

## 2 時期の航空レーザ計測地形データ解析による 平成 28 年（2016 年）熊本地震前後の 阿蘇カルデラ地域における地表変位

日本応用地質学会 2016 年熊本・大分地震災害調査団

向山 栄<sup>\*1</sup>・佐藤 匠<sup>\*1</sup>・高見 智之<sup>\*1</sup>・西村 智博<sup>\*1</sup>

### 要 旨

平成 28 年熊本地震により、熊本県阿蘇地域では地震性の広域的な地殻変動が観測された。本研究では阿蘇カルデラ地域の地表面変位を航空レーザ計測地形データを用いた数値地形画像解析手法によって面的に計測した。その結果、阿蘇カルデラ内の北西側地域では隆起傾向がみられると共に北方向への水平変位が認められた。またカルデラ内の南西側地域では隆起傾向と共に、南西方向への水平変位が認められた。また中央火口丘付近から立野にかけては、沈降傾向と共に西方への水平変位が認められた。両地域間の阿蘇カルデラ西方に位置する布田川断層帯から断続する地表部の右横ずれを示す亀裂は、カルデラ内の黒川左岸河陽付近から北東方向約 3 km 付近まで断続するが、本研究の解析結果では、地表面変位の向きが系統的に変化する境界が、さらにその北東側延長のカルデラ縁付近まで連続していることがわかった。阿蘇カルデラ地域全域の地表面変位の分布の詳細が明らかになったことにより、今後は地下の震源断層モデルと応力場解析の精緻化、および地表部での剪断を伴う地表変位の成因および地盤性状との関係の解明等が期待される。

**Key words** : 平成 28 年熊本地震, 地表面変位, 地殻変動, 航空レーザ計測, 数値地形画像マッチング解析

### 1. はじめに

平成 28 年熊本地震に伴い、布田川・日奈久断層帯に沿った地域では、断続的な地表変位が出現し、これらは現地調査や空中写真判読により観察された。また GNSS 基準点観測や衛星干渉 SAR (InSAR) 画像の解析により、測地的な広域変動が観測された。このような現地調査による観察結果および地殻変動の観測結果は、既にいくつかの研究機関等によって報告されている(国土地理院,2016<sup>1)2)</sup>など)。

しかし、断層直近から離れた地域における地表変位の広域的な分布と、地表で確認された明瞭な剪断面を伴う変位との関係はこれまでに十分に明らかにされていない。また、InSAR 画像解析では詳細が不明な、断層近傍における比較的大きな変位量とその面的分布についても明らかにされていない。

本調査団は、地震発生前後に取得された 2 時期の航空レーザ計測地形データを利用して、地表面変位を面的に計測し、変位の広域的な分布傾向について詳細に把握することができたので、その概要を報告する。

### 2. 阿蘇カルデラ付近の地形概要

本調査は、阿蘇カルデラの全域を対象として実施した。阿蘇カルデラは、東西約 18 km、南北約 25 km の凹地を形成し、中央部やや南寄りに中央火口丘を形成する火山体群が分布する。中央火口丘の北側には阿蘇谷と呼ばれる黒川沿いの平地、南側には南郷谷と呼ばれる白川沿いの平地が分布する。カルデラ壁の西端には、立野火口瀬と呼ばれる峽

谷が形成され、カルデラ内の水系の地表における唯一の排水経路となっている。阿蘇カルデラより南西方には布田川断層帯が位置しており、その東方延長部は北向山断層として立野火口瀬付近まで分布が確認されている。

平成 28 年 4 月 16 日の M7.3 の地震に伴い、北向山断層の延長方向に位置する白川・黒川合流点付近から黒川左岸地域にかけて、北東方向に約 3 km 断続する剪断亀裂が地表に出現した。これらは布田川断層帯の延長部である可能性が指摘されており(国土地理院,2016<sup>2)</sup>など)、その分布の北東延長方向の端部が、阿蘇カルデラ内のどこに位置するかが注目されている。また阿蘇谷地域の平坦地においては、正断層型の亀裂を伴う長さ 1 km 内外の地溝状の変位が断続的に出現した。これらが広範囲の地盤の側方移動に伴う開口亀裂群であると考えられることは、本調査団の調査報告速報版 1 で既に示した(応用地質学会,2016<sup>3)</sup>。

### 3. 数値地形画像マッチング解析による変位量計測

#### 3.1. 数値地形画像マッチング解析手法

阿蘇カルデラ地域全域を対象として、2 時期の数値地形モデル(DEM)を用いた数値地形画像マッチング解析(Mukoyama,2011<sup>4)</sup>)により、地表面の水平変位及び鉛直変位を計測し、広域的な地表面変位の分布を把握した。数値地形画像マッチング解析(3D-GIV 解析:3D Geomorphic Image Velocimetry)は、数値標高データから求めた地形量を画像化した数値地形画像のペアを作成し、画像マッチングの手法を応用して画像の濃淡パターンを追跡して水平移

\*1 国際航業(株) Kokusai Kogyo Co., Ltd.

