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

What SAR Could See and Could Not See: Northern Osaka and Eastern Iburi, Hokkaido Earthquakes

橋本学

Manabu HASHIMOTO

Synopsis

We processed Sentinel-1 and ALOS-2 SAR images acquired before and after the Northern Osaka and Eastern Iburi, Hokkaido earthquakes to detect coseismic surface deformations. Because of its relatively small size and deep focus, we could not obtain coseismic deformation of the Northern Osaka earthquake. We identified an elliptic area of uplift by ~ 8 cm near the Atsuma town by ALOS-2. This uplift may be caused by faulting of the Eastern Iburi, Hokkaido earthquake. We also found enormous number of belts of intensity changes that may be correlated to landslides in its adjacent area. Coherence and line-of-sight changes were observed at sites of severe liquefaction in the Kiyota ward, Sapporo city. We show the details of the observed surface changes and discuss capability of SAR.

キーワード: 合成開口レーダー, ALOS-2, Sentinel-1, 大阪府北部地震, 北海道胆振東 部地震

Keywords: Synthetic Aperture Radar, ALOS-2, Sentinel-1, Northern Osaka Prefeture earthquake, Eastern Iburi Hokkaido earthquake

1. はじめに

2018 年も国内外で被害地震が発生した. 我が国で は,4月9日に島根県東部でM6.1,6月18日に大阪府北 部でM6.1,そして9月6日に北海道胆振東部地震 (M6.7) が発生した.世界では、2月6日に台湾花蓮 でMw6.1と6.4, 2月25日にパプアニューギニアで M7.5, 5月4日にハワイでMw6.9, 7月28日からインド ネシアロンボク島で2回のMw6.9を含む群発活動が 発生した. さらに, 9月28日にはインドネシアスラウ ェシ島でMw7.5の地震が発生して、津波や液状化・地 すべりなどで大きな被害が発生した. これらの地震 に際して, 日本と欧州の宇宙機関が運用している地 球観測衛星のSAR画像が、災害の空間分布の把握と 現象の理解のために活用されている.ただ、用いる 電波の波長や観測モードの違いにより、その結果に は差異や特徴があり、これらを理解することが研究 の前提条件となる.

ここでは、日本国内で発生した2 つの中規模地震、 大阪府北部の地震と北海道胆振東部地震前後に得ら れたALOS-2 あるいはSentinel-1 のSAR 観測デー タの解析結果を示し、両者の特長やメリット・デメ リットを議論する.

2. 2018年6月18日大阪府北部地震

2018年6月18日7時58分,大阪府高槻市付近を震源 とするM_{jma}6.1の地震が発生し,高槻市などで震度6弱 を観測した [気象庁, 2018a].この地震では6名の方 が亡くなるなど,広域にわたり被害が生じた.震央 付近には,有馬・高槻断層帯や生駒断層帯などの活 断層帯があり,これらとの関係が注目された.Hallo et al. (2019)の解析によると,震源断層面は2つあり, それぞれ有馬・高槻断層帯と生駒断層帯の走向に平 行と推定される.しかし,震源が13 kmとやや深いこ ともあり, GNSSではごくわずかな地殻変動しか観測 されず [国土地理院, 2018a], 測地データから詳細 な断層運動の推定は行われていない.

この地震に際しては,主として Sentinel-1 の IW (Interferometric Wide-Swath) モードの画像を用いた. Sentinel-1 は,欧州宇宙機関が打ち上げた地球観測衛 星で,現在2機が運用されている.1機の再来周期は 12日で,同じ軌道を周回しているために,最短6日 間の間隔で干渉画像を得ることができる.使用して いるマイクロ波がCバンド(波長約5.6 cm)のため, Lバンドに比べ電離層擾乱の影響が小さく,変位の 分解能も高い.山間部や森林地帯での干渉性が低い が,今回の対象領域が都市域であるため,十分なコ ヒーレンスが得られると期待される.今回,Table 1

