方向、左下図：領域 b 内 D-E 方向、中下図：領域 b 内 D-F 方向)、領域 a 内の MT 図、M7.3 の地震の発震機構 (左：初動解、右：CMT 解) M6.4 の地震発生より前の震源を薄い青、M6.4 の地震発生～M7.3 の地震発生より前の震源を緑、M7.3 の地震発生以降の震源を赤で示した。

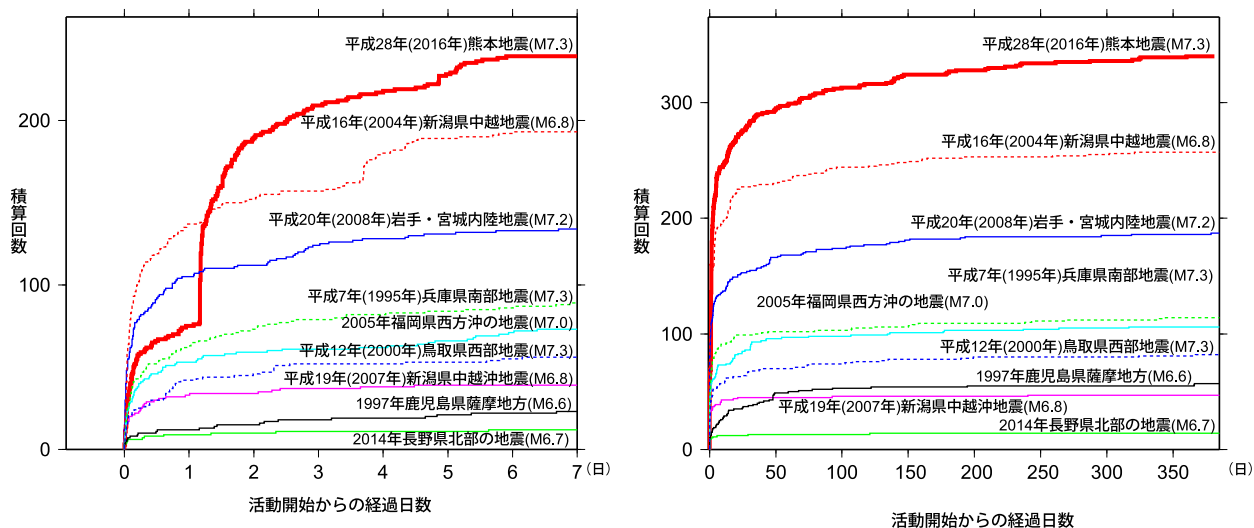
②の地震に伴って、これらの震央の北西側で約8cmの衛星に近づく向き、南西側で約15cmの衛星から遠ざかる向きの地殻変動が、③の地震を含む地震活動に伴って、布田川断層帯に沿って北側で東向き成分、南側で西向き成分の顕著な地殻変動、布田川断層の北側で顕著な沈降成分、南側で隆起成分などの地殻変動がそれぞれ検出された(第1.4.1項参照)。これらの地殻変動観測結果は、前述の震源分布と発震機構から推定される震源断層と整合している。

これらM6.0以上の地震と活断層との関係について、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016b)は、①、②の地震は日奈久断層帯(高野-白旗区間)の活動、③の地震は主に布田川断層帯(布田川区間)の活動によると考えられる旨、評価した。また、国立研究開発法人産業技術総合研究所は、現地調査の結果、日奈久断層帯(高野-白旗区間)の北部約6kmにわたる範囲と、布田川断層帯(布田川区間)をやや超える約28kmにわたる範囲で地表地震断層の出現を確認したほか、布田川断層帯の南側では、正断層成分を含む地表変位が広く認められたと報告した(産業技術総合研究所, 2016)。

一連の熊本地震のうち、主に熊本地方で発生した地震の回数について過去の活動との比較を行っ

た。第1.5.1.5図には、内陸及び沿岸域で最近約20年間に発生したM6.6～M7.3の主な地震活動(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の余震活動を除く)における、M3.5以上の地震の積算回数比較を示した。熊本地震では、発生当初から最初の地震の規模(M6.5)の割には、M7クラスで地震活動が活発な事例と同程度の活発さで推移し、本震発生後はさらに活発となって、発生後1年間のM3.5以上の地震回数は300回を超え、活発な地震活動が続いた平成16(2004年)新潟県中越地震よりも多くなっている。

また、主に熊本地方の地震活動について、地震活動の時間的減衰の程度を示す大森・宇津公式(宇津, 1957; Utsu, 1961)のパラメータp値を求めた(第1.5.1.6図)。本震の発生前後で減衰状況が大きく変化するため、大森・宇津公式を拡張してM6.5以降とM7.3以降の二つの系列を重ね合わせたモデルにあてはめると、活動開始から約1年間のデータを用いた場合は、前者のp値が1.17、後者が1.02であった。一方、活動の初期に着目して、活動開始から本震発生前までのデータを用いてあてはめた場合のp値は1.58であった。内陸の余震活動の標準的なp値は1.03(細野, 2006)であり、標準誤差は大きいもののM7.3の地震発生前までの地震活動のp値は標準的な値よりも0.5程

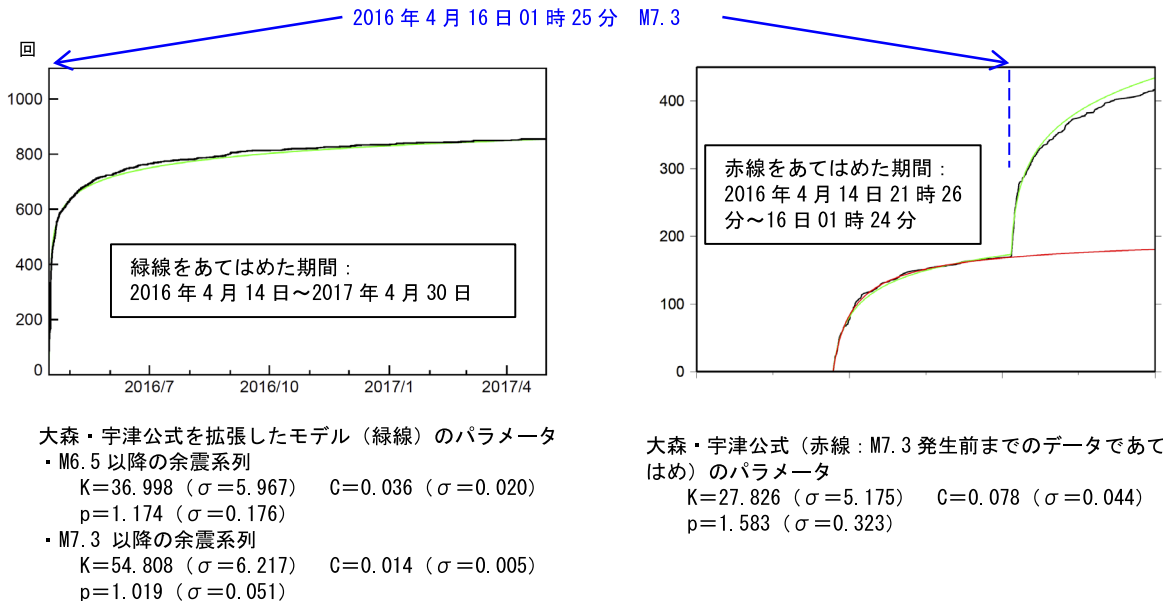


第1.5.1.5図 地震活動の回数比較(M3.5以上)。左図:2016年4月14日から7日間、右図:活動開始から約1年間) 陸域及び沿岸域における、最近約20年のM7クラスの地震後の地震活動の回数積算図を並べて示した。熊本地震は、2016年4月14日21時26分の地震からの経過日数及び主に熊本県熊本地方における積算回数を示しており、2016年4月16日01時25分の地震(M7.3)の発生直前までの積算回数は76回である。

度大きい。これは、M6.5の地震発生後に活発だった活動が通常よりも急速に減衰してきていたことを示しており、M7.3の地震発生前に相対的に静穏化していた可能性がある。

さらに、主に熊本地方の地震活動について、

規模別に並べた地震回数の分布を表すグーテンベルク・リヒターの式 (G-R 式, Gutenberg and Richter, 1941) のパラメータ b 値について求めた (第 1.5.1.7 図)。2017 年 4 月 30 日までの全期間で求めた b 値は 0.85 で、内陸の余震活動の標準的

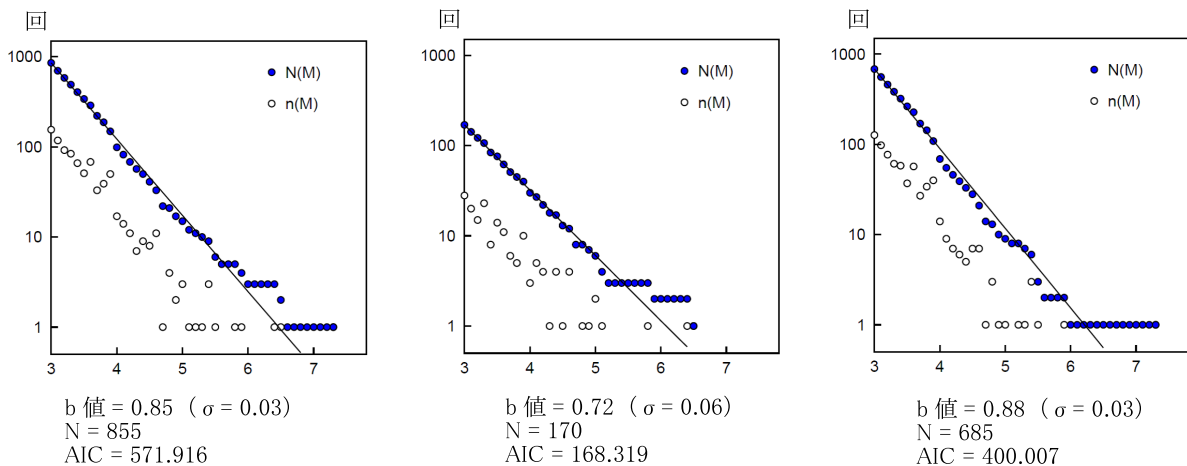


第 1.5.1.6 図 地震の積算回数と大森・宇津公式へのあてはめ結果 (M ≥ 3.0)

左図: 全期間 (2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震発生～2017 年 4 月 30 日) であてはめた結果

右図: 2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震発生～2016 年 4 月 16 日の M7.3 の地震発生前であてはめた結果 (赤) と全期間であてはめた結果 (緑) との比較

黒線は地震の積算回数, 緑線と赤線は大森・宇津公式のあてはめ結果を示す。



第 1.5.1.7 図 期間別の b 値比較 (M ≥ 3.0)

左図: 2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震発生～2017 年 4 月 30 日

中図: 2016 年 4 月 14 日の M6.5 の地震発生～2016 年 4 月 16 日の M7.3 の地震発生前

右図: 2016 年 4 月 16 日の M7.3 の地震発生～2017 年 4 月 30 日

青丸は当該 M 以上の地震の積算回数, 白丸は当該 M の地震回数を示す。

な b 値である 0.83 (細野, 2006) に近い値である。一方, M7.3 の地震の発生前後で期間を分けて b 値を求めると, M7.3 の地震発生前の b 値が 0.72, 発生以降が 0.88 となる。赤池情報量基準 (AIC, Akaike, 1974) を用いてこの差異の有意性について検定を行うと,

$\Delta AIC = (\text{期間分割した場合の AIC})$

$-(\text{期間分割しない場合の AIC})$

において ΔAIC は -3.590 となり, b 値の差は有意となった (有意水準 2.25%)。ただし, 期間後半 (M7.3 の地震発生以降) の期末を 2016 年 6 月 6 日まで短縮すると b 値の差は 5% の有意水準を超えないため, M7.3 の地震発生前後で b 値が顕著に変化したわけではないと考えられる。

前震活動など, 大地震発生前の前駆的活動においては, 直前に静穏な状態が生じたことや b 値の低下がみられたことを指摘する報告がある (例えば, 前者は吉田 (1990), 後者は弘瀬・前田 (2011) など)。前述のように, 熊本地震における M7.3 の地震発生前の地震活動の p 値と b 値は内陸の余震活動の標準的な値とやや異なる様子がみられるが, 近年の大地震後の地震活動とそのパラメータ (地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016a) の表 6) を参照すると, 今回と同程度やそれ以上標準値から外れた値でも, より大きな規模の地震発生には至らなかった事例もある (例えば, p 値は 2007 年 4 月 20 日の宮古島北西沖の地震 (p 値 = 2.06), b 値は 2004 年 12 月 14 日留萌支庁南部の地震 (b 値 = 0.72) など)。

参 考 文 献

Akaike, H. (1974) : A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-19, 716-723.

Gutenberg, B. and C. F. Richter (1941) : Seismicity of the Earth. *The Geological Society of America*, 34, 131.

弘瀬冬樹・前田憲二 (2011) : 東北太平洋沈み込み帯の b 値の時空間変化. *日本地球惑星科学連合予稿集*, MIS036-P96.

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 (<http://www.gsi.go.jp/common/000147111.pdf>, 2017 年 11 月 13 日参照)

細野耕司 (2006) : マグニチュード改訂に伴う余震パラメータ標準値の再決定. *験震時報*, 69, 171-176.

地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016a) : 大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方. (http://www.jishin.go.jp/main/yosoku_info/honpen.pdf, 2017 年 11 月 13 日参照)

地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016b) : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の評価. (http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf, 2017 年 11 月 13 日参照)

川勝均 (1991) : 地震の大きさと多様性 - Moment tensor inversion を中心として -. *地震* 2, 44 特集号, 265-277.

産業技術総合研究所 (2016) : 2016 年熊本地震に伴って出現した地表地震断層. *地震予知連絡会会報*, 96, 631-636.

宇津徳治 (1957) : 地震のマグニチュードと余震の起こりかた. *地震* 2, 10, 35-45.

Utsu, T. (1961) : A statistical study on the occurrence of aftershocks. *Geophys. Mag.*, 30, 521-605.

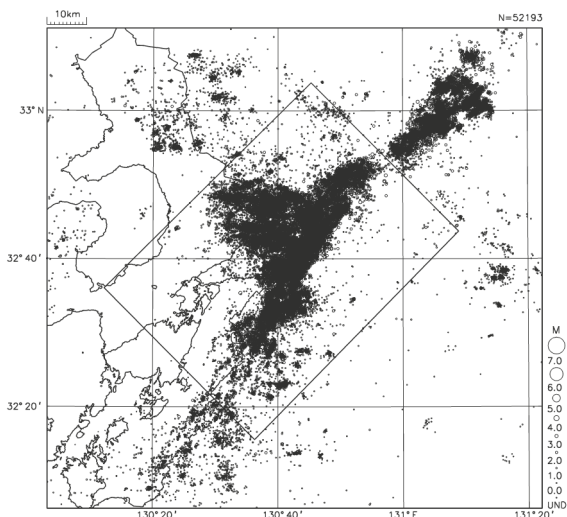
吉田明夫 (1990) : 日本列島およびその周辺の浅い大きな内陸地震に伴った前震活動の特徴. *気象研究所研究報告*, 41, 1, 15-32.

1.5.1.2 震源分布の詳細*

(1) 波形相関を用いたDD法により再決定された震源による熊本県熊本地方の震源分布

熊本地震の活動域のうち、概ね阿蘇地方より東を除いた地域（第1.5.1.8図の矩形内）についてWaldhauser and Ellsworth（2000）によるDouble-Difference法（以下DD法とする）を使用して震源再計算を行った。各地震発生時から1分間の上下動の波形を使用し、2016/4/14から2017/4/30までの気象庁一元化震源からM1.7以上の地震約7,000個について震源再計算を実施し、このうち6,800個余りの地震を再決定した（第1.5.1.9図）。

DD法による震源は、傾斜の異なる複数の断面が存在するなど、複雑な分布となっている。これは、複数の活断層が複雑に配列している布田川断層帯と日奈久断層帯の会合部付近の活断層が活動したことと、さらにもともと微小地震活動があった熊本平野などで活発な地震活動が発生したことによると考えられる。また、発生当初2～3日に計3回のM6.0以上の地震（以下、これら地震を本稿第1.5.1.1目同様に①、②及び③と呼ぶこととする）を観測するなど、熊本地震は時間的にも複雑な地震活動として経過した。ここでは、主に



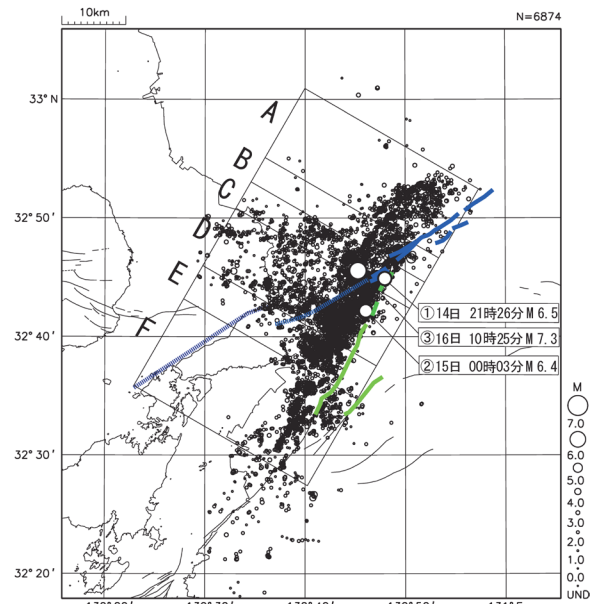
第1.5.1.8図 DD法による震源再計算を行った範囲 (2016/4/14 - 2017/4/30)

熊本地震発生初期の地震活動の経過を中心に、地震活動と活断層との関連等について考察する。

なお、①の地震発生から②の地震発生前まで（2016/4/14/ 21:26 - 2016/4/15 00:02）を期間1、その後③の地震発生前まで（2016/4/15 00:03 - 2016/4/16 01:24）を期間2、③の地震発生後（2016/4/16 01:25 - 2016/4/30 24:00）を期間3、とそれぞれ区分する。以下では期間1～3それぞれについての地震活動を考察する。また、布田川断層中央部以西の地域を地震活動の特徴や活断層の区間により領域A～Fに区分して考察する。それぞれの期間と領域ごとの震源の断面図を第1.5.1.10図に示す。