動量を求め、画素に対応する座標点の標高値の2時期差分値と合成して、3次元の移動ベクトルを求める手法である(特許第4545219号 国際航業株式会社)。使用した航空レーザ計測地形データは、国土地理院が管理する地震前の2010年4月計測の地形データ(1mDEM)と、国際航業株式会社が地震後の2016年4月19日～5月18日に自主計測した地形データ(1mDEM)である。1mDEMを用いた場合の計測手法に依存する解析限界値は0.1mである。

図-1～3に阿蘇カルデラ地域の地表面変位ベクトルの水平成分と鉛直成分の分布、およびそれらの重ね合わせ図、図-4に、変位ベクトル水平成分の分布傾向と地表面変位の分布位置との関係を示す。本報告では、地形データの誤差等も考慮し、0.2～5.0mの水平変位のベクトルを図示した。この図には、計測エラーと思われる局所の変位量の極端に大きい計測結果も含まれる。

なお、地震前の地形データは2010年に計測されているので、数値地形画像解析によって直接得られる変位量には、

2010年地形測量後から2016年4月16日の地震発生直前までの経年変動などが含まれる。また、地震直後から地形測量日までの余効変動による変位量も含まれる。しかし、国土地理院のGEONET観測によれば、阿蘇カルデラ内の観測点における地震前の地殻変動および地震後から5月末までの余効変動量の大きさの合計は、概ね0.1m程度より小さく、地震時変位量の10%以下である領域が多いので、全域を対象にした解析についてはこれらの補正は行わなかった。また変位量の鉛直成分を色相表示した図(図-2、図-3)では、地震後の地形データの取得日に約1ヶ月の間隔があることによる変位量の差が、微妙な色濃度の不連続境界となって現れている。また航空レーザ計測で取得したデータの飛行コース間調整で生じる不整合に起因する計測値の系統的ずれが色相の不連続となって認められる箇所もある。しかし本報告では、全体としての変位量の分布傾向を把握するのに大きな問題はないと考え、色相の調整等の補正は、地形データ重複部の透過性の調整のみに留めた。

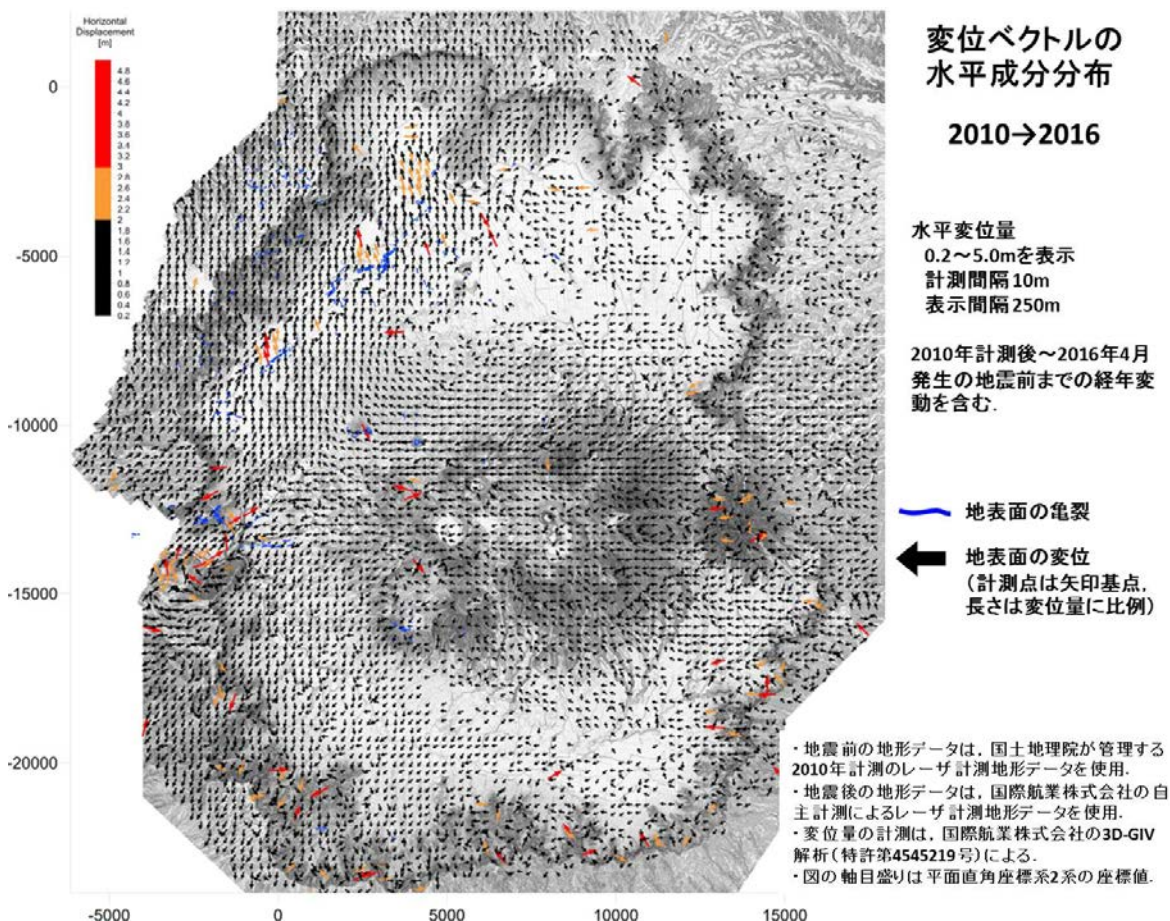
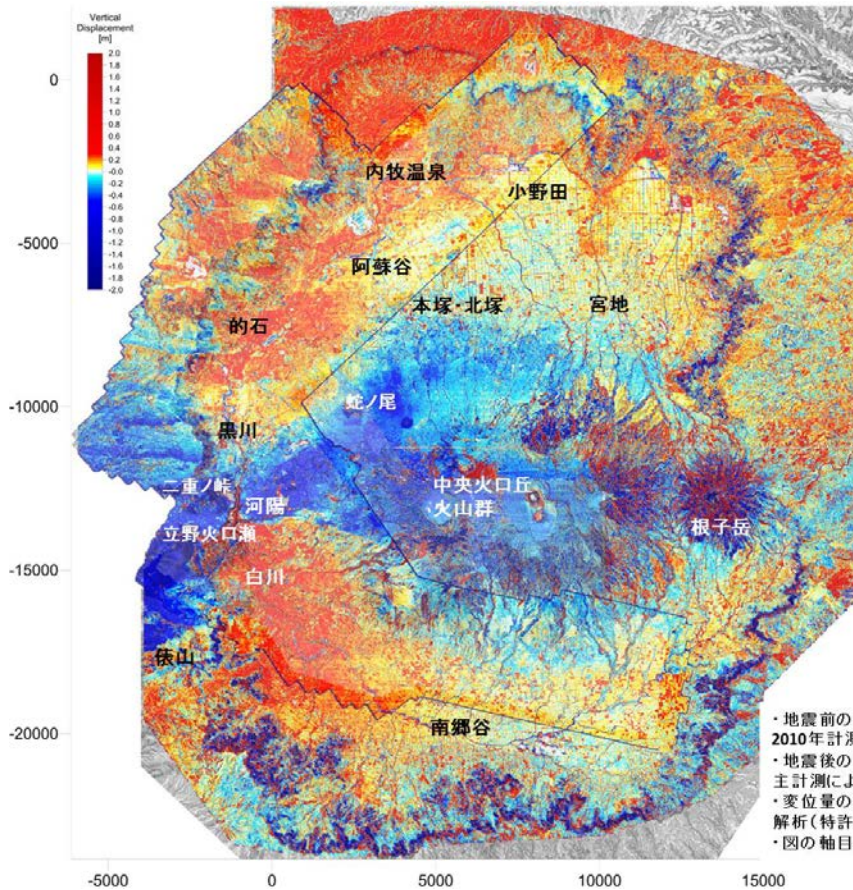


