

### 12-3 ALOS-2 の SAR で見つかった平成 28 年熊本地震による地表断層群 Groups of linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake detected by ALOS-2 SAR

藤原 智 (国土地理院)

Satoshi Fujiwara (Geospatial Information Authority of Japan)

#### 1. はじめに

熊本地震では地表の広範囲で地殻変動による変位が生じた。また、地震に伴い地表では多くの地表地震断層と考えられる亀裂が出現しており、地上調査や空中写真判読によって確認されている。地表変位の大部分は主たる地震を引き起こした震源域の断層運動で説明できるものの、地表にはより小さく複雑な変位が数多く現れており、地表に現れた断層（地表断層）の分布とその成因はその地震がどのように発生しているのかといった地震像を明らかにすることに大いに役立つ。しかしながら、地上での観測だけからは網羅的かつ詳細に調査することは困難である。

本稿は、人工衛星の合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar）（以下「SAR」という。）を用いた干渉 SAR と呼ばれる技術を利用して地表断層を抽出するものである。宇宙からの観測によって、面的に見落としなく地表変位の位置を求め、さらに変位方向、変位量や変位の空間的広がりを解析することができるため、干渉 SAR は地表断層の成因を推定する強力なツールとなっている。なお、本稿の記載の詳細については Fujiwara et al. (2016)を参照されたい。

#### 2. 地表断層の検出

国土地理院では、JAXA が運用する人工衛星「だいち 2 号」を用いて、SAR 干渉画像を複数解析し、地表の変位の空間分布を求めている。ここで、複数の SAR 干渉画像に現れる細かなリニアメント（線状の変位）を抽出しマッピングを行った。リニアメントをはさんだ変位量の差は小さいものでは数 cm 程度であり、地上の調査ではまず見つからないものがほとんどである。第 1 図に、地下の断層の動きが地表近くでどのように現れるのかを断層の断面図として模式的に示した。(a)のように地表まで断層が直接到達すれば、明瞭な線状の不連続が地上に現れるため、その判別は容易であろう。しかしながら、実際には(b)のように地表近くまで断層運動があったとしても、表層を形成する堆積層等を断層が直接切らなかった場合には、地表に断層断面が直接露出するのではなく、地表面では緩やかに曲がった撓曲（とうきょく）として現れるものが多いため、地上の調査で見つけるためにはよほど変位量が大きくなければならない。さらに(c)のように、地表面が断層運動で圧縮されたり引っ張られたりすることで、副次的な亀裂等が生じる場合がある。亀裂は断層運動と密接に関連しているものもあるが、断層とは関係なく局所的な地盤移動等で亀裂が生じる場合も多く、そうしたものを断層であると誤認してしまう可能性がある。SAR を用いることで、撓曲や亀裂等があっても、純粋に面的な変位の分布を得ることができるために、地震に伴い発生した地表断層の検出に適している。

第 2 図は、干渉 SAR で得られた画像を複数枚使用し、地殻変動が線状に不連続となっている場所を抽出したものである。地表には変位量は小さくとも細かい線状の変位が数多くあることがわかった。本稿では地表の変位がリニアメントとして存在するものを地表断層と呼ぶことにするが、地表断層（地表の直線状のずれ）と震源断層（主要な地震動を引き起こした断層）は必ずしも直接関係

しないことに注意が必要である。こうした地表断層の数は 230 本程にも及び、熊本地震による地殻変動が特異であったことがわかる。

### 3. 阿蘇カルデラ北西部の地表断層群

今回出現した地表断層は場所ごとに特徴が異なり、それぞれグループ（群）に分けることができる。こうしたグループの中で、数が多いこと、変位量が大きいこと、そして変位の形態が揃っていることから最も目立つのが、阿蘇カルデラ北西部のグループである。変位の分布をわかりやすく表現するため、複数の SAR 干渉画像を組み合わせた 3 次元解析を実施し、広域にわたる変位を取り除くためにハイパスフィルターをかけた上下方向の変位分布を第 3 図に示す。このグループでは、地表断層が西北西-東南東の走向を持ち、ほとんどが縦ずれの正断層の変位を示している。地表断層を挟んだ変位量の差は最大で 50cm 程である。このグループはさらに 2 つのグループに細分され、北西側では地表断層（青線）を挟んで南側落ち、南東側では地表断層（赤線）を挟んで北側落ちの変位を示す。隣り合う地表断層同士の間の変位はスムーズにつながっており、地表断層の場所で変位が不連続となっている。