期間1の地震活動

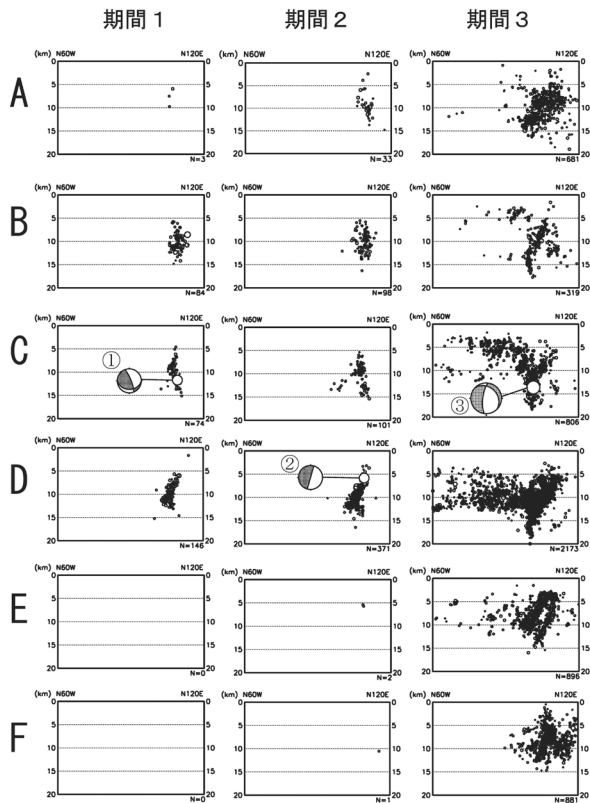
①の地震は、布田川断層と北甘木断層の分岐点に近い高野断層付近（領域C）を震央とする。この地震が発生してから、②の地震発生までの約2時間半の間の地震活動は、①の地震の震央をほぼ中心として北東-南西方向に延びた範囲であり、



第1.5.1.9図 DD法による震源再計算結果震央分布図 (2016/4/14 - 2017/4/30)

矩形領域内の布田川断層帯を青線、日奈久断層帯を緑線で示している。

* 地震火山部地震予知情報課 野坂 大輔（現 松江地方気象台）
地震火山部地震予知情報課 一條 和宏



第 1.5.1.10 図 各領域の期間別 DD 法再計算結果の震源断面図。断面の方向は N60W – N120E。

期間区分は以下のとおり。

期間 1 : 2016/4/14 21:26 – 2016/4/15 00:02

期間 2 : 2016/4/15 00:03 – 2016/4/16 01:24

期間 3 : 2016/4/16 01:25 – 2017/4/30 24:00

領域区分は第 1.5.1.9 図に示した矩形領域で活断層との対応は概ね以下のとおり。

領域 A : 布田川断層中央部

領域 B : 布田川断層南西端, 木山断層

領域 C : 高野断層, 北甘木断層

領域 D : 白旗断層北部

領域 E : 白旗断層南部

領域 F : 日奈久断層

①, ②及び③の地震の初動発震機構解の断层面投影図を期間 1, 2 及び 3 にそれぞれ示している。

木山断層と布田川断層の分岐点の益城町津森付近を北東端とし, 北甘木断層分岐点を経て, 高野断層の西端である緑川を超え, 白旗断層北部(領域 D)にあたる城南町と宇城市の境界付近を南西端とする。①の地震の震央を含む高野断層(領域 C)付近では, 深さ 9km 付近より深い部分で高角の南東傾斜の震源分布が見られる。それより浅い部

分とは傾斜が異なっており, 断层面が複雑な形状だったことが示唆される。①の地震の震源は深さ約 12km であり, 南東傾斜の部分にあたる。これはこの地震の初動発震機構解の節面のひとつと整合的である。これに対し, 期間 1 の地震活動域南西端の白旗断層北部(領域 D)では高角北西傾斜の震源分布となっている。このことから期間 1 においては, 領域 C 及び D において, 異なる傾斜の断層が動いたことが示唆される。

期間 2 の地震活動

②の地震は白旗断層北部(領域 D)の緑川付近で発生した。この地震の初動発震機構解の節面のひとつは高角の北西傾斜であり, この付近の震源分布と整合的である。震源の深さは約 6km と, 周辺の地震活動に比べやや浅めであることから, 主に白旗断層北部(領域 D)の浅い部分がずれ動いたものと考えられる。震源断面図(第 1.5.1.10 図)の領域 D の図を参照すると, 期間 2 で地震が多く発生している領域には期間 3 の地震も集中して発生していることから, ②の地震の震源は③の地震で動いた断层面とほぼ同一面上にあると考えられる。②の地震発生に伴い白旗断層北部(領域 D)では地震活動がやや活発となったが, 地震活動の範囲は①の地震発生後の活動領域と比べて顕著な拡大は見られない。しかしながら, 直後に③の地震で大きくずれ動くことになる布田川断層中央部(領域 A)付近で, M4 クラスの散発的な地震活動が発生している。

期間 3 の地震活動

③の地震は, 北甘木断層(領域 C)西端付近で発生した。震源過程解析(本稿第 1.3.1 項)等の結果から, 布田川断層(領域 A)をその東端まで破壊し, 同時に高野断層(領域 C)と白旗断層(領域 D 及び C)もずれ動いたとされる。地震活動域は一挙に拡大し, 日奈久断層南西部(領域 F)から八代海, 熊本平野を超えて有明海, 阿蘇山北東部から別府平野にまで及んだ。

領域 F での活動の開始

日奈久断層が存在する領域 F においては, ③の地震発生前にはほとんど地震活動が見られず, ③

の地震発生後に活発な地震活動が始まった。震央分布図（第1.5.1.9図）では線状ではなくクラスター状に見える地震活動で、震源断面図（第1.5.1.10図）では高角北西傾斜の面上に震源が分布しているように見えるが、その面はそれほど明瞭ではない。震源過程解析（本稿第1.3.1項）から③の断層運動は領域Fにはほとんど及んでいないと考えられるので、主として③の地震に影響された地震活動であると考えられる。領域Fで発生した地震は最大でもM5.5であり、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2016b）によって日奈久断層で想定されている最大規模M7クラスには到底達していない。

領域Eでの活動の開始

領域Eには白旗断層南部が位置する。③の地震発生以前は地震活動が目立たなかったが、③の地震発生後に活発な地震活動が始まった。震源断面図（第1.5.1.10図）を見ると、領域Eでは震源分布が平行した2つの面状に延びている。震源過程解析（本稿第1.3.1項）等から③の地震の断層破壊は領域Eまで及んでいた可能性があり、③の地震により活発化して発生した活動であると考えられる。また、平行した2つの面での地震活動が見られることから、平行分岐した断層が活動した可能性も考えられる。

領域D（白旗断層北部）での活動活発化と深部方向への拡大、及び西側地殻内での地震活動の開始

期間1で断層がずれ動いたと考えられる領域Dでは、周囲の地震活動分布から③の地震でも断層が活動したと考えられる。震源断面図（第1.5.1.10図）に示したように、期間1以降に発生していた断層面上での地震活動は、③の地震以降、深さ方向へも拡大し、活発となった。また深さ15km付近で断層面の折れ曲がりが見られ、そこより深い部分でやや南東傾斜の震源分布となっている。また、前述したように、震源断面図（第1.5.1.10図）を見る限り、②及び③の地震のすべりはほぼ同一面上で起こったと考えられる。また、西側の熊本平野から有明海へと地震活動が始まり、深さ10km付近の地殻内で地震活動が活発化した。

領域C-B（高野断層）での新たな断層面の出現と

①及び②の地震の断層面上での活動低下、及び西側地殻内での地震活動の開始

①の地震が発生した高野断層付近では周囲の地震活動分布から③の地震でも断層がずれ動いたと考えられる。ただし、震源断面図（第1.5.1.10図）に示したように③の地震の断層面の地震分布は白旗断層北部（領域D）と同様の北西傾斜であり、この付近では南東傾斜だった②の地震の断層面とは異なる。③の地震の北西傾斜の断層面の深部では、やはり白旗断層北部（領域D）から連続すると思われる断層面の折れ曲がりが見られる。折れ曲がりが起こる点の深さは北へ向けて浅くなる傾向がある。この折れ曲がった南東傾斜面は、②の地震の南東傾斜断層面での地震活動の西側に位置する。なお、②の地震の南東傾斜断層面での地震活動は、③の地震発生後はその活動が顕著に低下している。ただし、これは大規模な地震発生による極めて活発な地震活動によって検知力が低下した結果であることも否定できない。また、西側の熊本平野北部から有明海へかけて地震活動が始まり、深さ5km付近の地殻内で活動が活発化した。領域A（布田川断層）②及び③の地震に伴う地震活動の開始

布田川断層中央部が位置する領域Aでは、期間1においては地震活動が目立たなかったが、②の地震発生以降に地震活動が活発化した。また、③の地震では布田川断層が大きくずれ動き、地震活動が極めて活発となった。

以上の震源再決定で得られた震源分布及び震源過程解析（本稿第1.3.1項）の結果等から、①-③の地震、及びそれぞれで活動した活断層との関係について以下にまとめる。

- ・①及び②の地震では、領域DからBにかけて、白旗断層北部、高野断層、布田川断層西端部がずれ動いたと考えられる。また、領域C及びDに存在する北甘木断層、木山断層も活動した可能性がある。なお、領域C及びD（それぞれ高野断層と白旗断層北部が位置する）では、期間1の地震分布から走向や傾斜の異なる複数の断層が同時にずれ動いた可能性がある。
- ・③の地震では領域C、D及びE（それぞれ高野

断層, 白旗断層北部及び白旗断層南部が位置する) が北西傾斜の断層面で一体となつてずれ動いたと考えられる. 震源断面図(第 1.5.1.10 図)に示したように, 領域 C 及び D では下端で南東傾斜方向への折れ曲がりが見られるほか, 領域 E (白旗断層南部が位置する) では 2 重の平行面が見られるなど, 複雑な断層形状が示唆される.

- ・領域 C では, ①及び②の地震で主として動いた断層面と③の地震で主として動いた断層面が異なると考えられる. 高野断層が存在する領域 C では, 複数の活断層が複雑に配列し, 複雑な構造となっている可能性がある.
- ・一方で, 領域 D では②の地震と③の地震の断層面が概ね同じであるとみられる. ただし, 後者ではより大きな範囲がずれ動いた.
- ・領域 D (白旗断層北部) では, ①及び②の地震でずれ動き, さらに③の地震発生時のすべり量が大きかったが, 領域 E (白旗断層南部) においては①及び②の地震では動かず, ③の地震でもすべり量が比較的小さかった.

(2) DD 法により再決定された震源による熊本県阿蘇地方付近の震源分布

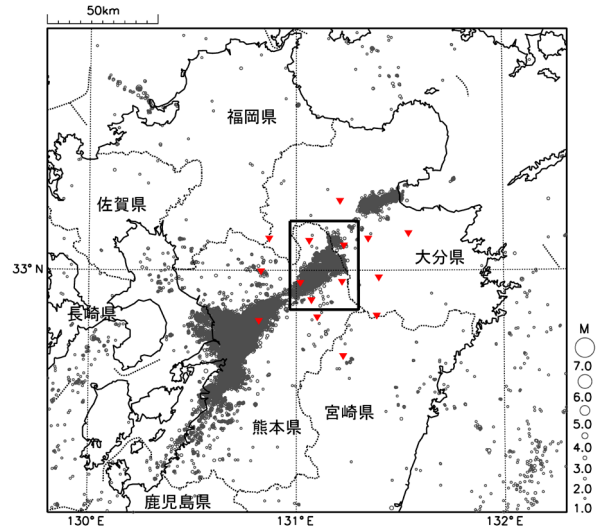
ア. 手法及びデータ

熊本県阿蘇地方付近の地震活動について, DD 法による震源の再決定を行った. 再決定の対象としたのは, 気象庁一元化震源のうち, 第 1.5.1.11 図の矩形領域内の地震 6,750 個である. このうち, 最終的に 6,588 個の震源が再決定された. DD 法による初期入力震源としては, 地震活動域近傍の 15 か所の定常観測点(国立研究開発法人防災科学技術研究所 11 点, 国立大学法人九州大学 2 点, 気象庁 2 点)の P 波及び S 波の検測値を用いて気象庁の一元化震源の処理と同様な震源決定手法(上野ほか, 2002)で処理した後に, その際の各観測点における平均的な走時残差を各観測点の観測点補正值として検測値に反映させ, 再度上野ほか(2002)の手法により震源を決定しなおしたものを使用した.

DD 法により再決定した震源分布から, 一元化震源による震源分布では明瞭にはみられなかったクラスタ分布や傾斜分布が明らかになった.

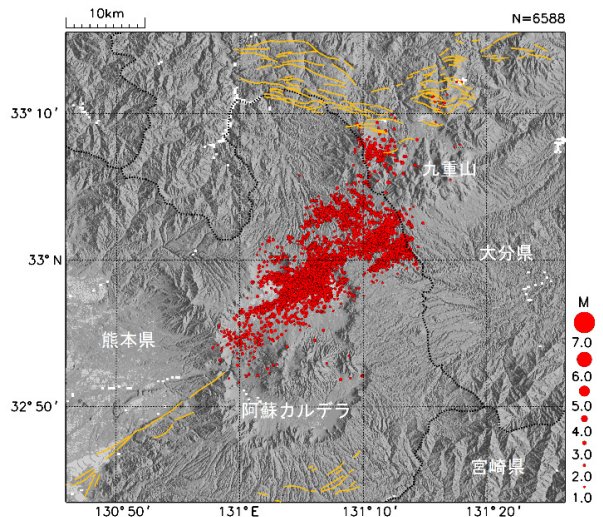
イ. 震源分布

第 1.5.1.12 図に DD 法を用いて再決定した震源分布を示す. この図から, 地震活動は布田川断層の北端付近から熊本・大分県境付近にかけて分布しているが, さらにいくつかのクラスタに分けら



第 1.5.1.11 図 気象庁一元化震源による震央分布図 (2016 年 4 月 14 日 ~ 2017 年 4 月 30 日, 深さ 20km 以浅, $M \geq 1.0$)

灰色の丸は震央位置, 図中の四角は震源再決定に使用した領域, 赤色の逆三角は震源再決定に用いた観測点位置を示す.

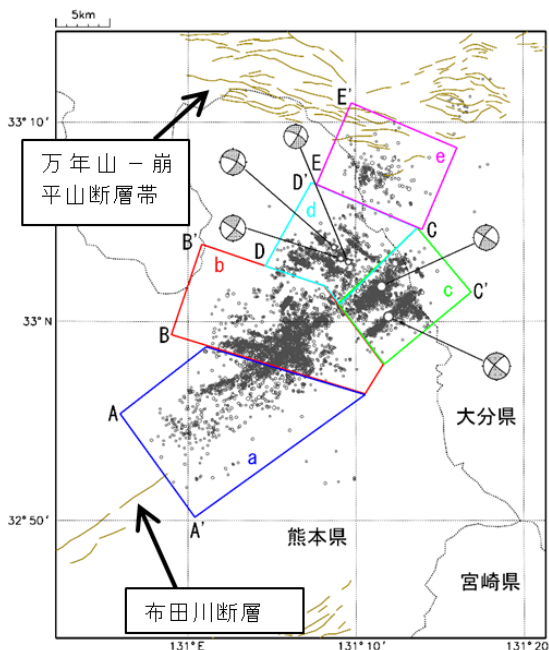


第 1.5.1.12 図 DD 法で再決定された震央分布 (地形を背景とした分布図)

赤丸は震央位置, 茶色の線は地震調査委員会の長期評価による活断層の地表トレースを示す.