図-1. 数値地形画像マッチング解析による阿蘇カルデラ地域における地表面変位量の水平成分

図-1～図-7に使用した数値地形画像マッチング解析結果の原因は、地震前の地形データについては国土交通省国土地理院が管理する2010年計測の航空レーザ測量データ、地震後の地形データは国際航業株式会社が2016年4月19日～5月18日に計測した航空レーザ測量データを使用し、一般社団法人日本応用地質学会の依頼により国際航業株式会社が作成提供したものである。





### 変位ベクトルの鉛直成分分布

2010→2016

鉛直変位量  
-2.0～2.0mを表示  
計測・表示間隔10m

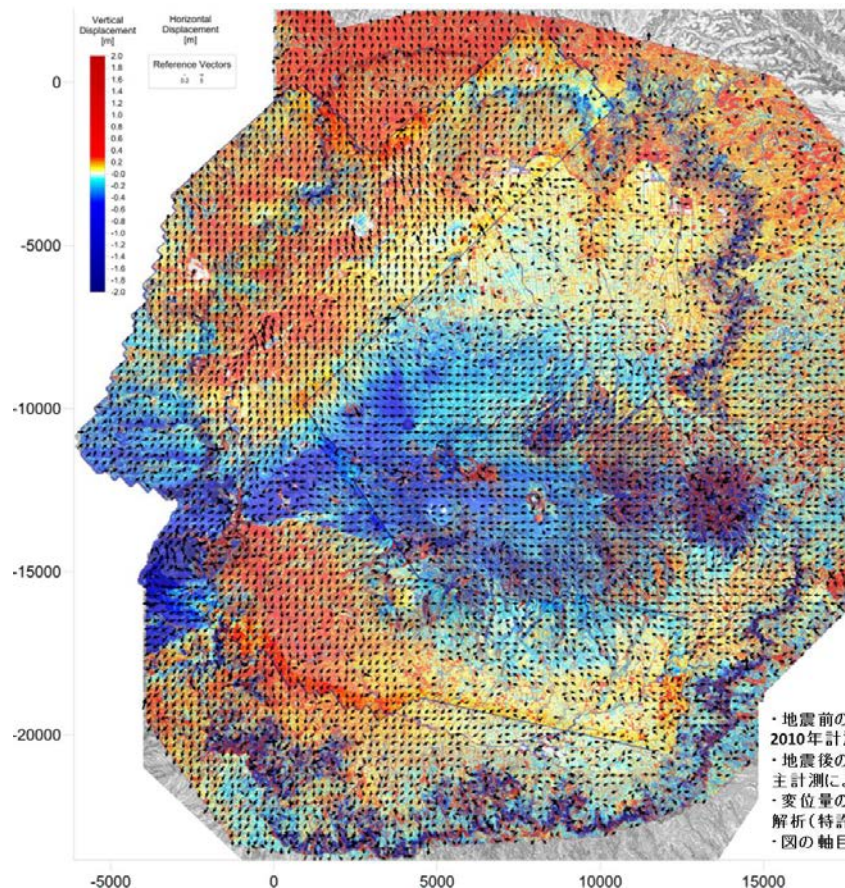
2010年計測後～2016年4月  
発生地震前までの経年変動を含む。

図中の細枠線は地震後2016年の計測時期毎の計測範囲

2016年4月19日～23日  
2016年4月29日  
2016年5月18日

- ・地震前の地形データは、国土地理院が管理する2010年計測のレーザー計測地形データを使用。
- ・地震後の地形データは、国際航業株式会社の自主計測によるレーザー計測地形データを使用。
- ・変位量の計測は、国際航業株式会社の3D-GIV解析(特許第4545219号)による。
- ・図の軸目盛りは平面直角座標系2系の座標値。

図-2. 数値地形画像マッチング解析による阿蘇カルデラ地域における地表面変位量の鉛直成分



### 変位ベクトルの水平・鉛直成分分布

2010→2016

水平変位量  
0.2～5.0mを表示  
計測間隔10m  
表示間隔250m

鉛直変位量  
-2.0～2.0mを表示  
計測・表示間隔10m

2010年計測後～2016年4月  
発生地震前までの経年変動を含む。

← 地表面の変位  
(計測点は矢印基点,  
長さは変位量に比例)

図中の細枠線は地震後2016年の計測時期毎の計測範囲

2016年4月19日～23日  
2016年4月29日, 5月18日

- ・地震前の地形データは、国土地理院が管理する2010年計測のレーザー計測地形データを使用。
- ・地震後の地形データは、国際航業株式会社の自主計測によるレーザー計測地形データを使用。
- ・変位量の計測は、国際航業株式会社の3D-GIV解析(特許第4545219号)による。
- ・図の軸目盛りは平面直角座標系2系の座標値。