第 3 図中の地点①では北側落ちの断層状の亀裂が（第 4 図左）、地点②では道路及び河川擁壁において南側落ちの亀裂（第 4 図右）が確認できた。このように、わずか 500m 離れた 2 地点間で上下変位の向きが反転しており、3 次元解析結果と調和的な結果となった。このように、地表面が一面の芝生であったり、アスファルトやコンクリート等で覆われていたりすると、変位量が数 10cm 程度あれば、直線的に段差が連なっているのがいくつか確認できた。しかし、地表断層の多くは山間部の樹木の多い場所に存在しており、実際に現地で確認できるものは数が少なく、SAR を利用しないと検出は困難であった。

阿蘇カルデラ北西に現れた地表断層群の変位の南北断面を第 5 図に示す。のこぎりの歯状の変位が連なっており、二つのグループの境界で、のこぎりの歯の向きが反転している。このようなのこぎりの歯状の変位は、水平方向に引っ張られてできる正断層に区切られた半地溝と呼ばれる地形が整然と列をなしていると考えられる（第 6 図）。

### 4. 地形と活断層

熊本地震に伴って出現した地表断層のうち、多くは布田川断層帯及び日奈久断層帯で震源断層となった断層から離れた場所にあるために、震源断層によって生じた二次的な応力や強震動によって発生したと考えるのが自然である。第 3 図に示すように、見出された地表断層のいくつかは既知の活断層と一致しており、本震もしくは余震によって地質的な弱面である断層面が誘発されて動いたと考えられる。つまり、本震等を引き起こした震源断層の地表延長としてではなく、地表面近くの応力等の解放のため、既存の弱面としての断層やその周囲がしわのように割れ目となったものが大部分であると考えられる。こうした、地震による地表断層の出現と地形（活断層）との相関は平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震（藤原ほか、2000）や平成 10 年（1998 年）の岩手県内陸北部地震（Fujiwara et al., 2000）においても見出されている。

今回出現した地表断層の変位量は大きくとも数十 cm 程度である。既知の活断層はその地形から判読されていることから、少なくとも地表断層に沿った数 m 以上の変位の蓄積が過去にあったはずであり、地質学的歴史の中で何回も同様な変位を繰り返したからこそ、今回発生したような地表変位が累積して断層地形として認識されるまで育ったといえる。ここで注目すべきは、過去に同様な

変位が繰り返し発生していたとするならば、今回のように地震動を引き起こさずとも、「活断層」と認識できる地形を形成しうることである。つまり、「活断層は過去の地震の痕跡で、将来も同様な地震を引き起こしうる」という前提に大きな疑問が生じることになり、「活断層」とは何なのかについて、現象としての理学面だけでなく、対策側の防災面で共通に使えるように再定義が必要かもしれない。

## 5. まとめ

人工衛星から SAR を用いて地殻変動を観測することで、今まで知られることがなかった約 200 本を超える小変位の地表断層を求めることができた。これらの断層の分布とそれぞれの変位はこの地域の地震活動や応力場を理解するための重要な手がかりとなる。

地表断層には、震源の断層が地表に直接出現したものだけではなく、震源の断層から枝分かれしている副次的な断層や誘発されて地質的な弱面が地すべりのように動いているものもある。これらの中でも特徴的なのは、阿蘇カルデラ北西部に現れた、お互いにほぼ平行な断層群である。これらの中には、過去に繰り返し発生した地殻変動が累積して、その地形から断層であると認識されていたものもあるが、今回の地震で自ら地震動を出した形跡はなく、熊本地震に誘発されて何らかの形でお付き合いした「動かされる断層」であった。つまり、地震の原因となる断層だけではなく、地震によって動かされた結果にしかすぎない断層も数多く存在することがわかった。