れることがわかる。本項では、第 1.5.1.13 図に示すように、阿蘇カルデラ内南部（領域 a）、阿蘇カルデラ内北部（領域 b）、九重山南西側南東部（領域 c）、九重山南西側北西部（領域 d）、九重山西側（領域 e）の 5 領域に分類した。各領域の断面図を第 1.5.1.14 図に示す。

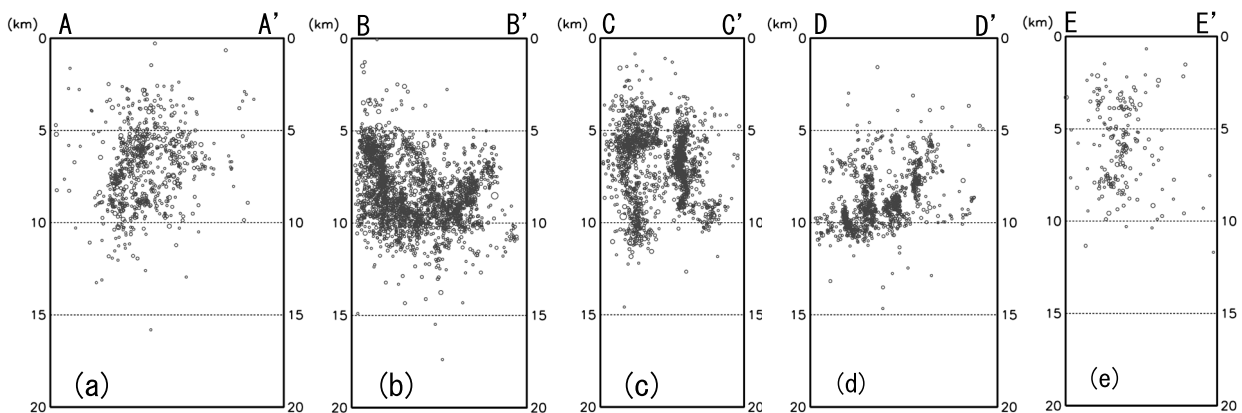
領域 a では布田川断層の走向に沿った分布がみられ、布田川断層の走向に直交する方向の断面



第 1.5.1.13 図 DD 法で再決定された震央分布

灰色の丸は震央位置、茶色の線は地震調査委員会の長期評価による活断層の地表トレースを示す。吹き出しで示した発震機構は気象庁による初動解。

(A-A' 断面) をみると、明瞭ではないが北西方向への傾斜がみられる（第 1.5.1.14 図 (a)）。これは布田川断層の傾斜方向に概ね一致する。領域 b は領域 a と明瞭に分離はできないが、領域 a とは異なる走向に沿った分布がみられる。領域 b でその分布の走向に直交する方向の断面 (B-B' 断面) をみると、北北東方向に傾斜した二枚の平行な面とそれらより北北東側 (B' 側) に位置する南南西方向に傾斜した面がみられる（第 1.5.1.14 図 (b)）。領域 c では北東 - 南西方向の二本の平行な走向に沿った分布がみられ、それらの走向に直交する方向の断面 (C-C' 断面) をみると、二本のほぼ垂直な分布がみられる（第 1.5.1.14 図 (c)）。領域 d では北西 - 南東方向の走向に沿った分布が数本みられる。それらの走向に直交する方向の断面 (D-D' 断面) をみると、深さ方向に 2 ~ 3km 程度の幅にほぼ鉛直に分布したクラスタがいくつかみられ、それぞれのクラスタは異なる深さに位置しており、南南西側 (D 側) ほど深い（第 1.5.1.14 図 (d)）。領域 e では、地震の数が少ないため明瞭ではないが、西北西 - 東南東方向の走向に沿った分布がみられる。これは、万年山 - 崩平山断層帯の走向に概ね一致する。その走向に直交する方向の断面 (E-E' 断面) では、明瞭な傾斜分布はみられない（第 1.5.1.14 図 (e)）。また、領域 c や領域 d 内で求められているいくつかの気象庁の初動発震機構解をみると、DD 法によって得られた震源分布と調和的な結果となっている



第 1.5.1.14 図 DD 法で再決定された震源分布（第 1.5.1.13 図各領域断面図）

灰色の丸は震源位置を示す。(a) 領域 a の A-A' 断面、(b) 領域 b の B-B' 断面、(c) 領域 c の C-C' 断面、(d) 領域 d の D-D' 断面、(e) 領域 e の E-E' 断面。水平方向と深さ方向のスケールは同じである。

る(第1.5.1.13図)。

以上のように、熊本県阿蘇地方付近の地震活動は複数のクラスタに分かれており、複雑な分布がみられた。これは、熊本県阿蘇地方の地震活動が複雑な断層運動によって発生していることを示唆している。

(3) DD法により再決定された震源による大分県中部付近の震源分布

ア. 手法及びデータ

大分県中部付近の地震活動について、震源の再決定を行った。再決定の対象としたのは、気象庁一元化震源のうち、第1.5.1.15図の矩形領域内の地震1,853個である。このうち、最終的に1,832個の震源が再決定された。DD法への初期入力震源としては、地震活動域近傍の16か所の定常観測点(国立研究開発法人防災科学技術研究所8点、国立大学法人九州大学2点、気象庁6点)のみのP波及びS波の検測値を用いて気象庁の一元化震源の処理と同様な震源決定手法(上野ほか, 2002)で処理した後に、その際の各観測点における平均的な走時残差を各観測点の観測点補正值として検測値に反映させ、再度上野ほか(2002)の

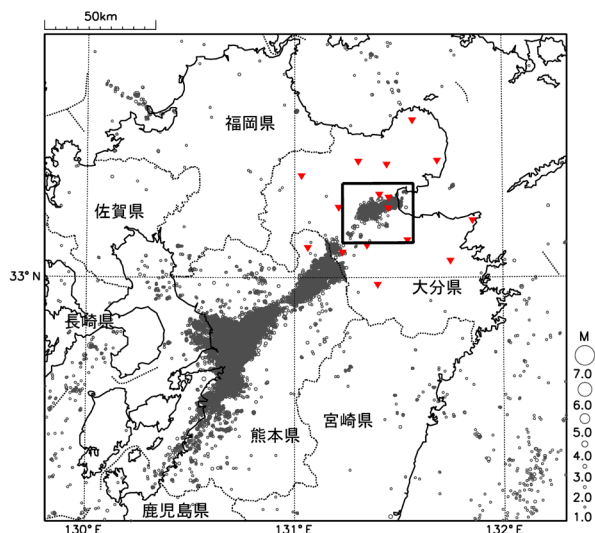
手法により震源を決定しなおしたものを使用した。

DD法により再決定した震源分布から、一元化震源による震源分布では明瞭にはみられなかったクラスタ分布や傾斜分布が明らかになった。

イ. 震源分布

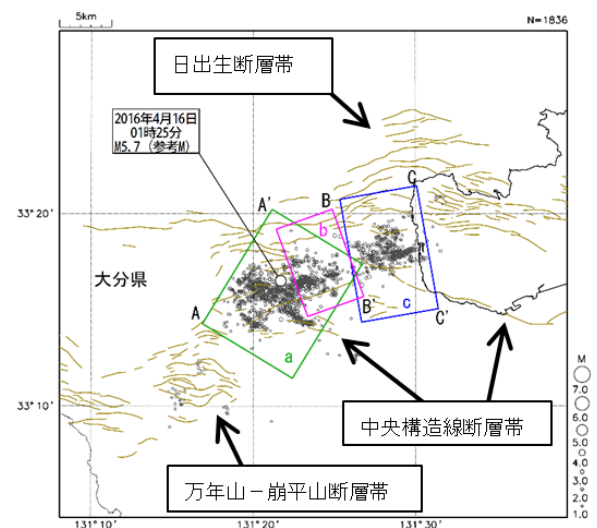
第1.5.1.16図にDD法を用いて再決定した震源分布を示す。地震活動は中央構造線断層帯や日出断層帯の周辺で発生しており、震央分布は東西に大きく二つのクラスタに分けられる。西側のクラスタを深さ分布から二つのグループ(領域a, 領域b)に分け、東側のクラスタについては、領域cとした。各領域の断面図を第1.5.1.17図に示す。

領域aは北西-南東方向の走向に沿った分布がいくつかみられる。その走向に直交する断面(A-A'断面)をみると、鉛直の分布がいくつかみられるとともに、全体として北東から南西方向に向かって深くなる分布がみられる。4月16日01時25分に熊本県熊本地方で発生したM7.3の地震とほぼ同時に大分県中部で発生したM5.7(Mは参考)の地震は、この領域a内の比較的深い部



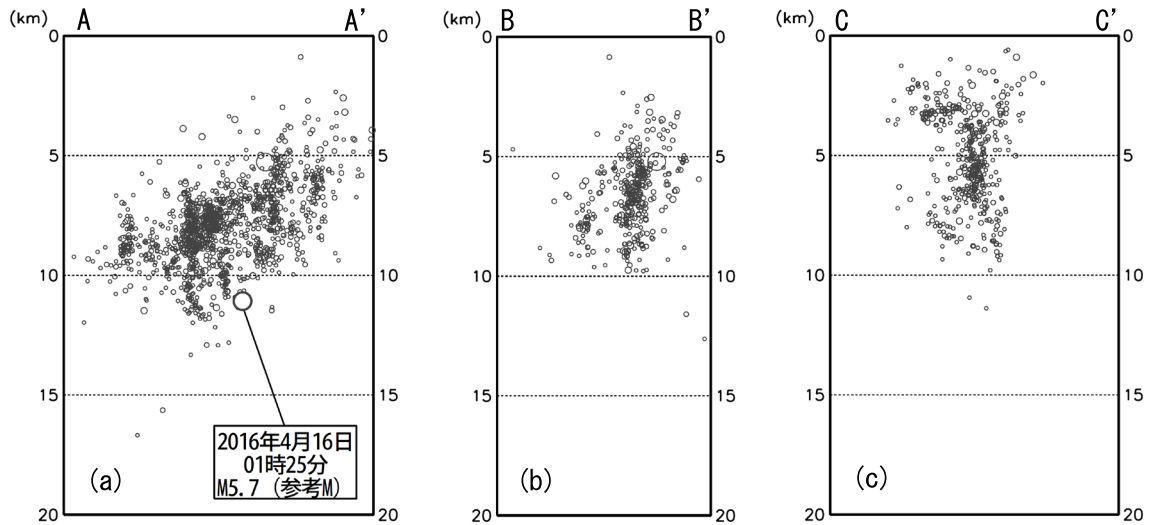
第1.5.1.15図 気象庁一元化震源による震央分布図(2016年4月14日～2017年4月30日、深さ20km以浅、M ≥ 1.0)

灰色の丸は震央位置、図中の四角は震源再決定に使用した領域を示す、赤色の逆三角は震源再決定に用いた観測点位置を示す。



第1.5.1.16図 DD法で再決定された震央分布

灰色の丸は震央位置、茶色の線は地震調査委員会の長期評価による活断層の地表トレースを示す。



第 1.5.1.17 図 DD 法で再決定された震源分布 (第 1.5.1.16 図各領域断面図)

灰色の丸は震源位置を示す。(a) 領域 a の A-A' 断面, (b) 領域 b の B-B' 断面, (c) 領域 c の C-C' 断面. 水平方向と深さ方向のスケールは同じである.

分で発生した. 領域 b は領域 a の一部で東北東-西南西方向の走向に沿った分布がみられる領域で, 周辺の活断層帯の走向に概ね一致している. その走向に直交する断面 (B-B' 断面) をみると, 二本の鉛直な分布がみられる. 領域 c は周辺の活断層帯の走向に概ね一致しており, その走向に直交する断面 (C-C' 断面) をみると, 鉛直の分布がみられる.

以上のように, 大分県中部付近の地震活動の震源分布には異なる走向の鉛直の分布がいくつかみられ, 周辺の活断層帯との関連は不明だが, 複雑な断層運動があったことを示唆している.

参 考 文 献

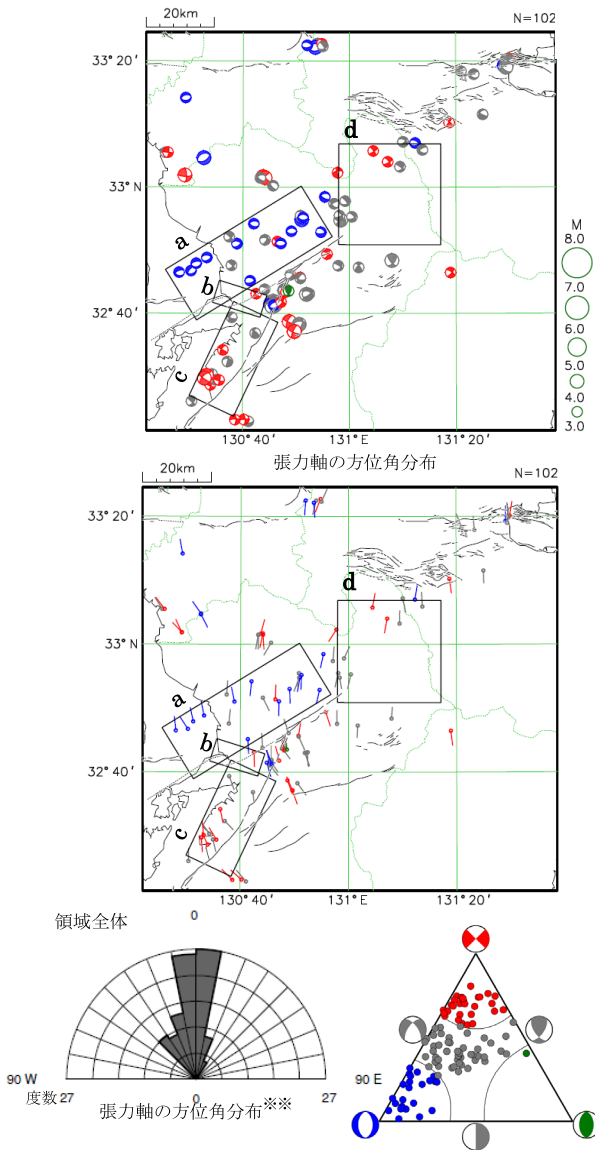
上野寛・畠山信一・明田川保・舟崎淳・浜田信生 (2002) : 気象庁の震源決定方法の改善-浅部速度構造と重み関数の改良-. 験震時報, 65, 123-134.

Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth (2000) : A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. Bull. Seism. Soc. AM., 90, 1353-1368.

1.5.1.3 発震機構解（初動解）の時空間的特徴*

2016年4月14日21時26分に、熊本県熊本地方でM6.5の地震が発生する以前は南北方向の張力軸をもつ型の地震が多かった(第1.5.1.18図)が、

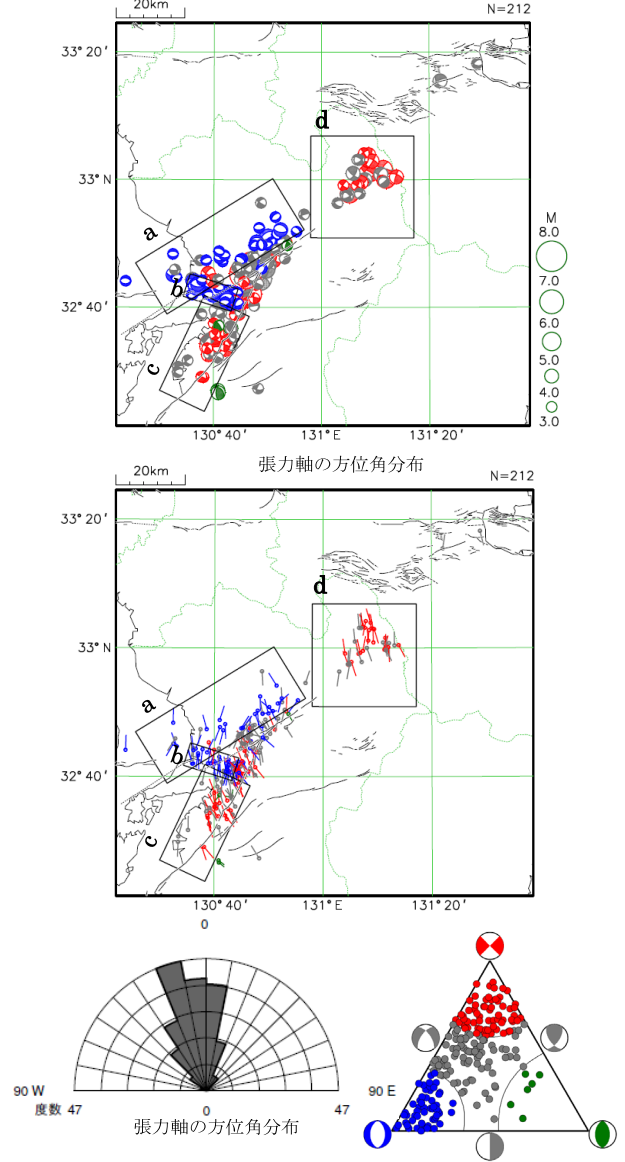
4月14日21時26分の地震発生以降は、北北西-南南東方向から南北方向にかけて張力軸をもつ型の地震が多く発生した(第1.5.1.19図)。同地震の発生以前と同様に逆断層型**の地震の発生は少ない。



第1.5.1.18図 4月14日21時25分以前の初動発震機構解及び張力軸の方位角分布

(1997年10月1日00時00分～2016年4月14日21時25分、深さ0～20km) 図中の灰線は地震調査委員会の長期評価による活断層を表す。

赤：横ずれ断層型 青：正断層型 緑：逆断層型
灰色：それ以外



第1.5.1.19図 4月14日21時26分以降の初動発震機構解及び張力軸の方位角分布

(2016年4月14日21時26分～2017年4月30日24時00分、深さ0～20km) 図中の灰線は地震調査委員会の長期評価による活断層を表す。

赤：横ずれ断層型 青：正断層型 緑：逆断層型
灰色：それ以外

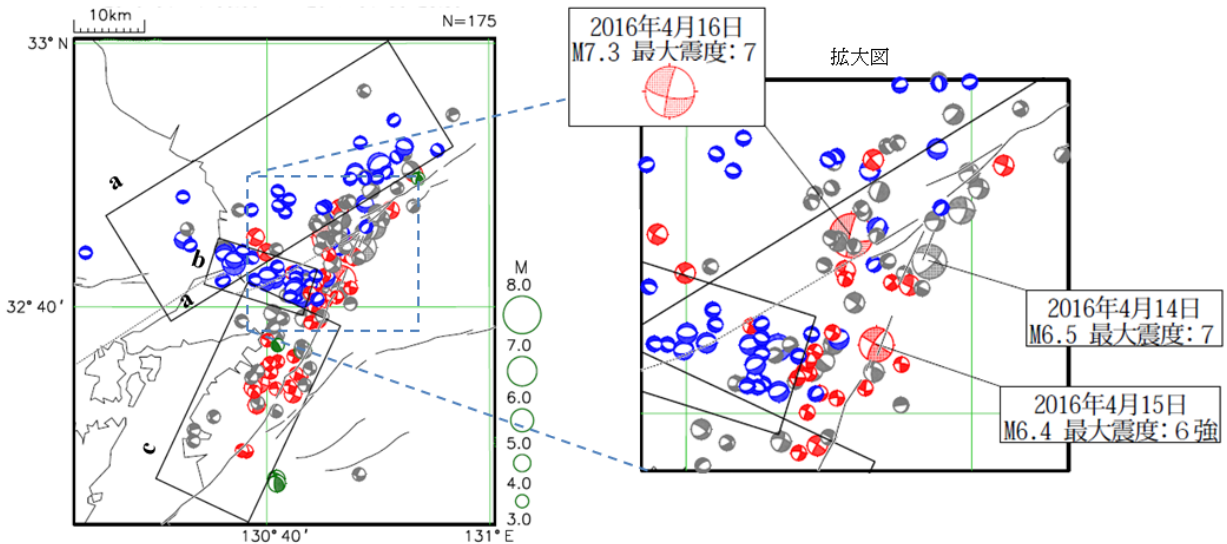
* 地震火山部地震予知情報課 山内 崇彦

** ここでは発震機構解の分類はFrohlich (2001) によるものを用いた。

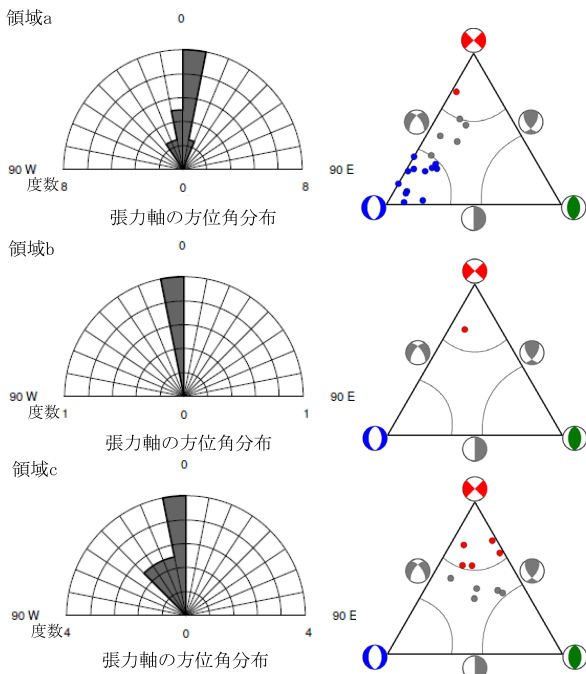
*** 中心からの距離は度数を表す。

第1.5.1.20図に、第1.5.1.19図の領域a-cの周辺を拡大した初動発震機構解の分布を示す。布田川断層帯北側の領域aでは4月14日21時26分以前と同様に正断層型の地震が多く発生し、南北方向を中心に張力軸を持つ型の地震が多い(第