図-3. 数値地形画像マッチング解析による阿蘇カルデラ地域における地表面変位量の水平・鉛直成分



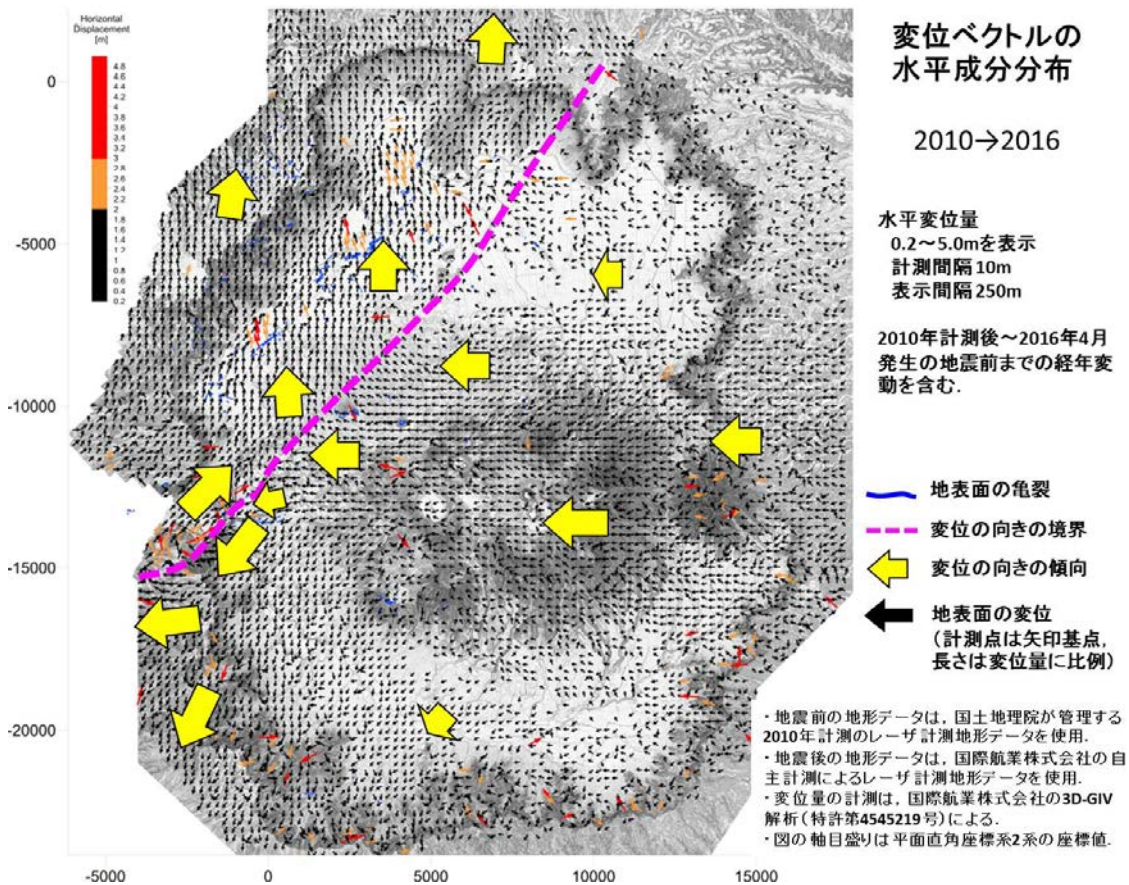


図-4. 数値地形画像マッチング解析による阿蘇カルデラ地域における地表面変位分布の傾向

## 3.2. 阿蘇カルデラ地域の地表変位

### 3.2.1 阿蘇カルデラ全域における変位の傾向

阿蘇カルデラ全域の地表面変位を計測した結果、カルデラ縁外側を含むカルデラの北西側～北側の地域では隆起傾向がみられると共に北方向への1m以上の水平変位が認められた。またカルデラ縁外側を含むカルデラの南西側地域では隆起傾向がみられると共に、南西方向への1m以上の水平変位が認められた。両地域の間、中央火口丘付近から立野にかけては、沈降傾向と共に西方への水平変位が認められ、カルデラ内西端で地表に出現した亀裂群に沿って、鉛直方向に差別的な変位が認められた。またカルデラ内の北東側と南東側においては、概ね西向きの変位が認められるが、変位量は他の領域に比較して小さい。

### 3.2.2 黒川左岸の河陽地区の変位

阿蘇カルデラ西方に位置する布田川断層帯から地表部に断続する剪断亀裂を伴う変位は、立野付近からカルデラ内部に達し、黒川左岸河陽地区から北東方向約3km付近まで断続している。この領域においては、剪断亀裂に沿う方向の顕著な右横ずれ変位が計測された。

