

第 2 1 1 回

# 地震予知連絡会資料

2016 年 5 月 18 日



京都大学防災研究所

## 第 2 1 1 回地震予知連絡会提出資料

### 目 次

#### I. 三重県南東沖の地震（2016 年 4 月 1 日）（3c）

三重県南東沖の地震（2016 年 4 月 1 日）による主ひずみ . . . 1

#### II. 近畿地方北部の地殻活動（4）

1. 丹波山地における微小地震活動の静穏化 . . . 3

2. 地殻変動連続観測のトレンド変化 . . . 4

#### III. 地殻活動総合観測線の観測結果（4）

最近 1 年の観測結果 . . . 6

#### IV. 平成 28 年（2016 年）熊本地震（V）

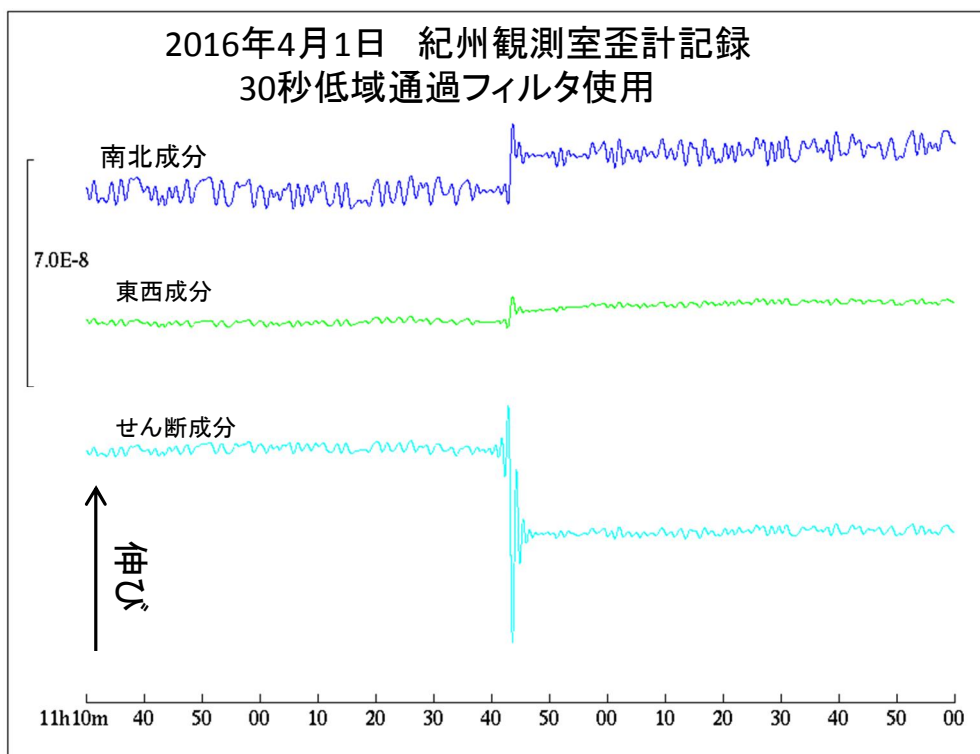
1. 平成 28 年熊本地震による大分県中部の地震等の誘発 . . . 1 1

2. 西南日本のひずみ速度分布とブロック断層モデルについて . . . 1 4

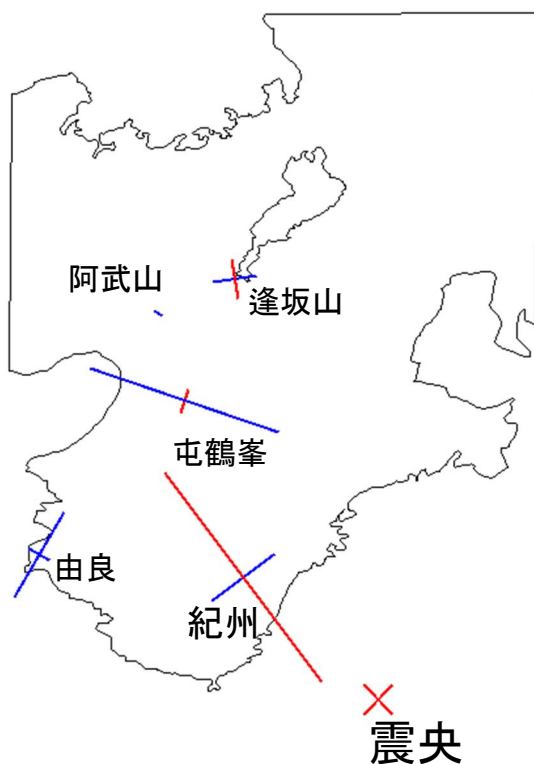
3. 「平成 28 年（2016 年）熊本地震」の地震活動のうち本震と最大前震の震源破壊過程 . . . 1 9

## 三重県南東沖の地震(2016年4月1日)による主ひずみ

京都大学防災研究所 地震予知研究センター



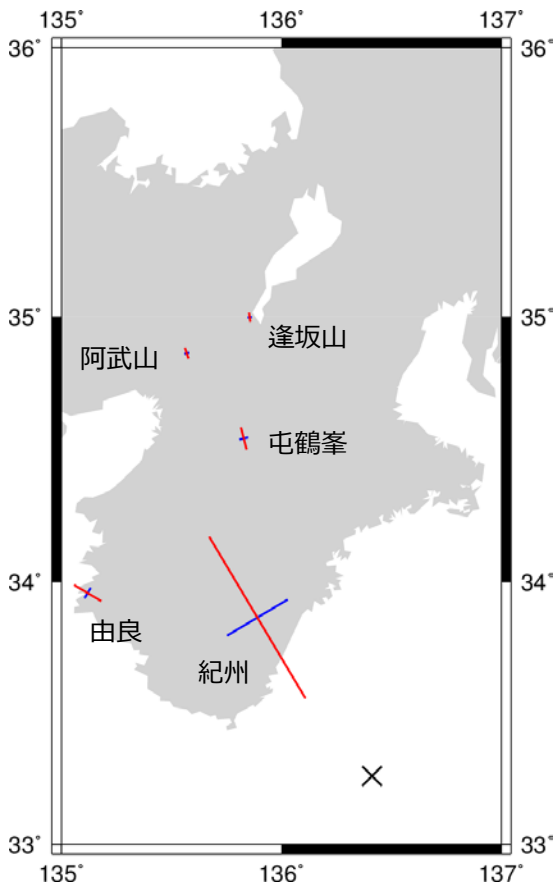
第1図 紀州観測室で記録された歪ステップ



観測点	主歪1(方位角)	主歪2(方位角)
紀州	2.1E-8 (143)	-6.3E-9 (53)
由良	-7.8E-9 (30)	-1.9E-9 (120)
屯鶴峯	-1.6E-8 (109)	2.0E-9 (19)
逢坂山	-3.5E-9 (81)	3.2E-9 (171)
阿武山	-7.9E-10 (120)	-2.6E-10 (30)

観測点	震央距離(km)	震央方位角
紀州	70	137°
由良	134	117°
屯鶴峯	143	151°
逢坂山	184	164°
阿武山	181	155°

第2図 各観測点で記録された歪ステップの値と方位



観測点	主ひずみ1(方位角)	主ひずみ2(方位角)
紀州	1.70E-08 (149)	-6.23E-09 (59)
由良	2.73E-09 (121)	-9.56E-10 (31)
屯鶴峯	1.94E-09 (166)	-6.90E-10 (76)
逢坂山	7.34E-10 (172)	-2.66E-10 (82)
阿武山	9.13E-10 (161)	-3.11E-10 (71)

第3図. 各観測点で予想される主ひずみ. 気象庁のCMT解\*をもとに断層面を仮定し, Okada (1992) の式を用いて計算した. 赤は伸び, 青は縮みで棒の長さでひずみの大きさをしめす.

\* <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/top.html>

## 近畿北部の地殻活動 ～丹波山地における微小地震活動静穏化～

京都大学防災研究所地震予知研究センター

大阪府北部から京都府中部、琵琶湖西岸にかけての「丹波山地」は微小地震活動が定期的に活発な地域である。微小地震発生数は2003年1月末ごろ突然それ以前の約7割に低下し、その静穏状態は長期にわたり継続していた。1946年南海地震や1995年兵庫県南部地震前にこの地域の地震活動が低下したことが知られており、近年の静穏化の推移が注目されていたが、2009年以降活動はやや活発化を示し、静穏化以前とほぼ同等のレートに回復していた。

ところが、2011年1月末ごろから発生数が減少し、2003年以来最低のレートを記録した。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（M9.0）時にはとくに活動に変化は見られなかったが、2011年2月以降低いレート（図1の矩形範囲内で約1400events/year）を維持していた。その後、2013年後半から2009～2010年のレート（約1700events/year）に近づいたのち、2015年には再び低下するなどわずかなレートの増減を繰り返している。この間、丹波山地で発生した中規模地震の余震活動による影響も考慮した上で、地震活動の推移を注意深く継続的に見ていく必要がある。

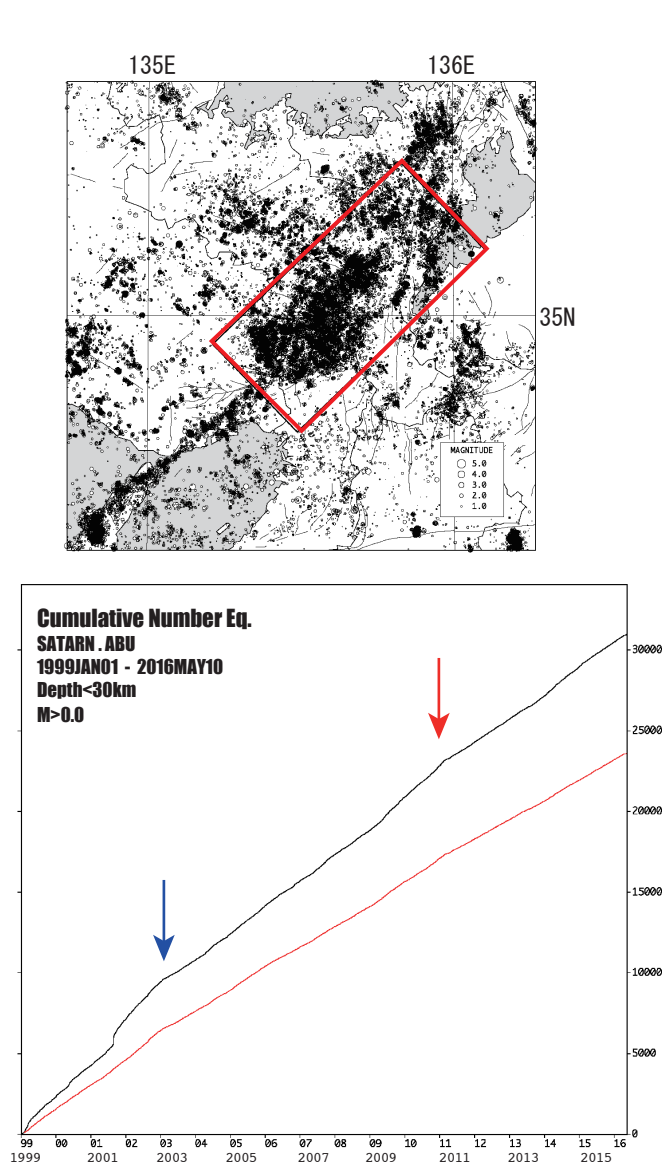


図1：上に示す近畿地方北部の矩形範囲内における積算地震発生数。1999年1月～2016年5月10日。京都大学防災研究所地震予知研究センターによる。

青矢印は丹波山地の静穏化が始まった2003年初頭の時期を示す。赤矢印は東北地方太平洋沖地震前に再度静穏化した時期を示す。

赤線は decluster したカタログによる積算発生数。

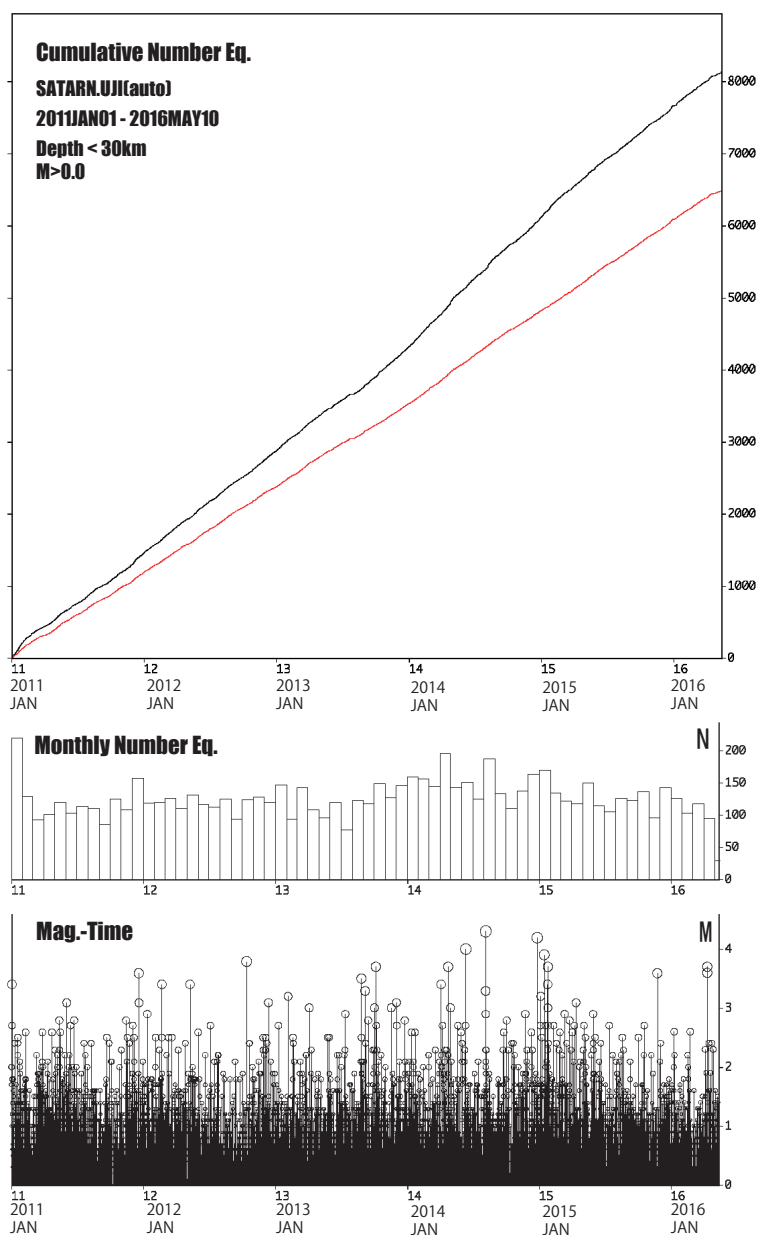


図2：(上) 図1上に示す近畿地方北部の矩形範囲内における積算地震発生数。京都大学防災研究所地震予知研究センターによる。赤線は decluster したカタログによるもの。