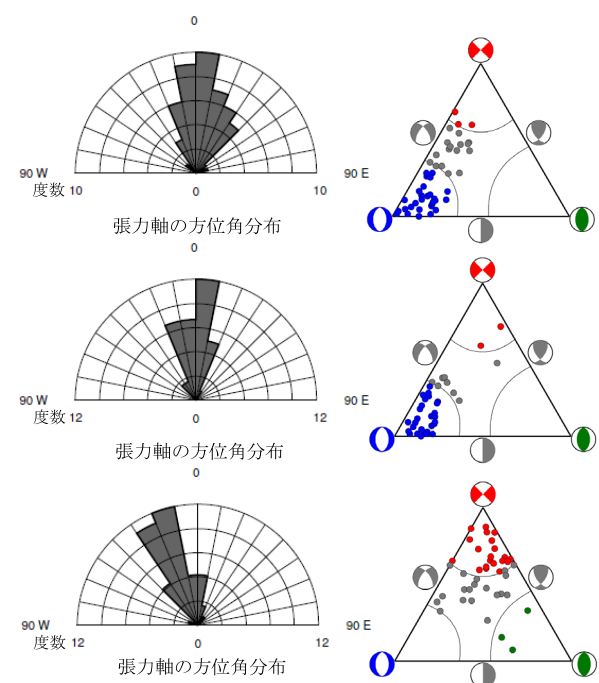
1.5.1.21図, 第1.5.1.22図)。布田川断層帯西側周辺の領域bでは、4月14日21時26分以降、正断層型の地震が多く発生し、南北方向を中心に張力軸を持つ型が多い。日奈久断層帯沿いの領域cでは4月14日21時26分以前と同様に横ずれ断



第1.5.1.20図 4月14日21時26分以降の初動発震機構解
(2016年4月14日21時26分～2017年4月30日24時00分, 深さ0～20km)
図中の灰線は地震調査委員会の長期評価による活断層を表す。



第1.5.1.21図 領域a,b及びcにおける4月14日21時25分以前の初動発震機構解
(1997年10月1日00時00分～2016年4月14日21時25分, 深さ0～20km)



第1.5.1.22図 領域a, b及びcにおける4月14日21時26分以降の初動発震機構解
(2016年4月14日21時26分～2017年4月30日24時00分, 深さ0～20km)

層型の地震が多く発生し、4月14日21時26分以降は北北西-南南東方向に張力軸を持つ型が多く、日奈久断層帯の走向と整合的である。

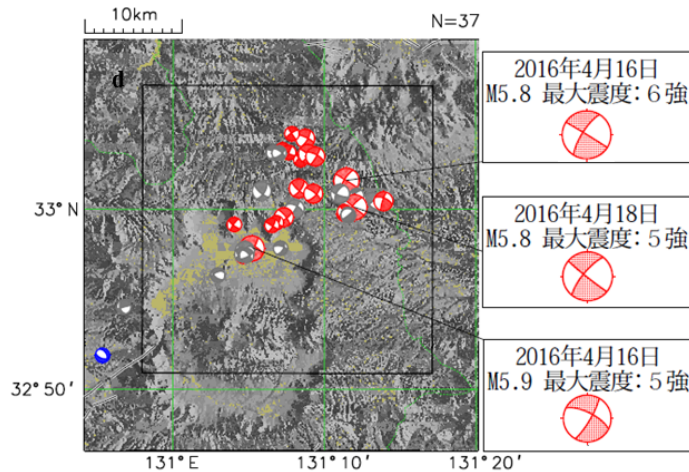
また、阿蘇山北東の領域d(第1.5.1.23図)では4月14日21時26分以降、南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型の地震が多く発生した(第1.5.1.24図, 第1.5.1.25図)。

謝辞

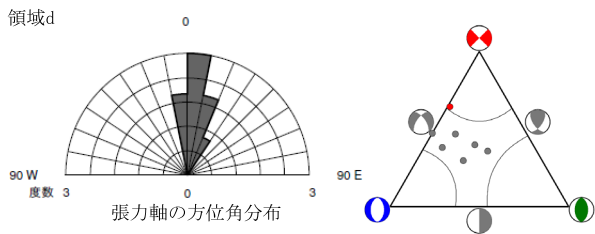
ローズダイアグラム, 三角ダイアグラムの作成には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998)を利用した。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

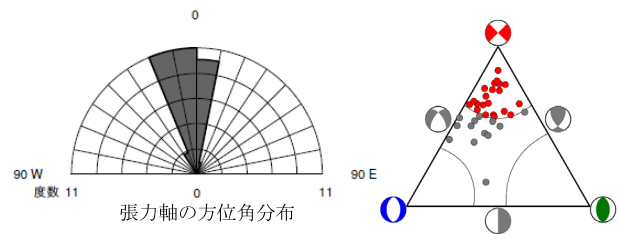
Frohlich, C. (2001) : Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanisms. *Geophys. J. Int.*, **144**, 300-308.
 Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998) : New, improved version of Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, Vol. **79** (47), 579.



第1.5.1.23図 4月14日21時26分以降の初動発震機構解
 (2016年4月14日21時26分～2017年4月30日24時00分, 深さ0～20km)



第1.5.1.24図 領域dにおける4月14日21時25分以前の初動発震機構解
 (1997年10月1日00時00分～2016年4月14日21時25分, 深さ0～20km)



第1.5.1.25図 領域dにおける4月14日21時26分以降の初動発震機構解
 (2016年4月14日21時26分～2017年4月30日24時00分, 深さ0～20km)

1.5.1.4 M6.5, M6.4, M7.3の3つの地震による静的応力変化*

規模の大きな地震と、その後の周辺の地震活動の変化との関連性については、静的応力変化（クーロン破壊応力変化、以下 ΔCFF とする）を用いて示されることが多い（例えば、Reasenberg and Simpson, 1992; Toda *et al.*, 2011）。本目では、熊本県熊本地方で発生した2016年4月14日のM6.5, 15日のM6.4, 16日のM7.3の3つの地震が、M7.3の地震発生後の周辺の地震活動に与えた影響を、 ΔCFF と地震活動の関係から調べた。

静的応力変化の算出では、震源過程解析により推定されたM6.5, M6.4, M7.3の3つの地震の各断層モデル（第1.3.1項）を用いて、Okada（1992）に基づく計算コードにより半無限均質弾性体中の変位を計算し、応力一ひずみの関係式により、静的応力変化を受ける周辺の任意の点において仮定した受け手の断層に対応する ΔCFF を計算した。その際、摩擦係数0.4、剛性率30GPa、ポアソン比0.25とした。

第1.5.1.26図に ΔCFF の分布を示す。 ΔCFF の正の値は断層の破壊（地震発生）が促進、負の値は抑制される応力変化を示している。断層モデルの近傍では、震源過程解析により推定された断層モデルの精度が ΔCFF に影響するため、ここでは断層モデルからやや離れた周辺領域に注目する。第1.5.1.26図をみると、受け手の断層が正断層型の場合、断層モデルの東方と西方では ΔCFF が正の領域が卓越しており、この領域には正断層型の地震が多く発生している領域aも含まれている。また、受け手の断層が横ずれ断層型の場合、断層モデルの走向方向延長線上に ΔCFF が正の領域が卓越しており、この領域には、横ずれ断層型の地震が多く発生している領域bと領域cも含まれている。一方、断層モデルの北方と南方では、受け手が横ずれ断層型と正断層型のどちらの場合でも負の ΔCFF が広がっており、それに対応するように発震機構解が得られるような比較的規模の大きな地震はあまりみられない。

第1.5.1.27図に発震機構解の節面を受け手の断

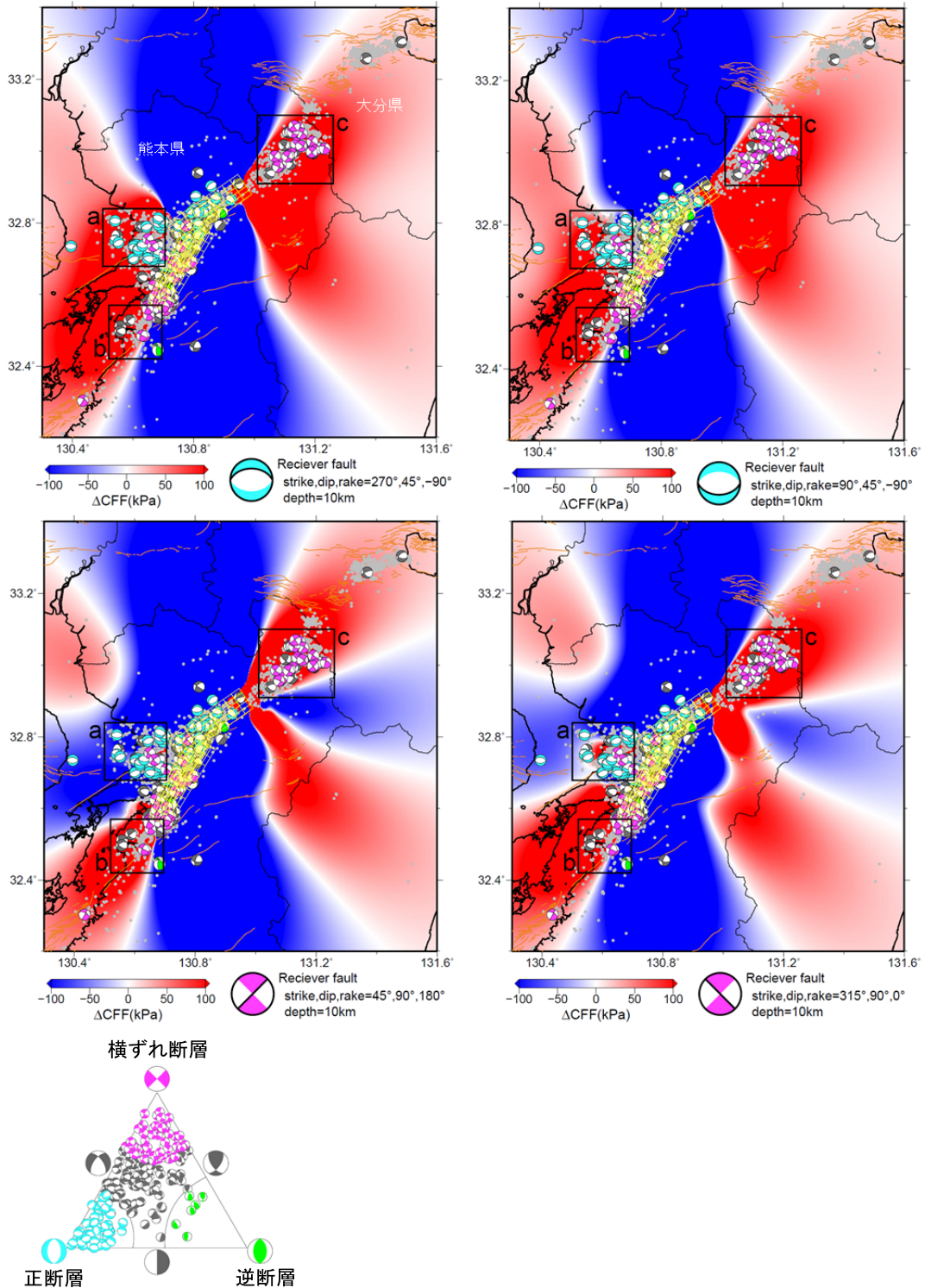
層とした ΔCFF の分布を示す。領域a, b, cのいずれにおいても、両方の節面または一方の節面の ΔCFF が正の発震機構解が多い。典型的な横ずれ断層や正断層から外れる発震機構解の多くでも、 ΔCFF は正である。また、断層モデルから遠く離れた大分県や八代海においても ΔCFF が正の発震機構解がみられる。

以上のように、M7.3の地震発生後にその断層から離れた領域でみられる地震活動は、M6.5, M6.4, M7.3の3つの地震によって生じた静的応力変化と調和的である。

参 考 文 献

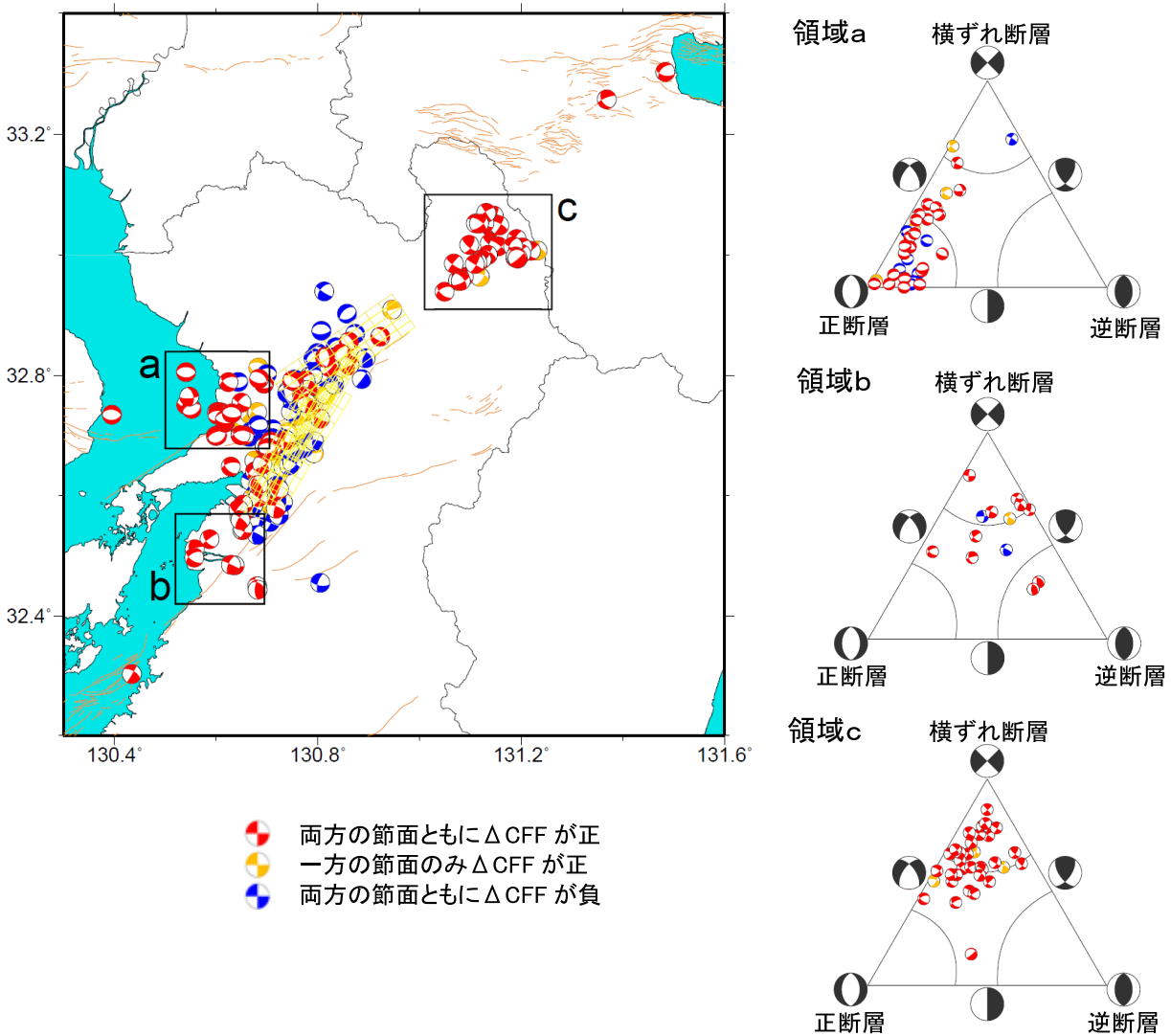
- Frohlich, C. (1992) : Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 75, 193-198.
- Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- Reasenberg, P. A. and R. W. Simpson (1992) : Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 255, 1687-1690.
- Toda, S., R. S. Stein, and J. Lin (2011) : Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G03, doi:10.1029/2011GL047834.