なお、立野～河陽地区周辺における地表変位の詳細については、機会を改めて報告したい。

### 3.2.3 阿蘇カルデラ外輪山西縁における変位

阿蘇カルデラ西縁の、立野北方から二重ノ峠北方にかけ

ての外輪山西側斜面上に、東西方向に連なる地表変位の不連続帯が6条認められた。

### 3.3. 阿蘇カルデラ北部における地表変位の向きの変化

河陽地区北東約3km地点付近から蛇ノ尾を經由しさらに北東方向には、地表面変位の向きが変化する境界が帯状に連続し、本塚・北塚付近を經由して、カルデラ内北縁の小野田付近に達している。この帯状の領域の北西側では、北北西～北方向の変位、南東側では西向きの変位が卓越するが、その境界は遷移的である。これらの変位の分布傾向は、弾性体転位理論に基づく右横ずれ震源断層モデルの端部延長方向における地表面の変位分布と整合的と考えられるが、その詳細については機会を改めて議論したい。

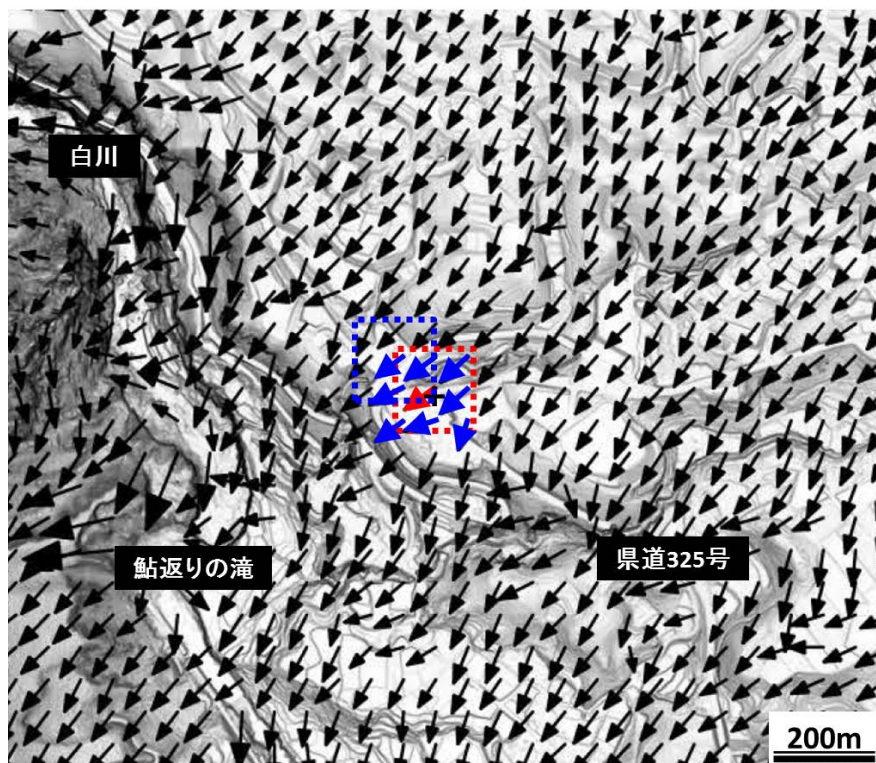
なお、帯状の境界領域の近傍における顕著な地表変位については、地盤の液状化に伴うもの(地盤工学会,2016<sup>5)</sup>)以外は現在のところ報告されていない。また阿蘇谷の内牧温泉市街地からの石地区に至る黒川左岸沿いの低地に出現した地溝状の開口亀裂群の配列は、上記の地表面変位の向きが変わる帯状の領域から北西に約2km離れた位置にある。

