

## 2018年大阪府北部地震(M6.1)前後の地殻変動

### Crustal Deformation Before and After the 2018 M6.1 Northern Osaka Earthquake

西村卓也・橋本 学・藤原 智<sup>(1)</sup>

Takuya NISHIMURA, Manabu HASHIMOTO and Satoshi FUJIWARA<sup>(1)</sup>

(1) 国土交通省国土地理院地理地殻活動研究センター

(1) Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geospatial Information Authority of Japan

#### Synopsis

We clarified crustal deformation before and after the 2018 M6.1 northern Osaka earthquake using GNSS, InSAR, and extensometers at Abuyama Observatory. The earthquake occurred in a strain concentration zone in which the high strain rate was observed before the earthquake by GNSS. Small coseismic displacement was observed by GNSS and was reproduced by dislocation fault models. Distinctive pre-, co-, and post-seismic strain was observed by the extensometers located ~5 km away from the epicenter. The strain in each period showed different directions of the principle strain and cannot be explained by simple elastic dislocation models. We constructed new GNSS stations across the Arima-Takatsuki fault zone after the earthquake. Combining new stations, stations operated by collaborative institutions, and existing GEONET stations, a detailed deformation in the Kyoto-Osaka-Kobe area will be clarified in a few years.

**キーワード:** 大阪府北部地震, 地殻変動, GNSS, InSAR, 伸縮計

**Keywords:** northern Osaka earthquake, crustal deformation, GNSS, InSAR, extensometer

#### 1. はじめに

2018年6月18日午前7時58分頃, 大阪府北部を震源とする地震(以下, 大阪府北部地震)が発生した。気象庁により決定された震源の深さは13km, マグニチュード(M)は6.1で, 大阪市北区, 高槻市, 枚方市, 茨木市, 箕面市で震度6弱を観測した。M6クラスの地震は, 日本列島周辺で1年あたり20回程度発生しているが, この地震は都市域の人口密集地域で発生した内陸地震であったため, 死者6名, 重軽傷者462名, 一部破損も含めた住家被害は61770棟(2019年8月20日現在, 消防庁による)という大きな被害をも

たらした。この地震の強震動や被害状況, 人々の防災意識への影響等について多くの研究が行われている(例えば, 松島, 2019; 山村ら, 2019)。

この地震の震源断層に関して, 余震分布(例えば, Kato and Ueda, 2019)や近地震記録の逆解析(例えば, Hallo et al., 2019)から, 東南東-西北西走向の右横ずれ断層と南北走向の逆断層の両方が動いたと考えられている。これらの震源断層には, それぞれ, 地表で活断層と確認される有馬-高槻断層帯, 生駒断層帯に対応する可能性があるが, その走向や地下での推定位置が完全に一致しているわけではなく, 地震調査委員会(2018)でもこれら活断層との関