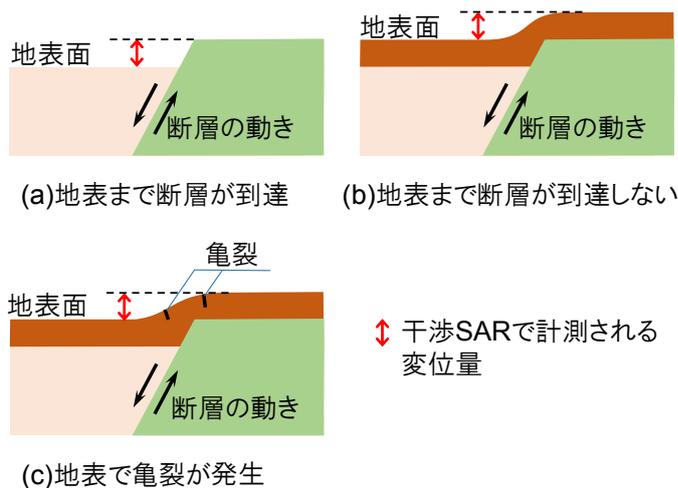
こうした小変位の地表断層を広域でもれなく見出すことに関して、宇宙からの SAR 技術は従来の地表での調査や空中写真の判読よりもはるかに優れたツールであり、地震や火山といった自然現象のみならず、地表面に変動をもたらす様々な現象の解明に今後も活用が期待される。

## 謝辞

ここで使用しただいち 2 号の原初データの所有権は、JAXA にあります。これらのデータは、だいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定及び地震予知連絡会 SAR 解析ワーキンググループを通じて提供されました。