## 4. GEONET 計測結果, InSAR 解析結果との比較

数値地形画像マッチング解析結果と、既往調査のGEONET計測変位量およびInSAR画像解析との比較を行い、計測結果の特徴と傾向について検討した。



## 数値地形画像変位量とGEONET変位量との比較手法



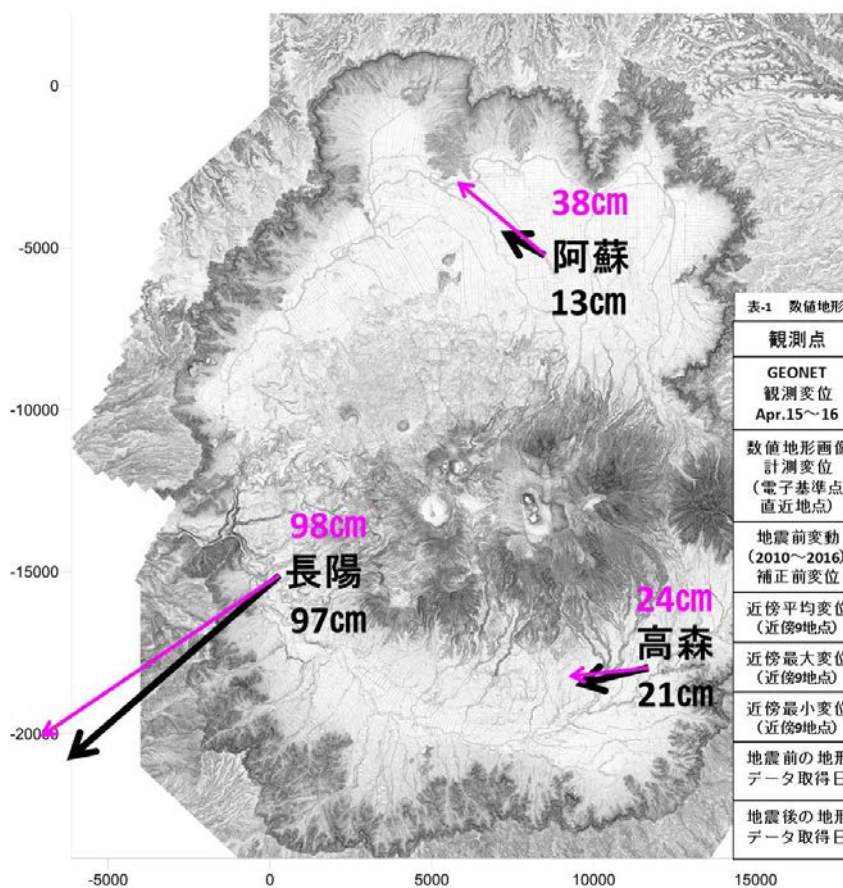
電子基準点「長陽」付近の  
数値地形画像変位量と  
GEONET変位量との比較

- +** 電子基準点
- 数値地形画像計測変位  
(電子基準点最近傍)
- 変位計測領域
- 近傍平均変位量  
算出対象変位  
(近傍9地点)

図示したベクトルは、基点を変位計測領域の中心に置き、長さは変位量に比例して拡大表示したものである。計測間隔は10m、表示間隔は50m。

電子基準点「長陽」付近の変位量は概ね南西方向に約1mである。

図-5. 電子基準点「長陽」付近の数値地形画像変位量と GEONET 変位量との比較計測範囲位置図



## 国土地理院の GEONET変位量 との比較 (水平成分)

- GEONET変位量
- 数値地形画像計測変位量

表-1 数値地形画像計測変位量とGEONET観測変位量との比較

観測点	長陽	阿蘇	高森
GEONET 観測変位 Apr.15~16	97cm	13cm	21cm
数値地形画像計測変位 (電子基準点直近地点)	98cm	38cm	24cm
地震前変動 (2010~2016) 補正前変位	94cm	24cm	15cm
近傍平均変位 (近傍9地点)	91cm	25cm	21cm
近傍最大変位 (近傍9地点)	106cm	32cm	33cm
近傍最小変位 (近傍9地点)	80cm	18cm	11cm
地震前の地形 データ取得日	2010 Apr.	2010 Apr.	2010 Apr.
地震後の地形 データ取得日	2016 Apr.22	2016 May 18	2016 Apr.19

図-6. 数値地形画像変位量と GEONET 電子基準点変位量との比較



国土地理院 DInSAR MAI解析  
MAI (Multiple Aperture Interferometry)

2時期レーザ地形 3D-GIV解析 南北成分  
3D-GIV (3D Geomorphic Image Velocimetry)

