日本応用地質学会 熊本・大分地震災害調査団 調査報告速報版 その1

阿蘇カルデラ内に出現した陥没性断裂とその周辺の地形変位

日本応用地質学会 2016 年熊本・大分地震災害調査団 陥没性亀裂調査班

黒木 貴一^{*1}・井口 隆^{*2}・千田 敬二^{*3}・加藤 靖郎^{*4}・小俣 雅志^{*5}・撰田 克哉^{*6}・高見 智之^{*7}・ 田近 淳^{*8}・田村 浩行^{*9}・西山 賢一^{*10}・矢田 純^{*11}・向山 栄^{*7}・西村 智博^{*7}・ 阪口 和之^{*12}・末武 晋一^{*13}・橋本 修一^{*14}・寺口 慧介^{*13}・矢野 健二^{*15}・ 山本 茂雄^{*16}・碓井 敏彦^{*17}・矢野 寛幸^{*18}・佐藤 匠^{*7}・河合 貴之^{*7}・石橋 愛香^{*4}

要旨

平成 28 年熊本地震によって多数の陥没性断裂が発生した阿蘇カルデラ内の低地地域周辺について,地震前後に取得された航空レーザ測量デ ータを利用して数値地形画像マッチング解析を実施し,地表面の変位を計測した.その結果,阿蘇市の内牧,狩尾,的石の3つの地区では, 局地的に北-北西方向に 3~5m の水平変位が計測された.これらの地区周辺について現地調査を実施し,地表面の伸長が推定される変位の拡 大領域では,陥没性断裂が断続的に形成されていることを確認した.一方,地表面の圧縮が推定される変位の収束領域では,河川護岸や橋梁 の圧縮変形,河床の隆起,水田における異常湧水や水田の傾斜などの異常が多数見いだされた.これらの観察から,これらの地域では,範囲 1~2km 四方にわたる表層部の地盤全体が,地震によって側方移動したものと考えられる.被害箇所については,周辺の広範囲の地盤変動を 念頭に置いて調査し復旧にあたる必要がある.

Key words: 平成 28 年熊本地震, 陥没性断裂, 航空レーザ測量地形データ, 数値地形画像マッチング解析, 側方移動

1. はじめに

平成28年熊本地震に伴い,阿蘇カルデラ内北西部の低地 には,陥没を伴う断裂群が約10kmにわたって断続的に出 現した(写真-1,図-1).これらの断裂群は,2016年4月 16日に発生したM7.3の地震後に出現が確認されたもので, その分布の概要は,空中写真等の判読等によって報告され ている(例えば国土地理院のホームページ).



写真-1 阿蘇市的石地区に出現した陥没性断裂

また,いくつかの研究機関等による現地調査結果も公開されている.しかしその成因については,正断層性の活断層の地表地震断層である可能性,埋没した旧河道地形部分の 沈下・陥没,鉱床採掘等人工改変地の沈下・陥没である可 能性などが考えられており,これまでは特定に至っていない.調査団は,地震発生前後に取得された2時期の航空レ ーザ測量地形データを利用して,地表面の変位を詳細に検



図-1 阿蘇市的石地区の陥没性断裂鳥瞰図

携帯型斜め写真専用システム「PALS」による斜め写真 から作成した3Dモデルの鳥瞰図((株)パスコ提供)

*1	福岡教育大学教育学部 Faculty of Education, University of Teacher Education Fukuoka
*2	防災科学技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience
*3	大日本コンサルタント(株) Nippon Engineering Consultants Co., Ltd.
*4	川崎地質(株) Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.
*5	(株)パスコ PASCO CORPORATION *6 日本地研(株) NihonChiken Co., Ltd.
*7	国際航業(株) Kokusai Kogyo Co., Ltd. *8 (株) ドーコン Docon Co., Ltd. *9 応用地質(株) OYO Corporation
*10	徳島大学大学院理工学研究部 Graduate School of Science and Technology, Tokushima University
*11	(株)カミナガ Kaminaga Co., Ltd. *12 アジア航測(株) Asia Air Survey Co., Ltd.
*13	日本工営(株) Nippon Koei Co., Ltd. *14 東北電力(株) Tohoku Electric Power Co., Inc.
*15	(株)ジオテック技術士事務所 Geological Technology Research Co., Ltd.
*16	中央開発(株) Chuo Kaihatsu Corporation *17 新日本グラウト工業(株) New Japan Grout Industrial Co., Ltd.
*18	(株)アサノ大成基礎エンジニアリング Asano Taiseikiso Engineering Co., Ltd.