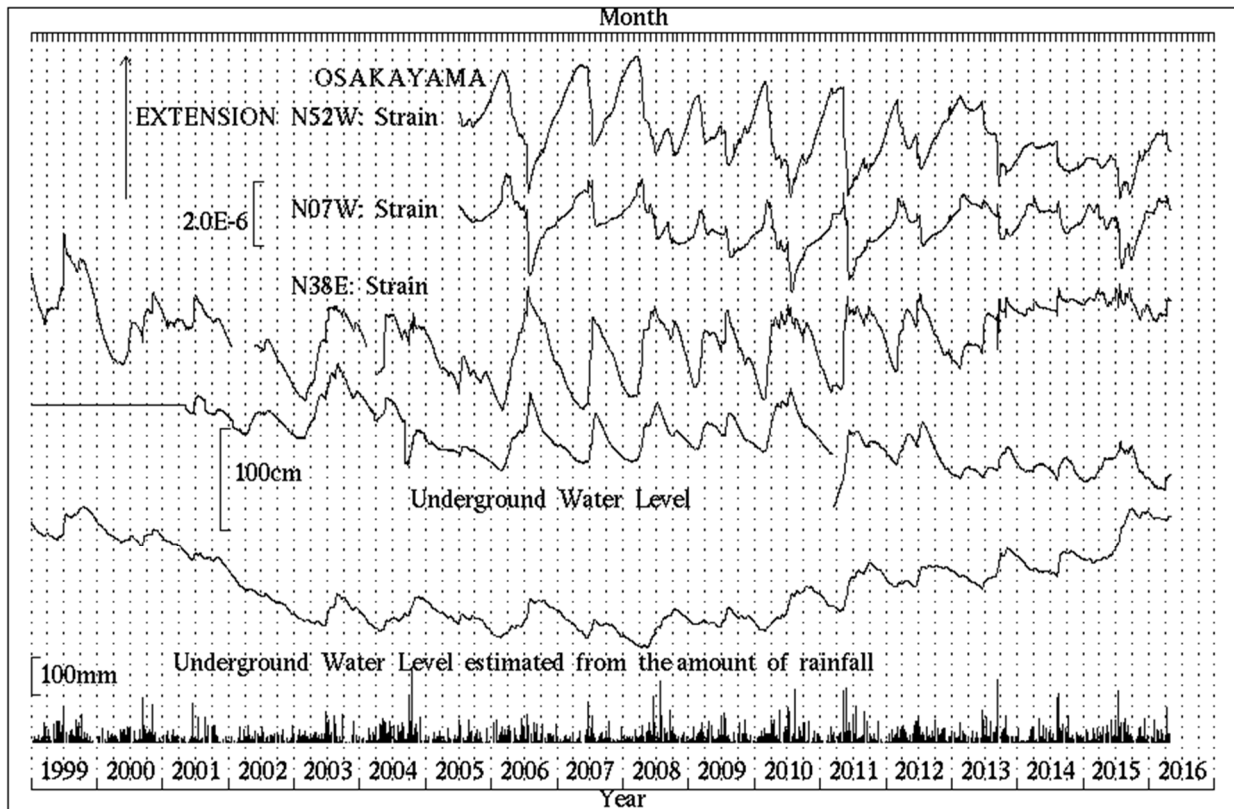
2011年1月1日～2016年5月15日、30km以浅。

(中) 同範囲内での月別地震発生数。

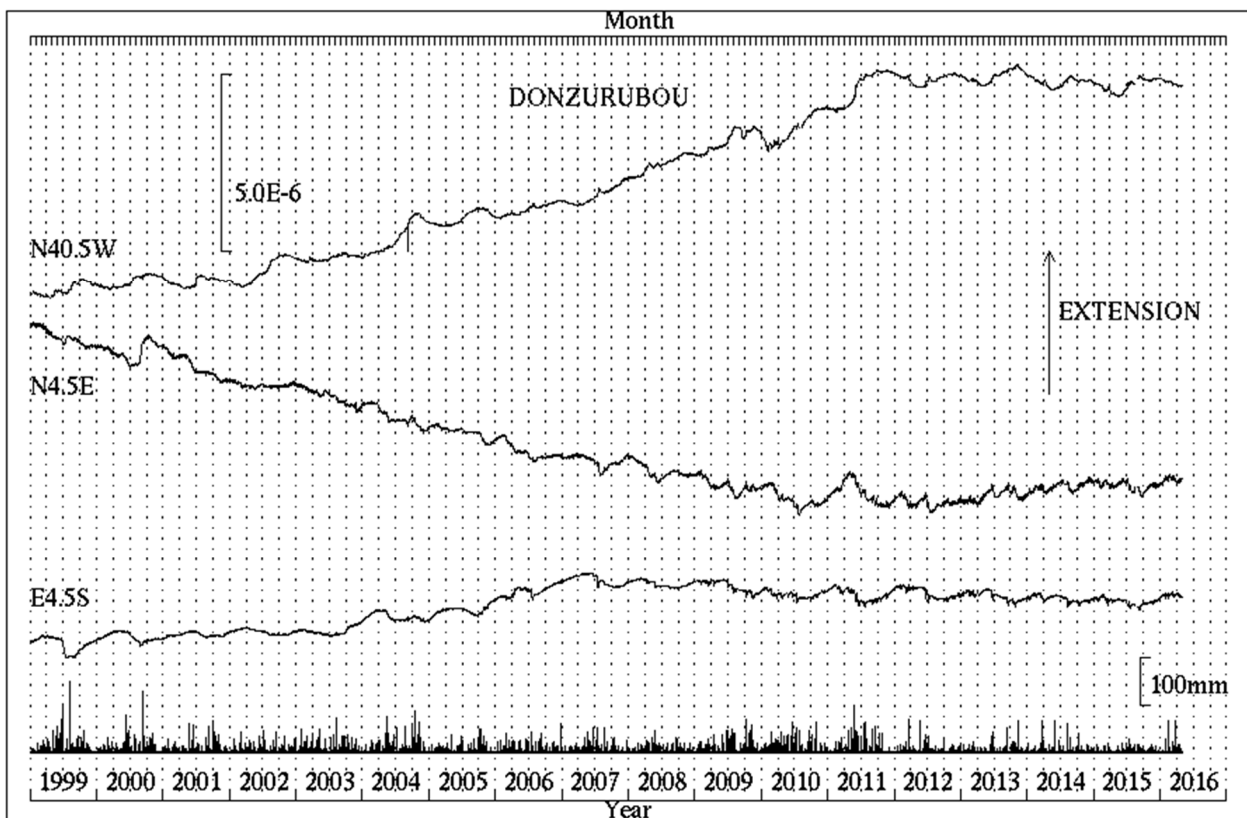
(下) 同じく気象庁一元化震源に基づくMT図。

# 近畿北部の地殻活動 ～地殻変動連続観測のトレンド変化～

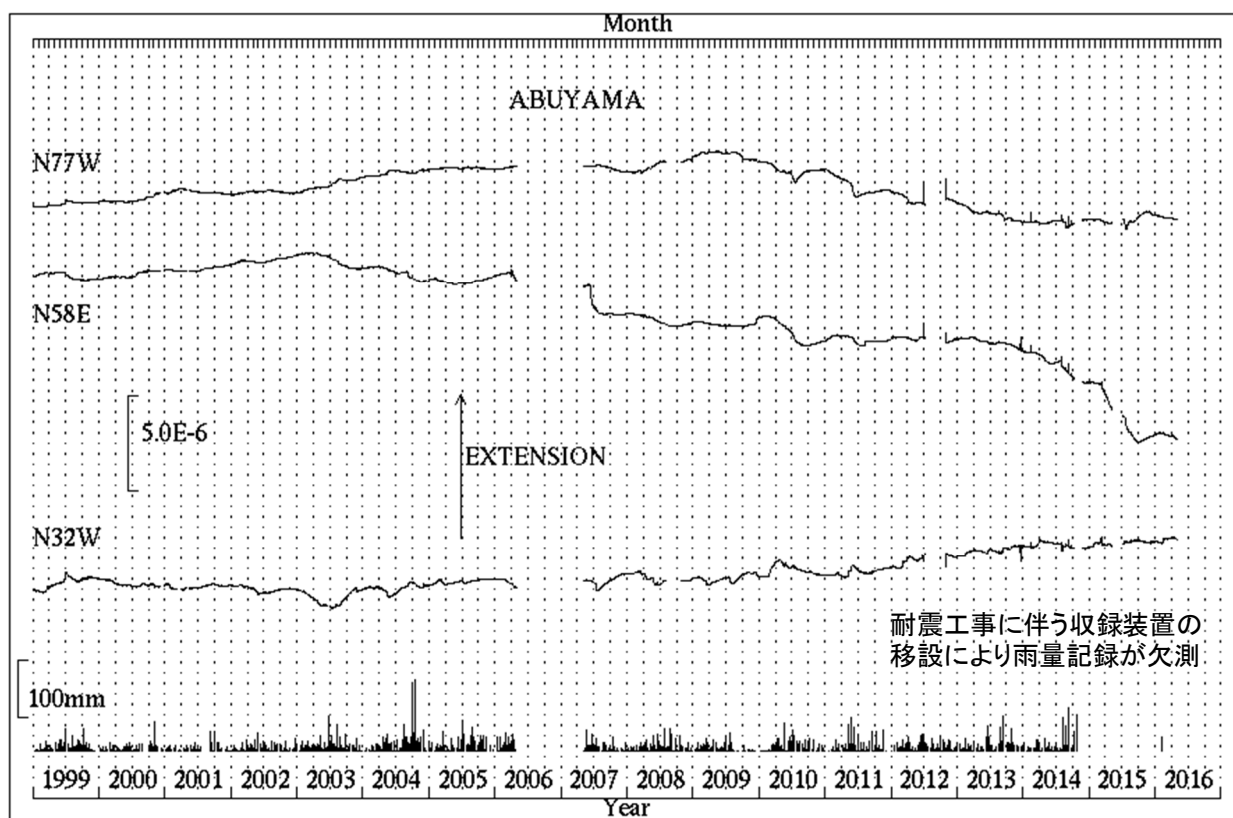
京都大学防災研究所附属地震予知研究センター



第1図 逢坂山観測所における歪変化、地下水位と日雨量(1999年1月～2016年4月)



第2図 屯鶴峯観測所における歪変化と日雨量 (1999年1月～2016年4月)