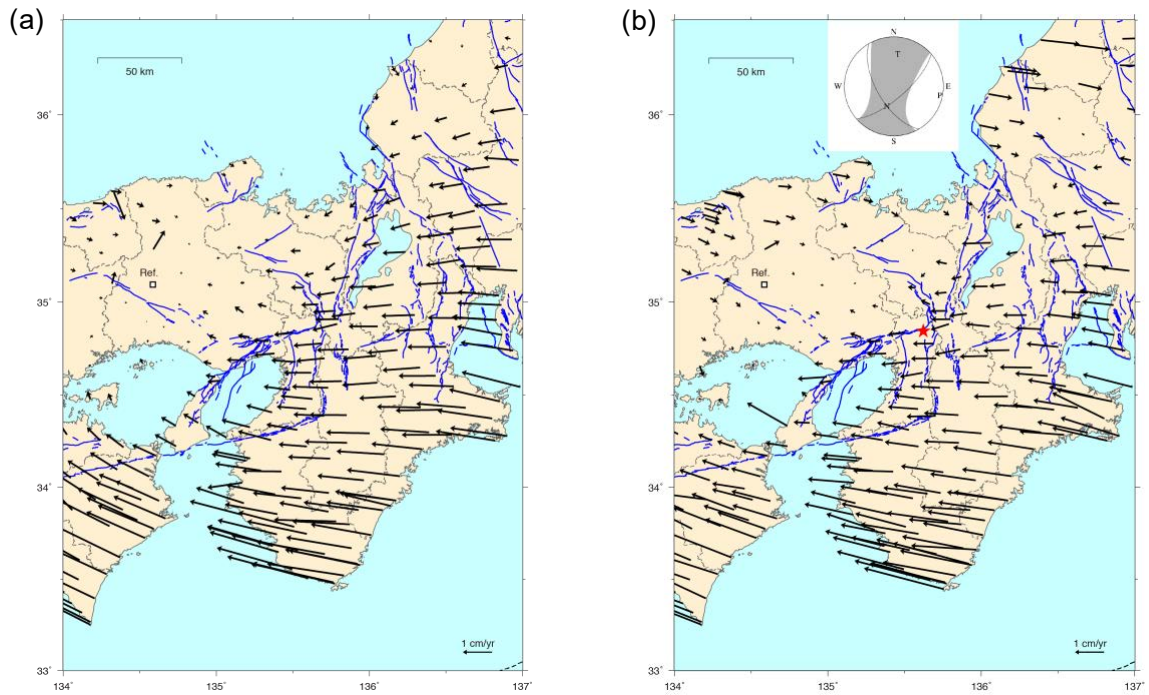


Fig. 1 Horizontal velocity at continuous GNSS stations from. The reference station is 950344. Blue lines denote surface trace of major active faults (Earthquake Research Committee, 2020). (a) Velocity from April 2005 to December 2009. (b) Velocity from December 2014 to March 2018. The red star and beach ball indicate the epicenter and focal mechanism of the 2018 northern Osaka earthquake determined by the Japan Meteorological Agency.

係は結論づけていない。

大阪府北部地震に伴い周辺のGNSS観測点でわずかな地震時変位が観測された。また、震源域近傍に位置する阿武山観測所の伸縮計では、地震に伴う明瞭な歪み変化が報告された（森井，私信）。InSARからは、本震を起こした震源断層に起因する明瞭な変化は観測されなかったものの（橋本，2019），周辺に位置する有馬一高槻断層帯付近で微小な変動が見つかった（Fujiwara et al., 2020）。大阪府北部は地震前から新潟一神戸ひずみ集中帯（Sagiya et al., 2000）と呼ばれる日本列島の内陸域でも歪み速度の大きな場所に位置しており、内陸地震の多発域であることが指摘されていた（西村，2017）。筆者らは地震後に震源域周辺を含む地域の詳細な地殻変動分布を明らかにするため、稠密GNSS観測網を構築した。

本稿では、主にGNSSデータに基づいて、地震前、地震時、地震後の地殻変動を整理するとともに、阿武山観測所の地震前後の歪み変化とInSARの局所的变化に対する解釈を試みる。

## 2. 地震前の地殻変動

### 2.1 GNSSデータ

前述したとおり大阪府北部地震の震源域を含む神

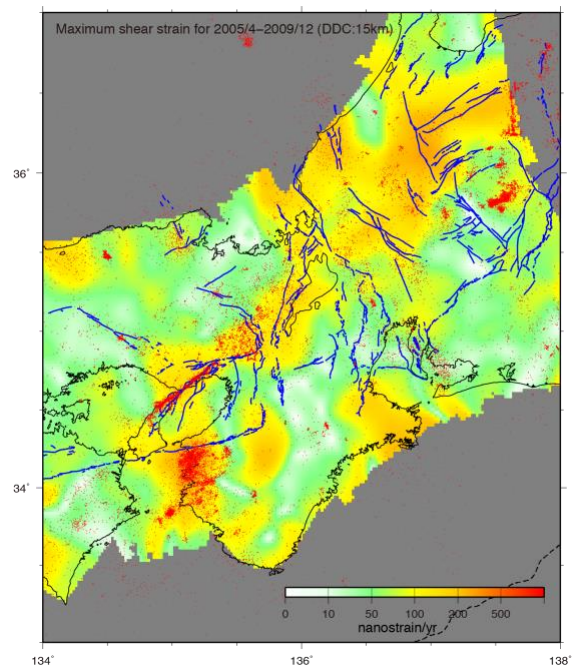


Fig. 2 Corrected maximum shear strain rate from April 2005 to December 2009. Elastic deformation due to interplate coupling along the Nankai Trough is removed using the block model (Nishimura, 2018). Red dots show epicenters of shallow earthquake (Depth  $\leq 20$  km) from 1998 to 2017. The other symbols are the same as Fig. 1.

戸から大阪北部、京都にかけての地域は、新潟―神戸ひずみ集中帯の一部をなしており、ひずみ速度の集中が観測されている場所であった。地震予知研究センターでは、当センター独自に設置しているGNSS観測点に加えて国土地理院のGEONETや他大学の観測点も含めて、Gipsyによる精密単独測位法（PPP）を用いた日座標値の算出をルーチン的に行っており、Fig. 1に、大阪府北部地震の発生以前で大地震が比較的少ない時期の水平速度ベクトルを示す。兵庫―宮観測点(950344)を基準とすると、東北地方太平洋沖地震前の2005年4月から2009年12月まで（Fig. 1a）、東北地方太平洋沖地震後の2014年12月から2018年3月まで（Fig. 1b）のどちらの時期でも、西向きベクトルが京阪神地域より東側で急激に大きくなり、大阪府北部地震の震央が速度ベクトルの急変帯に位置している。震央より北側では速度ベクトルは小さいが、南側では西向き速度が大きくなっていて、大阪府北部地震のメカニズム解や有馬―高槻断層帯の右横ずれ運動と調和的な変動が観測されていたことになる。