討するとともに、変位の大きかった地区を中心に広範囲に わたる現地調査を実施し、その状況を把握した.

2. 阿蘇カルデラ内北西部低地の地形地質概要

阿蘇カルデラ内北西部の低地は、南東側に位置する阿蘇 火山中央火口丘から北西側の黒川に向かって傾斜する山麓 緩斜面から続く、平坦な谷底平野となっている.低地の平 均傾斜は、約0.6°以下である.谷底平野の地下には、細粒 な火山性砕屑物や砂、シルト、粘土、腐植が成層した湖沼 性の堆積物が、一部に扇状地性の礫層を挟んで数10m以上 の厚さで分布している(長谷ほか、2010).対象地内の狩尾 地区近傍では1,000年より新しい地層を切る正断層が発見 され、二重峠断層と命名されている(須藤ほか,2001).

3.1mDEM による数値地形画像マッチング解析

対象地において、数値地形画像マッチング解析

Mukoyama,2011)を行い,地表面の水平変位及び鉛直変位 を計測した.数値地形画像マッチング解析は,2時期の数 値地形モデル(DEM)から,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 移動量を求め,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).使用した地形データ は,国土交通省により2010年に取得された航空レーザ計測 地形データ(1mDEM)と,地震後の2016年4月20日に国 際航業株式会社が計測した地形データ(1mDEM)である.

図-2~5 に地表面変位ベクトルの水平成分と鉛直成分の 分布,および変位ベクトルの収束・発散傾向の分布を示す. 1mDEM を用いた場合の計測手法に依存する計測限界値は 0.1m であるが,地形データの誤差等も考慮し,本研究では, 0.3m 以上の水平変位のベクトルを図示している.



図-2. 数値地形画像マッチング解析による地表面の水平変位量 (2010年~2016年4月の地形データによる比較)

図-2~図-5 に使用した数値地形画像マッチング解析結果の原図は,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 20 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.



図-4. 数値地形画像マッチング解析による変位ベクトルの収束・発散傾向



図-5. 数値地形画像マッチング解析による地表面変位ベクトル水平成分の等値線図

解析を実施した範囲の全体の傾向としては、北北東方向へ 0.5~ 1.5m 程度の広域的な水平変位と、カルデラ内の西〜北部での隆起傾 向が認められた.これは国土地理院による電子基準点の観測結果と 整合的である.一方、黒川沿いの低地では、内牧、狩尾、的石の 3 地区において、それぞれ長径約 1~2km 四方の範囲一帯に、北-北西 方向に 2~5m 移動する大きな変位が認められた.これらの 3 地区の 地表面の平均傾斜は、内牧温泉付近で約 0.1°,狩尾地区で 0.3°, 的石地区で 0.3~0.4°である.

大きな水平変位を示す3地区の南-南東側(高標高側)では、空中 写真等の判読から陥没性断裂(図-2~5中の黒線)が断続的に形成 されていることが確認されているが、その位置は、変位量が拡大を 始める地点と整合的である.



写真-2. 阿蘇市内牧地区北方の水田に生じた異常湧水群 (国土地理院:阿蘇地区正射画像(4/16撮影)の一部)

一方、変位量が収束する北-北西側(低標高側)では、空中写真の肉 眼判読で判別できる規模で地形が大きく変形しているような箇所は 確認できない.しかし、水田に異常湧水が集中する範囲が見られる など、何らかの影響が生じている可能性が推察できる(写真-2).

4. 現地調査による確認

数値地形画像マッチング解析によって大きな変位が計測された内 牧,狩尾,的石の3地区周辺について現地調査を行い,地表面に現 れた変状を確認・記録した.

4.1. 内牧地区

市街地南方に陥没性断裂が複数確認できた.近傍にある鉄筋6階 建ての宿泊施設では、敷地内に東北東-西南西方向に落差40cm程度 の陥没が生じ、附属建物の一部が変形したほか、庭園やプールに撓 曲や亀裂が発生している(写真-3).市街地内では陥没性断裂の追跡 が難しくなるが、東部から北東部では黒川や花原川を横断する深さ 50cm、幅 30m程度の陥没帯が確認できる(写真-4).この付近で陥 没帯の走向はやや北方向に屈曲し、北北東-南南西方向となっている.