に示す画像を入手し, Gamma®を用いて干渉処理を

行った. Sentinel-1のIWモードの画像は、3つの帯状領域 (swathという)の観測画像からなる.いずれの軌道 からも2番目のswath (IW2)が大阪平野をカバーす るので、このswathのみを解析した.データのサン プリングの間隔はマイクロ波射出方向(レンジ方向) 2.3m、衛星進行方向(アジマス方向)13.9mであり、 これをそれぞれ23m、28mに平均化(10×2ルック) して位相変化を求めた.Flatteningや大気遅延補正等 の処理は施していない.DEMには、飛田幹男氏・小 澤拓氏によるSRTM4のDigital Ellipsoidal Height Modelを用いた.Flatteningや大気遅延補正等の処理 は施していない.

独立のペアの干渉処理をし、干渉画像をスタック することで、大気遅延等の影響を低減できる可能性 がある. 地震後6月末までに南北両軌道から2回以 上の観測がなされ、地震前の複数の画像と各2つの 独立ペアを構成することができる. ここでは、地震 直近の5月末から6月末までの画像を利用した.

Fig.1に北行軌道からの干渉画像を示す. Fig.1(a) がペア1 (5月24日と6月23日の観測)の干渉画 像, Fig.1(b)がペア2(6月5日と29日の観測)の干 渉画像である.いずれの干渉画像にも,地震時変位 と考えられる明瞭なコヒーレントなシグナルは認め られない.ペア2の干渉画像には、短波長の変化が 見られるが、ペア1にはない.気象庁の観測による と、6月29日の18~19時に大阪で17mmの降雨が あったので[気象庁, 2018b], この影響であろう. Fig. 2は、南行軌道からの干渉画像である. Fig. 2(a)がペ ア3(5月30日と6月23日の観測)の干渉画像, Fig. 2(b)がペア4(6月11日と29日の観測)の干渉画像 である.ペア4の干渉画像には,桂川・宇治川・木 津川の合流地帯(135.7°N, 34.9°N付近)で、視線距 離伸長が認められる. 地盤が軟弱な地域であり、ま た堤防天端の損傷の報告もある.しかし、ペア3に はそのような変動は認められないので、大気の擾乱 による見かけの変動と考えられる. その他の地域で も 1 cm 前後の局所的な閉じた縞模様が散見される が、独立なペアの干渉画像において対応する変化が 検出されないので、地表面の変動とは考えにくい.

4 つの干渉画像を Branch cut 法 [Goldstein et al., 1988] でアンラップ処理し,軌道毎に平均を計算し た.その結果を Fig.3 に示す.Fig.3(a)は北行軌道, Fig.3(b)は南行軌道のアンラップ干渉画像の平均で ある,北行軌道の干渉画像では視線距離変化は-4~ +2 cm,南行軌道では 0~+4 cm の範囲に収まってい る.しかしながら,震央周辺には地震性地殻変動と 考えられる視線距離変化のパターンは認められない. 今回の地震は震源が深く,規模も小さいため, SAR で の地表変位の検出は困難であったと考える.

Table 1.	Statistics of the pair of S	entienl-1 SAR images	acquired before and	d after the 2018 No	orthern Osaka I	Earthquake
used in th	nis study					

Pair	Acquisition before	Acquisition after	Local	Ouhit	Incidence angle	Perpendicular
	the Event	the Event	Time	Orbii	(Swath)	Baseline
1	May 24	June 23	18:00	Ascending	39.2°(IW2)	89.9 m
2	June 5	June 29	06:00	Ascending	39.2°(IW2)	60.4 m
3	May 30	June 23	06:00	Descending	39.2°(IW2)	51.7 m
4	June 11	June 29	18:00	Descending	39.2°(IW2)	18.4 m



Fig. 1. Sentinel-1 interferograms acquired on ascending orbits. (a) Interferogram derived from the pair of images on May 24 and June 23, 2018. (b) Interferogram derived from the pair of images on June 5 and 29, 2018. Area with lower coherence than 0.7 (almost mountainous area). Red star indicates the epicenter determined by JMA. Black and yellow arrows denote directions of flight and emission of microwave, respectively. Solid lines are surface trace of active faults in Active Faults Database in Japan by AIST (2005).