次に、この地域のひずみ速度分布を見るために、Fig. 1aの水平速度ベクトルからShen et al. (1996)の手法を用いて、最大せん断ひずみ速度分布を計算した結果をFig. 2に示す。ひずみ分布の滑らかさを規定するパラメータである距離減衰定数は15kmとし、内陸部のひずみ集中域に注目するために南海トラフから沈み込む海洋プレートと陸側プレートの固着による弾性変形を固着分布モデルによって除去した（西村, 2017）。ひずみ速度の大きな場所は、淡路島か

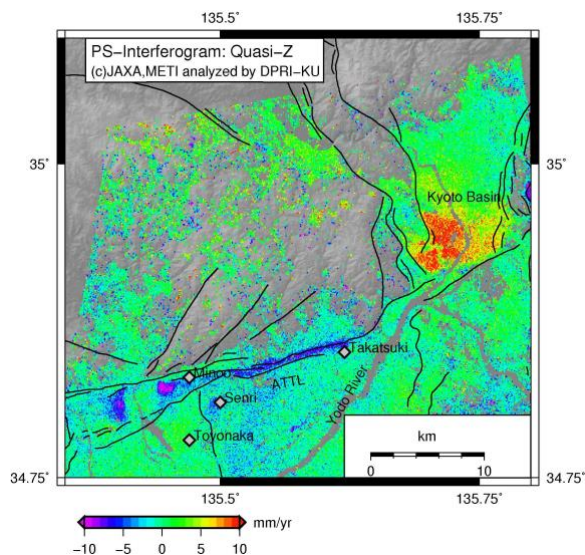


Fig. 3 Quasi-vertical velocity from 2.5D analysis of Persistent Scatterer InSAR of ALOS during 2006-2010 (橋本, 2014; Hashimoto, 2016).

ら琵琶湖を通過して岐阜県北部に至っており、主要活断層の地表トレースや微小地震の活発な領域と対応しているように見える。京阪神地域においては、六甲―淡路断層帯、有馬―高槻断層帯、琵琶湖西岸及び花折断層帯と、和歌山市付近の微小地震の多発域に顕著なひずみ速度の集中が見られ、これらの地域が、測地・地形・地震のいずれのデータで見ても地殻変動の集中域となっていると解釈できる。

## 2.2 InSARデータ

大阪府北部地震の震源域近傍では、地震前にInSARによって有馬―高槻断層帯に沿った沈降が観測されていた（橋本, 2014; Hashimoto, 2016）（Fig. 3）。沈降域は、長さ約16km、幅約1kmに渡っており、沈降域の西端である豊中市付近では、2006-2009年の沈降速度は局所的に10mm/年に達しており、沈降は1995年の兵庫県南部地震以降に始まったようである。この変動域では、水平方向の変動はほとんど観測されていないことから、沈降が有馬―高槻断層帯の断層運動に直接関係しているとは考えにくい。沈降域は、有馬―高槻断層帯を構成する複数の並行した断層に囲まれる低地帯に位置し、周辺よりも堆積層が厚いと考えられることから、沈降の原因は、堆積層中の水位が低下したためだと考えられている（橋本, 2014）。また、Morishita et al.(2020)によるInSAR時系

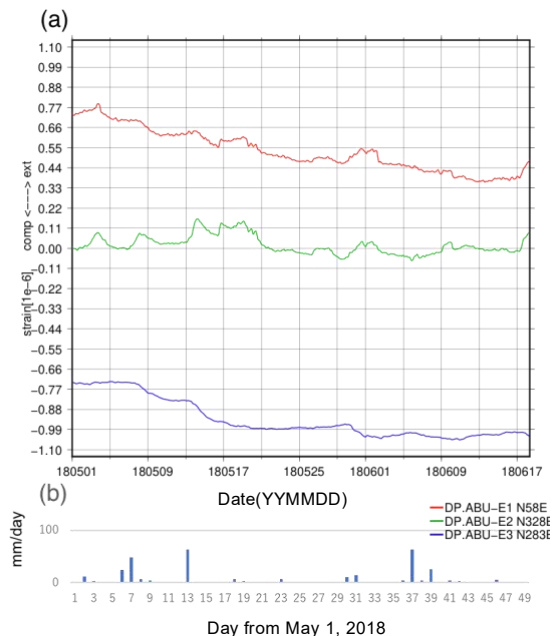


Fig. 4 (a) Strain measured by extensometers at the vault of Abuyama Observatory for two months before the northern Osaka earthquake. Tide components is removed. (b) Precipitation at the Ibaraki AMeDAS station.



Table 1 Parameters for the rectangular fault model for the 2018 northern Osaka earthquake. Latitude, longitude, and depth are the location of the northern upper edge of a rectangular fault. Rigidity is 30 GPa. Bold numbers represent the fixed parameters in the inversion. (a) Single fault model. (b) Double faults model.