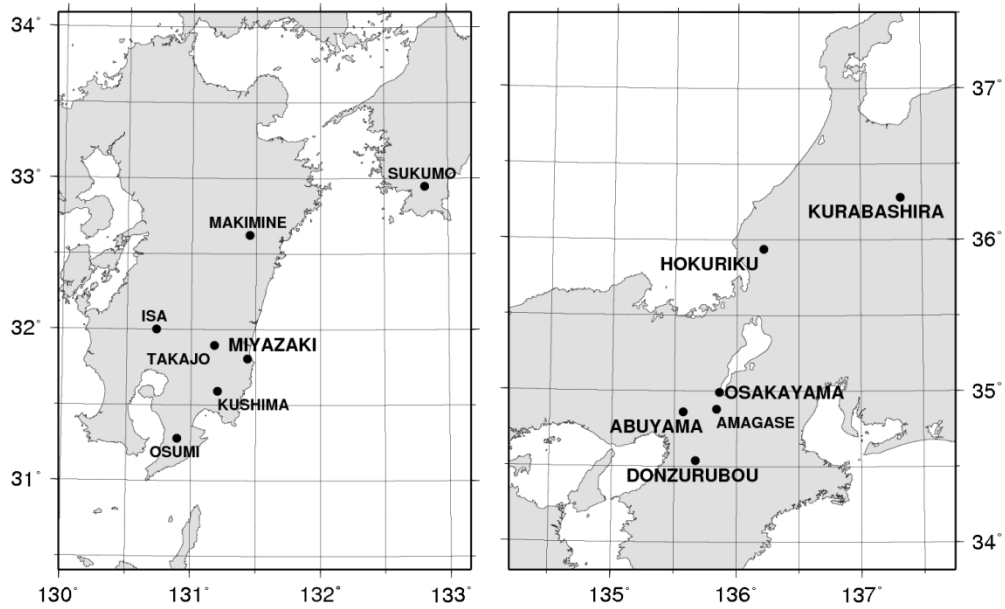


第3図 阿武山観測所における歪変化と日雨量（1999年1月～2016年4月）

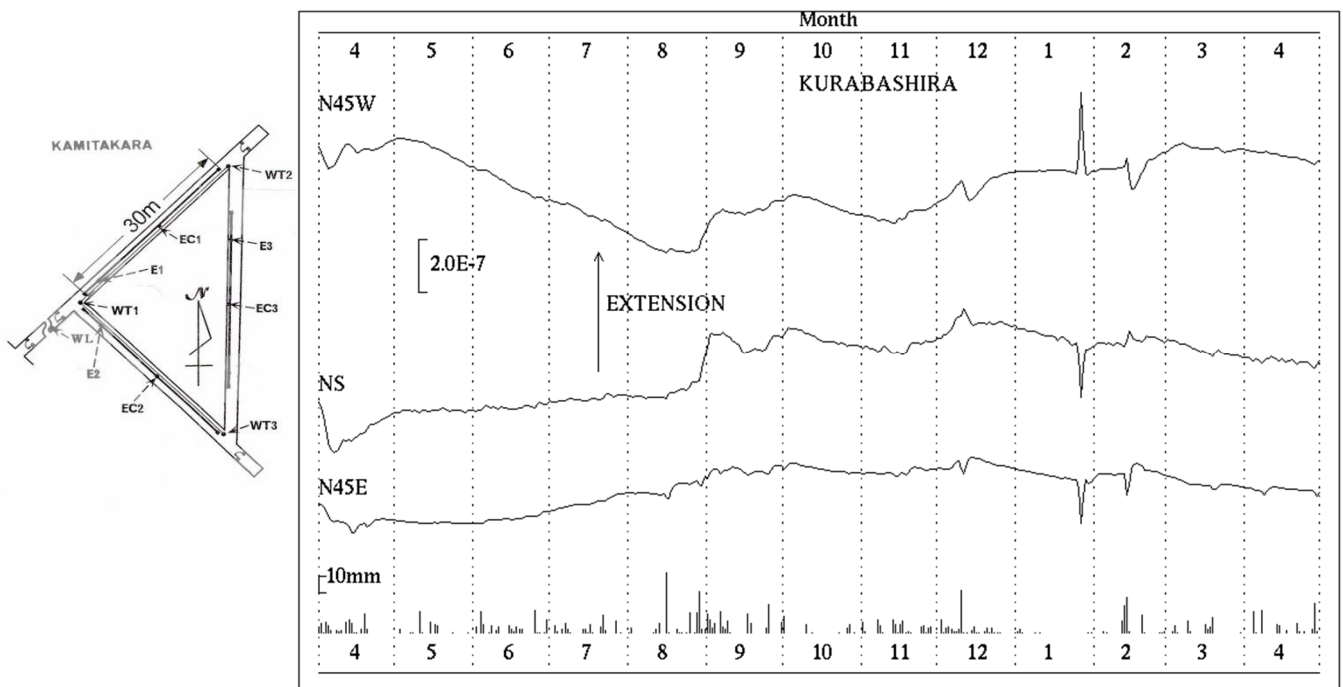
近畿地方横坑連続観測点3点の1999年1月～2016年4月の伸縮計記録を示す。  
 微小地震活動の静穏化と同時に歪速度が変化したため、その推移に注意している。  
 歪速度の変化は、2003年以降、2007年、2010年、2013年にも生じていると観られる。

# 地殻活動総合観測線最近1年の観測結果

京都大学防災研究所地震予知研究センター

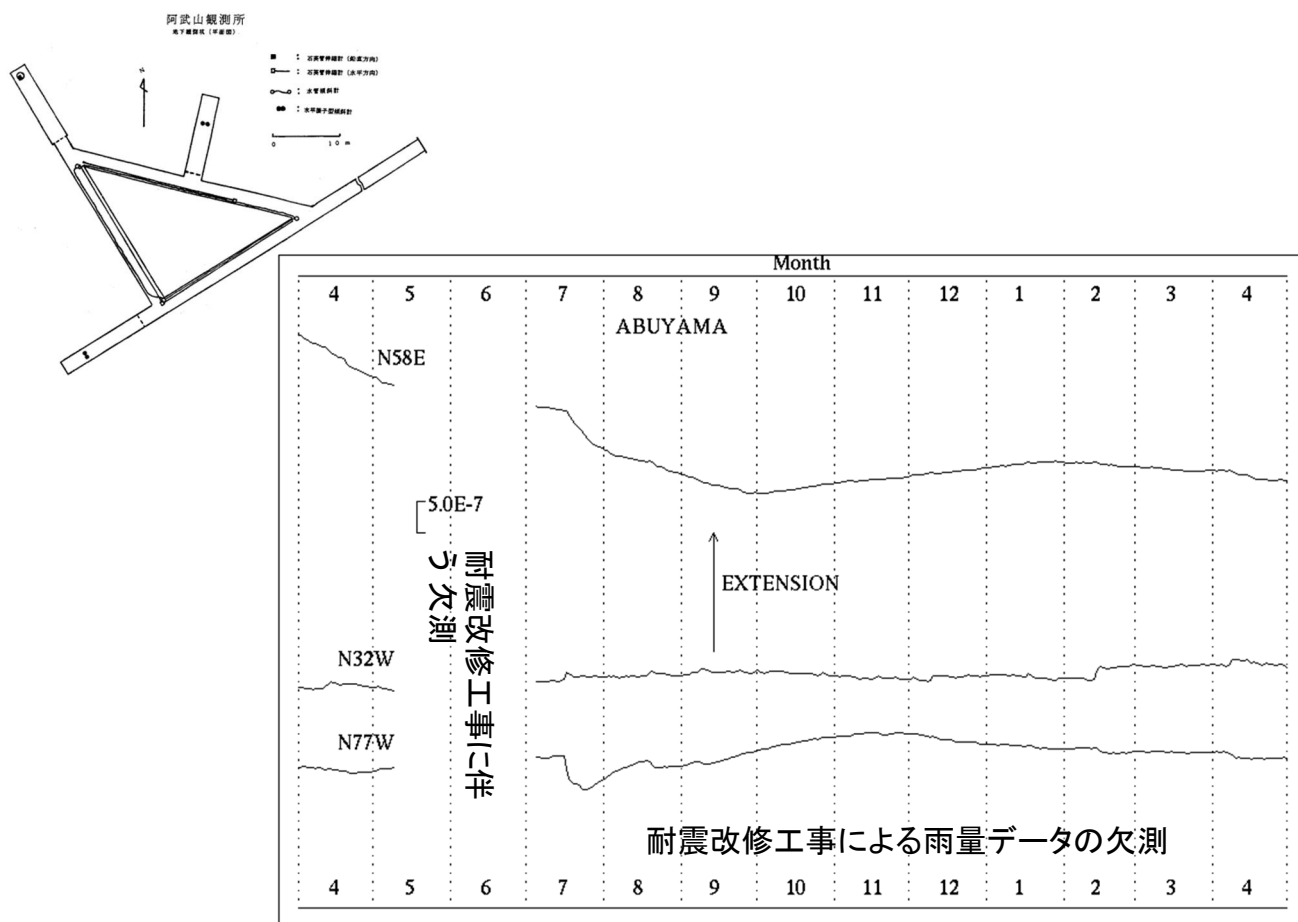


第1図 観測点位置図

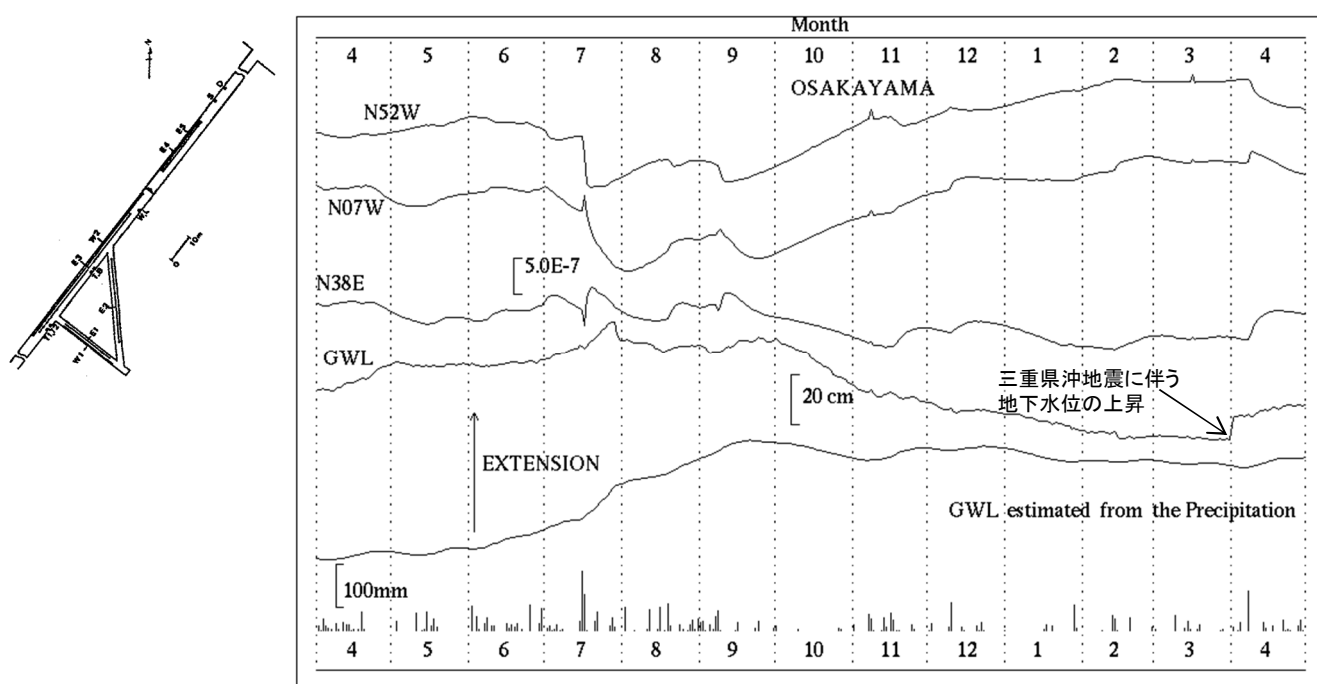


第2図 上宝観測所蔵柱観測室における歪変化と日雨量(2015年4月～2016年4月)