Fig. 2. Sentinel-1 interferograms acquired on descending orbits. (a) Interferogram derived from the pair of images on May 30 and June 23, 2018. (b) Interferogram derived from the pair of images on June 11 and 29, 2018. See also the legend of Figure 1.



Fig. 3. Averaged unwrapped interferograms of two independent pairs of Sentinel-1 SAR images. (a) Interferogram for ascending images. (b) Interferogram for descending images. Negative values correspond to range increase.

3. 9月6日北海道胆振東部地震

2018年9月6日,台風21号が北海道を通過した直後, 日高山地の西麓,深さ約37kmを震源とするM6.7の地 震が発生した[気象庁,2018c].この地震により厚 真町の地すべりや札幌市清田区の地盤液状化等によ り死者42名,全壊家屋462棟という大きな被害が生じ た[消防庁,2019].さらに,苫東厚真火力発電所が 停止し,これが引き金となって全道にわたり大規模 停電が発生した.

北海道胆振東部地震については主としてALOS-2 データの解析を行った. Sentinel-1 データも解析した が, コヒーレンスが低く明瞭な干渉縞を得られなか った.

ALOS-2 の観測は、南行軌道で1 回、北行軌道で3 回の観測がなされた.それぞれGamma®と飛田氏・小 澤氏による国土地理院10m メッシュのDigital Ellipsoidal Height Model を用いて干渉処理を行なっ た.干渉画像はFlattening 処理を行い、Branch cut法 でアンラップした後、2 方向からの画像を用いて、 東西および上下成分に変換した.解析したALOS-2画 像のペアのリストをTable 2に示す.Sentinel-1と異な り、ALOS-2は左右両方向の観測があるため、同じ軌 道であっても視線方向が反対になるケースもあるの で注意を要する.

Fig. 4aは,南行軌道8 月23 日と9 月6 日のペアと 北行軌道8 月25 日と9 月8 日のペアの干渉画像か

ら, Fujiwara et al.(2000)の手順で作成した準上下変動 図である. 厚真町の東側, 震央のすぐ南を中心に楕 円形の隆起域が認められる.最大隆起量は約8 cm で ある. 石狩低地東縁断層帯の南部を境に, 西側が沈 降しているが、この地域の軟弱な地盤の影響も考え られる.一方,震央の東側に東向き,西側に西向きの 変位が見られる (Fig. 4b). この変位のパターンは, 高角の逆断層運動により説明できる [例えば,国土 地理院, 2018b; Kobayashi, T. et al., 2019; Kobayashi, H. et al., 2019]. ただ, 単純な逆断層を仮定して地表 変位シミュレートした. 深さの影響を調べるために 上端が15 kmと25 kmに変え,隆起の最大値が概ね同 じになるようにすべりを調整すると(0.5mと1.0m), 地表変位のパターンに大きな変化は見られない(Fig. 5). 深さ25 kmの方が変動域が広いが, SARの観測誤 差を考慮すると、有意な差といえない.深さ25kmの モデルでMw6.7(剛性率33GPaを仮定)となる(深さ 15kmのケースではMw6.5). 地震モーメントなどの 情報を先験的情報として加えて、解くことも考える べきであろう.

前述のとおり、この地震に伴って厚真町での地す べりと札幌市清田区における液状化など深刻な地盤 災害が発生した. SAR はこのような地盤災害の面的 な分布を得るために最適のツールの一つである. こ の目的には、受信された後方散乱波の強度と、これ と位相情報を組み合わせたコヒーレンスの変化が主 として用いられる.