(a)

Lat.(°)	Long.(°)	Depth(km)	Length(km)	Width(km)	Strike(°)	Dip(°)	Rake(°)	slip(m)	M <sub>w</sub>
34.837	135.603	7.2	<b>4.0</b>	<b>4.0</b>	<b>49</b>	<b>73</b>	152	0.30	5.38

(b)

Lat.(°)	Long.(°)	Depth(km)	Length(km)	Width(km)	Strike(°)	Dip(°)	Rake(°)	slip(m)	M <sub>w</sub>
34.837	135.602	6.1	<b>4.0</b>	<b>4.0</b>	<b>52</b>	<b>77</b>	151	0.24	
34.837	135.600	9.6	<b>4.0</b>	<b>4.0</b>	<b>351</b>	<b>50</b>	90	0.13	5.41*

\*Total moment magnitude of two faults

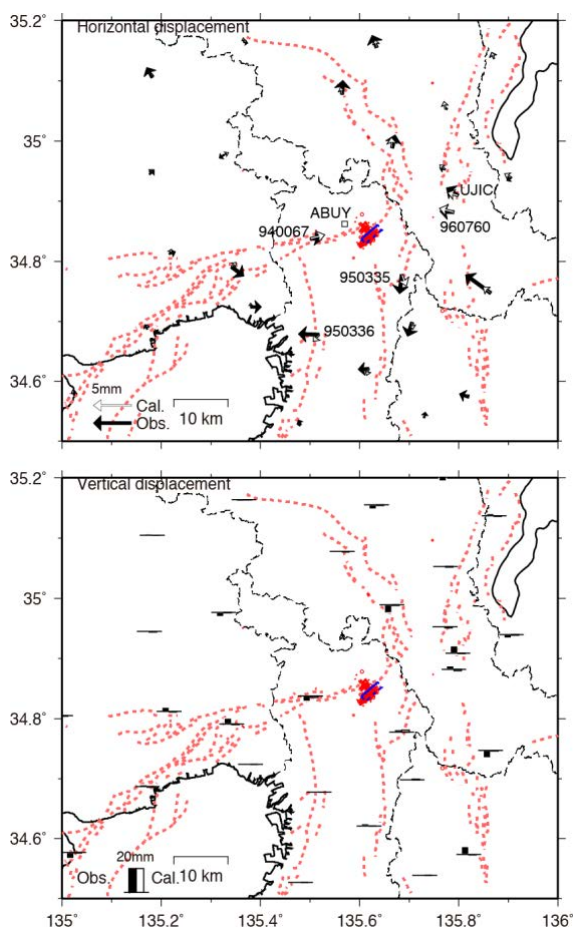


Fig. 5 Single rectangular fault model of the 2018 northern Osaka earthquake. A blue rectangle, red circles, and red broken lines represent an estimated fault, aftershock epicenters determined by the Japan Meteorological Agency, and active fault traces evaluated by the Earthquake Research Committee (2020), respectively.

列解析によると、沈降域の西側の一部では2017年後半以降は隆起している。約13kmという大阪府北部地

震の震源の深さやこのような隆起沈降速度の変化を考えると、この局所的な沈降と地震が関係しているとは考えにくい。

### 2.3 伸縮計データ

京都大学防災研究所阿武山観測所は、大阪府北部地震の震央から約5kmの距離に位置し、1972年から横坑内で地殻変動の連続観測を行っている（岡野・梅田, 1974）。大阪府北部地震の1日ほど前には、石英管伸縮計の記録に変化が現れ、地震時及び地震後の変化も記録された（森井, 私信）。Fig. 4は2018年5月1日から地震直前までの潮汐を補正した伸縮計記録3成分と茨木市での日毎降水量を示したものである。Fig. 4からもN58°E成分とN328°E成分に地震前の1日間で $10^{-7}$ 程度の伸張があったことが読み取れる。伸縮計記録は降雨等に伴う地下水変化によって、変化することが知られており、Fig.4でも降雨に対応するような変化が見られるが、地震前にはほとんど降雨は見られない。この地震直前の伸張については、地震時・地震後の伸縮変化とともに後ほど解釈を試みる。

### 3. 地震時の地殻変動

#### 3.1 GNSSデータと震源断層モデル

GNSS観測点における大阪府北部地震時の地殻変動は、数mm程度という検出限界ぎりぎりの微小なものであった。これは、大阪府北部地震の震央から10km以内にはGNSS連続観測点がないこととM<sub>w</sub>5.6という地震の規模や深さから考えて妥当である。2018年6月の1ヶ月間の日座標値データに対して、6月18日にステップを持つ1次関数をフィッティングし、ステップ量を地震時地殻変動とすると、震源域の南北では震源域から遠ざかり、東西方向では震源域に近づく方向の本震のメカニズム解（Fig. 1b）と