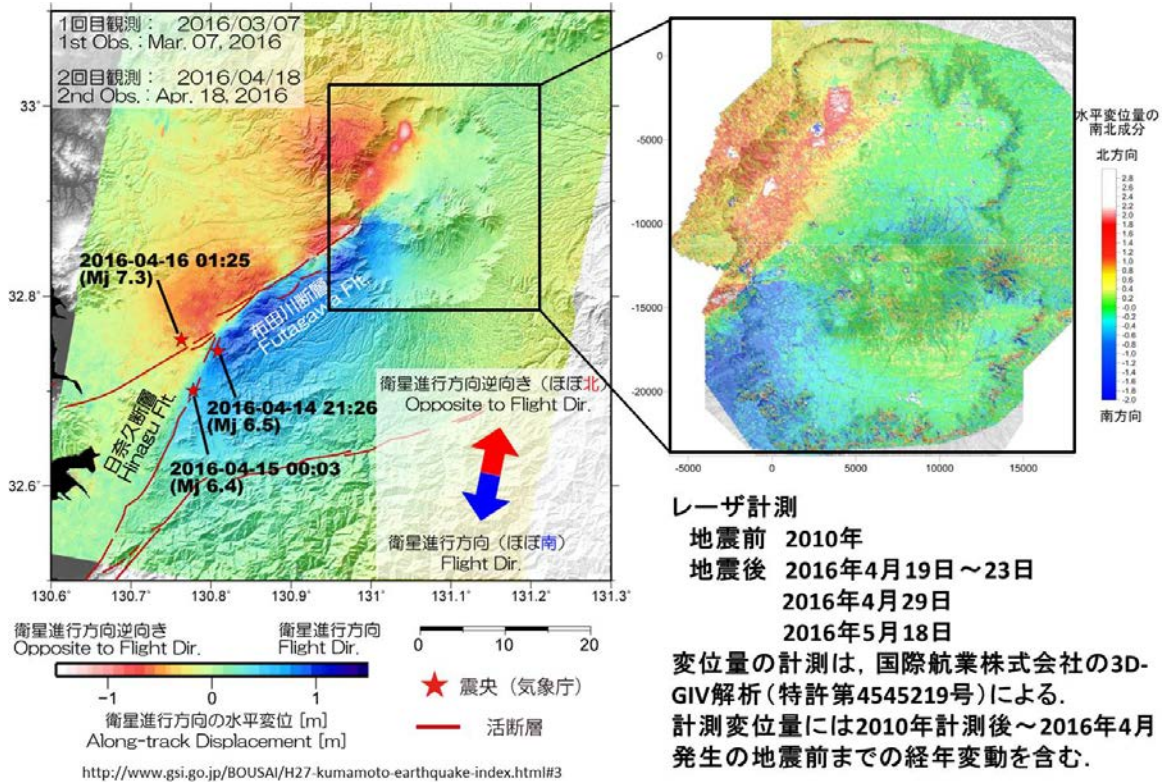


図-7. 国土地理院による InSAR の MAI 解析結果と数値地形画像解析による変位量の南北成分分布との比較

#### 4.1. GEONET 計測変位量との比較

数値地形画像計測は、2 時期の数値地形画像について一定の面積をもつ領域におけるパターンマッチングにより変位量を算出する。一方、電子基準点は、1 地点における GNSS 連続観測値の比較により変位量を算出する。計測対象範囲も計測原理も異なるが、対象地域の地表変位量の分布が、一定の範囲内において極端に不均質でないならば、各々の計測結果は良く一致することが期待される。

本調査では、128×128pixel (1pixel は 1m×1m) の領域に対して画像マッチングを行って変位量を算出し、計測領域を 10m ごとに移動して、対象地域全域の面的な変位量分布を求めた。図-5 は、電子基準点「長陽」付近における数値地形画像計測結果による変位量ベクトルの水平成分を、50m 間隔に間引いて図示したものである。

対象地域内に分布する 3 箇所の電子基準点における変位計測結果について比較を行った結果を、図-6 に示す。地震前の地形データ取得時期は 2010 年なので、数値地形画像から計測された変位量には、2010 年 4 月から地震発生直前までの経年的変位が含まれる。そのため、比較を行うに当たっては、各電子基準点の経年的変位 (国土地理院,2016<sup>6)</sup>) のグラフから読み取れる地震前の変位量を用いて補正を行い、2016 年 4 月 16 日の地震による変位量を算出した。電子基準点「長陽」と「高森」においては、数値地形画像計

測結果と GEONET 計測結果は概ね一致するが、電子基準点「阿蘇」においては、数値地形画像計測結果のほうが大きな値が得られた。電子基準点「阿蘇」を含む領域の地震後の地形データの取得日は 5 月 18 日であり、大きめの計測値には地震後の余効変動の影響も考えられる。しかし電子基準点の観測によれば、5 月末までの余効変動の変位量はいずれの地点でも 10 cm 以下であり、より大きい計測値が得られた原因の解明については今後の課題である。

#### 4.1. InSAR 解析との比較

国土地理院による InSAR 画像解析では、阿蘇カルデラ内において、カルデラ西部の阿蘇谷からカルデラ北西縁にかけて顕著な変位が認められる。また、InSAR の MAI 解析では、カルデラ北西部に顕著な北方向 (衛星進行方向逆向き) の変位およびカルデラ南西部に顕著な南方向 (衛星進行方向) の変位が認められる (国土地理院,2016<sup>1)</sup>)。本調査では、数値地形画像計測で得られた変位量の南北成分を抽出し、MAI 解析結果と同様な変位量の色相を割り当てた擬似的な図表表現により比較を試みた (図-7)。全体に南北方向の変位の分布傾向は一致しており、変位の向きが変化する帯状の領域がカルデラ北西部を北東-南西方向に横断し、外輪山付近まで達していることが読み取れる。また内牧温泉市街地および阿蘇谷を流れる黒川沿いに存在する、局所的に北方向の変位の大きい斑状領域も、共通に読み取れる。