	Acquisition	Acquisition	Orbit	Incidence	Perpendicular	Polarization	Look
	before the	after the		angle	Baseline		Direction
	Event	Event					
P18- 2750+3	June 14	August 23 ^{*)}	Descending	36.2°	-238 m	НН	Right
	June 14	September 20	Descending	36.2°	-245 m	НН	Right
	August 23	September 06	Descending	36.2°	69 m	НН	Right
	August 23	September 20	Descending	36.2°	-8 m	НН	Right
	September 06	September 20	Descending	36.2°	-77 m	НН	Right
P122- 850	August 25	September 8	Ascending	31.1°	-70 m	HH/HV/VH/VV	Right
P116- 890	July 26	August 9*)	Ascending	43.0°	8 m	НН	Left
	August 9	August 23*)	Ascending	43.0°	77 m	HH	Left
	August 23	September 6	Ascending	43.0°	36 m	HH	Left

Table 2. Statistics of the pair of ALOS-2/PALSAR-2 images acquired before and after the 2018 Eastern Iburi Hokkaido Earthquake used in this study. +3 means scene shift of +3. *) shows pre-event images used for the computation of average coherence before the earthquake.



Fig. 4. Results of 2.5-D analysis of the coseismic interferograms spanning the Eastern Iburi Hokkaido earthquake. Unwrapped interferograms of P122 (Ascending) and P18 (Descending) are used for processing. (a) Quasi-vertical component. (b) Quasi-E-W component. Red star shows the epicenter. Green lines are surface traces of active faults registered in AIST(2005). Red color corresponds to uplift/easting in each figure.



Fig. 5. Simulated coseismic displacements for two dislocation models with different depth of top margin and slip. Length and width are 20 km and 20 km, respectively. Dip angle is set to 65° and purely thrust is assumed. (a) Depth is 15 km and slip is 0.5 m. (b) Depth is 25 km and slip is 1.0 m.



Fig. 6. (a) Coseismic interferogram (P116-F890) that covers southern Sappro city. Black and yellow arrows indicate direction of flight and emission of microwave, respectively. (b) Coherence change ($\Delta \gamma$) of interferograms of P116-F890. $\Delta \gamma$ is larger than 0.2 in red regions, which means coherence decrease during the earthquake. Average coherence before the earthquake is lower than 0.7 in grey region.



Fig. 7. Color composite of intensity images of P122-F850. Red, green and blue are assigned to HH, HV and VV polarized images, respectively. (a) Image of August 25, 2018. (b) Image of September 8, 2018.



Fig. 8. Color composite of change of intensity. Red and cyan (green + blue) are assigned to preseismic and coseismic intensity images, respectively. (a) HH, (b) HV, and (c) VV polarizations.

コヒーレンスは植生や構造物の変化,さらには列 車などの移動などいろいろな原因で変化するため, 単純な2期間のペアで議論するのは危険である.その ため、イベントが発生する前のペアのコヒーレンス とイベントを挟むペアのコヒーレンスを比較するこ とがなされる. Karimzadeh and Matsuoka (2018)は、地 震前の1ペアと地震を挟むペアのコヒーレンスの比 較を行っている.ここでは札幌市清田区をカバーす るP116の画像を2018年7月まで遡って収集・解析し、 地震前のコヒーレンスの平均を計算した.これと地 震を挟む期間のコヒーレンスと比較した.Watanabe et al. (2016)にならい、地震前のコヒーレンスの平均 を $\bar{\gamma}_{pre}$,地震時のコヒーレンス変化を γ_{co} とすると、

$$\Delta \gamma = \frac{\bar{\gamma}_{pre} - \gamma_{co}}{\bar{\gamma}_{pre} + \gamma_{co}}$$

を計算した. $\Delta \gamma \delta T CO (interpretation of the set of the$

ー領域は、貨物列車の操車場で、列車の頻繁な移動 によりコヒーレンスが低い.地形に沿った赤い帯が 認められ、液状化の発生と地形に相関があることが 示唆される.ただし、山地や緑地にもコヒーレンス の低下が見られ、これらと実際に液状化被害が生じ たところとの判別について課題が残る.