調和的な水平変位が得られた (Fig. 5) . この変位に対して, 半無限弾性体中の矩形断層 (Okada, 1985) のパラメータをMatsu'ura and Hasegawa (1987) の非線形インバージョン手法によって推定した結果が, Fig. 4及びTable 1である. 前述の通り, この地震は地震波や余震の解析から2枚の断層が動いたことがわかっているが, 地殻変動データのみから全ての断層パラメータを推定する解像度はない. そこで, 防災科研のF-netメカニズム解の北東—南西走向の節面を断層面と仮定し, 1枚の矩形断層の長さ, 幅を4kmと固定して, 断層の位置と滑り角及び滑り量だけを推定したのがTable 1a及びFig.5に示したモデルである. Table 1bのモデルは, 2枚の断層面を仮定し, 走向と傾斜は強震波形インバージョン (浅野, 2018) で用いられたものに固定して, 1枚の時と同様に断層の位置と滑り角及び滑り量だけを推定したものである. どちらのモデルも震源近傍の変位は概ね説明できたが, 推定された断層面の位置する深さは6-13kmとなり, 地震学的に決められた震源深さよりも浅くなる傾向がある. この原因は, 地表付近の堆積層の影響を無視した半無限弾性体を仮定しているためである可能性がある.

### 3.2 InSARデータ

Sentinel-1及びALOS2によって取得されたSARデータに基づく地震を含む期間の干渉画像には, 震央付近に顕著な変動は観測されなかった (橋本, 2019) が, 藤原・他 (2018) は, 有馬—高槻断層帯に沿った微小な地殻変動を見出した (Fig. 6) . この変動は長さが約11kmで, 地震前の沈降域 (Fig. 3) の東側に概ね対応する. 変動方向の解析から, この局所の変形は, 有馬—高槻断層帯を構成する真上断層の南側が沈降する逆断層+右横ずれ運動が示唆され, 震源断層と直接の関係はなく, 大阪府北部地震をトリガーとして受動的に変位が発生したと考えられている (Fujiwara et al., 2020) . 近年InSARによる稠密地殻変動分布から, このような活断層の浅部が受動的に滑る「お付き合い断層」が発見されており, 2016年熊本地震(M7.3)はその典型的な例である. (Fujiwara et al., 2016) .

### 3.3 伸縮計データ

地震時の歪み変化は, 阿武山観測所の伸縮計により, 振り切れることなく記録され, 各成分では $1.6-1.9 \times 10^{-6}$ strainの大きさであった. 歪み変化の主軸や地震前後の変化との比較は5章において議論する.

## 4. 地震後の地殻変動

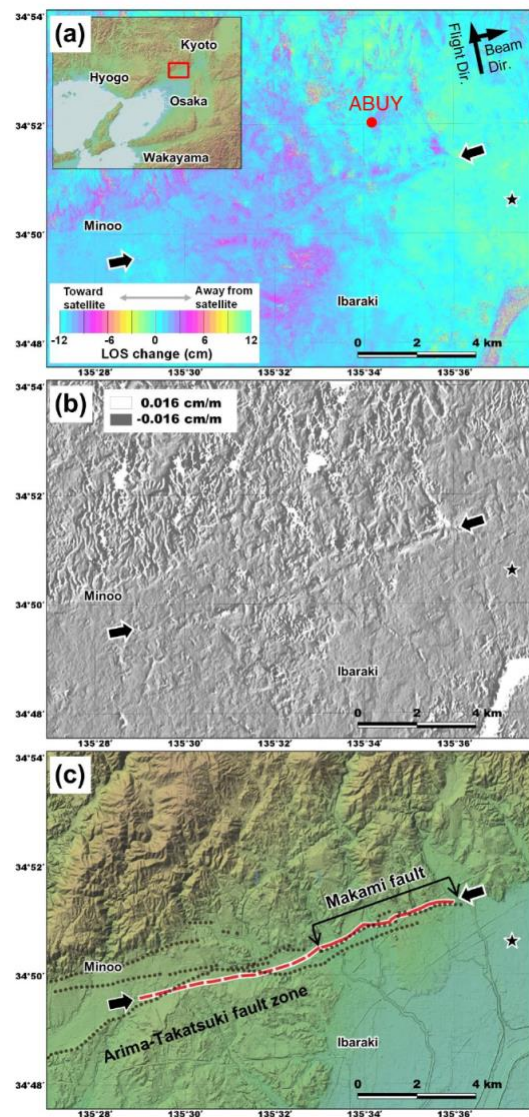


Fig. 6 Local deformation along the Arima-Takatsuki fault (Fujiwara et al., 2020). (a) Interferogram depicting surface deformation. The interferogram was constructed using ALOS-2 data captured between April 9 and June 18, 2018. A displacement lineament exists between the two arrows. The star indicates the epicenter of the main shock. (b) Gradient shade map of line-of-sight displacement. Gradients along  $60^\circ$  and  $150^\circ$  (positive clockwise from north to east) directions were calculated and the one that is larger in magnitude was mapped. (c) Comparison with topography and active faults. The red line indicates a displacement lineament. The red broken line indicates a displacement lineament, the existence of which is uncertain owing to small displacements. Dotted lines indicate known active faults.