* 地震火山部地震予知情報課 岩切 一宏



第 1.5.1.26 図 2016 年 4 月 14 日の M6.5, 15 日の M6.4, 16 日の M7.3 の 3 つの地震による, 4 タイプの断層への静的応力変化 (ΔCFF)。

黄色の矩形で示した M6.5, M6.4, M7.3 の 3 つの地震の断層モデル (第 1.3.1 項) について, 深さ 10km における ΔCFF を計算した。仮定した受け手の断層は, (左上図) 東西走向で北傾斜の正断層, (右上図) 東西走向で南傾斜の正断層, (左下図) 北東-南西走向の右横ずれ断層, (右下図) 北西-南東走向の左横ずれ断層。M7.3 の地震発生後から 2017 年 4 月 30 日までの地震 ($M \geq 2.0$, 深さ ≤ 20 km) について, 震央を灰色で示し, 初動発震機構解を Frohlich (1992) の分類による左下図の三角ダイアグラムに記した色分けで示す。茶色の線は地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層の地表トレスを示す。



第 1.5.1.27 図 2016年4月14日のM6.5, 15日のM6.4, 16日のM7.3の3つの地震による, 発震機構解の節面を受け手の断層とした静的応力変化 (ΔCFF)。

(左図) 黄色の矩形で示したM6.5, M6.4, M7.3の3つの地震の断層モデル(第1.3.1項)について, M7.3の地震発生後から2017年4月30日までの地震(深さ $\leq 20\text{km}$)の初動発震機構解の節面を受け手の断層とする ΔCFF を計算した。初動発震機構解の2つの節面の ΔCFF について, 赤色は両方の節面ともに正, 橙色は一方の節面のみが正, 青色は両方の節面ともに負を示す。茶色の線は地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価による活断層の地表トレースを示す。

(右図) 左図の矩形領域a, b, cにおける初動発震機構解をFrohlich(1992)の分類による三角ダイアグラムに示す。赤, 橙, 青の色の分類は左図と同じ。

1.5.2 一元化震源における自動処理の活用

地震調査委員会において、気象庁の一元化震源の処理方法について検討され、平成26年2月12日に「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する報告書」が取りまとめられた。この報告を受けて、気象庁の一元化震源の処理（第1.5.2.1目末尾の「(参考) 通常の一元化震源の処理の概要」を参照）及び地震解説業務において、溜瀧ほか(2016)の自動処理による震源（以下、自動震源）の活用を、2016年4月1日より開始していた。

熊本地震は、この新たな自動震源の活用開始後に初めて発生した顕著な地震であり、自動震源を活用した対応がとられた。ここでは、以下の2つの主な自動震源の活用例について紹介する。

- ① 即時的な地震解説
- ② 一元化震源の処理

1.5.2.1 即時的な解説資料における自動震源の活用*

(1) 解説業務における自動震源の活用についての考え方

一元化震源の処理に自動震源を活用すると、従来の手作業による検測に比べて震源決定を行う処理の時間が短縮されるため、より迅速に一元化震源を処理できる。しかし、一元化震源の震源データは、全て職員による確認が必要であるため、規模の大きな地震後の余震活動や地震活動が活発になった場合、全ての自動震源を直ちに一元化震源にすることは難しい。なお、一元化震源の処理の流れは、第1.5.2.1目末尾の「(参考) 通常の一元化震源の処理の概要」を参照。しかし、そのような状況下でも、地震活動の推移などについて大まかでも迅速に図示して解説することが防災対応上効果的な場合もある。その場合、ほぼリアルタイムに得られる自動震源を報道発表資料や地震解説資料等に自動震源を活用することとした。

(2) 解説業務に使用する自動震源

気象庁では、ほぼリアルタイムで自動震源の計算を行っており、地震発生から概ね10分後には

震源データの利用が可能である。これらの震源データは、最も早くに活用できるデータである一方で、震源計算精度の良くないデータも含まれる。地震情報で発表する震源要素は気象庁職員が手作業により決定した震源であるため、自動震源の震源要素とは異なることもある。精度の良くないデータ、すでに情報として発表している震源と異なる数値のデータを解説資料に表示・記載することは、利用者に誤解を与えることがある。このため、解説業務に活用する自動震源には以下の基準を設けている（第1.5.2.1表）。

(3) 熊本地震における地震解説資料等での活用例
熊本地震では、4月14日21時26分の地震(M6.5)の直後から地震活動が非常に活発になった。このため、同地震発生直後の報道発表（記者会見）から、自動震源を活用して解説を行った。自動震源を活用することの大きなメリットは以下の2つであった。

① 活動が非常に活発であったため、通常の一元化震源の処理では、検知した地震のうち規模の大きな一部の震源しか処理することができなかった。しかし、自動震源を利用することで、規模の小さな地震を含む検知した全ての震源を活用することができた。

第1.5.2.1表 即時的な解説資料等で使用する自動震源の基準

震源誤差	以下の条件を満たした自動震源 【特定領域 (内陸とその周辺の30km以内)】 震源時誤差：0.2秒以内 水平誤差：0.5分以内 【一般領域(特定領域以外)】 震源時誤差：0.5秒以内 水平誤差：1.0分以内
M	M0.1以上の自動震源
使用観測点数	5観測点以上
震源要素	地震情報で発表した地震は、地震情報で用いた震源要素とする。それ以外の地震は、自動処理による計算で決定した値を用いる。

* 地震火山部地震予知情報課 廣田 伸之
気象研究所地震津波研究部 溜瀧 功史

②自動処理はほぼリアルタイムで行われているため、より最新のデータまで活用することができた。

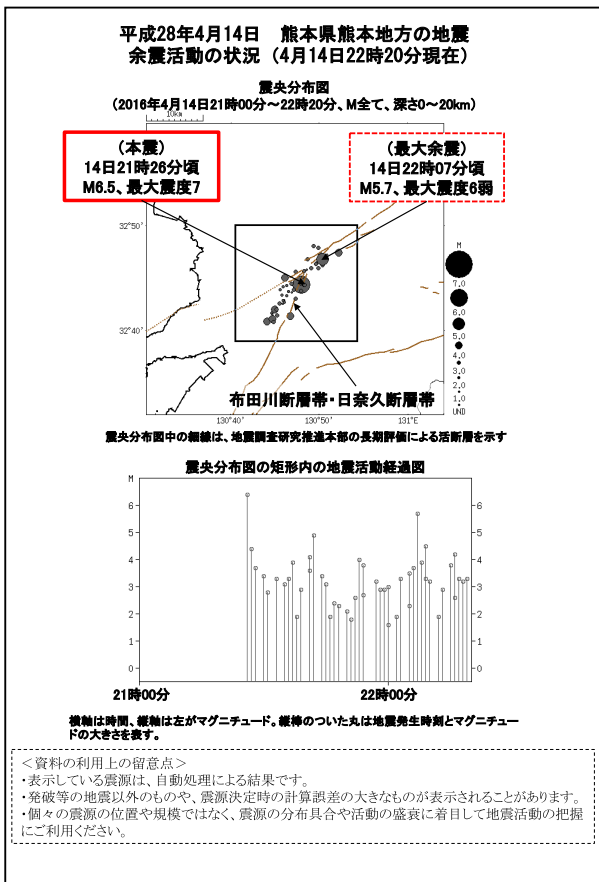
以下、実際の報道発表資料の例をいくつか示し、それぞれの資料において自動震源がどのように有効活用できたかを紹介する。

14日のM6.5の地震発生から約2時間後の報道発表（第1報）資料では、同地震発生から約1時間後まで、地震発生から約6時間後の報道発表（第2報）資料では、約4時間30分後までの自動震源を使用し、地震活動の状況を解説した。ここでの主な解説ポイントは以下の2点であった（第1.5.2.1図、第1.5.2.2図）。

①地震活動が非常に活発な状態が継続している。

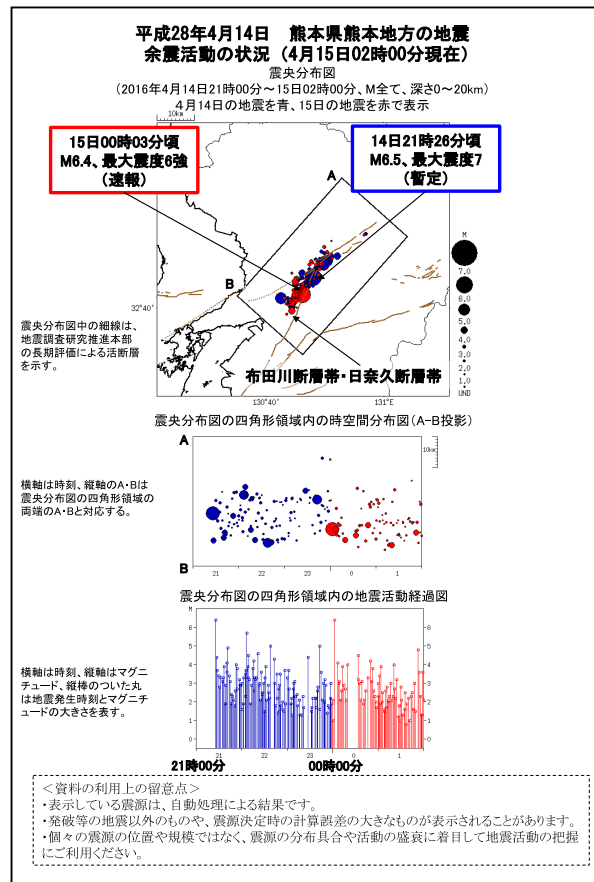
②活動域が、布田川断層帯及び日奈久断層帯沿いに分布している。

①は従来からも、緊急作業での監視や地震波形のモニタ等で把握することができたが、自動震源を活用することで地震の発生状況や時空間分布を図示して解説ができた。特に自動震源の活用で効果が大きかったのは②であった。この例では、地震発生直後から活動域が付近の活断層沿いに分布していることを把握できた。



第1.5.2.1図 【活用例1】

4月14日21時26分の地震（M6.5）発生から約2時間後の報道発表第1報（4月14日23時30分発表）

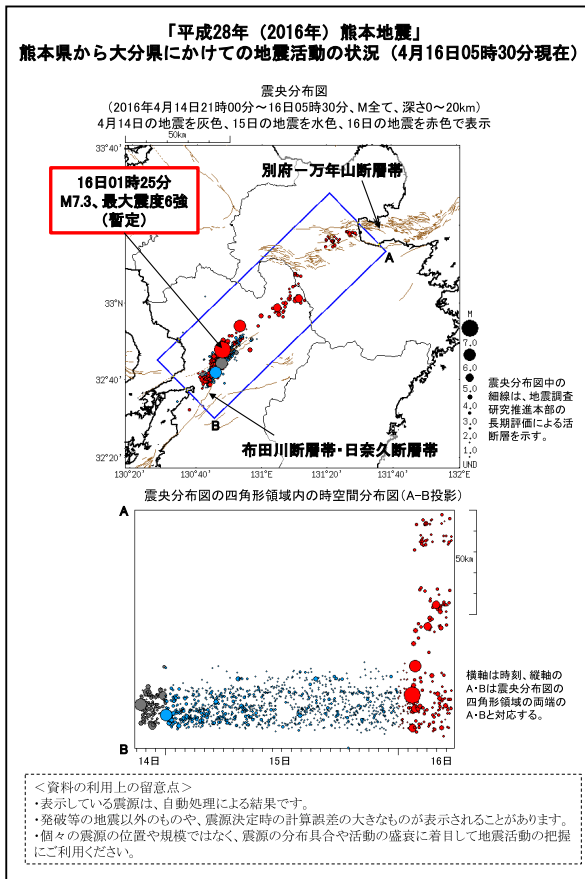


第1.5.2.2図 【活用例2】

4月14日21時26分の地震（M6.5）発生から約6時間後の報道発表第2報（4月15日03時30分）

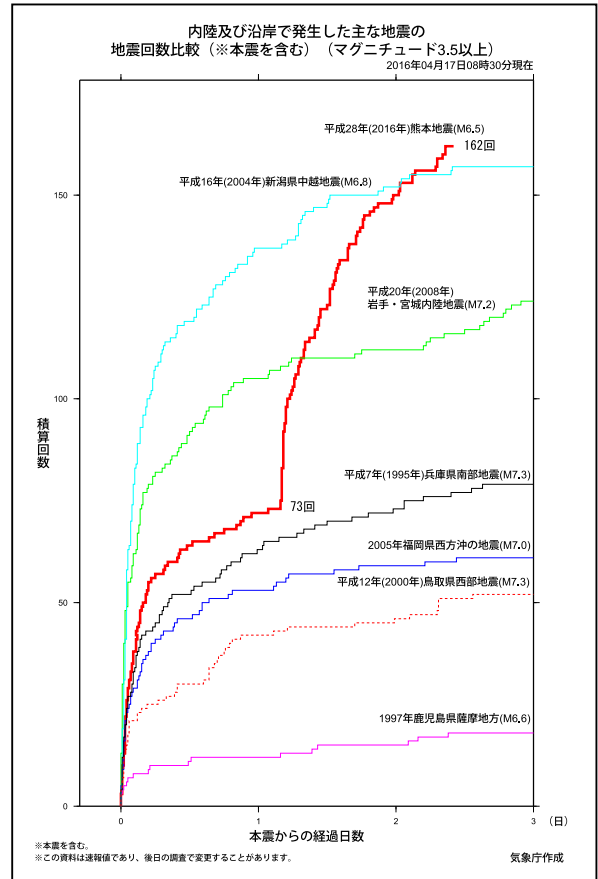
16日01時25分の地震(M7.3)の発生後の報道発表(第8報)資料では、自動震源を活用することで、活動域が熊本地方だけでなく、阿蘇地方から大分県まで広がったことを、より迅速に解説することができた(第1.5.2.3図)。

第9報(4月16日10時30分)以降、それまでの震央分布図・MT図等に加えて、内陸及び沿岸で発生した過去の主な地震との地震回数比較のグラフを作成した(第1.5.2.4図)。このグラフにより、熊本地震の活動が過去の地震活動と比較しても活発であることが視覚的にわかりやすく解説することが可能となった。この回数比較のグラフ作成においても、自動震源を活用することにより、最新の活動状況まで反映できた。



第1.5.2.3図 【活用例3】

4月16日01時25分の地震(M7.3)発生から約6時間後の報道発表第8報(4月16日07時30分)



第1.5.2.4図 【活用例4】

4月16日01時25分の地震(M7.3)発生翌日の報道発表第11報(4月17日10時30分)

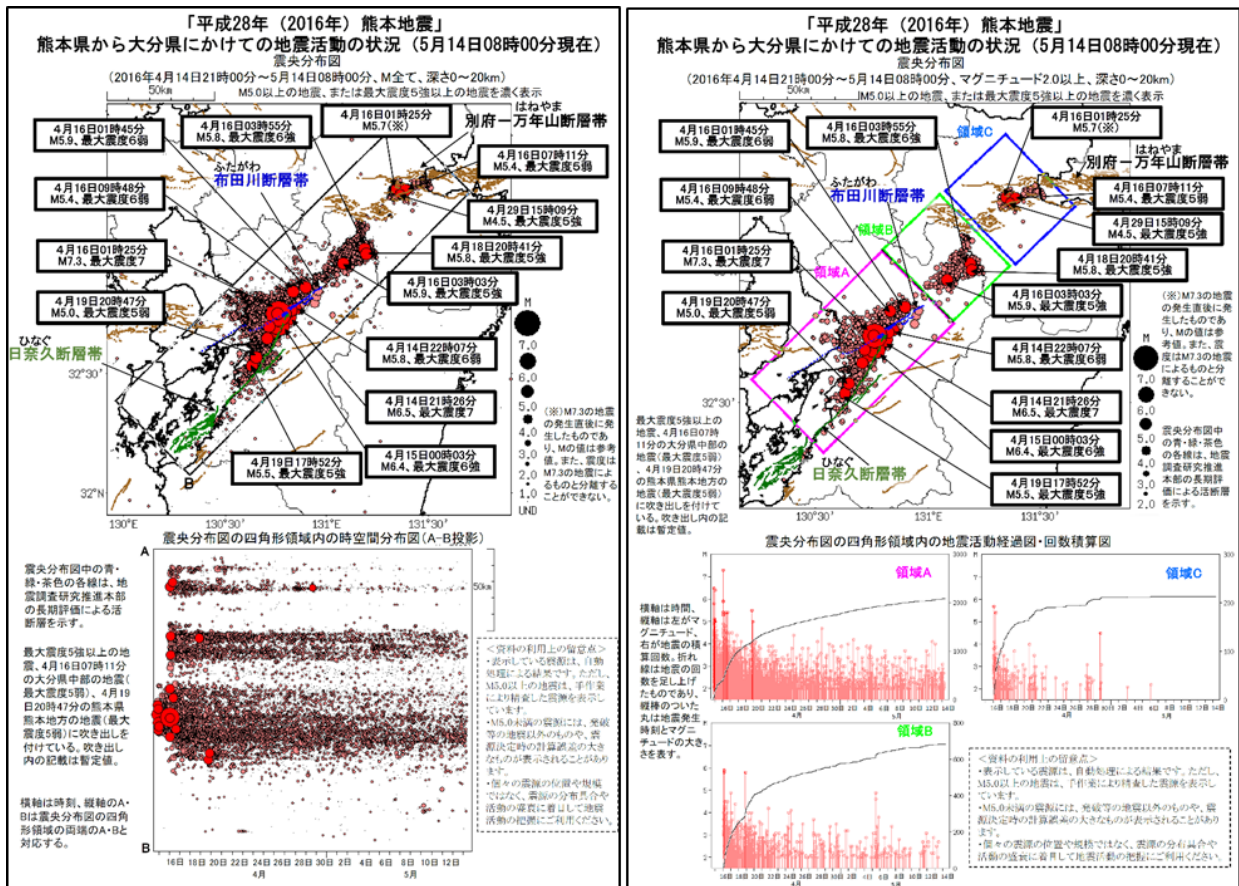
その後も、最大震度5弱以上の地震が発生した際の臨時的報道発表資料、気象庁HPへの掲載等の定期的な解説資料、各種支援資料の提供においても、自動震源を活用して最新の活動状況を解説することができた。第1.5.2.5図は、定期的に気象庁HPへ掲載した解説資料であり、資料掲載時刻の約1時間から2時間前までの最新の震源データを活用し、より最新の状況を示すことが可能であった。

(4) 従来の自動震源との比較

2016年3月以前もグループトリガという従来の手法でイベント検出、自動震源決定を行っている。従来の手法(以下、GT震源と表記する。GTはGroup Triggerの略)は地震のトリガ時刻をP波と仮定して震源計算を行うために、複数の地震やノイズが混在した場合に誤った場所に震源を決定することが多くあった。その課題を克服するた

め、現在導入している自動処理は、各観測点で多数のP波、S波を自動的に検出した後に、それらの最適な組み合わせを探索する(PF法、相組み合わせ探索、Phase combination Forward searchの略)。現在の自動震源(以下、PF震源と表記する)は2016年4月1日から運用を開始したが、震源精度や検出数は、GT震源に比べPF震源の方が良好である。詳細は、溜瀨ほか(2016)を参照。2016年4月以降もGT震源は計算しているため、熊本地震の活動におけるPF震源とGT震源の精度や決定状況等を比較した結果を示す。

第1.5.2.6図は、2016年4月14日の地震(M6.5)発生から同日23時までのPF震源とGT震源の震央分布図とMT図である。これを見ると、PF震源では、前述の通り布田川断層帯・日奈久断層帯沿いに分布しているのに対して、GT震源は震源分布が2つのクラスタに分かれており、活断層帯に沿うような帯状の分布を把握することは難し