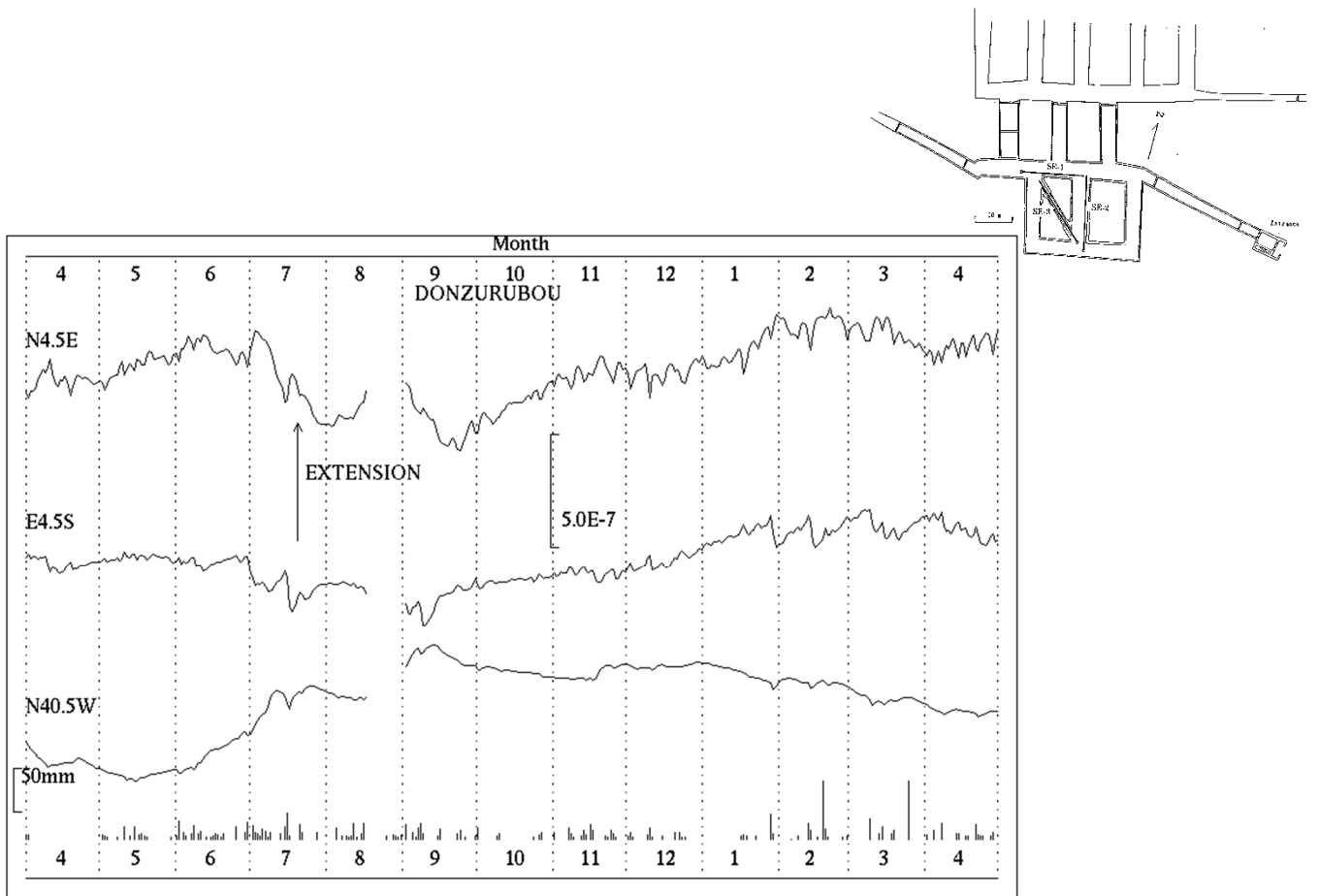




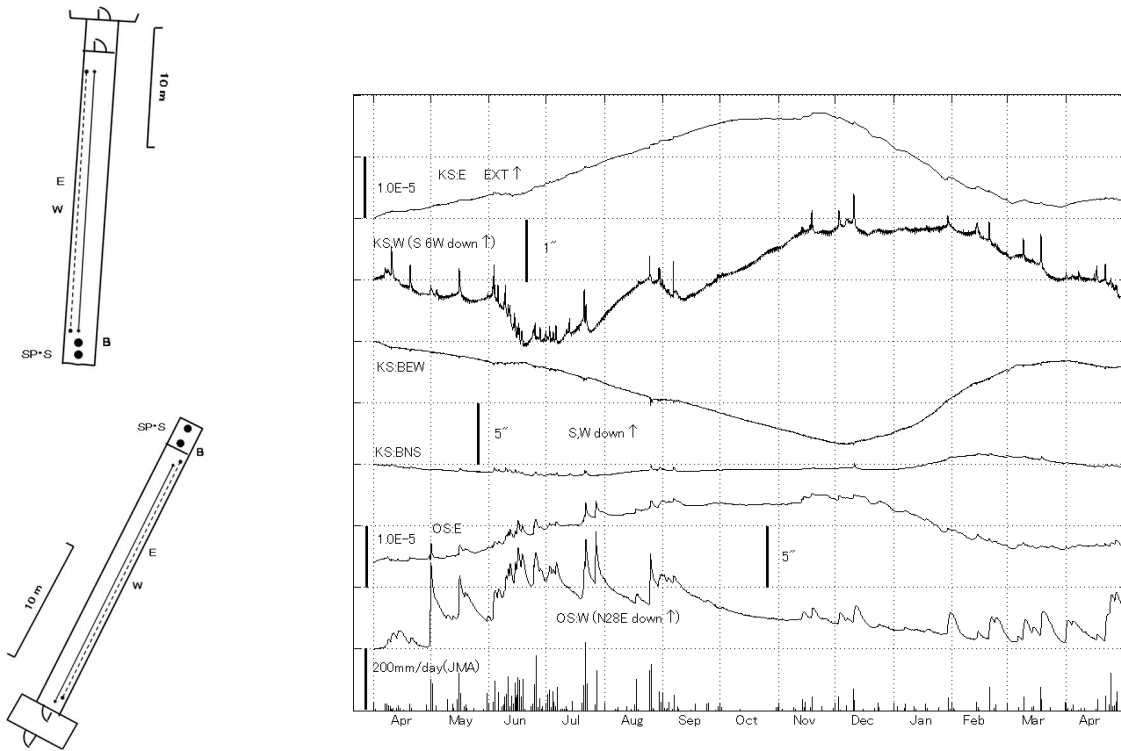
第3図 阿武山観測室における歪変化と日雨量(2015年4月～2016年4月)



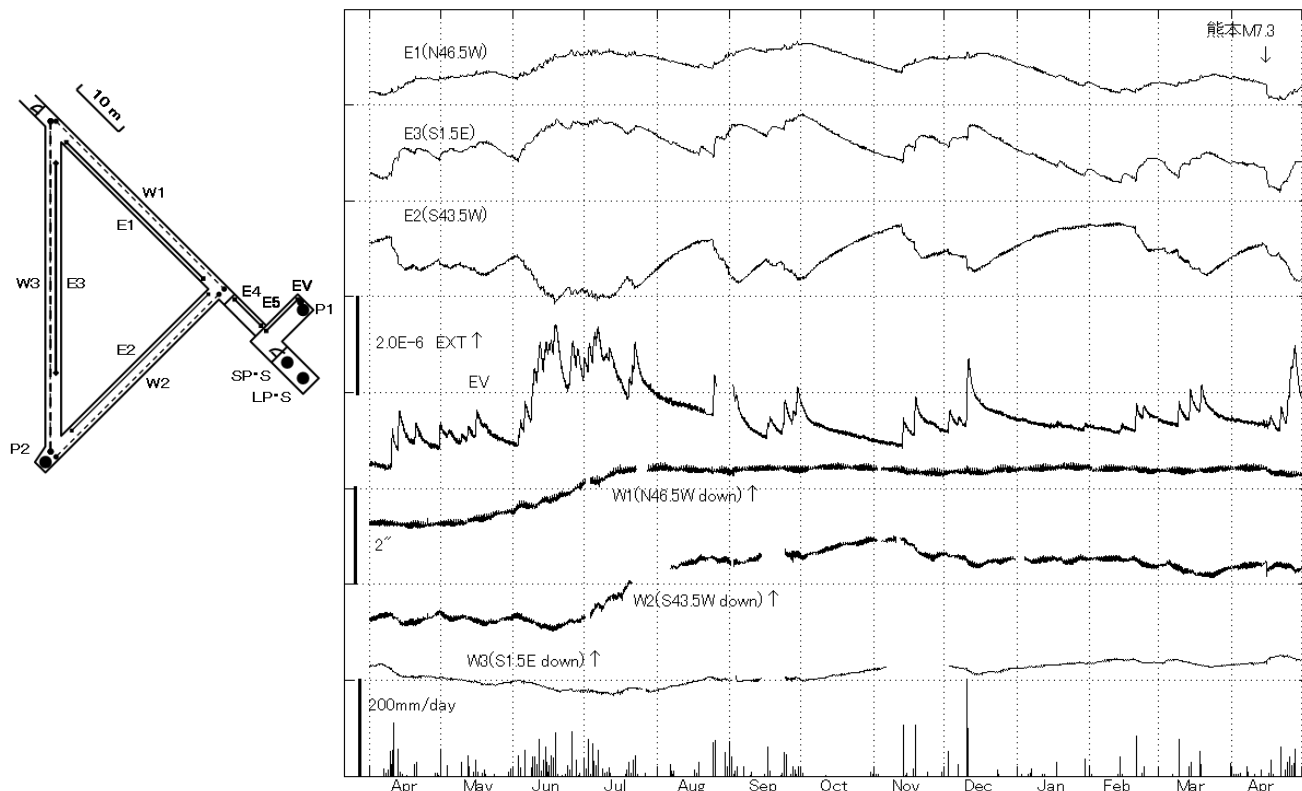
第4図 逢坂山観測室における歪変化と日雨量(2015年4月～2016年4月)



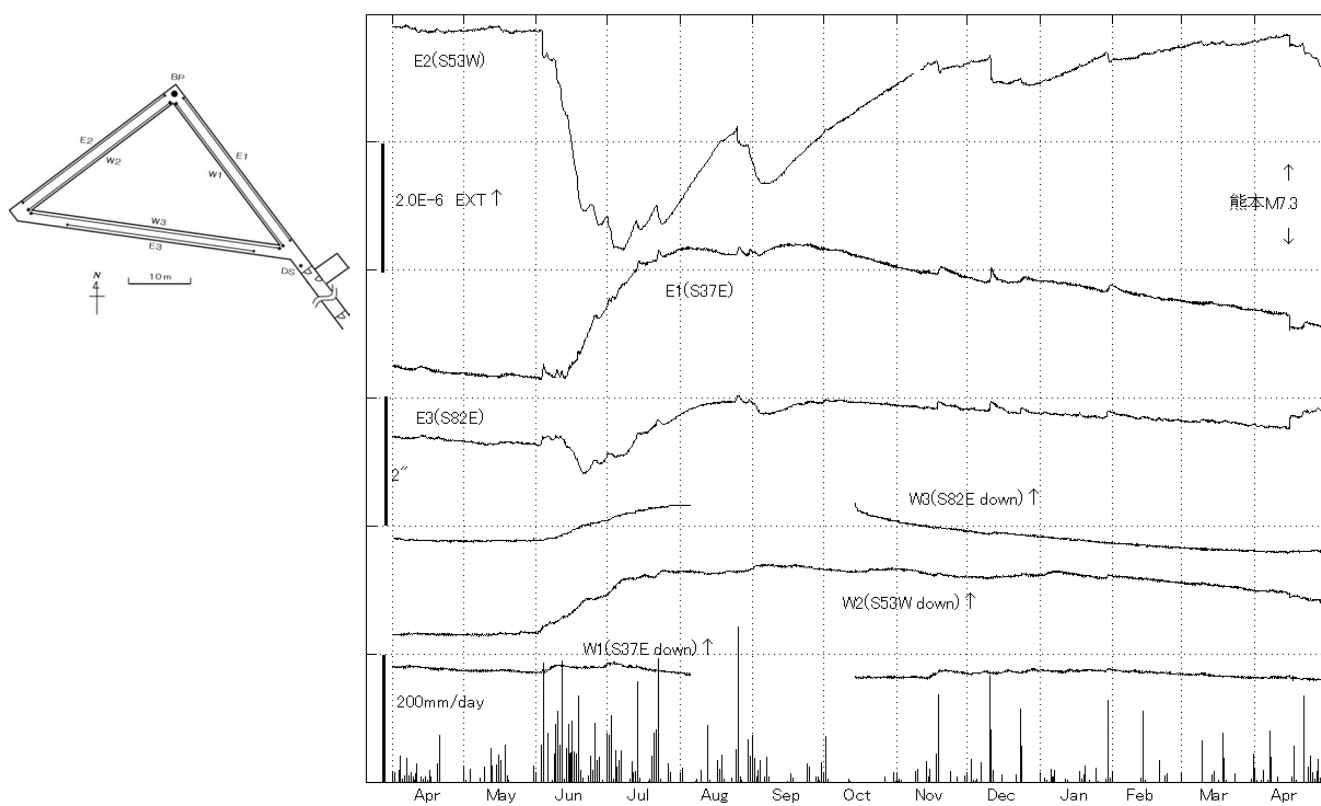
第5図 屯鶴峯観測所における歪変化と日雨量(2015年4月~2016年4月)



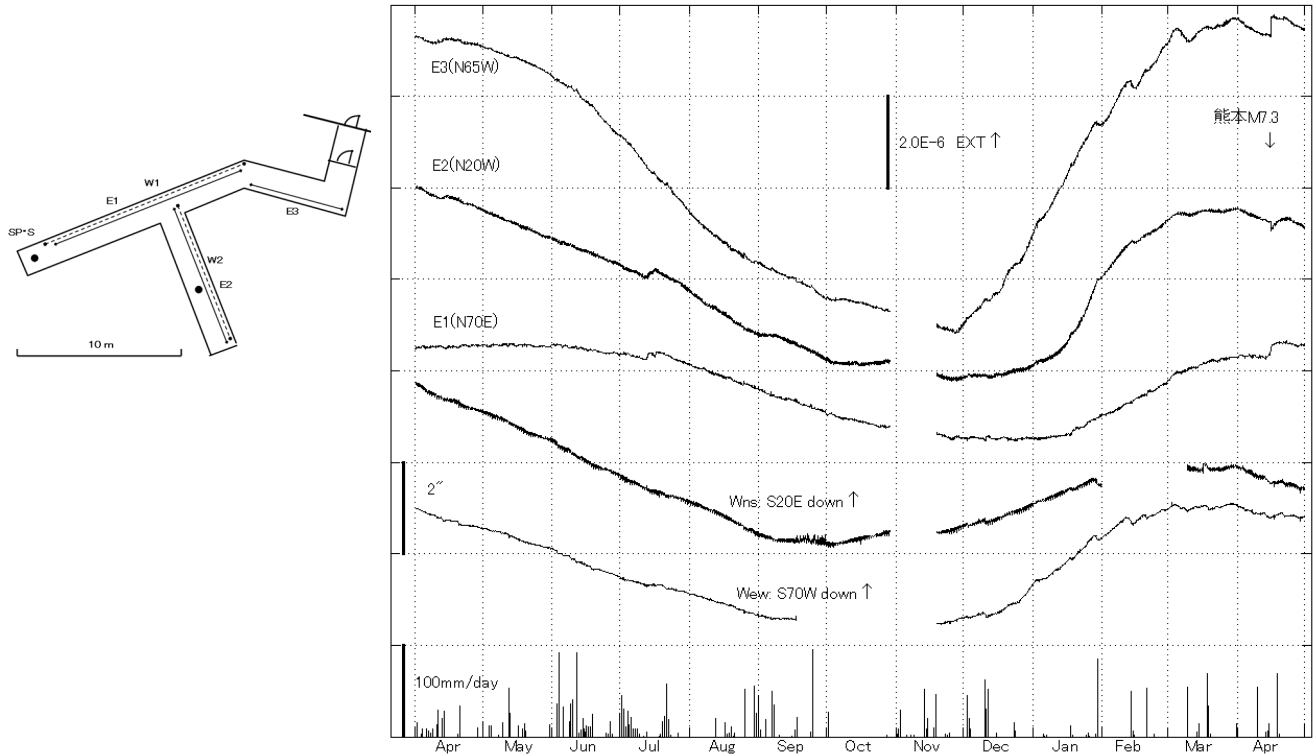
第6図 串間・大隈, 観測室における歪変化と傾斜変化(2015年4月~2016年4月)  
雨量はアメダス(鹿児島県田代)の日雨量