強度の変化からは,厚真町の土砂災害がマップさ れる. ここでは, ALOS-2/PALSAR-2のFull Polarimerty mode (FP6)の画像解析結果を示す.このモードは、水 平/垂直偏波を射出し, それぞれの後方散乱波を受 信するもので、偏波の組み合わせにより4通りの画像 が得られる.また、1回の観測の強度画像に対して加 色混合法を適用すると,地表面の植生や土地利用に 関する情報が得られる [例えば, 大内, 2009]. ここ では、HHを赤、HVを緑、VVを青で着色し重ね合わ せたものを示す. Fig.7aが地震前の8月25日, Fig.7bが 地震後の9月8日の偏波強度の加色混合画像である. 山地はほぼ緑がかった灰色をしている. これは樹冠 での体積散乱により, HV偏波の後方散乱波が一定の 強度を持っているためと考えられる.一方,9月8日 の画像では、厚真川中流域両岸の約200 km² にわた ってピンク色の領域が顕著となる. HH偏波とVV偏 波が相対的強くなったことを示す. HH偏波やVV偏 波は裸地において強く散乱されることから、これら

の地域の樹木がなくなった,すなわち斜面崩壊が生 じたことを示唆する.Fig.8a~cは,HH,HVおよびVV 偏波の強度の加色混合画像である.ここでは,地震 前8月23日の強度画像を赤,地震後9月8日の強度画像 を水色(緑+青)に着色している.Fig.8aと8cでは, Fig.7bのピンク色の領域と同じ場所で,水色が卓越 する.すなわち,地震後の後方散乱波の強度が上が ったことを示しており,これもやはり裸地が現れた ことと調和的である.一方,HV偏波のFig.8bでは, 同じような色の変化は認められず,HV偏波は斜面崩 壊などの地表面の変化の検出には適していないと考 えられる.

Fig.9は国土地理院(2018b)による斜面崩壊・土砂 堆積分布図である.この図は空中写真を中心とした 調査結果をまとめたもので,グランドトゥルースと して適当と考える.例えば,Fig.10や12の強度変化の 画像と比較すると,概略は一致する.しかし,国土地 理院の調査により判別された斜面崩壊の空間密度は, Fig.8aまたは8cの水色の領域に比べて圧倒的高い.こ れは,SARの場合,斜め上空から観測するため,シャ ドーとなる反対側の斜面の情報を得られない欠点か ら生じているものと考える.したがって,SAR観測を 山地における斜面崩壊等検出に用いるためには,複 数の方向からの観測結果を組み合わせることが望ま しい.



Fig. 9. Compilation of surveyed results of slope failure and soil deposits by Geospatial Information Authority (2018b) mainly based on aerial photos.

3. 議論

2018年の2つの中規模地震前後のSARデータを解析 し、地表面変動や斜面崩壊の検出を試みた.これら の経験を踏まえ、課題を抽出する.

まず,今回の2つの地震は規模に対して,震源がや や深いという特徴があった.2016年鳥取県中部の地 震(Mw6.2)で,2018年の地震よりは小さかったが,震 源が浅かったことから,ALOS-2により地表面変動が 検出され,断層モデルの推定もなされた[Menesez-Gutierrez et al.,2019].大阪府北部の地震は震源の深 さが17 kmと内陸地震としては深い上に,規模が M_{jma}6.1では,断層運動による地表変位が現れないこ とは妥当であろう.Hallo et al.(2018)は,強震動記録 と余震分布を用いて2つの断層面を推定している.や はり,このような条件下では,測地データの寄与す るところは小さく,地震学的データが主にならざる を得ない.

大阪府北部の地震では、地表変位が小さいことが 予想されたため、波長の短い(変位の分解能が高い) CバンドのSentinel-1を主として解析した.しかし、 Fig.1bに見られるように、対流圏の擾乱が激しい場合 は、解釈が難しい.そのため、複数の独立ペアの干渉 画像をスタックする試みを行った.今回は地表変位 そのものが小さかったため検出できなかったが、熊 本地震クラスになる余効変動も大きくなるため、地 震前後どの程度の期間のデータを用いるべきか、明 らかな基準はない.地震の規模、予想される変動の 大きさ・空間的な広がりなどを考慮して、経験的に 決めていくしかないと考える.