第1.5.2.5図 【活用例5】
定期的に気象庁HPに掲載した解説資料

い。また、震源の数を比較しても、PF震源は規模の小さな地震をより多く決定し、GT震源の約4倍の個数となっている。このことは、地震発生直後から「①地震活動が非常に活発な状態が継続していること」「②活動域が、布田川断層帯及び日奈久断層帯沿いに分布していること」を示すことにおいて、GT震源よりPF震源がより有効であったことを示している。

第1.5.2.7図は、2016年4月16日の地震(M7.3)発生から約2時間後までの、PF震源とGT震源の震央分布図と時空間分布図を示している。震源の数については、第1.5.2.6図で示したのとほぼ同じで、PF震源はGT震源の約4倍決定している。活動域の拡大については、GT震源でも把握できるが、PF震源と比較すると震源分布がややばらついていることがわかる。

このように、従来のGT震源と比較して、PF震源は震源決定精度や震源決定数が顕著に向上

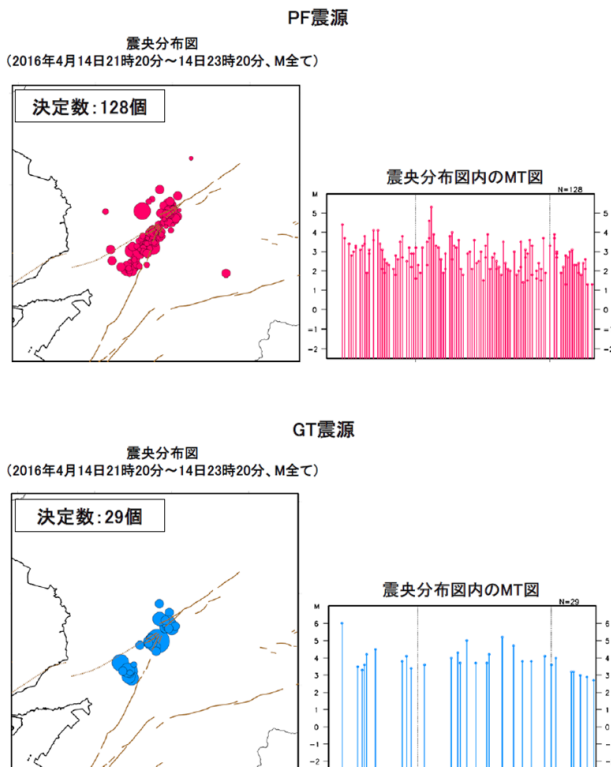
し、最新の活動状況の解説に有用であったことが、熊本地震においても確認できた。

(5) まとめ

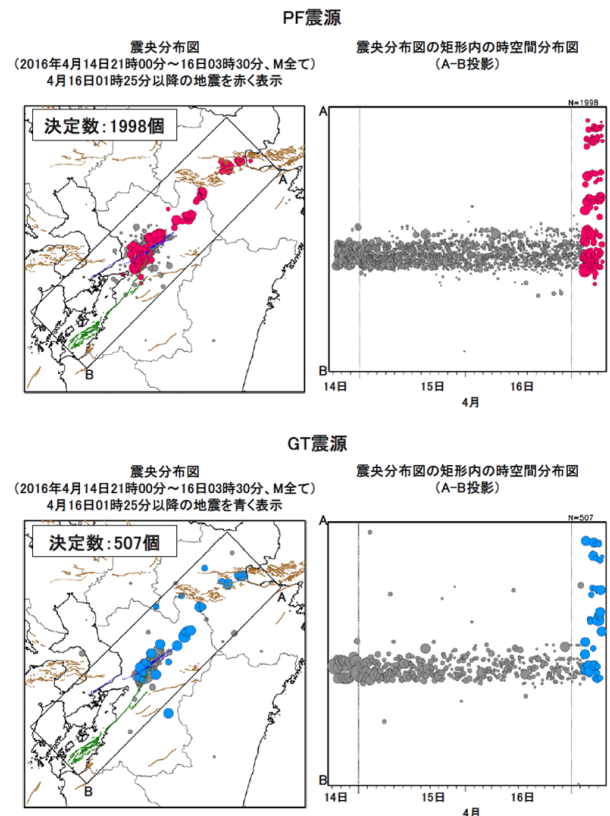
熊本地震では、4月14日21時26分の地震(M6.5)の直後から自動震源を活用して解説を行った。自動震源を活用することの大きな効果は以下の2つであった。

①活動が非常に活発であったため、通常の一元化震源の処理では、検知した地震のうち規模の大きな一部の震源しか処理することができなかった。しかし、自動震源を利用することで、規模の小さな地震を含む検知した全ての震源を活用することができた。

②自動処理はほぼリアルタイムで行われているため、より最新のデータまで活用することができた。



第1.5.2.6図 2016年4月14日の地震(M6.5)発生から約2時間後までのPF震源とGT震源の比較



第1.5.2.7図 2016年4月16日の地震(M7.3)発生から約2時間後までのPF震源とGT震源の比較

熊本地震では、通常の一元化震源の処理では迅速に処理できなかった規模の小さな震源データまで活用することで、地震活動が非常に活発であること、地震活動が付近の活断層に沿うように分布していること、地震活動の範囲が広がったこと等をより明瞭に図示することができた。また、最新の活動状況を解説する上で、自動震源が有効であることが確認できた。

(参考) 通常の一元化震源の処理の概要

通常の一元化震源(第1.5.2.2表)の処理の流れについて概要を簡単に解説する(第1.5.2.8図)。

①【自動処理】

処理システム内で、リアルタイムに自動震源の計算を行う。

②【職員による手作業】

自動震源を、領域と深さにより予め設定した一定の規模(マグニチュード)以上の地震とそれ未満の地震に選別する。

③【職員による手作業】

一定の規模以上の地震については、職員が全ての波形を目視確認し、自動震源の検測値(P相とS相の到達時刻、最大振幅等)を確認する。誤った検測値、未検測の相や振幅がある場合には、職員が手動検測を行う。震源計算後、再度検測値に誤りがないかを確認し、一元化震源(会話震源)とする。

なお、2016年3月以前は、検知した全ての地震に対してこの作業により震源決定を行っていた。

④【職員による手作業】

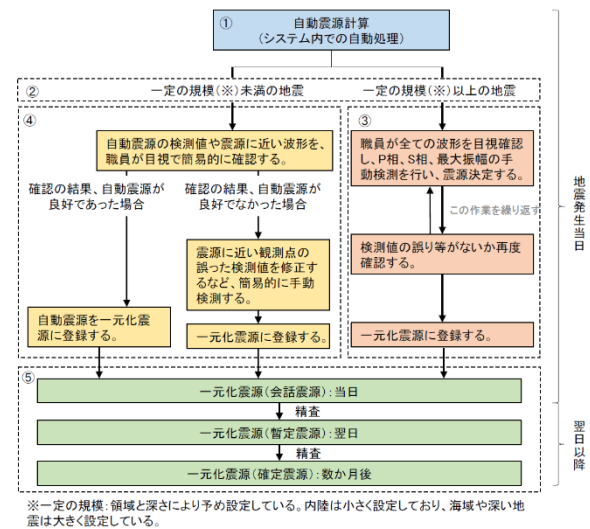
一定の規模未満の地震については、自動震源の震源位置、波形、検測値等を目視で簡易的に確認する。確認の結果、自動震源の精度が良好であれば、自動震源をそのまま一元化震源(会話震源)とする。自動震源の精度が良好でない場合には、震源に近い観測点の検測値を修正する等、簡易的に手動検測を行い、一元化震源(会話震源)とする。

⑤【職員による手作業】

地震発生当日に処理した震源データ(会話震源)は、翌日以降に再度精査し、暫定震源、確定震源とする。

第1.5.2.2表 本節における「一元化震源」の定義

震源の種類	作成日	震源について
一元化震源	会話震源	・公開していない。 ・即時的な解説資料等には使用する。
	暫定震源	・会話震源を精査した震源。 ・気象庁HP等で公開している。
	確定震源	・暫定震源を精査した震源。 ・気象庁HP等で公開している。



第1.5.2.8図 通常の一元化震源の処理の概要

参考文献

地震調査研究推進本部地震調査委員会(2014): 高感度地震観測データの処理方法の改善に関する報告書。

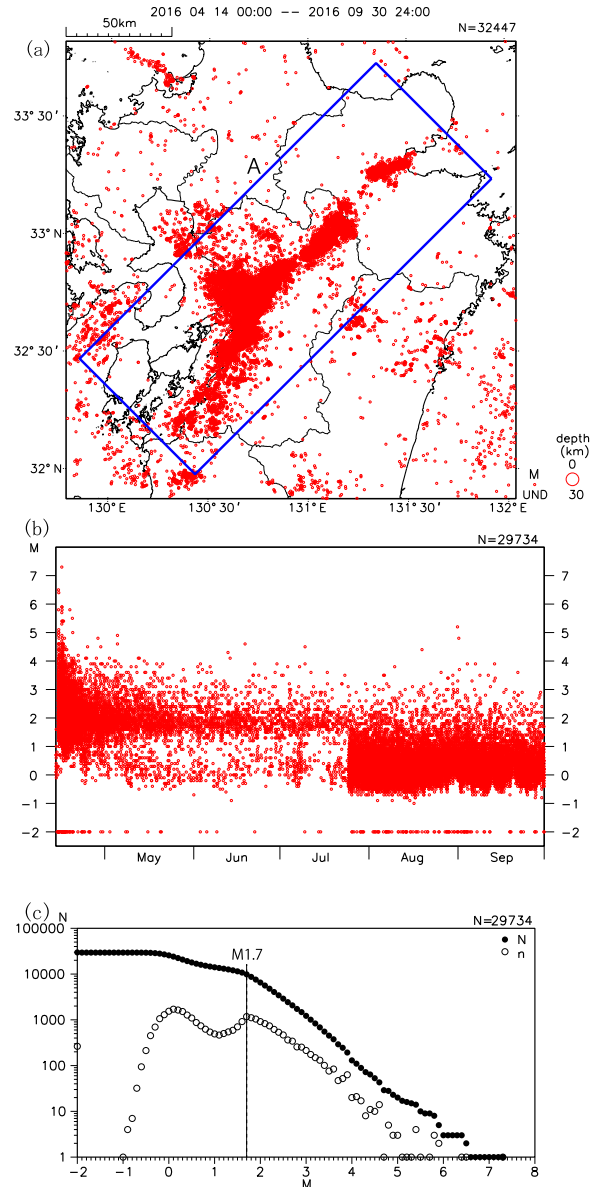
溜瀧功史・森脇健・上野寛・東田進也(2016): ベイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法, 験震時報, 79, 1-13.

1.5.2.2 自動処理結果の追加*

熊本地震の一連の地震活動は、非常に活発であり（例えば、第1.5.2.9図）、震源決定処理に時間がかかることが想定されたことから、手動検測による一元化震源の決定処理は優先順位を付けて行った。まずは震度1以上を観測した地震を最優先に処理し、続いて手動検測対象基準であるM1.7以上の地震について処理を行った。M1.7未満の地震については、PF法（溜渕ほか、2016）を導入して以降の2016年4月以降では、PF法の自動震源に対して、波形の目視確認を行い、適切な震源か、修正あるいは削除が必要な震源かを分類している。しかし、熊本地震の一連の地震活動では、既に震源決定処理済みの地震と同一地震と思われる地震を除いたPF法による自動震源は約63,000個と多数であったことから、溜渕（2017）の波形相関の方法を用いて効率的に処理し、簡易的な確認を行った上で、自動震源をそのまま一元化震源とした。

溜渕（2017）の方法を用いて確認した自動震源の対象は、通常の震源決定処理に戻った日（7月25日）以前である、2016年4月14日～7月24日に発生した地震である（第1.5.2.9図）。今回の自動震源の確認方法についてのフローチャートを第1.5.2.10図に示し、概要を以下に示す。

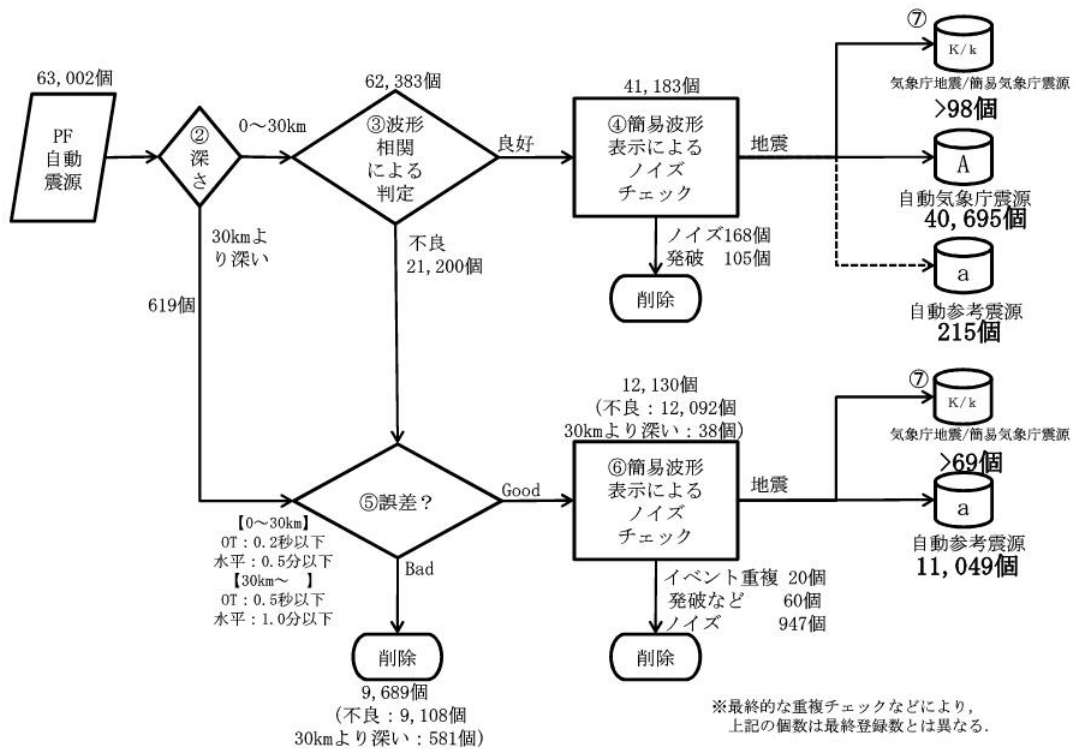
- ① PF法による自動震源のうち、震源決定処理済みの地震と同一地震と考えられる地震を除く。同一地震と判断する条件は震源時の差が2秒以内かつ緯度・経度の差が10分未満とした。
- ② 深さ30km以浅の地震と30kmより深い地震に分類する。
- ③ 深さ30km以浅の地震について、溜渕（2017）の波形相関による判定を行う。テンプレートには、手動検測を行った地震から選定した11,754個の地震の波形を用いた（第1.5.2.11図）。
- ④ 波形相関が良い地震（例：第1.5.2.12図）について、地震波形を表示し、手動によりノイズもしくは発破であるかを判断する。ここで



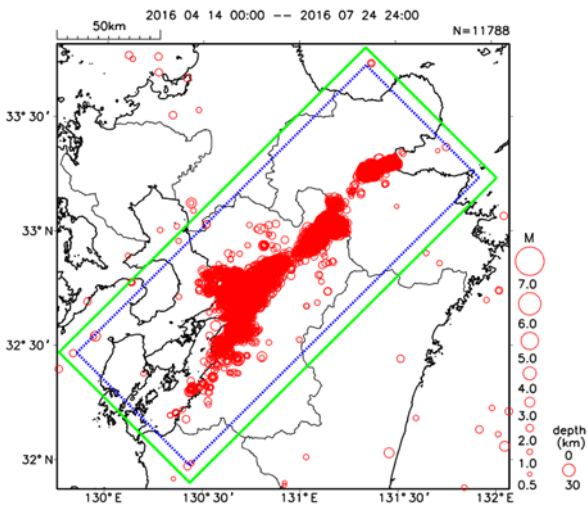
第1.5.2.9図 今回の処理前の熊本地震の地震活動（深さ30km以浅，M全て）

- (a) 震央分布（2016年4月14日～9月30日）
領域Aは報道発表等で使用されていた地震活動を見る際の領域（例えば、第1.5.2.3図の領域A）より広げている。
- (b) 領域A内のMT図
M未決定の地震はM-2.0として表示している。
- (c) 領域A内の規模別発生回数図
4月14日～7月24日までのM1.7未満のほとんどの地震を震源決定処理していないため、M1.7を境にGR則に従っていないことが分かる。M0.0付近で地震数が多いのは、通常の震源決定処理である7月25日～9月30日の地震活動を反映しているためである。

* 地震火山部地震予知情報課 上野 寛



第 1.5.2.10 図 今回の処理のフローチャート図



第 1.5.2.11 図 波形相関に用いたテンプレート地震の震央分布図（深さ 30km 以浅）

青点線領域は第 1.5.2.9 図の領域 A と同じ。緑枠はテンプレートとして抽出した地震の領域。青点線枠より広めに設定している。

ノイズもしくは発破と判断されなかった地震について、一元化震源とする。PF 法の震源誤差を基に、登録フラグを「A」（自動気象庁震源）もしくは「a」（自動参考震源）に分

類した。

- ⑤ 深さ 30km より深い地震もしくは③の判定において波形相関が悪い地震（例：第 1.5.2.13 図）について、即時的な解説資料等で使用する自動震源データの震源決定誤差基準（表 1.5.2.1）を基に、誤差が大きい地震については削除した。
- ⑥ ⑤において、震源誤差が小さい地震について、地震波形を表示し、手動によりノイズもしくは発破であるかを判断する。ここでノイズもしくは発破と判断されなかった地震については、一元化震源とするが、波形相関が悪かった地震のため、登録フラグは「a」とした。
- ⑦ ④もしくは⑥の手順を通過した地震で M1.7 以上の地震があった場合は手動検出作業を行う（登録フラグ「K」）。この手動検出作業の際に、地震前後に別の未処理地震が見られた場合は追加で簡易検出作業を行った（登録フラグ「k」）。