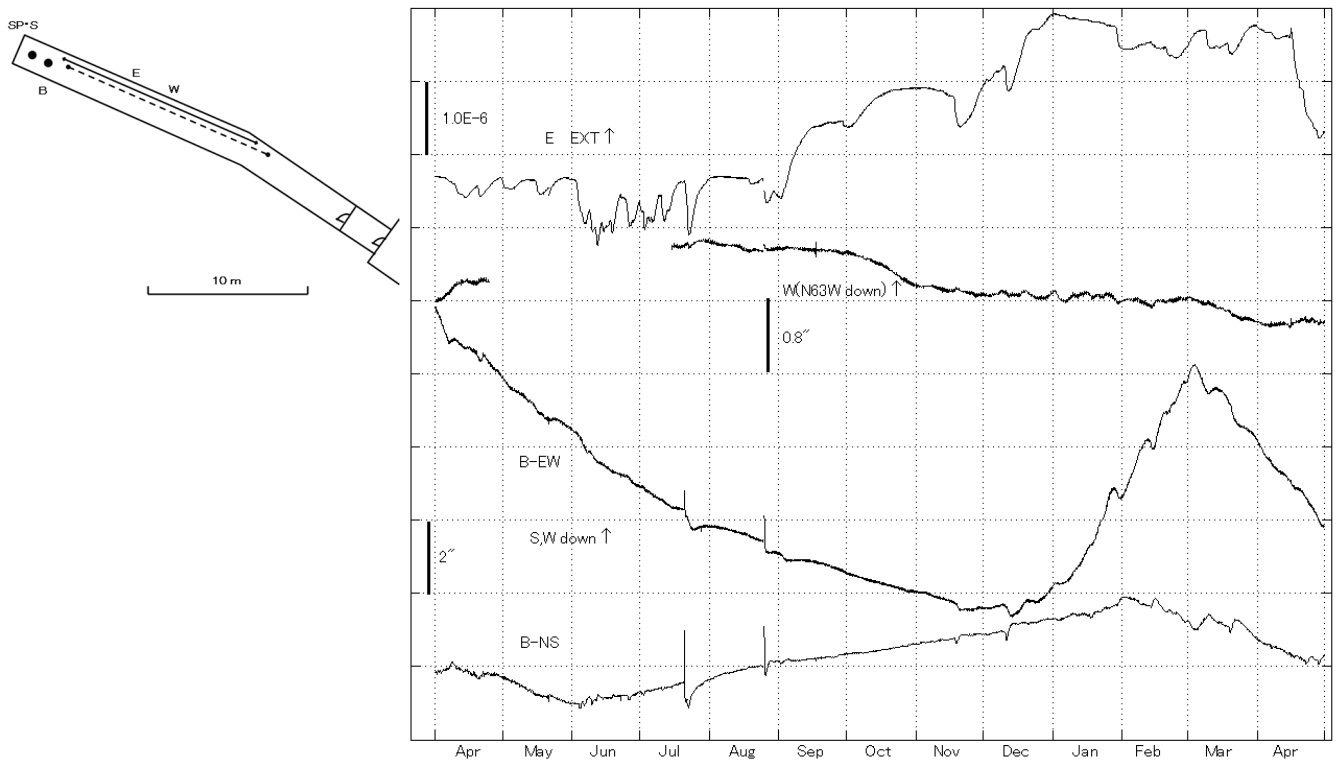
第7図 宮崎観測室における歪・傾斜変化と日雨量(2015年4月～2016年4月)



第8図 伊佐観測室における歪・傾斜変化と日雨量(2015年4月～2016年4月)



第9図 宿毛観測所における歪・傾斜変化と日雨量(2015年4月～2016年4月)



第10図 高城観測室における歪変化と傾斜変化(2015年4月～2016年4月)

## 平成 28 年熊本地震による大分県中部の地震等の誘発

京都大学防災研究所 地震予知研究センター

M7.3 の地震(2016/4/16 01:25:05.47)の約 33 秒後に大分県中部で別の大地震が発生し、局所的に M7.3 よりも強い揺れを観測していた (図 1, 2)。この震源を、K-NET, KiK-net の強震波形記録の P, S 波到達時刻を読み取り、hypomh により決定した (図 1)。規模は M6.0 前後(M5.7-M6.2)であったと推定され、一連の熊本地震活動の中において、M7.3(4/16), M6.5(4/14), M6.4(4/15)に次ぐ 4 番目の規模である。現在大分県中部で活発な地震活動(最大 M5.4)は、この地震の余震に対応する活動であると考えられる。またこの地震は M7.3 の地震によって誘発されたと考えられる。震源分布から別府-万年山断層帯の湯布院活動セグメント(strike=260°, dip=60°, rake=90°)、または立石山活動セグメント(strike=90°, dip=60°, rake=90°)で発生したと考えられる。

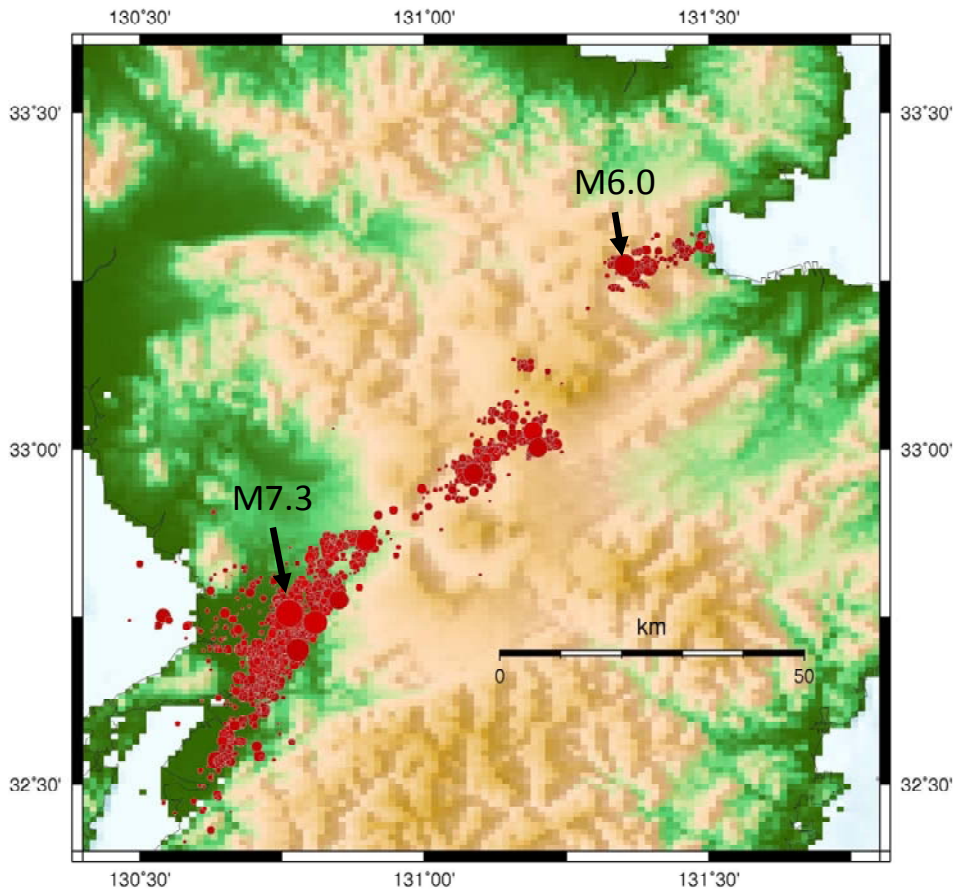


図 1. M7.3 直後に大分県中部で誘発された地震の震源

2016/4/16 01:25:38 33.274N 131.352E 深さ約 7.5km M6.0 前後(M5.7-M6.2)

(但し誤差を大きく含む。M に関しては過大評価している。)

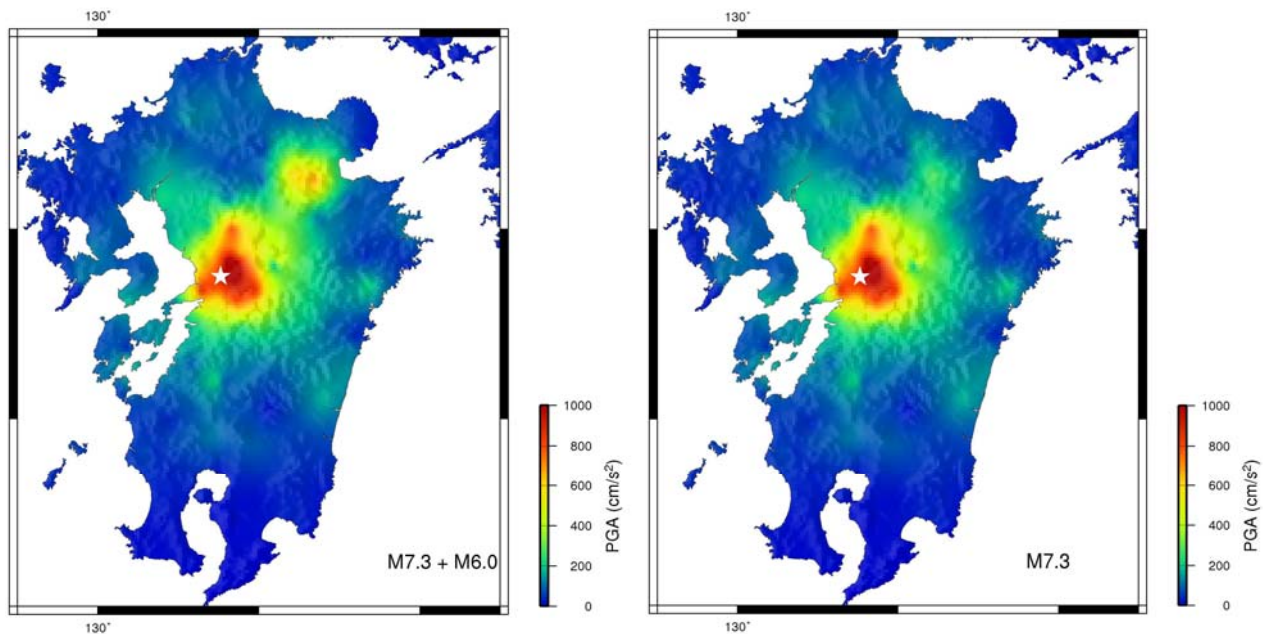


図2 K-NET, KiK-net 記録から推定した PGA 分布図

M7.3 と M6.0 を合わせた PGA 分布と、M7.3 のみ(M6.0 の地震波到達前)の PGA 分布。

### ○応力変化

この地震の誘発過程を探るために M7.3 地震が作用した応力変化を求めた。

#### ・静的 $\Delta CFF$

別府-万年山断層帯の二つの断層メカニズムに対して  $\Delta CFF$  を求めた (図3)。M7.3 のメカニズムには国土地理院の矩形断層モデル (地震調査委員会資料 289-(3)-2) を用いた。計算には Okada(1992)のサブルーチンを利用した。

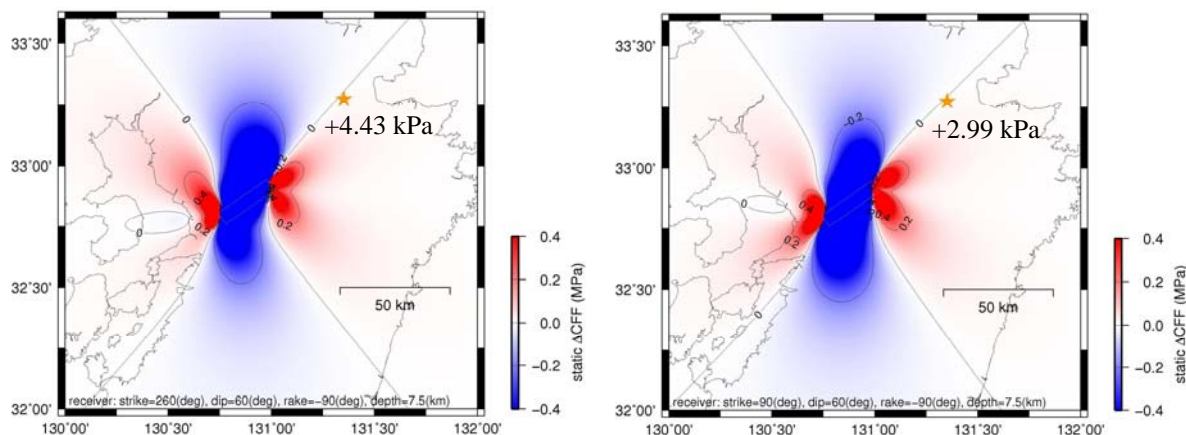


図3 (左) 湯布院活動セグメント、(右) 立石山活動セグメントで発生する地震メカニズムに対する深さ 7.5km での  $\Delta CFF$ 。橙星印は M6.0 の震央。

- 動的応力変化

動的応力変化を、速度の3成分合成エンベロープ波形から簡便的に推定したところ、最大値で2.2MPaであり、静的応力変化に比べて3桁近くも大きい。

○九州地域以外での誘発地震

日本列島ではこの他に M7.3 の地震の表面波によって誘発されたと考えられる地震が観測されている。表面波との対応が明確なのは箱根カルデラ内の活動である（図4）。但し極微小な地震活動であり、前後の地震活動にも変化は見られていない。