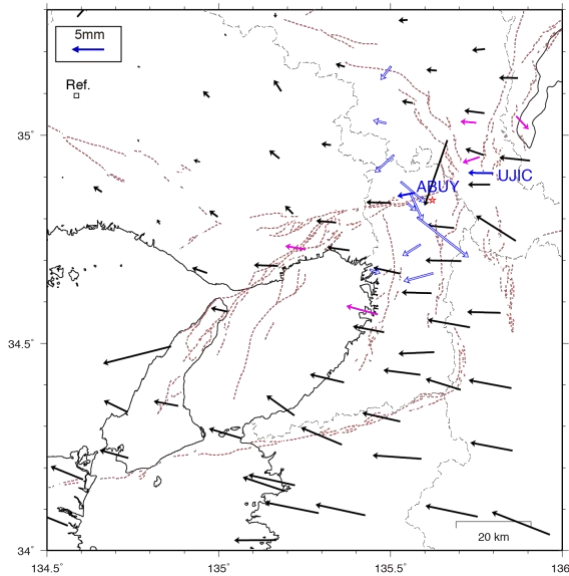


Fig. 7 Horizontal velocity of GNSS stations from June 20, 2019 to June 19, 2020. Blue, black, purple vectors indicate GNSS stations operated by DPRI of Kyoto University, the Geospatial Information Authority of Japan, and collaborative institutions, respectively. Stations represented by open blue vectors were constructed in September, 2019.

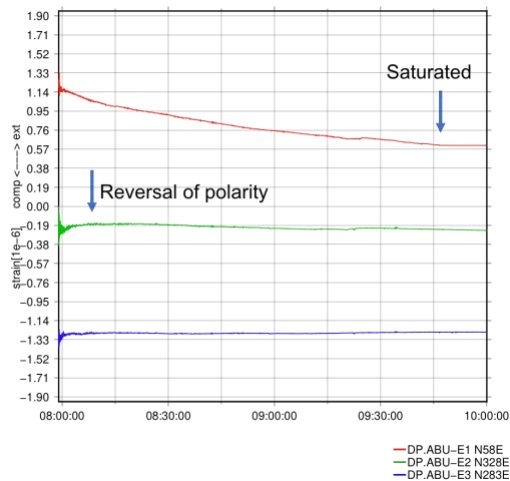


Fig. 8 Strain measured by extensometers at the vault of Abuyama Observatory for two hours after the northern Osaka earthquake.

#### 4.1 GNSSデータと地震後のGNSS観測網の拡充

大阪府北部の地震については、GNSSデータからは地震後の余効変動と考えられるような変動は観測されなかった。地震を契機として震源域周辺や有馬一高槻断層帯に沿ったひずみ集中帯の地殻変動の詳細分布を調べるため、著者らはGNSS連続観測点の新設

を行った (Fig. 7)。まず、地震直後の6月22日に阿武山観測所の屋上に連続観測点 (ABUY) を設置した。そして、2019年の9月から既存の観測点を含めて、有馬一高槻断層帯を横断する南北測線と上町断層帯や生駒断層帯を横断する東西測線上に合計9点の観測点 (Fig. 7の白抜き青矢印) を新設した。これらの観測点に加えて、京都市埋蔵文化財研究所などが管理する近畿地方のGNSS連続観測点5点のデータを常時提供してもらい、地震予知研究センターでルーチ的に解析するシステムを整えた。Fig. 7の矢印は、2019年6月20日からの1年間の日座標値データを線形回帰した測度ベクトルである。概ねFig.1と調和的なベクトルが得られているが、2019年に新設した観測点では観測期間が1年に満たず、年周的な変化も見られるため、周囲と異なる傾向のベクトルが見られる。今後データが蓄積することにより、数年後には詳細な地殻変動分布を議論することが出来ると期待される。

#### 4.2 伸縮計データ

阿武山観測所の伸縮計で記録された地震後の歪み変化をFig. 8に示す。森井 (私信) が示したようにN58°E成分では地震後2時間程度でセンサーの測定範囲外となってしまったが、この成分で地震後の変化が最も大きく、 $5 \times 10^{-7}$ 程度であった。地震時と地震後の変化の極性は、3成分とも同じであるが、N228°E成分については、地震後10分ほどで反転している。震源距離を考えるとこのような極性の反転は、余効変動の主原因が震源断層での余効すべり以外にあることが示唆される。