これらの一連の作業後、第 1.5.2.9 図の地震と再度比較し、重複した地震を取り除いた。また、

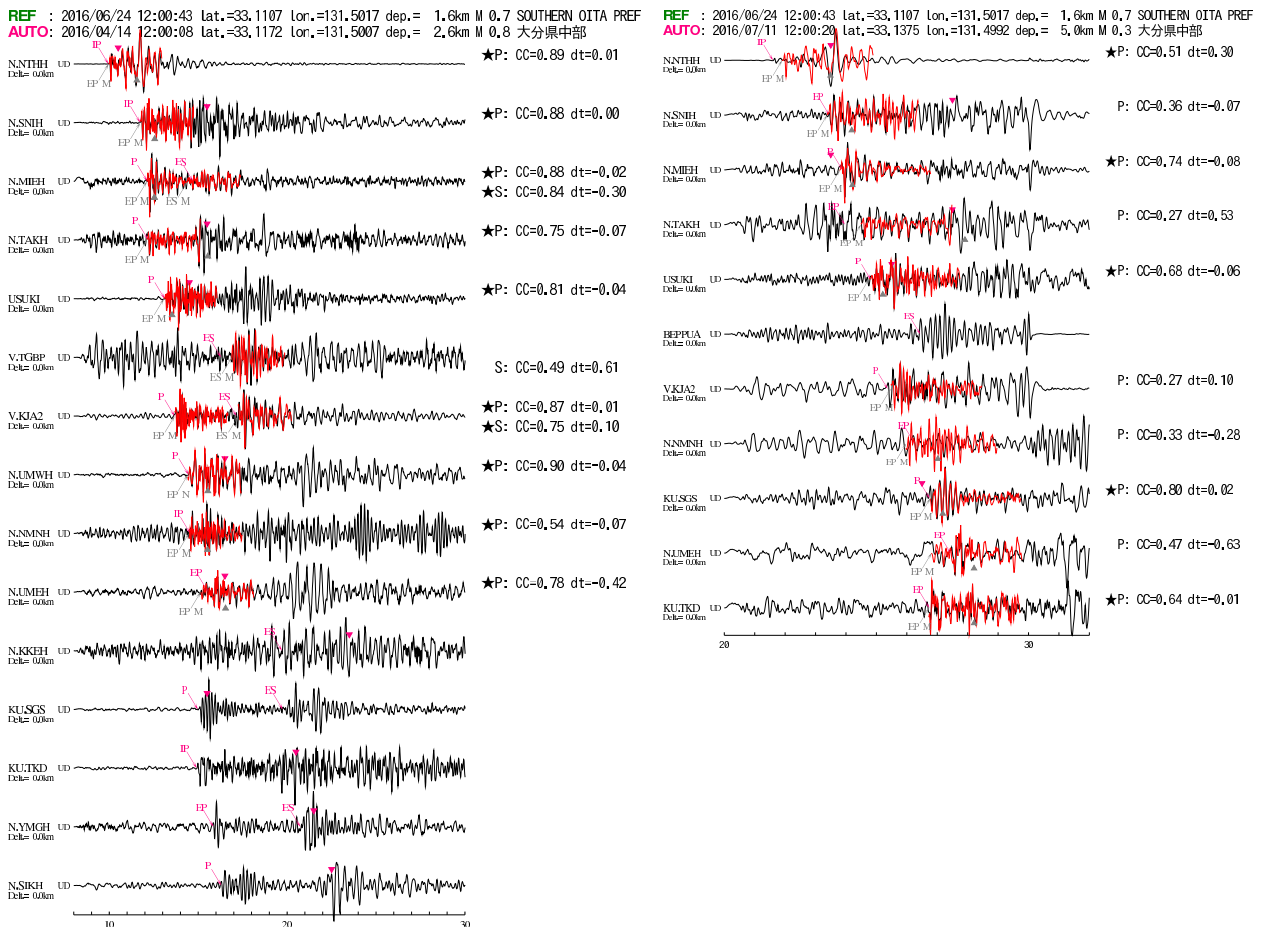
既知の発破領域と重なっていた地震を取り除いた。これらの処理を受けて、追加で一元化震源とした地震を第 1.5.2.14 図に示す。登録フラグごとの追加地震数は、下記の通りとなり、合計 52,042 個の地震を追加することとなった。

- 「K」(気象庁震源) 172 個
- 「k」(簡易気象庁震源) 15 個
- 「A」(自動気象庁震源) 40,595 個
- 「a」(自動参考震源) 11,260 個

この技術報告では、今回追加した震源も含めて、資料を作成している。

参 考 文 献

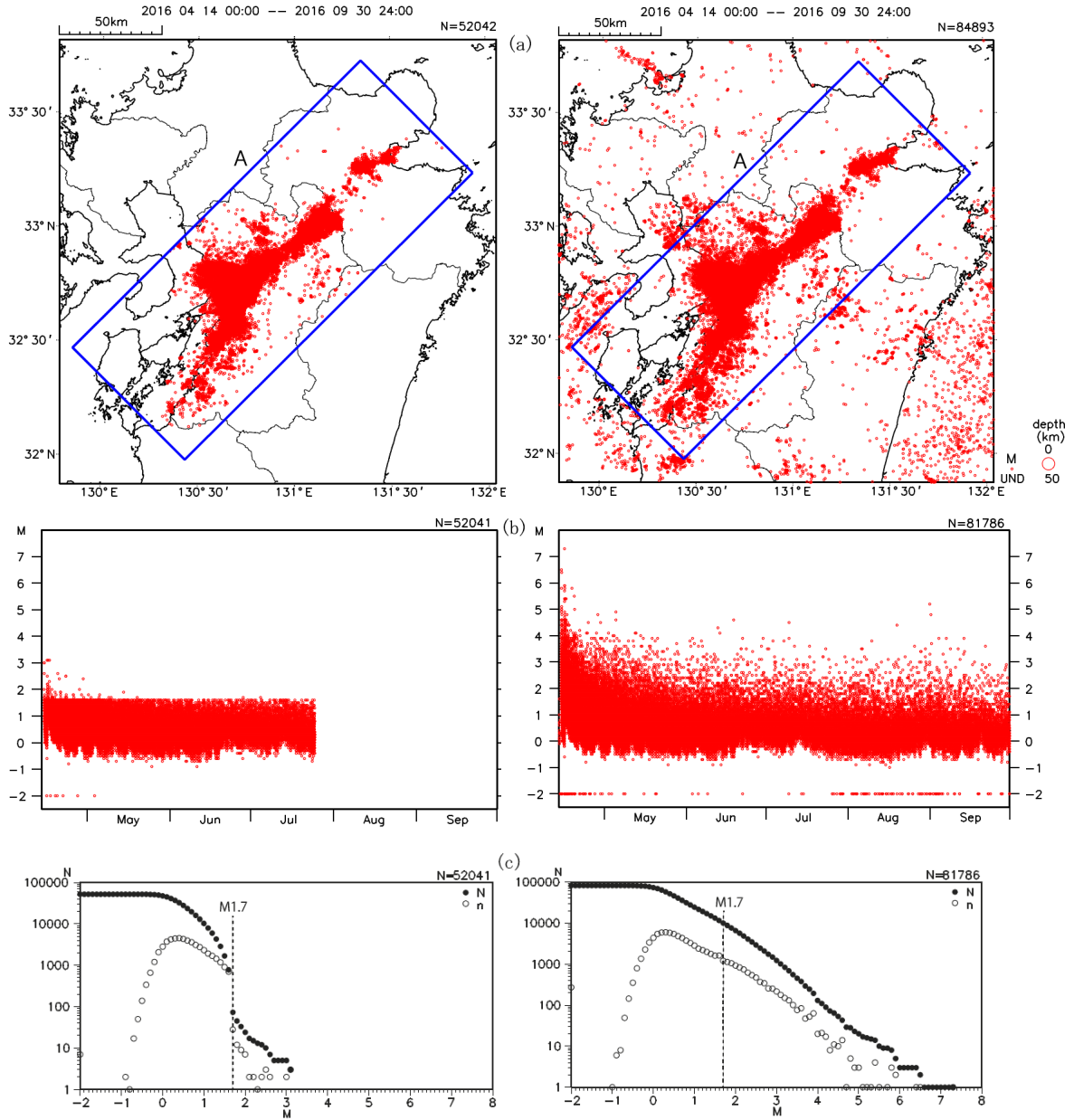
溜瀧功史・森脇健・上野寛・東田進也 (2016) : ベイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法. 験震時報, 79, 1-13.
 溜瀧功史 (2017) : 波形相関による自動震源分類の効率化. 験震時報, 81:6



第 1.5.2.12 図 (左) 波形相関が良いと判断された地震波形例

第 1.5.2.13 図 (右) 波形相関が悪いと判断された地震波形例

黒波形は解析対象地震、赤波形はテンプレート波形。「REF」はテンプレートとなった地震の震源要素、「AUTO」は解析対象となった自動震源の震源要素を示す。各々の波形は 2-8Hz のバンドパスフィルターをかけている。灰色の検測位置はテンプレート波形の検測位置を、赤色の検測位置は PF 法の検測位置を示す。CC は相関係数を、dt は波形ずれ時間を表す。相互相関の計算パラメータ及び相関係数のしきい値については、溜瀧 (2017) と同じである。



第 1.5.2.14 図 今回の処理を受けて追加する地震(左)と追加後の一元化震源(右)(深さ 50km 以浅, M 全て)
 (a) 震央分布(2016 年 4 月 14 日~9 月 30 日), (b) 領域 A 内の MT 図, (c) 領域 A 内の規模別発生回数図
 第 1.5.2.9 図と右図を比較すると, GR 則に従った分布になっていることが分かる.

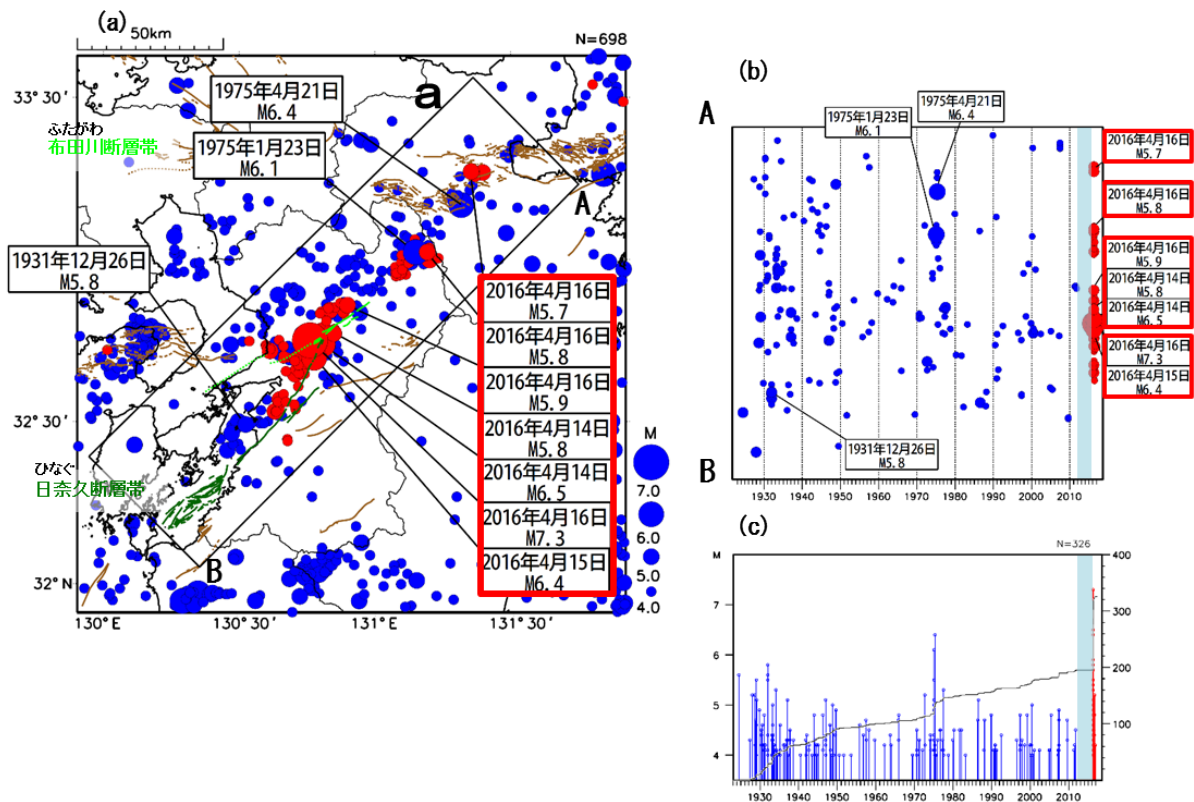
1.5.3 過去の地震活動

1.5.3.1 地震活動の推移と熊本地震発生前の活動状況*

大分県から天草諸島にかけての地震活動をみると、概ね活断層（布田川断層帯・日奈久断層帯）に沿う方向（北東-南西方向）に地震が分布しているのが分かる(第 1.5.3.1 図(a)). 領域 a 内では、1923 年以降、M5 程度の地震が時々発生しており、熊本地震が発生するまで 1975 年 4 月 21 日に大分県西部で発生した M6.4 の地震が最大規模の地震であった。過去の活動をみると、1930 年前後には、日奈久断層帯の日奈久区間付近で M5.8 の地震が発生するなど領域 a 内全体で活動がみられた(第 1.5.3.1 図 (b)). 1975 年にも、熊本県阿蘇地

方で M6.1、大分県西部で M6.4 の上述の地震が発生するなどまとまった活動がみられている。その後、領域 a 内では定常的な地震活動がみられていたが、2011 年 10 月 5 日の M4.5 の地震（最大震度 5 弱）の発生から今回の熊本地震が発生する前まで M4 を超える地震は発生していなかった(第 1.5.3.1 図 (c)).

第 1.5.3.2 図は、1997 年 10 月から 2016 年 4 月 13 日（熊本地震の発生前）までの間に発生した地震（ $M \geq 2.0$ 、深さ 30km 以浅）とその地震活動の推移を示した図である。熊本地震発生前に地震活動に変化があったのかなかったのかを捉えるために、領域 a（第 1.5.3.1 図の領域 a と同じ領域）内の地震について、デクラスタ処理を行い、



第 1.5.3.1 図 過去の周辺の地震活動状況（赤枠は今回の熊本地震）

(a) 震央分布図 (1923/1/1 ~ 2017/4/30, 深さ 100km 以浅, $M \geq 4.0$)

2016 年 4 月 13 日以前の地震を青色, 2016 年 4 月 14 日以降の地震を赤色で表示

(b) 領域 a 内の時空間分布図 (A-B 投影) 薄水色は熊本地震発生前の静穏化期間

(c) 領域 a 内の M-T 図及び回数積算図

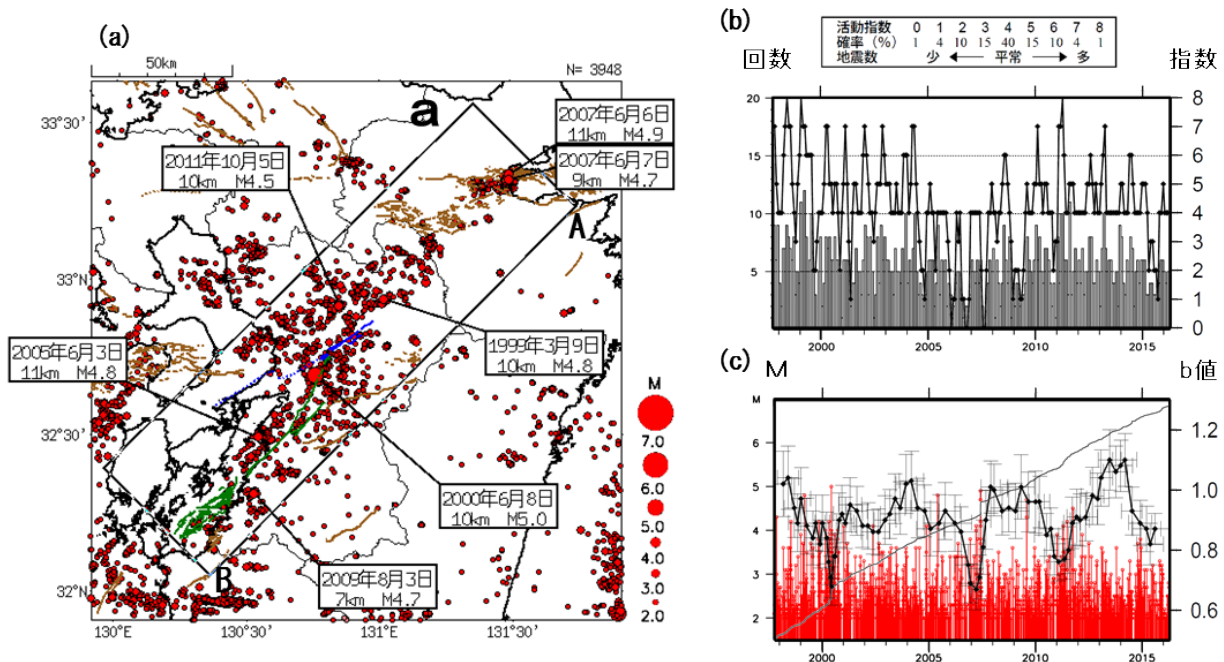
* 地震火山部地震予知情報課 森田 裕貴

地震活動指数^{*}の時間推移をみてみた。その結果、熊本地震発生前に活発化または静穏化を示す傾向はなく、地震活動に特段の変化がなかったことが分かる(第1.5.3.2図(b))。また、同じ条件でM4.0以上の地震についてもデクラスタ処理を行ったが、ポアソン分布に従わなかったため、大きめな地震を対象とした熊本地震発生前の変化は評価できなかった。同様に、領域a内の全地震について、b値の時間推移についてみると、地震活動の状況によって変化しているが、概ね0.9前後で推移しており、地震活動指数と同様に、熊本地震発生前にb値にも特段変化はなかったこと

が分かる。つまり、熊本地震発生までにM4を超える大きめな地震が発生していない期間(静穏化期間)があったが、1997年10月以降に発生したM2.0以上の地震を対象に統計的な解析を行うと地震活動には特段の変化がなかったといえる。ただし、いずれも対象となる領域が広域のため、ローカルな変化は捉えきれていない可能性があることに留意する必要がある。

参 考 文 献

塚越利光・石垣祐三(2003):東海地域の地震活動レベルの評価。月刊地球号外, 41, 101-109.