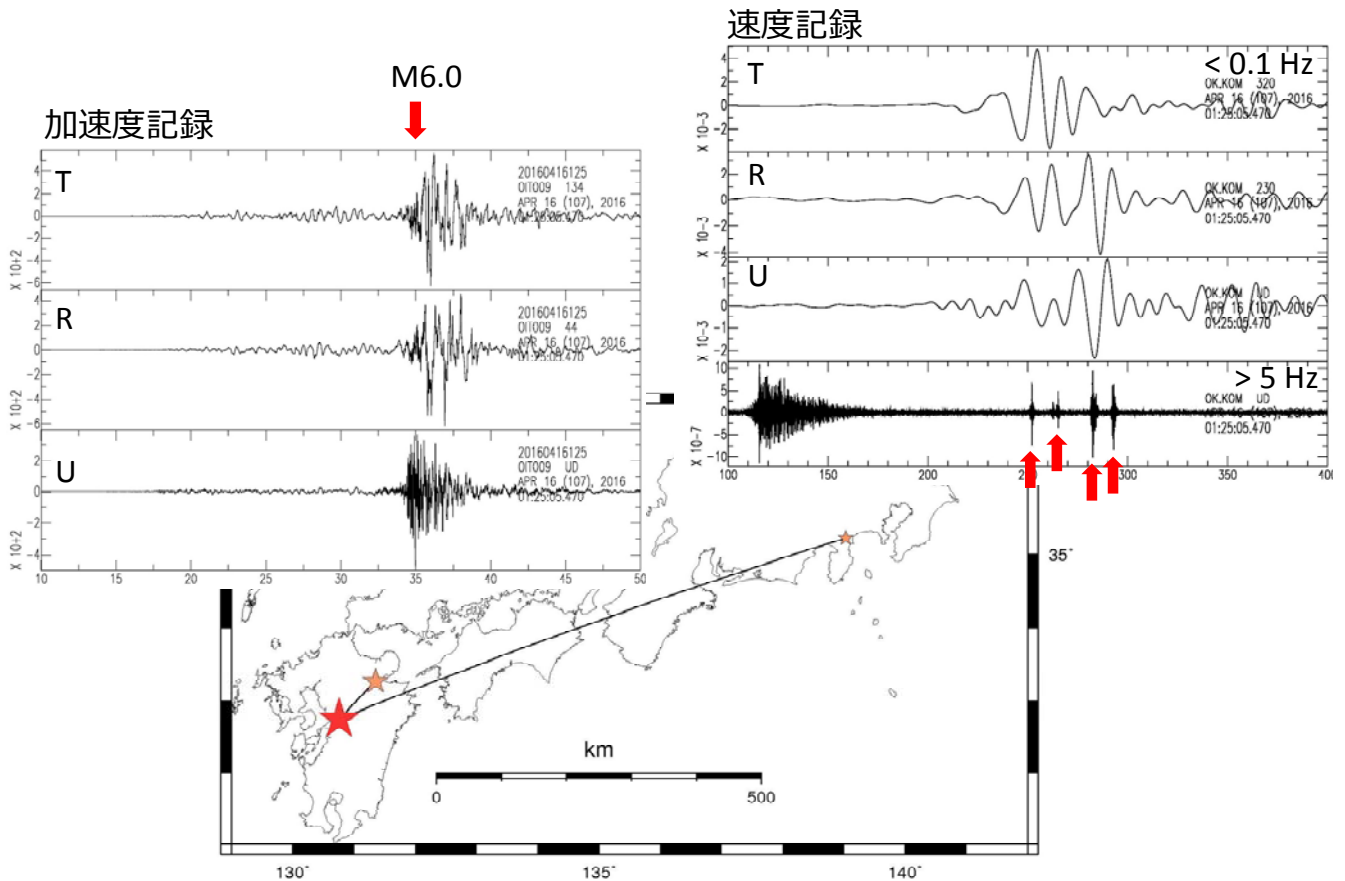


図4 M7.3によって誘発された地震活動例

謝辞：気象庁一元化震源記録、防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net 記録、神奈川県温泉地学研究所の地震波形記録、産業技術総合研究所の活断層データベースを利用いたしました。

## 西南日本のひずみ速度分布とブロック断層モデルについて

京都大学防災研究所 地震予知研究センター

西南日本内陸のひずみ集中帯を調べるために、東北地方太平洋沖地震以前の西日本の GNSS によって観測された地殻変動速度を用いて、ひずみ速度分布の計算を行った。ひずみ速度分布は、Shen et al.(1996)の手法を用いて計算し、平滑化の度合いを表す距離減衰定数は 15km とした。図 1 及び 2 に示すひずみ速度は、太平洋側で大きなひずみ速度が観測されているが、主にフィリピン海プレートの沈み込み帯におけるカップリングが原因であり、このままでは、内陸地震の発生に関係する可能性があるひずみ集中帯を抽出することが難しい。

そこで、ブロック断層モデル (Nishimura et al., 2015 AGU Fall meeting) を用いて内陸のブロック運動と南海トラフ沿いのカップリングを推定し、推定されたカップリングによる弾性変形を差し引いて、内陸のひずみ集中帯の抽出を試みた。ブロック断層モデルにおけるブロック境界の位置 (図 3) は、GNSS データに基づくひずみ分布、微小地震分布、活断層の位置を参考に、試行錯誤の上決定した。平成 28 年熊本地震の震源付近は、ブロック境界の位置にあたり、年間 10mm を超えるブロック相対運動があることが推定される (図 4)。ここで推定された南海トラフから沈み込むプレート間カップリングによる弾性変形分を除去し、図 1 及び 2 と同じ方法で計算したひずみ速度が図 7 と 8 である。

図 8 の最大剪断ひずみ速度を見ると、図 2 で見られた太平洋側における大きなひずみ速度は概ね小さくなっているが、熊本地震で地震活動が活発化した大分から阿蘇、熊本にかけての領域のひずみ速度は大きい。さらに、四国中部から西部の中央構造線付近、紀伊半島の和歌山市付近はひずみ速度が大きいことがわかる。また、中央構造線より北側では図 2 と同様、淡路島から琵琶湖、福井市に至る地域や濃尾断層帯から跡津川断層帯にかけての領域、島根県東部から鳥取県にかけての領域はひずみ速度が大きい場所が連なっている。1923 年以降の地殻内大地震 ( $M \geq 6$ , 20km 以浅) をプロット (図 8) すると、最大剪断ひずみ速度が大きい場所で発生していることがわかる。

謝辞：国土地理院、海上保安庁、International GNSS Service の GNSS 観測点データ、気象庁一元化震源、Hi-net 自動震源、地震本部の主要活断層分布を使用させて頂きました。



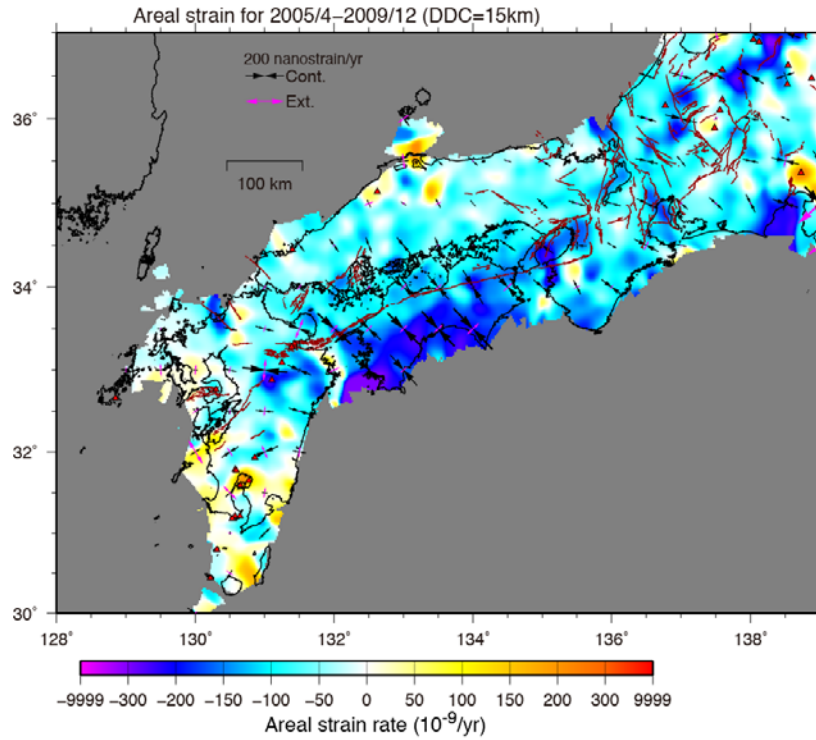


図1 2005年4月-2009年12月のGNSS観測点での平均速度から計算した面積ひずみ速度分布と主ひずみ速度. 茶色の線は, 地震本部による活断層分布.

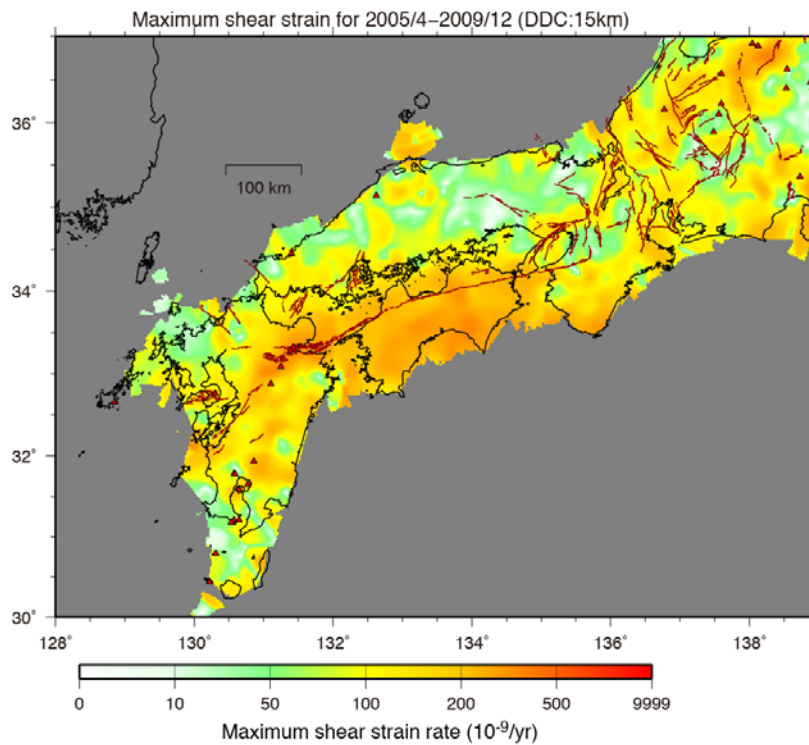


図2 2005年4月-2009年12月のGNSS観測点での平均速度から計算した最大剪断ひずみ速度分布. 茶色の線は, 地震本部による活断層分布.

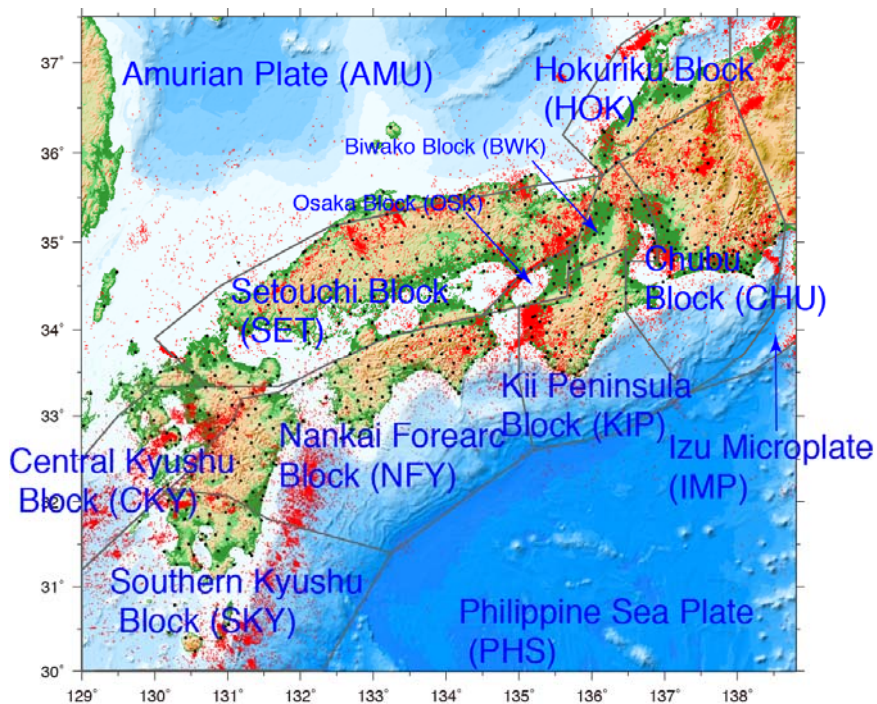


図3 ブロック断層モデルにおけるブロックの位置と微小地震分布(1998-2015年の深さ30km以浅の気象庁一元化震源).

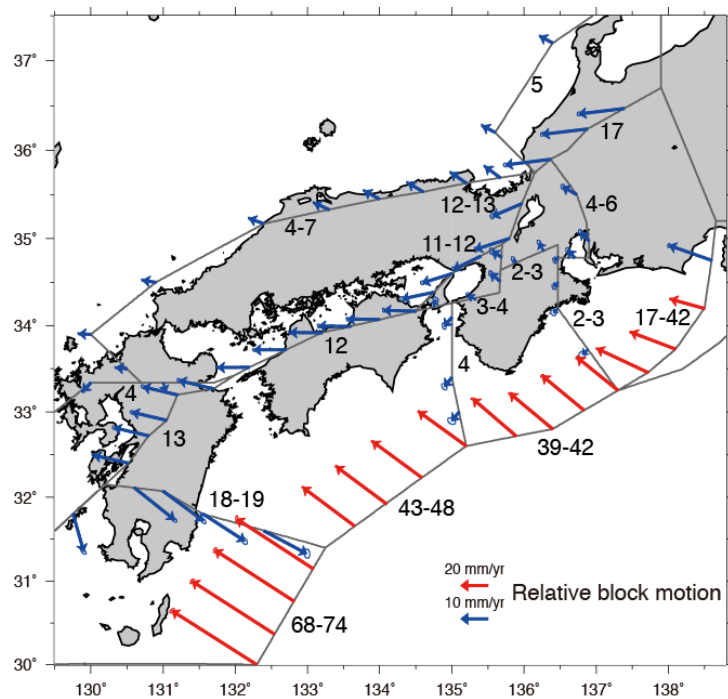


図4 ブロック境界でのブロック間相対運動速度 (単位 mm/yr).