市街地北方では、花原川より北側の水田に多数の異常湧水痕跡が 認められ(写真-2)、一部は 6/18 の調査時点でも湧水が継続してい た(写真-5).また、これらの農地周辺では、舗装された農道やコン クリートブロック製の水路に圧縮性の変形が複数生じている.市街 地北西部の湯浦川をまたぐ新花原橋は、北北西-南南東方向に架けら れた長さ20m程度,2スパンの橋桁からなる橋梁であるが、南東方 向からの圧縮により顕著な変位と損傷が認められる(写真-6).

内牧地区には多数の温泉施設があるが、その多くで「温泉が止ま った」「温泉の湯量が減った」等の情報が得られた. これらの被害が 生じている施設は、水平変位量が2~4mと大きい範囲内にある.





写真-3 断裂上の宿泊施設の被害

写真4 花原川右岸護岸の沈下





写真-5 内牧市街地北方水田の湧水

写真-6 新花原橋の圧縮変形の損傷

4.2. 狩尾地区

黒川左岸(南側)の集落より南方の農地には、陥没性断裂が複数 確認できた. 一部は集落まで連続し, 落差1~1.5mの陥没帯が人家 の庭先や道路を寸断している(写真-7・8).聞き込みによると、人 家は、グラグラ揺れた後、スーッと傾いたようで瓦も落ちていない.

集落の北側では、水田に異常湧水が認められた(写真-9). この湧 水は「地震後に異変 田んぼに温泉?湧く」として5/30付の西日本 新聞の記事に取り上げられている. また, 黒川左岸のブロック積護 岸工には水平方向に長く連続する亀裂が発生しており、一部が押し 出されたように変形している(写真-10). これらの亀裂は、阿蘇市 浄化センターへ通じる 「みやま橋」 付近から下流側の乙姫川合流点 付近まで断続的に出現している. 乙姫川合流点下流に架かる「新小 野橋」では、南北方向の圧縮によると考えられる変形が生じていた.



写真-7 落差1.5mの陥没帯



写真-9 水田に湧出した温泉

写真-10 黒川左岸の護岸の水平亀裂

写真-8 水田・道路を横断する陥没帯

4.3. 的石地区

最も大きな変位が計測された的石地区では、阿蘇西小学校北側の 広域農道沿いに約 1.6km の区間にわたって東北東-西南西方向に延 びる最大落差1.5m程度の陥没性断裂が出現した(写真11・12). こ の地表変状によって、送電鉄塔が傾倒する被害や農道の段差、耕作 地の地割れ・陥没・湛水等の被害が生じている.

一方, 黒川沿いには圧縮性の変状が多数発生している. 黒川に架 かる大正橋では、橋桁が左岸側の橋台コンクリートを破壊して 3m 程度盛土にめり込んでいるなど(写真-13, 写真-17 写真-18), 南北 方向の圧縮を示す変形が複数生じている.また、大正橋付近では地 震後河床に中州ができたという情報があり、水位が 2m 程度上昇し たため、緊急対策として約100mの区間にわたっておよそ7000 mの 土砂が浚渫されている. 大正橋から下流側の下鶴橋にかけての区間 でも、堤防の変形や河床の隆起が複数認められる(写真-14).いず れも南北方向の圧縮による変形で、堤防の一部が水平方向に折れ曲 がったり、矢板護岸が北側へ傾くなどの変状が生じている. 下鶴橋 の橋台にも圧縮性の変形が生じている.

陥没性断裂が多数生じている地域から見て対岸となる黒川右岸側 (北側) にも変位は及んでおり、阿蘇カルデラ外輪山の急斜面から 流出する谷が形成した小規模扇状地の末端付近では、複数の箇所で 異常湧水が認められた(写真-15).また、多くの水田では田植えに あたって水を引き入れる作業を行っていたが、農地が傾き、一部の 範囲に水が行き届かないなどの異常が見られた(写真-16). これら の水田周辺にある南北方向の水路では,圧縮性の変状が多数発生し, ブロック積の護岸が押し出される被害が認められた.



写真-11 水田に生じた正断層型亀裂群



写真-13 大正橋橋台部の損傷



写真-15 水田内に生じた湧水







写真-16 水田の傾動



写真-17 地震前の大正橋(Google earth のストリートビュー2013年12月)



写真-18 地震後の大正橋 2016年6月4日撮影

5. 考察およびまとめ

数値地形画像マッチング解析および現地調査の情報から,現段階 では以下のように推察できる.