第1.5.3.2図 熊本地震発生前までの周辺の地震活動状況と推移
 (a) 震央分布図 (1997/10/1 ~ 2016/4/13, 深さ30km以浅, $M \geq 2.0$)
 (b) 領域a内のデクラスタ後の地震の回数ヒストグラムと地震活動指数の推移
 (c) 領域a内のM-T図及び回数積算図とb値の時間変化

^{*} 地震活動指数は、活発・静穏の度合いを客観的に数値(0~8)で示したもので、デクラスタ(ここでは地震発生から7日以内かつ震央距離3km以内に発生した地震をクラスタとみなし、そのうちの最大の地震を残す)処理を行った後の期間別の地震回数の頻度分布がポアソン分布に従うという性質を用いて、地震活動を統計的に評価する方法である(塚越・石垣, 2003)。ここでの指数化の標準期間は1997年10月1日~2016年4月13日であり、90日間の時間窓を30日ずつずらして指数を表示している。

1.5.3.2 過去の被害地震*

九州地方の中部には、東の別府湾付近から西の島原半島付近にかけて、ほぼ東西に火山（九重山、阿蘇山、雲仙岳など）や活断層が分布しており、別府－島原地溝帯と呼ばれる大きな地形的な構造を形成している。今回の一連の地震活動の領域は、この地溝帯に位置し、日奈久断層帯、布田川断層帯、万年山－崩平山断層帯、日出生断層帯、中央構造線断層帯（豊予海峡－由布院区間）が存在する。これらの断層帯の周辺では、過去にも大きな被害を伴った地震が発生している。第1.5.3.1表に1500年以降の主な被害地震を、第1.5.3.3図に主な被害地震を含めたM6.0以上の地震の震央分布図を示す。

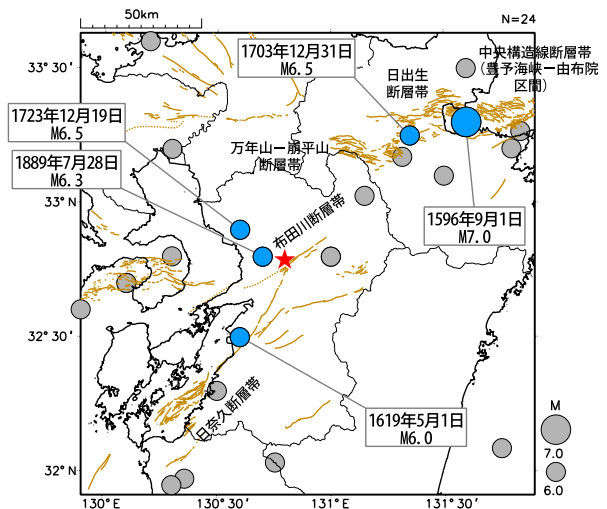
1596年の別府湾の地震は、慶長豊後の地震と呼ばれ、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2005）は、その被害の記録などから別府－万年山断層帯の別府湾－日出生断層帯東部（注1）の最新活動であったと推定している。この地震の発生する約2か月前にも地震があり、約1か月前には1日に複数回の揺れを感じる地震が発生していた。別府湾の地震により、いくつかの場所で山崩れが発生したほか、別府湾沿岸で津波によ

る大きな被害が生じた（宇佐美ほか、2013）。なお、この地震の発生から4日後に近畿地方で慶長伏見地震（M7 1/2 ± 1/4）が発生した。1619年の肥後・八代の地震は、日奈久断層帯の活動であったと推定されている（千田、1979；松浦ほか、2008）。1703年の豊後の地震では、大分領や油布院筋で死者や家屋全壊の被害が生じた（宇佐美ほか、2013）。松浦ほか（2008）は、この地震が別府－万年山断層帯の一部の活動であったと指摘している。1723年の肥後・豊後・筑後の地震では、肥後で死者や家屋倒壊などの被害が生じた。この地震は、布田川断層帯の宇土区間や雲仙断層群にも近い場所で発生した（地震調査委員会、2013）。1889年の熊本の地震では、熊本市付近を中心に死者19人などの被害が生じ、また、地割れや山崩れなども発生した（宇佐美ほか、2013）。この地震は、布田川断層帯の宇土区間付近で発生したと考えられている（地震調査委員会、2013）。後

第1.5.3.1表 今回の地震活動域の周辺で1500年以降に発生した主な被害地震

年月日	発生地域	M	主な被害**
1596年 9月1日	豊後 (別府湾)	7.0	死者多数。山崩れあり。別府湾沿岸で強い揺れ及び津波による被害大。
1619年 5月1日	肥後・八代	6.0	麦島城はじめ公私の家屋が破壊。
1703年 12月31日	豊後	6.5	死者1人、家屋全壊853棟など。
1723年 12月19日	肥後・豊後・筑後	6.5	死者2人、家屋倒壊980棟など。
1889年 7月28日	熊本	6.3	死者19人、家屋全壊234棟など。

** 宇佐美ほか（2013）による



第1.5.3.3図 今回の地震活動の周辺で発生した主な被害地震の震央分布図

1500年から今回の一連の地震活動の前までに発生したM6.0以上の震央を示す。第1.5.3.1表に掲載した地震を青色の丸で示し、吹き出しをつけている。今回の一連の地震活動のうち2016年4月16日（M7.3）の地震の震央を赤色の星で示す。茶色の実線は、地震調査委員会の長期評価による活断層を表す。

* 地震火山部地震予知情報課 清水 淳平

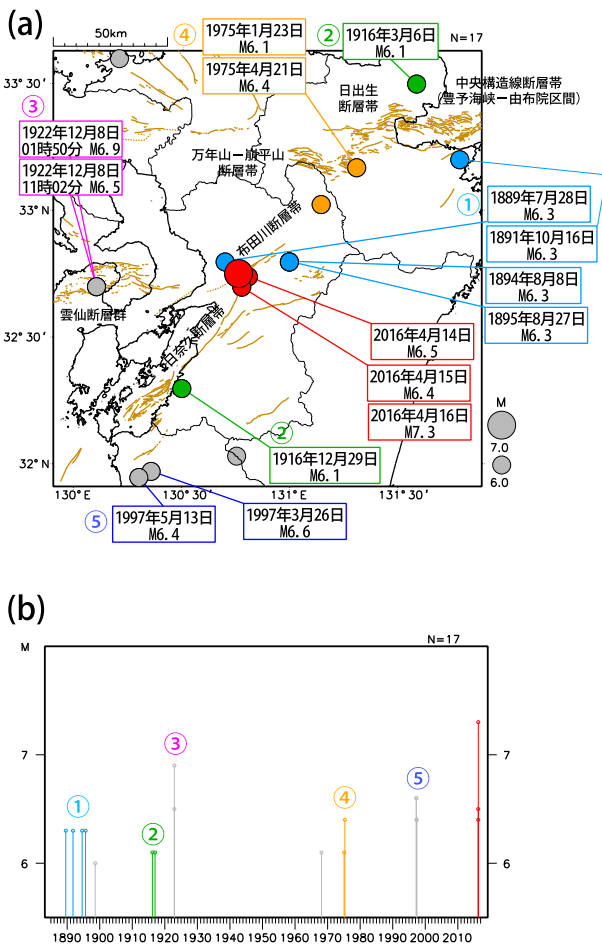
注1：2017年12月の中央構造線断層帯の長期評価の改訂により、現在は、中央構造線断層帯の豊予海峡－由布院区間に該当する（地震調査委員会、2017）。

述のように、この地震の発生後、M6.0を超える地震が数年間隔で続いて発生した。

今回の一連の地震活動では、4月14日、15日、16日にそれぞれM6.5、M6.4、M7.3の地震が短い間隔で発生した(第1.1節)。九州地方では、このように近接した地域で地震が続発した事例が過去にもあり、これらの事例の震央分布図とM-T図を第1.5.3.4図に示す。1885年から今回の一連の地震活動までの期間に、九州地方の陸域で発生したM6.0以上の地震のうち、5年程度以内の間隔で発生した地震を抽出し、吹き出しをつけている。①1889年の熊本地震では、その後の

6年間でM6.0以上の地震が4回発生し、今回の一連の地震活動のように、熊本県だけではなく大分県でも地震が発生した。②1916年3月6日に大分県中部でM6.1の地震が発生した。この地震の発生から約10か月後の12月29日に熊本県南部でM6.1の地震が発生した。大分県中部の地震の震央と熊本県南部の地震のそれは、日出生断層帯及び中央構造線断層帯(豊予海峡-由布院区間)付近と日奈久断層帯付近にそれぞれ位置しており、約170km離れている。これら2つの地震の直接的な関係は不明であるが、短い期間のうちに発生した事例として、ここで紹介する。③1922年の島原(千々石湾)の地震では、01時50分と11時02分にM6.9とM6.5の地震が続いて発生した。これらの地震により、主に島原半島南部、天草、熊本市方面で死者26人(うち、2回目の地震による死者3人)、負傷者39人、住家全壊195棟などの被害が生じた(地震調査委員会, 2013)。これらの地震の震央は、雲仙断層群付近に位置する。④1975年の事例では、熊本県阿蘇地方のM6.1の地震の88日後に北東へ約20km離れた大分県西部でM6.4の地震が発生した(第1.5.3.5図)。

熊本県阿蘇地方の地震では、負傷者10人、住家全壊16棟などの被害が生じた(地震調査委員会, 2013)。⑤1997年の鹿児島県薩摩地方の地震では、3月26日のM6.6の地震が発生し、その48日後(5月13日)に、西南西約6kmでM6.4の地震が発生した(第1.5.3.6図)。M6.6の地震では負傷者31人、住家全壊4棟などの被害が、M6.4の地震では負傷者43人、住家全壊4棟などの被害が発生した(地震調査委員会, 2013)。明田川(2008)によると、3月の地震の活動では、大森・宇津公式(宇津, 1957; Utsu, 1961)のp値は0.81であった。これは、彼らが日本付近で発生した地震について調査した結果の中でも小さい値の部類に入る。



第1.5.3.4図 九州地方において近接した地域で地震が続発した事例の(a)震央分布図及び(b)M-T図。

1885年から今回の一連の地震活動までの期間に発生したM6.0以上の地震の震央を示す。そのうち、5年程度以内の間隔で発生した陸域の地震に吹き出しをつけている。茶色の実線は、地震調査委員会の長期評価による活断層を表す。

参 考 文 献

明田川保 (2008) : 日本付近で発生した陸域 M6.0 以上と海域 M7.0 以上の地震の余震活動について. 験震時報, 71, 19-33.

千田 昇 (1979) : 日奈久断層帯の第四紀後期における断層運動. 東北地理, 31, 172-179.

地震調査委員会 (2005) : 別府-万年山断層帯の長期評価. 73pp.

地震調査委員会 (2013) : 九州地域の活断層の長期評価 (第一版). 81pp.

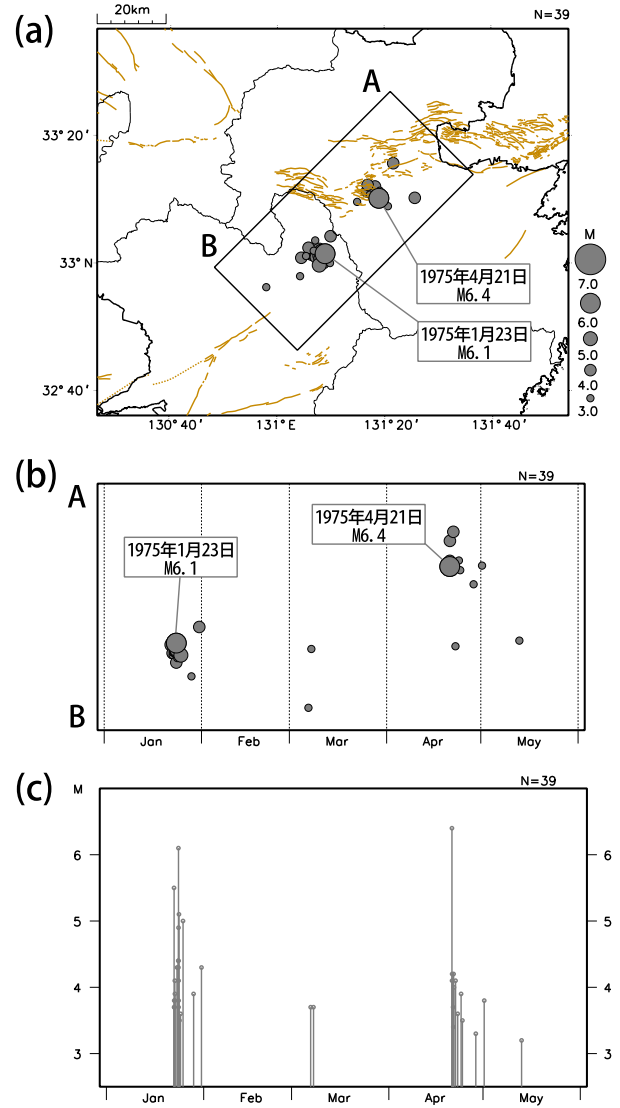
地震調査委員会 (2017) : 中央構造線断層帯 (金剛山地東縁-由布院) の長期評価 (第二版). 162pp.

松浦律子・中村操・唐鎌郁夫 (2008) : 江戸時代の歴史地震の震源域・規模の再検討作業- 1718年伊那の地震など8地震について-. 歴史地震, 23, 143.

宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子 (2013) : 日本被害地震総覧 599-2012. 東京大学出版会, 694pp.

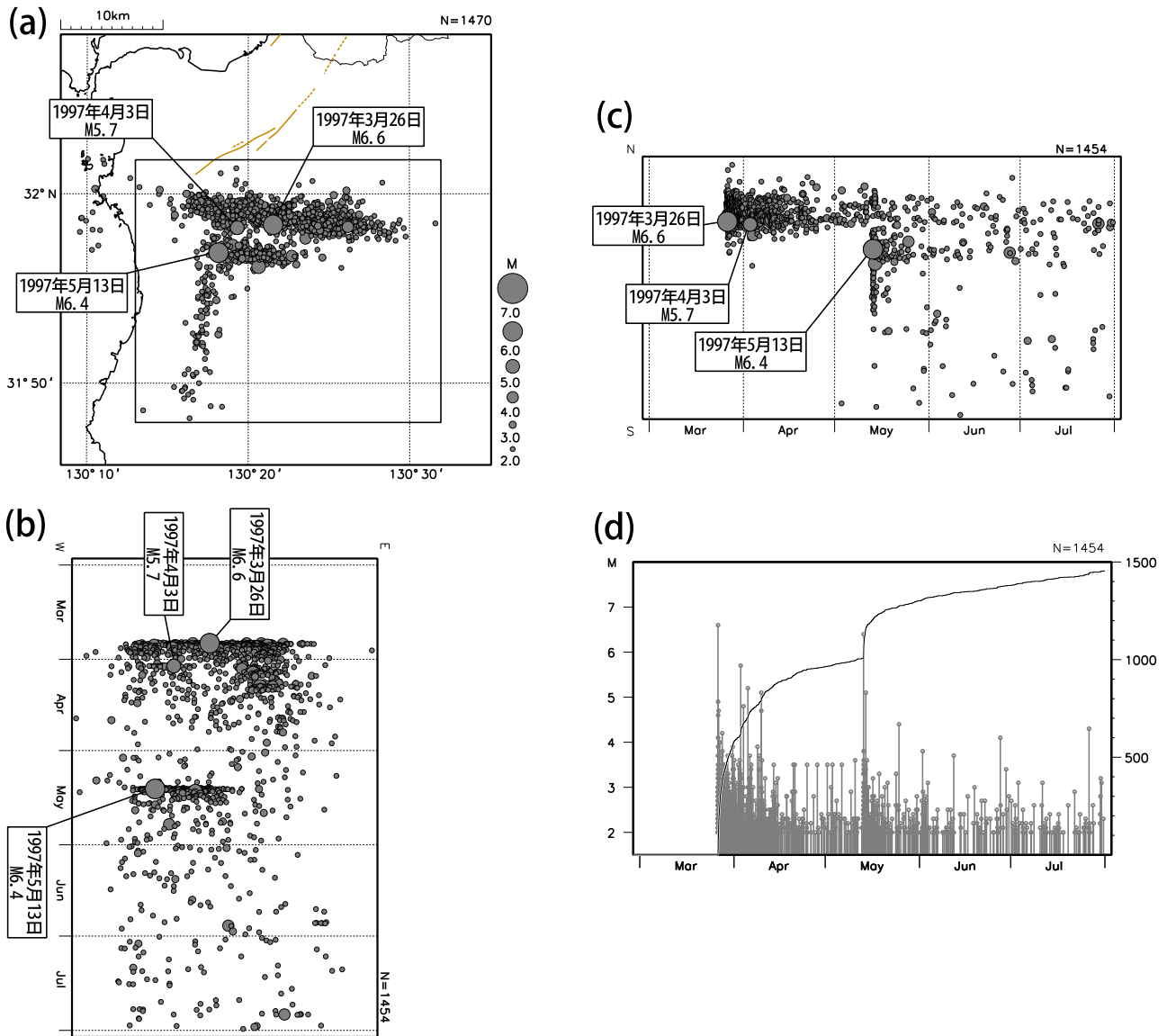
宇津徳治 (1957) : 地震のマグニチュードと余震の起こりかた. 地震2, 10, 35-45.

Utsu, T. (1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks. Geophys. Mag., 30, 521-605.



第 1.5.3.5 図 1975 年の熊本県阿蘇地方の地震 (M6.1) に続いて大分県西部の地震 (M6.4) が発生した事例の (a) 震央分布図, (b) 時空間分布図及び (c) M-T 図.

1975 年 1 月 1 日から 5 月 31 日までに発生した深さ 30km 以浅, M3.0 以上の地震を示す. (b) の時空間分布は, (a) の震央分布図に示す線分 A-B に投影している. 茶色の実線は, 地震調査委員会の長期評価による活断層を表す.



第 1.5.3.6 図 1997 年の鹿児島県薩摩地方の地震活動の (a) 震央分布図, (b) 東西投影した時空間分布図, (c) 南北投影した時空間分布図, 及び (d) M-T 図・回数積算図.

1997 年 3 月 1 日から 7 月 31 日までに発生した深さ 20km 以浅, M2.0 以上の地震を示す. (b)-(d) の図は, (a) の震央分布図に示す矩形領域内の地震をプロットしている. 茶色の実線は, 地震調査委員会の長期評価による活断層を表す.