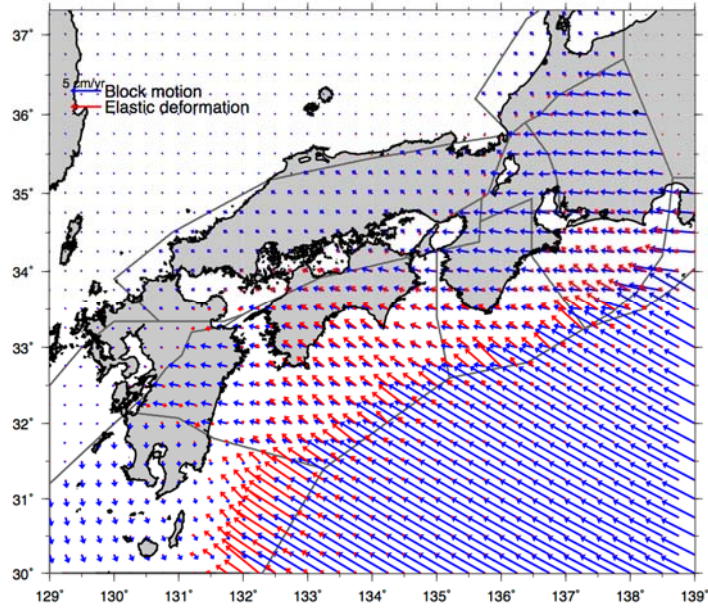


図5 ブロック断層モデルにおけるブロック運動（青矢印）とブロック間断層の固着による弾性変形（赤矢印）。

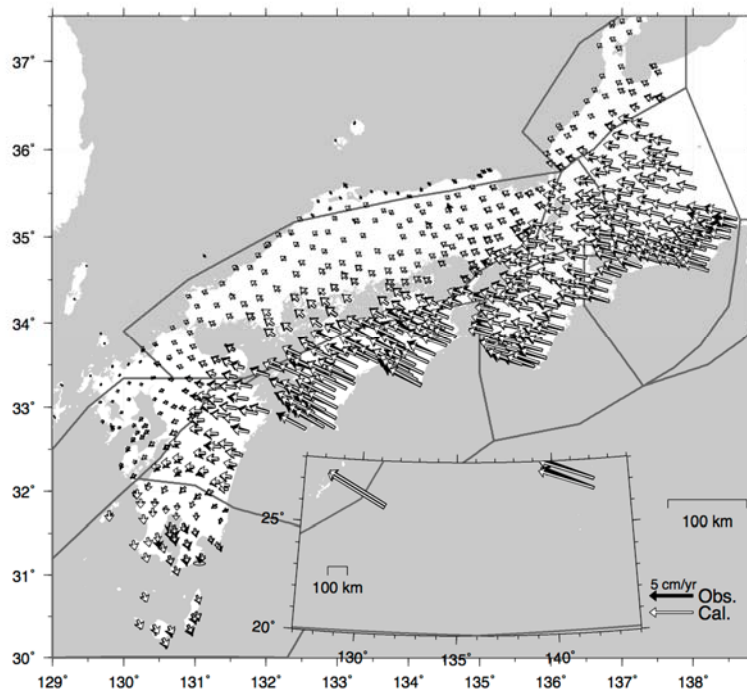


図6 ブロック断層モデルにおける水平変位ベクトルの観測値（黒矢印）と計算値（白矢印）。観測期間は2005年4月～2009年12月。

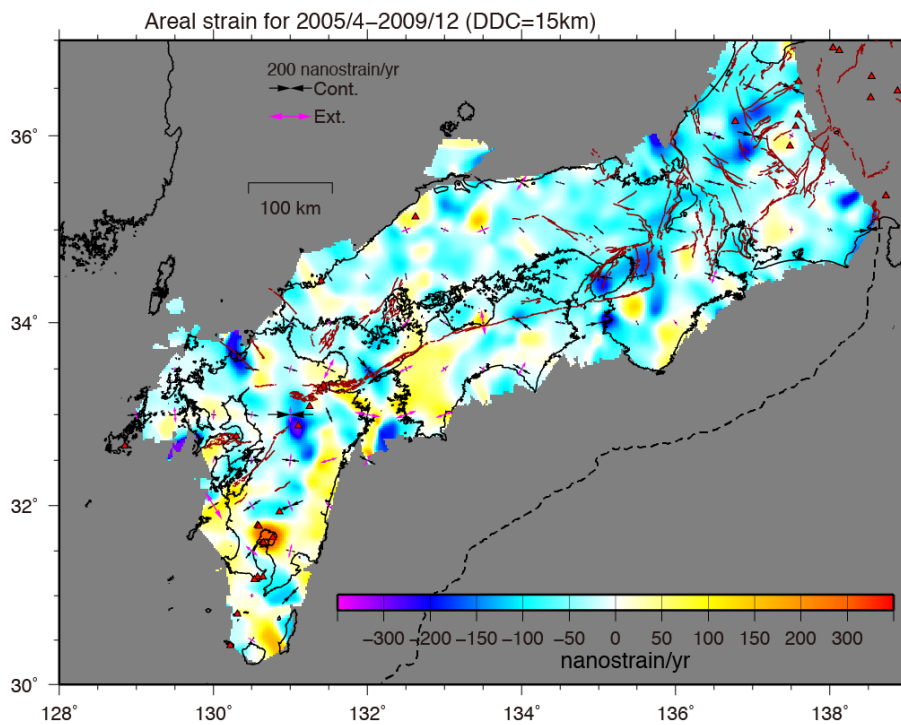


図7 プレート間カップリングの影響を除去した面積ひずみ速度分布と主ひずみ速度。茶色の線は、地震本部による活断層分布。

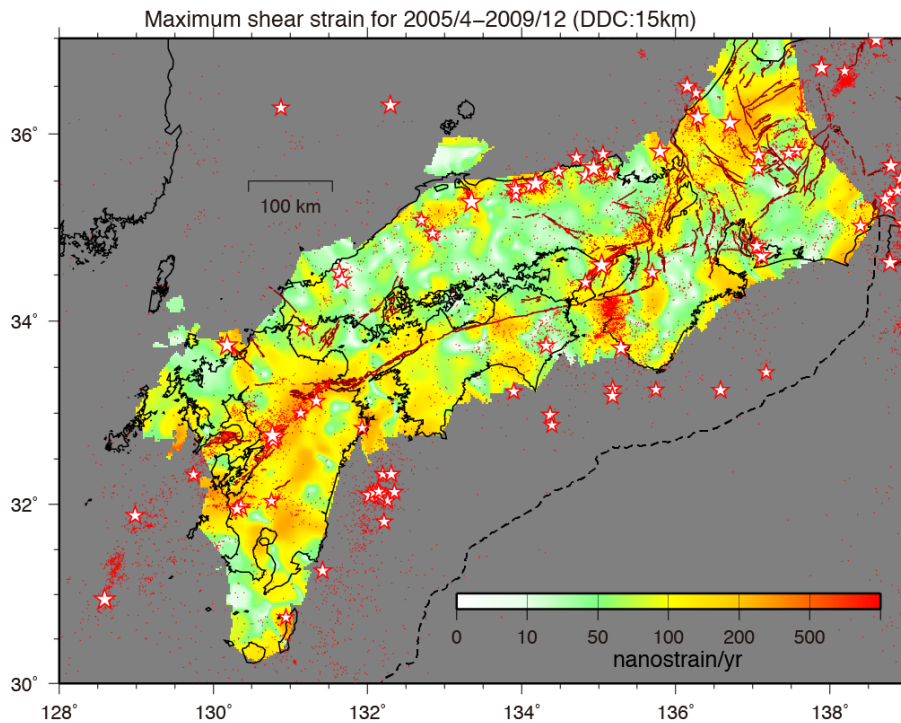


図8 プレート間カップリングの影響を除去した最大剪断ひずみ速度。赤点及び星印は、1923年以降に発生した深さ20km以浅の震央を表し、それぞれ $M \geq 3$ 、 $M \geq 6$ 以上の地震を示す。茶色の線は、地震本部による活断層分布。

## 「平成 28 年（2016 年）熊本地震」の地震活動のうち本震と最大前震の震源破壊過程

京都大学防災研究所 地震災害研究部門

平成 28 年（2016 年）熊本地震の地震活動のうち、2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分に発生した本震 ( $M_{JMA}7.3$ ) と 2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に発生した最大前震 ( $M_{JMA}7.3$ ) の震源破壊過程を、強震記録の解析により推定した。

解析手法はマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法 (Hartzell and Heaton, 1983) を用いた。時空間のすべり分布の平滑化は Sekiguchi et al. (2000) に従い、平滑化の強さと第 1 タイムウィンドウ破壊フロントの伝播速度は ABIC 最小規準により決定した。

グリーン関数計算のための速度構造モデルは、地震調査研究推進本部全国 1 次地下構造モデル (Koketsu et al., 2012) から、各観測点直下の構造を一次元構造として抽出した。グリーン関数は離散化波数法 (Bouchon, 1981) 及び透過・反射係数行列法 (Kennett and Kerry, 1979) により計算した。

### 1) 本震 (4/16 01:25)

本震後の余震分布、国土地理院の地殻変動観測結果、各機関による地表地震断層 (布田川、日奈久断層沿い) の現地調査報告などの情報を考慮し、日奈久断層帯北部と布田川断層帯に沿った北西傾斜の断層面を設定した。気象庁の暫定震源をプロットしたところ、4 月 14 日 21 時 26 分の最大前震 ( $M_{JMA}6.5$ ) の余震はほぼ鉛直に分布していたのに対し、4 月 16 日 1 時 25 分の本震の余震は、北西に傾斜した面に沿って発生しているように見えるため、このようなモデル設定とした。北西傾斜の断層面を仮定する限り、震央と地表の断層トレースの位置関係から、破壊開始点は日奈久断層帯に置く必要がある (布田川断層では鉛直断層を仮定しない限り無理な設定となる)。

大きなすべりは布田川断層帯沿いに見られるが、日奈久断層帯北部の浅部にもややすべりの大きな領域がみられる。日奈久断層沿いのすべりは右横ずれが卓越しているが、布田川断層帯のすべりは正断層成分を含む。断層面上のすべりのスナップショットと、布田川断層近傍の熊本県震度計観測点 (益城町、西原村) の変位波形 (インバージョンには使用していない) を比較したところ、観測点近傍の断層がすべる時刻に対応して、断層平行成分の変位が観測されている。詳細な地表地震断層調査結果などと比較していく必要がある。日奈久断層帯北部での前震を伴い、本震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて、連続的に破壊が伝播したものと考えられる。また、臨時余震観測や地殻構造調査などの成果により、詳細な震源断層形状が明らかになることを期待している。

### 2) 最大前震 (4/14 21:26)

21 時 26 分の地震直後の余震はほぼ鉛直な面に沿って発生している。このため走向 212 度で、ほぼ鉛直な断層面を設定した。大きなすべりは、破壊開始点 (深さ 11.39km) 付近と、北東側のやや浅い部分 (深さ 5km 程度) の 2 カ所に見られる。全体としては、北東方向への破壊伝播である。

すべりと直後の余震分布は相補的である。また、1999 年 10 月 31 日以降のまとまった地震活動も、4 月 14 日の地震で大きくすべった領域の外側に震源が集中している。

<謝辞> 国立研究開発法人防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net 及び F-net、気象庁、熊本県の強震波形記録を使用しました。震源情報は気象庁と文部科学省が協力して処理した結果を使用しました。関係者の皆様に感謝します。

### 本震の震源破壊過程（4月16日1時25分、 $M_{\text{JMA}}7.3$ ）

- ・ K-NET、KiK-net（地中）、F-net（強震計）、気象庁震度計から計15点の速度波形0.05~0.5 Hz、S波部分30秒間を使用した。
- ・ 破壊開始点は、気象庁による暫定震源の位置（深さ12.45 km）に固定した。
- ・ 余震分布、地表地震断層などを考慮して、日奈久断層帯北部に沿った長さ14 km×幅18 km、走向205度、傾斜72度の断層面、及び布田川断層帯に沿った長さ28 km×幅18 km、走向235度、傾斜65度の断層面を仮定。
- ・ サブ断層サイズ2 km×2 km、各サブ断層の基底関数はライズタイム1秒のsmoothed ramp関数を0.5秒間隔で9個置いた。

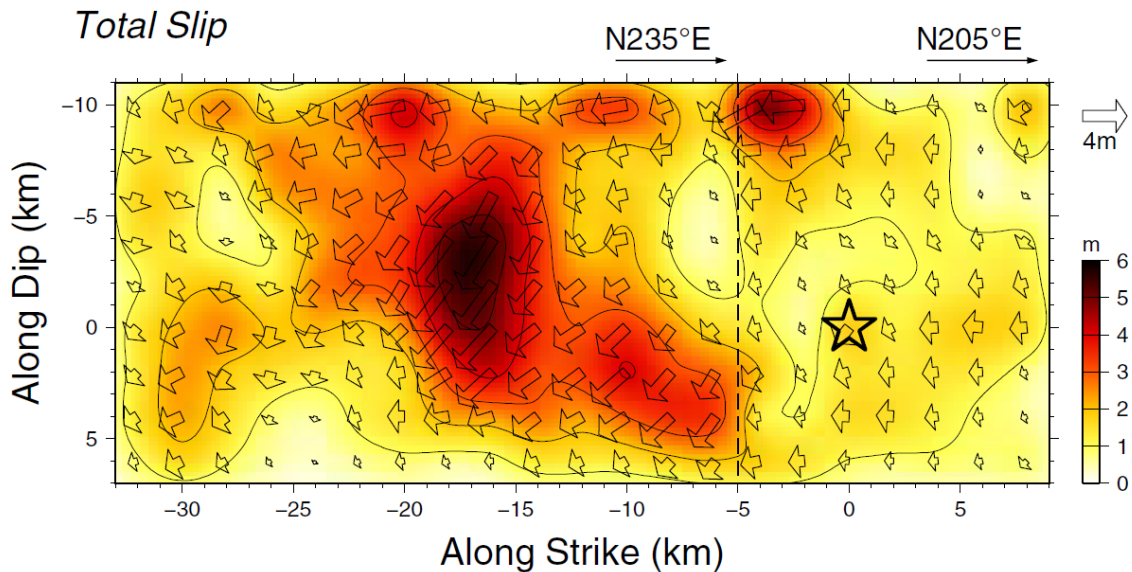


図1 本震の最終すべり量分布

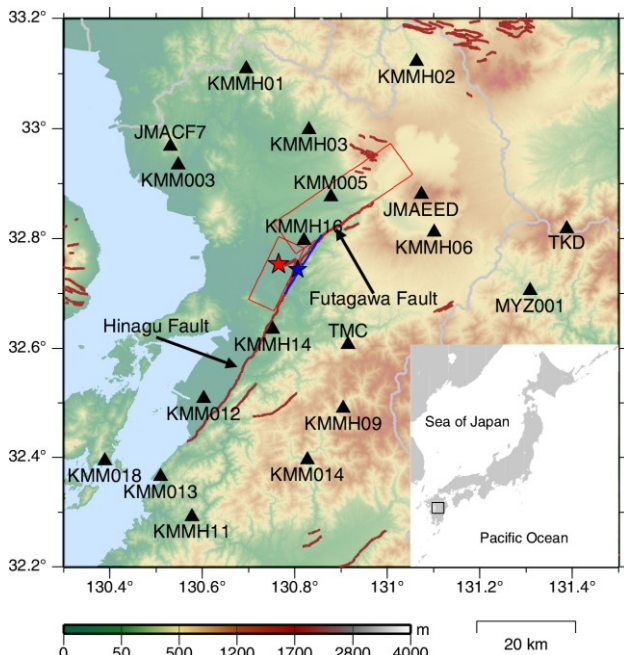


図2 観測点(▲)、震央(★)、断層面の地表投影  
(赤：本震、青：最大前震)