- (1)数値地形画像マッチング解析により大きな変位が計測された範囲と、現地調査により確認された変状の位置や伸長・圧縮の特徴 は極めて整合的である.
- (2)これらの地域の地表面勾配は 0.1° ~0.4° と極めて緩傾斜である が、1~2km 四方の表層地盤が一体となって側方移動した可能性 が高い.
- (3)地盤の側方移動により、その範囲内や周辺の地表面の伸長・圧縮 が顕著な領域で、橋梁の損傷や河川堤防などの構造物被害、鉄塔 や温泉施設、農業施設に大きな被害が生じた.また、異常湧水な ども多発している.
- (4)被害箇所については、周辺の広範囲の地盤の「変動」を念頭に置いて復旧にあたる必要がある.変動機構の解明には、地表の変動 実態の詳細とともに地下の地盤性状の把握が必要である.
- (5)阿蘇カルデラ内全域の地表面変動については、さらに広い範囲の 地形データの比較により、今後検討を進める必要がある.

なお、本地域における地盤情報としては、全国地質調査業協会連 合会のホームページに、震源域周辺のボーリング柱状図が多数公開 されている。今回報告地域の中では、狩尾地区の新小野橋付近の右 岸側に、深度 69mのボーリングの情報がある。その柱状図を参照す ると、深度 16mまでは砂層を主体とした砂粘土互層、それ以深はN 値が5に満たない粘土層が厚く堆積しており、最深部数メートルは N値 50以上、Chクラスの安山岩が分布している。また、的石地区 で今回の地震で大きく損傷した大正橋の南南東方約 620m に位置す るボーリングでは、深度 32.5m 以深にN値 50 以上の安山岩が分布 しており、それより浅部の大部分にはN値 5 以下のシルト層が分布 している。今後、側方移動した層の厚さの考察や、断裂直上・至近 でも旧い木造家屋の瓦が落下しなかったような振動特性を考察して いく上で、これらの地盤データは重要な情報である。

6. おわりに

本報告は、地形データの解析および地表踏査で得られた情報をと りまとめたものである。今後、地盤を構成する地質や地質構造に関 するより詳細な情報、阿蘇カルデラ地域全体を含む広域における変 位情報も加え、陥没性断裂の発生原因や側方移動した地層の分布範 囲・深度等を検討していく必要がある。

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みな さまに心よりお見舞い申し上げます.

引用文献

- 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.
- 西日本新聞(2016) : 阿蘇市狩尾地区 地震後に異変 田んぼに温泉?湧く. http://www.nishinippon.co.jp/nnp/national/article/248529,(2016年5月30日配信)

長谷義隆・宮縁育夫ほか(2010):中部九州阿蘇カルデラ北部阿蘇谷の最終水 期以降の層相変化と地形形成、御所浦白亜紀資料館報,第11号, pp.1-10

- 須藤靖明・池辺伸一郎(2001):阿蘇カルデラ内で見出された落差1mの新鮮 な活断層と最近の地震活動,京都大学防災研究所年報,第44号 B-1, pp.345-352
- 向山栄ほか(2016): Sentinel-1 衛星干渉 SAR 解析に基づく 2016 年 4 月熊本 地震による地表変動と建物被害分布,および多時期の LiDAR DEM データ 解析による地表変位の抽出.日本地球惑星科学連合 2016 年大会ポスター発 表, MIS-P38
- 全国地質調査業協会連合会:平成28年(2016年) 熊本地震 復興支援ボーリ ング柱状図緊急公開サイト, 2016.05.28 確定版

http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/webgis/index.html

Horst Graben and its surrounding terrain displacement that appeared in the Aso caldera JSEG 2016 Kumamoto-Oita Earthquake disaster investigation team

Abstract

A large number of ruptures in the form of horst-graben have appeared on the surface of low land in the Aso caldera by Kumamoto earthquake in 2016. In order to measure ground displacements caused by the earthquake, digital geomorphic image analysis was conducted using temporal LiDAR DEM. As a result, horizontally 3-5m northward displacements were observed locally at Aso Uchinomaki, Kallio and Matoishi areas. Results of the field survey showed that the areas where ruptures were observed intermittently were coincided to the areas where the amount of displacement expands. On the other hand, compression deformations of river banks and bridges, riverbed lifting, anomaly of water-springs in a rice paddy, and increase of slope surface inclination were observed at the areas where the amount of displacement travelled more than 1-2km have occurred locally by the earthquake.

Key words: 2016 Kumamoto Earthquake, Horst Graben, LiDER DEM, Digital Geomorphic Image Matching Analysis, Lateral Ground Displacement