北海道胆振東部地震については,先行する国土地 理院(2018b), Kobayashi, H. et al.(2019)および Kobayashi, T. et al.(2019)は,深さ37 kmの震源よりも 浅いところで主破壊が起きたとしている.では,こ の破壊がどこまで浅いところまで届いているか? Fig. 5に示したように,深さとすべり量にtrade-offが あり,測地データのみから一意的に推定することは 難しい.したがって,ここでも地震学的データの活 用が不可欠となる.ただ,当該地域は構造が複雑な ところであるため,不均質構造を仮定したモデル化 が必須である.そもそもこのように高角の逆断層運 動がなぜ起きたのか,という疑問も残る.この疑問 に対する回答を得るためにも,不均質構造を取り込 んだモデリングが望まれる.

斜面崩壊や液状化等の地盤災害の検出に,SARが 有益な情報を提供しうることが確認された.ただし, 特に斜面崩壊に関しては,地形によるシャドーの関 係で,複数の異なる方向からの観測が望ましいとい える.今回,北海道胆振東部地震に際しては,最初の 観測が地震発生当日9月6日の12時ころに行われてい る.発生から9時間弱後に観測されている.国土地理 院による正式な解析結果の公表は9月10日である[国 土地理院,2018b],おそらく当日夜には暫定結果は 得られていたと推定される.ただ,今回試したコヒ ーレンス変化の検出に,地震前の複数回の観測の平 均を用いる場合は,多くの画像を収集し,計算しな ければならない.一般のユーザーがアーカイブされ ているSAR画像を収集する場合は,JAXAのサイトを 検索・発注し,ダウンロードすることになるため,か なり時間を要する.発災後の諸活動に貢献するため には,あらかじめ注目すべき地域を特定しておいて, 事前にコヒーレンス変化等を計算しておくなど,処 理時間の短縮が不可欠である.

4. まとめ

2018年に発生した2つの中規模地震に伴う地表変動の検出のため、Sentinel-1及びALOS-2のSAR画像を 収集し、解析した.その結論を以下にまとめる.

(1) 6月18日の大阪府北部の地震については,規模 が小さく震源が深かったため,波長の短いSentienl-1 を用いたが有意な変動を検出できなかった.

(2) 9月6日の北海道胆振東部地震については, ALOS-2により,最大8cm程度の隆起を検出した.逆 断層運動で説明可能であるが,深さとすべり量に trade-offがあるため,SARのみではモデル一意的に決 めることは難しい.

(3)北海道胆振東部地震に伴って発生した斜面崩壊は SARの強度画像の加色混合法により,検出可能であ る.ただし,HHおよびVV偏波は感度が高いが,HV 偏波はこの目的には適さない.また,空中写真判読 に比べて抽出される面積が小さい.これは地形によ るシャドー等の影響が考えられ,複数の方向からの 観測結果を組み合わせることが望ましい.

(4)札幌市清田区の液状化被害地域において, SARの 干渉画像とコヒーレンス変化から,被災地域の同定 が可能であることを示した.ただ,同じ画像中の山 地部においてもコヒーレンス低下が認められ,これ らとの識別に課題が残る.

謝 辞

使用した Digital Ellipsoidal Height Model は、東京 大学地震研究所共同利用特定共同研究「SAR を用い た多角的な地殻・地表変動研究」(課題番号 2018-B-02,研究代表者:高田陽一郎)において提供されまし た.ALOS-2/PALSAR-2 画像は、宇宙航空研究開発機 構(JAXA)「陸域観測技術衛星の防災利用実証実験」 地震予知連絡会 SAR 解析 WG(事務局国土地理院) および前記東京大学地震研究所共同利用特定共同研 究「SAR を用いた多角的な地殻・地表変動研究」の 活動の一環として, JAXA より提供されました. Sentinel-1 データは欧州宇宙機関の Copernicus プロジ ェクトにより公開されているものを使用しました. 関係各位に感謝申し上げます.