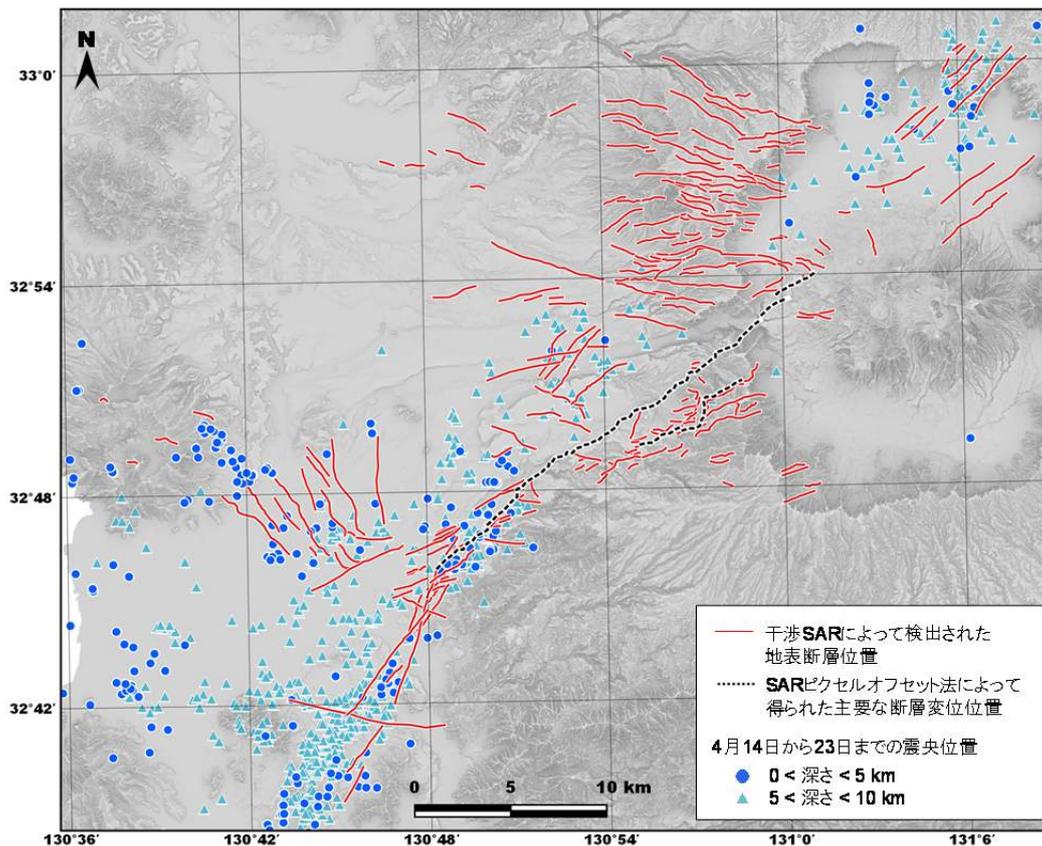
## 参 考 文 献

- 1) 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, 2049–2052.
- 2) 藤原智, 小沢慎三郎, 村上亮, 飛田幹男 (2000) 干渉 SAR によって得られた地表変位の勾配解析による 1995 年兵庫県南部地震の地表断層位置推定, *地震* 2, 53, 127-136.
- 3) Fujiwara S, H Yurai, T Kobayashi, Y Morishita, T Nakano, B Miyahara, H Nakai, Y Miura, H Ueshiba, Y Kakiage, and H Une (2016) Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, *Earth, Planets and Space*, 68(1), doi: 10.1186/s40623-016-0534-x
- 4) 藤原智, 矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 中埜貴元, 宇根寛, 宮原伐折羅, 仲井博之, 三浦優司, 上芝晴香, 攪上泰亮 (2016) だいち 2 号干渉 SAR による熊本地震で生じた小変位の地表断層群の抽出, *国土地理院時報*, 128, 147-162.