(図中の活断層は中田・今泉(2002)による)

地震モーメント：  $4.67 \times 10^{19}$  Nm ( $M_w 7.0$ )

最大すべり量： 5.3m

第1タイムウィンドウ破壊フロントの伝播速度： 2.4km/s

- ・ 断層の破壊は、破壊開始点から阿蘇山方面に向かってほぼユニラテラルに伝播した。
- ・ 大きなすべりをもつ領域は、布田川断層帯の中央部付近にみられる。地表に最も近いサブ断層のすべり量は1~4 mの範囲で分布。
- ・ 日奈久断層帯では北端付近の浅部でのすべりが大きい。
- ・ 日奈久断層帯では右横ずれ卓越、布田川断層帯では正断層成分を含む。

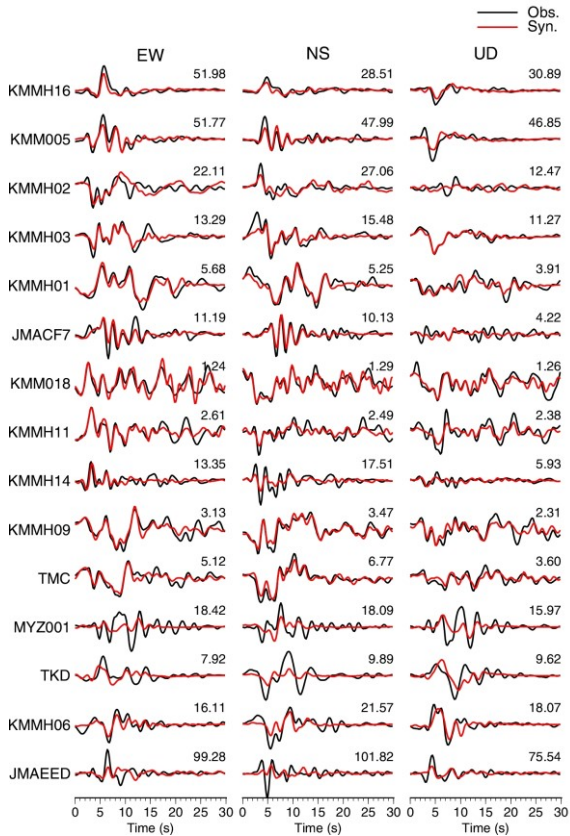


図3 速度波形(0.05-0.5Hz)の比較  
(黒：観測、赤：合成)

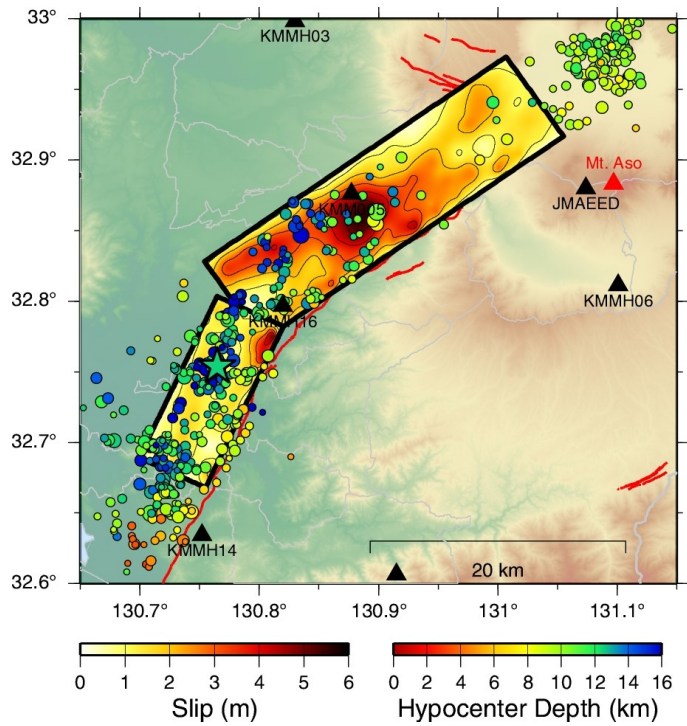


図4 すべり分布と余震分布(4/16 1:25~4/17 1:25)  
※余震は気象庁暫定震源カタログによる

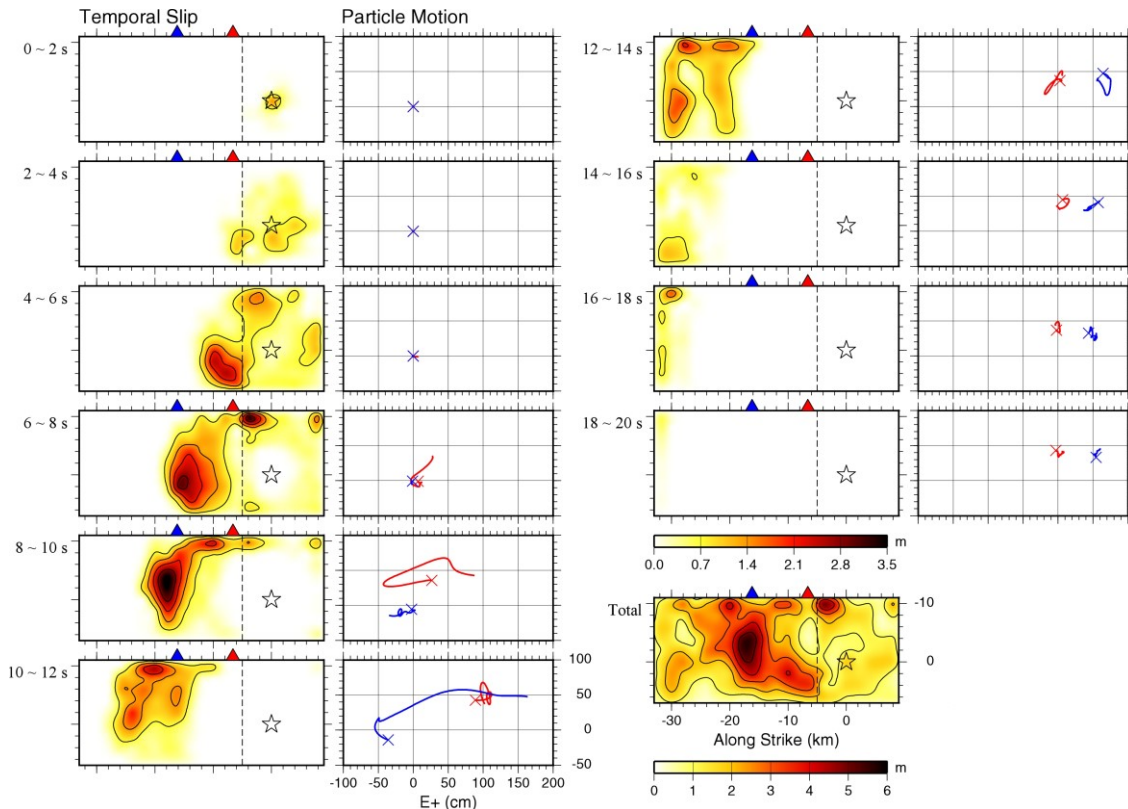


図5 断層面上のすべりの時間発展と断層近傍の変位の粒子軌跡との対応関係。破壊の時間進展に対応した時刻に、近傍の強震観測点での断層平行成分の変位が観測されている。  
※熊本県の益城村役場(赤)、西原村役場(青)の震度計記録から得られた変位波形(フィルターなし)

## 最大前震の震源破壊過程 (4月14日21時26分、 $M_{JMA}6.5$ )

- ・ K-NET、KiK-net(地中)、F-net(強震計)から計13点の速度波形0.05~1.0 Hz、S波部分12秒間を使用した。
- ・ 破壊開始点は、気象庁による暫定震源の位置(深さ11.39 km)に固定した。
- ・ 直後の余震分布、F-netのモーメントテンソル解などを考慮して、日奈久断層帯北部に沿った長さ14 km×幅13 km、走向212度、傾斜89度の断層面を仮定した。
- ・ サブ断層サイズ1 km×1 km、各サブ断層の基底関数はライズタイム1秒のsmoothed ramp関数を0.5秒間隔で5個置いた。

地震モーメント:  $2.04 \times 10^{18}$  Nm ( $M_w6.1$ )

最大すべり量: 1.2m

第1タイムウィンドウ破壊フロントの伝播速度: 2.2km/s

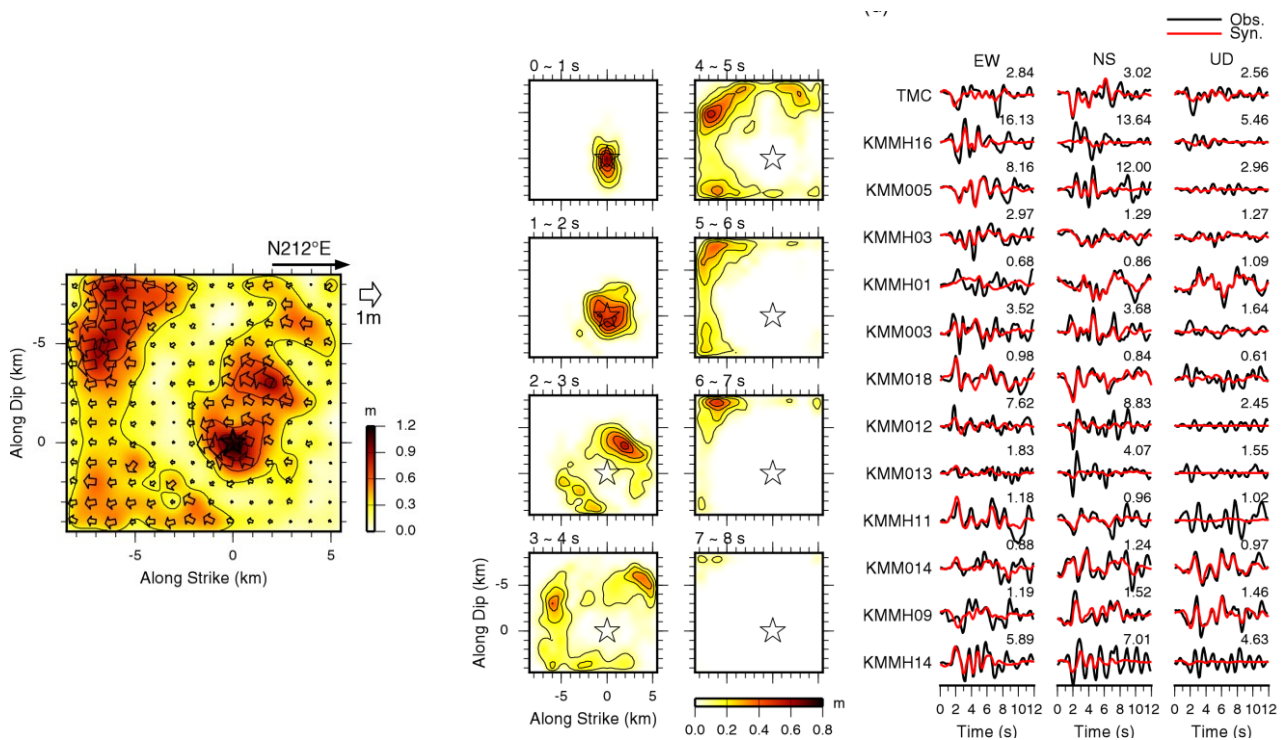


図6(左) 最大前震の最終すべり分布。破壊開始点(☆)付近と北東側浅部にすべりの大きな領域がある。(中) 断層面上のすべりの時間発展、(下) 速度波形(0.05-1Hz)の比較。黒: 観測、赤: 合成

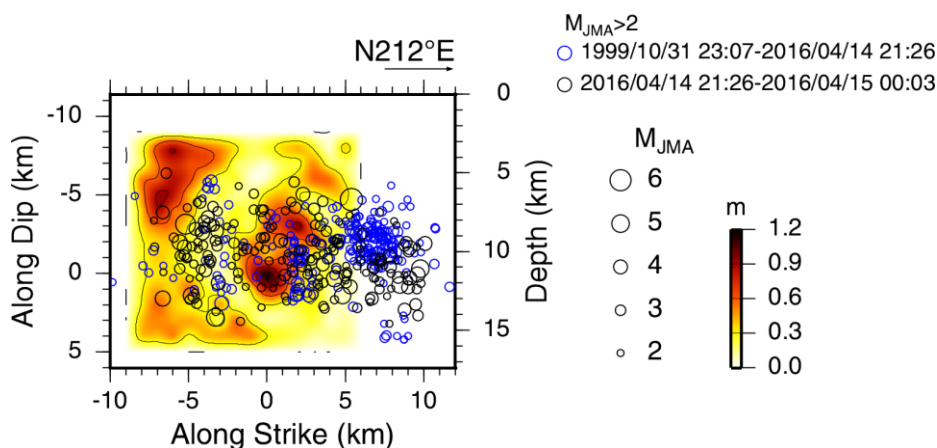


図7 最大前震のすべり分布と直後の余震、1999年以降の地震活動との比較。最大前震のすべりの大きい領域では、直後の余震が少ない。1999~2000年頃の地震活動とも空間的に相補的であるように見える。