#### 5. 阿武山観測所の地震前後のひずみに関する考察

阿武山観測所では、大阪府北部地震の前後で興味深いひずみ変化が観測されたが、その原因について考察を行う。まず、地震前24時間、地震時、地震後90分間の伸縮記録から主歪を求めた (Fig. 9)。地震前は、ほぼ南北方向の伸張、地震時は北東-南西方向の短縮と北西-南東方向の伸張、地震後は北東-南西方向の短縮となる。震源断層モデルから計算される主歪はほぼ南北方向の短縮を示し、震源断層の枚数には大きく左右されず (Fig. 9d, 9e)、観測された主歪とは大きさ、方向ともに異なっている (Fig. 9b)。そこでInSARデータから示唆される有馬一高槻断層帯に沿ったすべりが地震時及び地震後のひずみ変化を生じさせている可能性を検討した。Fig.9fは、大阪府北部地震の2枚断層モデルに加えて、Fig.6cの赤線に合うような上端の深さ0.5km、長さ9km、幅2kmの



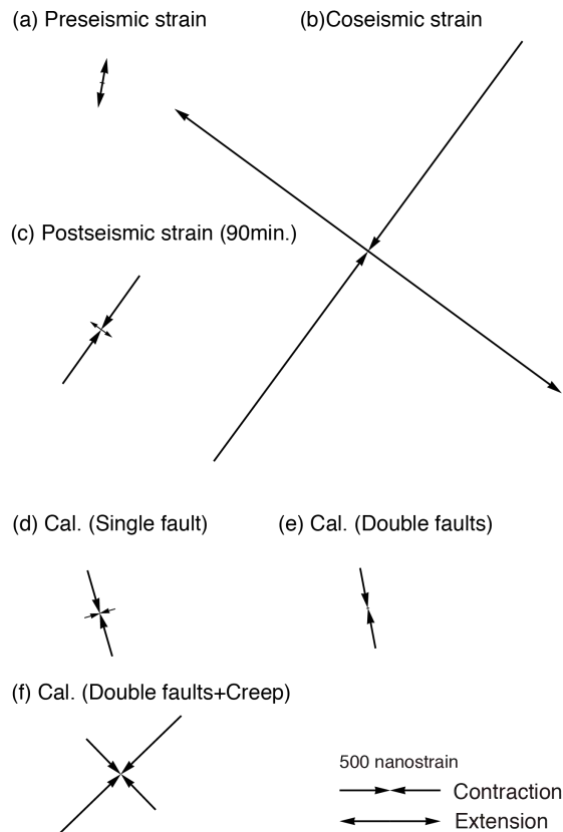


Fig. 9 Observed and calculated principle strain at Abuyama Observatory before and after the northern Osaka earthquake. (a) Preseismic strain for 24 hours. (b) Coseismic strain. (c) Postseismic strain for 90 minutes. (d) Coseismic strain calculated from a single fault model. (e) Coseismic strain calculated from a double fault model. (f) Coseismic strain calculated from a shallow creep and double fault model.

鉛直右横ずれ矩形断層を5cm滑らせたときの主歪変化である。最大短縮方向は概ね合わせることができるが、直交する主歪は観測された伸張に対し、短縮であった。さまざまな断層パラメータを仮定して、ひずみの計算を行ったが、断層位置をSARの変動域として浅部での鉛直右横ずれを仮定する限り、観測された地震時や地震後の歪変化を再現することは難しく、より局所的な影響が大きいと考えられる。

地震前のひずみについても、地震時や地震後のひずみの主軸とは大きく異なっていることや、2018年5月16日頃の変化のように降雨がなくても地震前の変化と似た変化が現れている。よって、地震前の変化と大阪府北部地震の発生を直接関連づける証拠はないといえる。地震前のひずみ変化と大阪府北部地震を関係付けるためには、長期間にわたって類似の歪変化の頻度を調査し、偶然には起きえないという統

計的な有意性を示す必要がある。

## 6. おわりに

大阪府北部地震の地震前、地震時、地震後の地殻変動について、GNSS、InSAR、阿武山観測所の伸縮計のデータを整理し、震源断層モデルの推定と伸縮計データに基づく主歪の解析を行った。大阪府北部地震は、地震前のGNSS観測から明らかになったひずみ速度が大きい「ひずみ集中帯」で発生し、数mmの地震時変動がGNSS観測点で観測された。地震波解析から求められた断層面で観測された変動は説明できる。阿武山観測所の伸縮計では、地震前・地震時・地震後にそれぞれ特徴的なひずみ変化が観測されたが、各期間の主ひずみの方向は期間ごとに大きく異なるものであった。半無限弾性体を用いた震源断層モデルで伸縮計記録を説明するのは困難で、本震の震源断層やInSARデータから示唆される有馬一高槻断層帯浅部でのすべりで地震時や地震後のひずみ変化を説明することはできなかった。

大阪府北部地震の震源域を中心とする京阪神地方の詳細地殻変動を明らかにするため、2019年に有馬一高槻断層帯を横断するような9点のGNSS観測点を新設した。関係機関や防災研既存の観測点を加えると現状ではGEONETに加えて、16点の観測点が整備され、京阪神地方のGNSS観測点は概ね倍増した。これらのデータの蓄積により、詳細な地殻変動が今後明らかになり、ひずみ集中と地震の関連性が明らかになることが期待される。