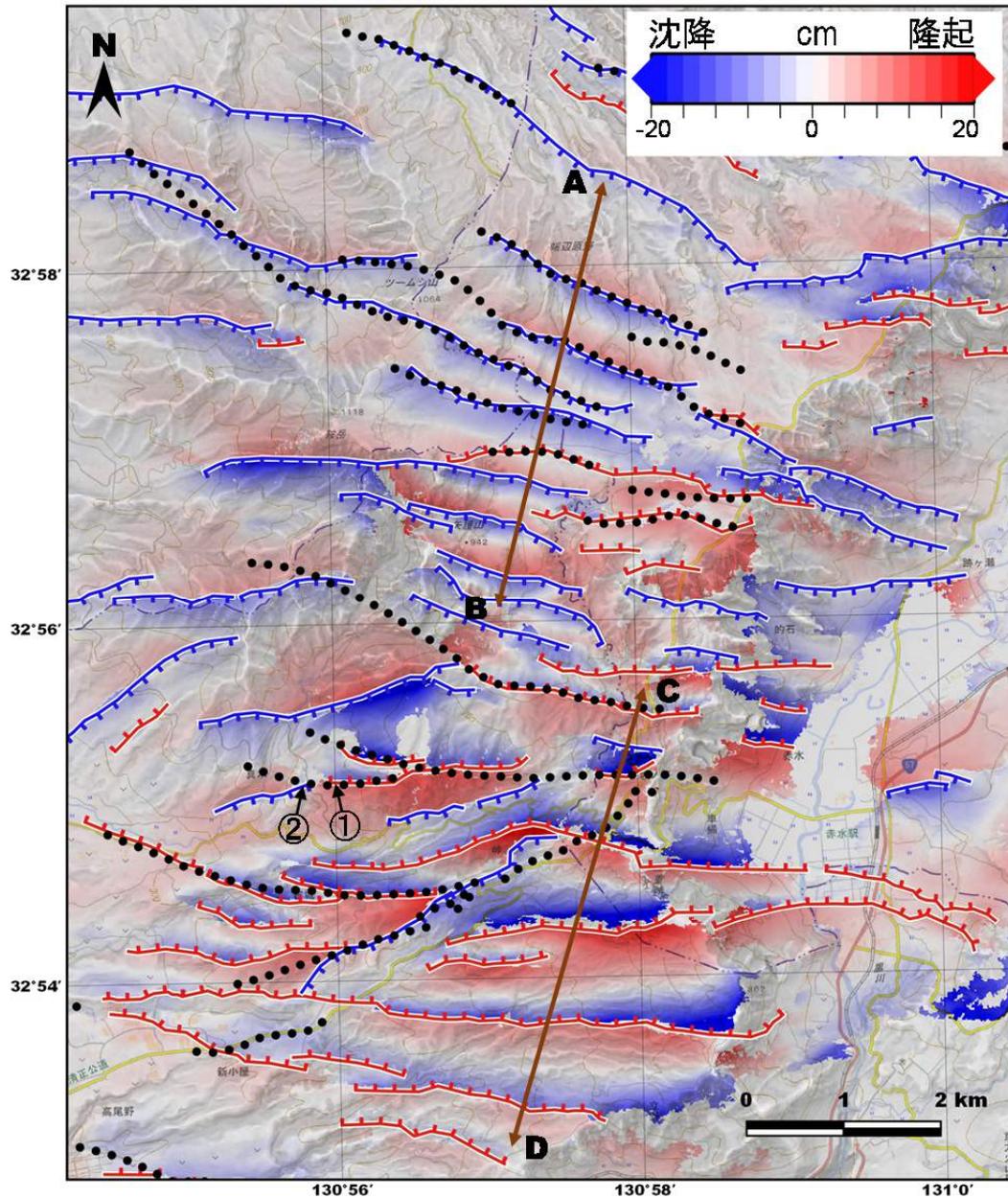
第1図 地表で観測される断層の変位量と断層の動きの関係。それぞれ断層の走向に直交する鉛直断面を示す。

Fig. 1 Schematic explanation of relationship between fault displacement and fault motion observed at the surface. Each shows a vertical section orthogonal to the strike of the fault.



第2図 抽出された地表断層。赤線が抽出された地表断層位置を表す。黒点線は SAR 画像の画素自体の変位に明瞭な食い違いが見られた場所を表す。三角 (深さ 5~10km) と丸 (深さ 5km 未満) は 4 月 14 日から 23 日の間に発生した地震の震央位置を示す。

Fig. 2 Identified linear surface ruptures. Red solid lines show identified linear surface ruptures identified by the InSAR images. Black dotted lines shows clear linear surface ruptures identified by SAR pixel offset images. Small circles (depth < 5km) and triangles (10km > depth > 5km) show epicenters from Apr. 14 to Apr. 23.