参考文献

- 大内和夫(2009): リモートセンシングのための合成 開ロレーダの基礎[第2版],東京電機大学出版局, 371pp.
- 気象庁(2018a): 2018年6月18日の震源リスト, https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/20 180618.html, 2018年12月3日アクセス.
- 気象庁(2018b):大阪2018年6月29日(1時間ごとの 値),
- https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_ s1.php?prec_no=62&block_no=47772&year=2018&mo nth=6&day=29&view=, 2018年12月3日アクセス.
- 気象庁(2018c):平成30年9月6日03次08分頃の胆振地 方 中 東 部 の 地 震 に つ い て ,
- https://www.jma.go.jp/jma/press/1809/06a/2018090605 10.html, 2019年6月17日アクセス.
- 国土交通省近畿地方整備局 (2018):平成30年6月18日 大阪府北部を震源とする地震による河川被害と対応 《第8報 6月30日 17時現在》, https://www.kkr.mlit.go.jp/news/river/disaster/2018/ol9 a8v000000ya62-att/ol9a8v000000zb8v.pdf, 2018年12 月3日アクセス.
- 国土地理院(2018a):平成30年(2018年)大阪府北部 を 震 源 と す る 地 震 に 関 す る 情 報, https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-osaka-earthquakeindex.html, 2019年6 月17日アクセス.
- 国土地理院(2018b): 平成30年(2018年)北海道胆振 東部地震に関する情報, https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburieast-earthquake-index.html, 2019年6月17日アクセス. 産業技術総合研究所(2005):活断層データベース, https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html, 2018 年12月3日アクセス.
- 消防庁(2019):平成30年北海道胆振東部地震による 被害及び消防機関等の対応状況(第34報),
 https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/saigaizyoho
 u 07.pdf, 2019年6月16日アクセス.
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., and Rosen P. A. (2000): 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected

by SAR interferometry, Geophys. Res. Lett., Vol. 27, No. 14, pp.2049-2052.

- Goldstein, R.M., Zebker, H. A., and Werner C.L. (1988): Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping, Radio Science, Vol. 23, No. 4, pp.713-720.
- Hallo, M., Oprsal, I., Asano, K., and Gallovic, 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, No. 34, https://doi.org/10.1186/s40623-019-1016-8.
- Karimzadeh, S., and Matsuoka, M. (2018): A Weighted Overlay Method for Liquefaction-Related Urban Damage Detection: A Case Study of the 6 September 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Japan, Geosciences, Vol. 8, No. 487, doi:10.3390/geosciences8120487.
- Kobayashi, H., Koketsu, K. and Miyake, H. (2019): Rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake derived from strong motion and geodetic data,

Earth, Planets Space, Vol. 71, No. 63, https://doi.org/10.1186/s40623-019-1041-7.

- Kobayashi, T., Hayashi, K., and Yarai, H. (2019): Geodetically estimated location and geometry of the fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, Earth, Planets Space Vol. 71, No. 62, https://doi.org/10.1186/s40623-019-1042-6.
- Meneses-Gutierrez, A., Nishimura, T., and Hashimoto, M. (2019): Coseismic and postseismic deformation of the 2016 Central Tottori earthquake and its slip model. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124, pp.2202–2217. https://doi.org/10.1029/2018JB016105.
- Watanabe, M., Thapa, R. B., Ohsumi, T., Fujiwara, H., Yonezawa, C., Tomii, N. and Suzuki, S. (2016): Detection of damaged urban areas using interferometric SAR coherence change with PALSAR-2, Earth Planets Space, Vol. 68, No. 131, doi:10.1186/s40623-016-0513-2.

(論文受理日: 2019年6月17日)