## 5. 考察およびまとめ

2 時期のレーザ計測地形データを用いた数値地形画像解析による阿蘇カルデラ地域の地表面変位の状況について以下のようにまとめられる。

- (1) 阿蘇カルデラ地域の全域において地表面変位の分布が明らかになった。カルデラ内の北西側地域では隆起傾向と北方向への水平変位が認められた。またカルデラ内の南西側地域では隆起傾向と南西方向への水平変位が認められた。また中央火口丘付近から立野にかけては、沈降傾向と西方への水平変位が認められた。カルデラ内の北東側と南東側の地域の水平変位量は相対的に小さい。
- (2) 黒川左岸の河陽から北東方向約 3 km 付近まで地表に断続する剪断亀裂に沿って、顕著な右横ずれ変位が認められるとともに、鉛直方向の差別的な変位が認められた。
- (3) 阿蘇ファームランド付近からさらに北東方向には、地表面変位の向きが遷移的に変化する境界が帯状に連続し、カルデラ北縁まで達している。
- (4) 数値地形画像計測で得られた地表面変位量は、既往の GEONET 観測点および InSAR の観測結果と、概ね良く整合する。今後、詳細地形データの整備がさらに進めば、観測機器を置かない任意の場所においても、一定以上の変位量を地形情報から計測できることが期待される。

阿蘇カルデラ地域全域の地震時地表面変位の分布の詳細が明らかになったことにより、今後は地下の震源断層モデル・地下構造モデルと応力場解析の精緻化が期待される。また地表面変位の分布と地表で観察された剪断を伴う地表変位の成因との関係、構造物被害との関連の解明等が進むことが期待される。さらにそれらの結果から、地震時における地表変位に対する構造物等の被害を軽減するための効果的な対策を検討することも今後の課題である。

## Estimation of ground displacements around Aso-Caldera caused by the 2016 Kumamoto Earthquake, from the Geomorphic Image Analysis of temporal LiDAR DEMs

JSEG 2016 Kumamoto-Oita Earthquake disaster investigation team  
(Sakae Mukoyama, Takumi Sato, Tomoyuki Takami, Tomohiro Nishimura)

### Abstract

After the main shock of 2016 Kumamoto Earthquake (M7.3), seismic wide-area crustal deformation was observed around Aso region in Kumamoto Prefecture, Japan. In this study, temporal LiDAR DEMs and Digital Geomorphic Image Matching method was applied to measure ground displacements of 1m scale in wide-area. As a result, upheaval and northward displacements were observed in N-NW area in the caldera, and upheaval and southwestward displacements were observed in W-SW area. And westward displacements and subsidence were observed in the central-cone volcanoes area. Additionally, boundary zone of displacement direction change was observed clearly across the caldera. The distribution of the directions of ground displacements suggests the existence of the end part of the earthquake fault under the caldera. These results accord closely with the observation data obtained by GNSS stations of GEONET, and would supply the data gap of InSAR analysis.

**Key words** : 2016 Kumamoto Earthquake, LiDER, Digital Geomorphic Image Matching Analysis, Ground Displacement

## 6. おわりに

本報告は、2 時期の航空レーザ計測地形データによる地表変位の計測結果をとりまとめたものである。地震前の地形データの利用を許諾していただいた国土地理院、および地震後に自主計測された航空レーザ計測地形データを使用した成果図の作成と提供を許諾していただいた国際航業株式会社に感謝します。

最後になりましたが、このたびの地震により被害にあわれた皆様に、あらためて心よりお見舞い申し上げます。

### 引用文献

- 1) 国土地理院：平成 28 年熊本地震に関する情報，だいち 2 号干渉 SAR による変動の検出について，公開サイト（2016.08.16 最終閲覧）  
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.htm>
- 2) 国土地理院（2011）：平成 28 年熊本地震に関する情報，地震による亀裂分布，公開サイト（2016.08.16 最終閲覧）  
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
- 3) 日本応用地質学会：阿蘇カルデラ内の陥没性断裂に関する調査結果 公開サイト，（2016.08.16 最終閲覧）  
[http://www.jseg.or.jp/00-main/pdf/20160716\\_Aso.pdf](http://www.jseg.or.jp/00-main/pdf/20160716_Aso.pdf)
- 4) Sakae Mukoyama (2011) : Estimation of ground deformation caused by the earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the geomorphic image analysis of high resolution LiDAR DEMs. Journal of Mountain Science, 8, Issue 2, pp 239-245.
- 5) 防災科学技術研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震液状化調査報告（第 2 報）公開サイト，（2016.08.16 最終閲覧）  
<http://www.bosai.go.jp/saigai/2016/pdf/20160521-0522.pdf>
- 6) 国土地理院（2016）：基準点・測地観測データ，最新の地殻変動情報 公開サイト，（2016.08.16 最終閲覧）  
<http://mekira.gsi.go.jp/project/f3/ja/index.html>