## 謝 辞

地震後のGNSS観測網の設置及び保守にあたり、京都大学防災研究所拠点研究（一般推進）及び災害軽減のための地震火山観測研究計画（第2次）の支援を受けた。GNSS観測点の設置には、茨木市消防本部、南丹市、亀岡市教育委員会、門真市教育委員会、東大阪市教育委員会、大阪市教育委員会の協力を頂いた。京都市埋蔵文化財研究所、一般財団法人地域地盤環境研究所には、GNSS観測データをオンラインで提供頂き、京都市埋蔵文化財研究所の宮原健吾氏には様々な便宜を図って頂いた。伸縮計データの解析及び図示には、地殻変動データベース (<https://crust-db.sci.hokudai.ac.jp/db/login.php>) を用いた。また、国土地理院GEONETの公開RINEXデータ、気象庁一元化震源を利用した。これらの諸機関や関係者に感謝申し上げる。

## 参考文献

- 浅野公之 (2018) : 2018年6月18日大阪府北部の地震 震源過程・地震動, 土木学会地震工学委員会 大阪府北部の地震調査報告会.
- 岡野健之助・梅田康弘 (1974) : 阿武山地震観測所における地殻変動連続観測, 地震 2, Vol. 27, pp. 262-269.
- 地震調査委員会 (2018) : 2018年の主な地震活動の評価, [https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity\\_annual/major\\_act\\_2018/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity_annual/major_act_2018/).
- 地震調査委員会 (2020) : 主要活断層帯の長期評価, [https://www.jishin.go.jp/evaluation/long\\_term\\_evaluation/major\\_active\\_fault/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/major_active_fault/).
- 西村卓也 (2017) : GNSSデータから見出される日本列島のひずみ集中帯と活断層及び内陸地震, 活断層研究, Vol. 46, pp. 33-39, [https://doi.org/10.11462/afr.2017.46\\_33](https://doi.org/10.11462/afr.2017.46_33).
- 橋本 学 (2014) : 「だいち」合成開口レーダーで観測された京都盆地と大阪平野の地盤変動, 自然災害科学, Vol. 33(2), pp. 115-125.
- 橋本 学 (2019) : SARが見えたもの見えなかったもの: 大阪北部地震と北海道胆振東部地震, 京都大学防災研究所年報, 第62号B, pp. 296-305.
- 松島信一 (2019) : 平成30年(2018年)6月18日の大阪府北部の地震(M<sub>JMA</sub>6.1)の概要とそれによる強震動と被害の特徴, 京都大学防災研究所年報, 第62号A, pp. 35-47.
- 山村紀香・三宅雄紀・坂上 啓・片尾 浩 (2019) : 2018年大阪府北部の地震がもたらした防災意識の変化, 京都大学防災研究所年報, 第62号B, pp. 306-309.
- Fujiwara, S., Yarai, H., Kobayashi, T., Morishita, Y., Nakano, T., Miyahara, B., Nakai, H., Miura, Y., Ueshiba, H., Kakiage, Y., and Une, H. (2016): Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry. *Earth Planets Space*, Vol. 68, 160, <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0534-x>.
- Fujiwara S., Nakano T., and Morishita Y. (2020): Detection of triggered shallow slips caused by large earthquakes using L-band SAR interferometry, *Earth Planets Space*, Vol. 72, 119, <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01239-6>.
- Hallo, M., Opršal, I., Asano, K., and Gallovič F. (2019): Seismotectonics of the 2018 northern Osaka M6.1 earthquake and its aftershocks: joint movements on strike-slip and reverse faults in inland Japan, *Earth Planets Space*, Vol. 71, 34., <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1016-8>.
- Hashimoto, M. (2016): Ground deformation in the Kyoto and Osaka area during recent 19 years detected with InSAR, *International Symposium on Geodesy for Earthquake and Natural Hazards (GENAH)*, IAG Symposia Series, Vol. 145, pp. 155-164.
- Kato, A., and Ueda, T. (2019): Source fault model of the 2018 M<sub>w</sub> 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence. *Earth Planets Space*, Vol. 71, 11, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0995-9>.
- Matsu'ura M., and Hasegawa, Y. (1987): A maximum likelihood approach to nonlinear inversion under constraints, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 47, pp. 179-187.
- Morishita, Y. (2020): An open-source InSAR Time Series Analysis Package LICSBAS and Its Application, Abstract of JpGU-AGU 2020.
- Nishimura, T. (2018): A trial of application of geodetic data for assessing activities of inland faults – Coulomb stress changes estimated from GNSS surface displacements, *J. Disaster Res.*, Vol. 113, pp. 489-495, <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0489>.
- Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T. (2000): Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 157, pp. 2303-2322.
- Shen, Z. K., Jackson, D. D., and Ge, B. X. (1996): Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 101, pp. 27957-27980.

(論文受理日 : 2020年8月31日)