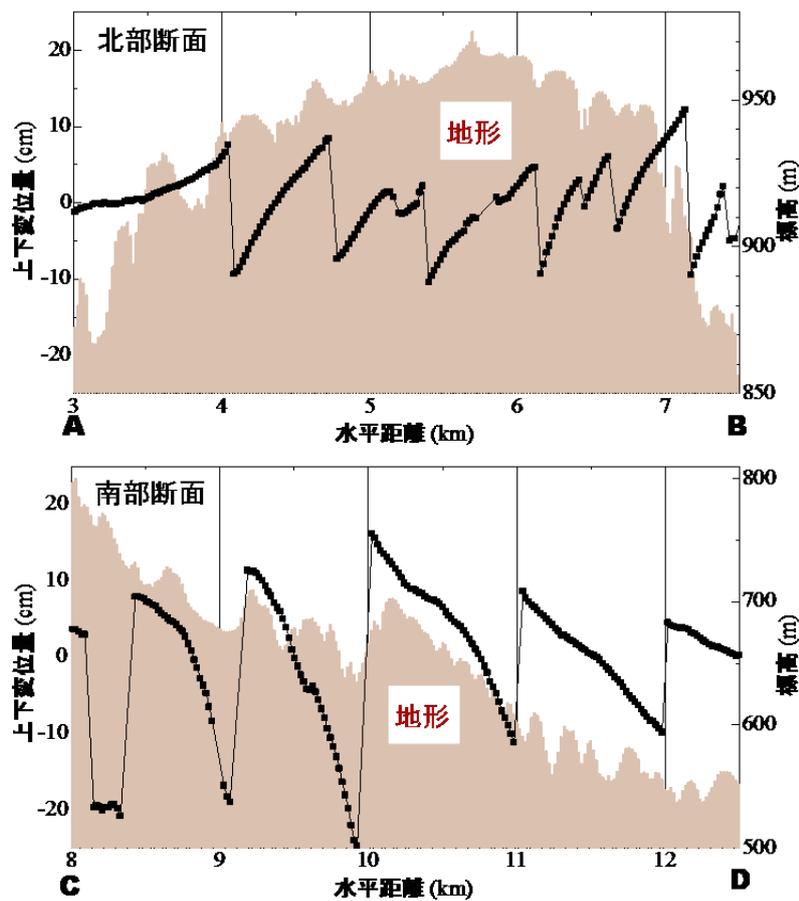


第 3 図 阿蘇カルデラ北西部の上下方向地表変位及び地表断層. 複数の SAR 干渉画像から 3 次元解析によって求められた上下方向の変位分布を表す. ハイパスフィルターによって広域の変動を除去してある. 赤線は北側落ち, 青線は南側落ちの地表断層をそれぞれ表す. 黒点線は既知の活断層位置を表す (鈴木他, 2017). AB 及び CD 測線は第 5 図で断面を示す.

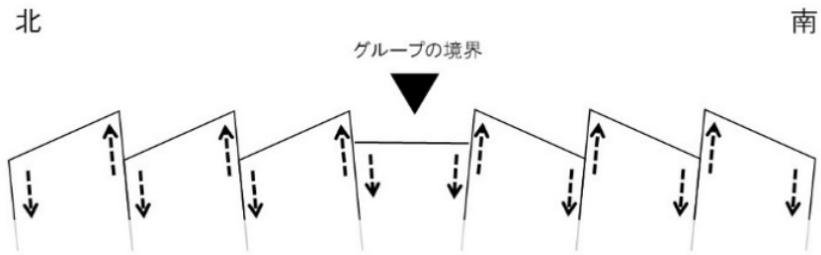
Fig. 3 Up-down displacement and linear surface ruptures northwest of the outer rim of Aso caldera. A high pass-filtered up-down displacement map made by three-dimensional (3-D) analysis using ALOS-2 image pairs. Red and blue areas represent up and down, respectively. Red solid lines show the identified linear surface ruptures with dip slip where the north side moving down and blue solid lines show the identified linear surface ruptures with dip slip where the south side moving down. Ticks of the lines show the lower side of each displacement. Black dotted lines show known active faults (Suzuki et al., 2017). Lines AB and CD show cross sections in Fig. 5.



第 4 図 左 第 3 図の地点①の北側落ちの断層状の開口亀裂  
 右 第 3 図の地点②の南側落ちの河川擁壁の亀裂. どちらも東に向かって平成 28 年 5 月 11 日撮影.  
 Fig. 4 Left : point(1) and Right : point(2) in Fig. 3 (taken toward the east on May 11, 2016).



第 5 図 第 3 図の AB 及び CD 測線での上下変位量と標高（地形）の断面図  
 Fig. 5 Cross sections of up-down displacement and topography along AB and CD lines in Fig. 3.



第 6 図 のこぎりの歯状の変位のイメージ図

Fig. 6 Schematic explanation of “saw-tooth” displacement. Schematic profile of surface displacement from north to south in the northwest area of the outer rim of Aso caldera. Dashed arrows show displacement of each block divided by linear surface ruptures.