



熊本地震で帯状に陥没した阿蘇市狩尾地区の変状調査

安田 進¹⁾、島田政信²⁾、石川敬祐³⁾、野村勇斗⁴⁾

1) 正会員 東京電機大学理工学部、教授 工博
e-mail : yasuda@g.dendai.ac.jp

2) 非会員 東京電機大学理工学部、教授 工博
e-mail : shimada@g.dendai.ac.jp

3) 正会員 東京電機大学理工学部、助教 博士(工学)
e-mail : ishikawa@g.dendai.ac.jp

4) 学生会員 東京電機大学理工学部、学生
e-mail : 14rg063@ms.dendai.ac.jp

要 約

2016年熊本地震では阿蘇カルデラ内で帯状の陥没が多く発生し、家屋や道路などが被害を受けた。そのメカニズムを調べるために、これまでに衛星観測画像からの地盤の水平・鉛直変位分布の推定、被災状況の詳細な調査、表面波探査および既往地盤調査データの収集による表層地盤状況の把握を行ってきた。まだ研究途上であるが、被害が甚大だった狩尾地区に関してこれらの調査結果を比較したところ、水平・鉛直変位や水平ひずみ、表層の地層構成に陥没区間の付近で特異な分布していることが明らかになってきた。

キーワード： 地震、地盤、陥没、現地調査

1. はじめに

2016年に発生した熊本地震では熊本市や益城町を中心に、阿蘇から大分県に至るまで広い範囲で地盤に関係した被害が発生した。被害の種類には、過去の地震でも多く発生してきた液状化、斜面崩壊、丘陵地の造成宅地盛土の変状、河川堤防の変状、道路盛土・切土法面の崩壊、ため池や鉾さい集積場の被害といったものがあつたが、さらに近年の地震では発生していない帯状の陥没といった特殊な被害が阿蘇のカルデラ北部の阿蘇谷で発生した¹⁾。陥没により段差が出来た上にあつた低層建物はギロチン状に変形したり、基礎が強いものはガラス窓も割れず傾いた。また、道路は勿論、埋設管、河川の護岸などが段差等により被害を受けた。昨年度の報告¹⁾の段階では、この原因として①別府－島原地溝帯に関係した南北方向の引張り力による正断層型の落ち込みにより発生した。②カルデラの縁から内側に基盤が急に落ち込んでいる地区のため、表層の軟弱層の厚さも急増する箇所であり、地震動で体積圧縮した量が部分的に異なり段差が発生した。または、カルデラの陥没に伴い表層内にも正断層型のずれが生じかけていたところに地震が襲い、表層までずれが及んで段差が発生した。③横ずれ雁行断層により局所的に陥没が発生した、といったことがとりあえず考えられたが、被災状況を見ただけではこれらが原因なのか、または他に原因があるのか分からなかった。

これに対し、今回科研費の補助を得て研究を実施することが出来るようになったため、地震から1年経

った2017年5月から後述する10名で研究を開始した。研究の進め方は以下のように計画した。

- (1) 合成開口レーダーによる阿蘇のカルデラ内の広域な地盤変形量の計測
- (2) 帯状陥没発生箇所の抽出
- (3) 現地の被災状況の詳細な調査
- (4) 表層および深層の地層構成に関する探査
- (5) 代表的な地区に対する詳細な地盤調査および試料採取
- (6) 採取した試料に対する各種室内試験
- (7) 地震応答解析や変位解析などの実施と、上記の調査結果を総合したメカニズムや本復旧方法の検討
- (8) 国内の他地域における類似の被害発生の可能性の検討および対策方法の検討

被災地では陥没発生のメカニズムや地盤状態が分からず住民の方々が復旧できず困っていらっしゃることもあり、研究を早く進めているところである。(1)～(4)のうちの一部の研究成果が出てきたので、以下に中間報告をしたい。

2. 広域な地盤変状発生状況の調査方法および結果

阿蘇のカルデラ北部の広域な地盤変状発生状況を調べるため、熊本地震前後の複数の陸域観測衛星画像（合成開口レーダー画像）を使って干渉SAR画像を基に検討を行った。JAXAが運用するだいち2号に搭載した合成開口レーダ（SAR）は、レーダーの波長が約24cmと長く、植生をある程度透過して地表までの距離を直接観測することができる特徴がある。また、本レーダーの地表分解能は約3mと高く、観測画像の大きさは約50km四方と阿蘇山のカルデラ地形を十分に包含することができる。そこで、熊本地

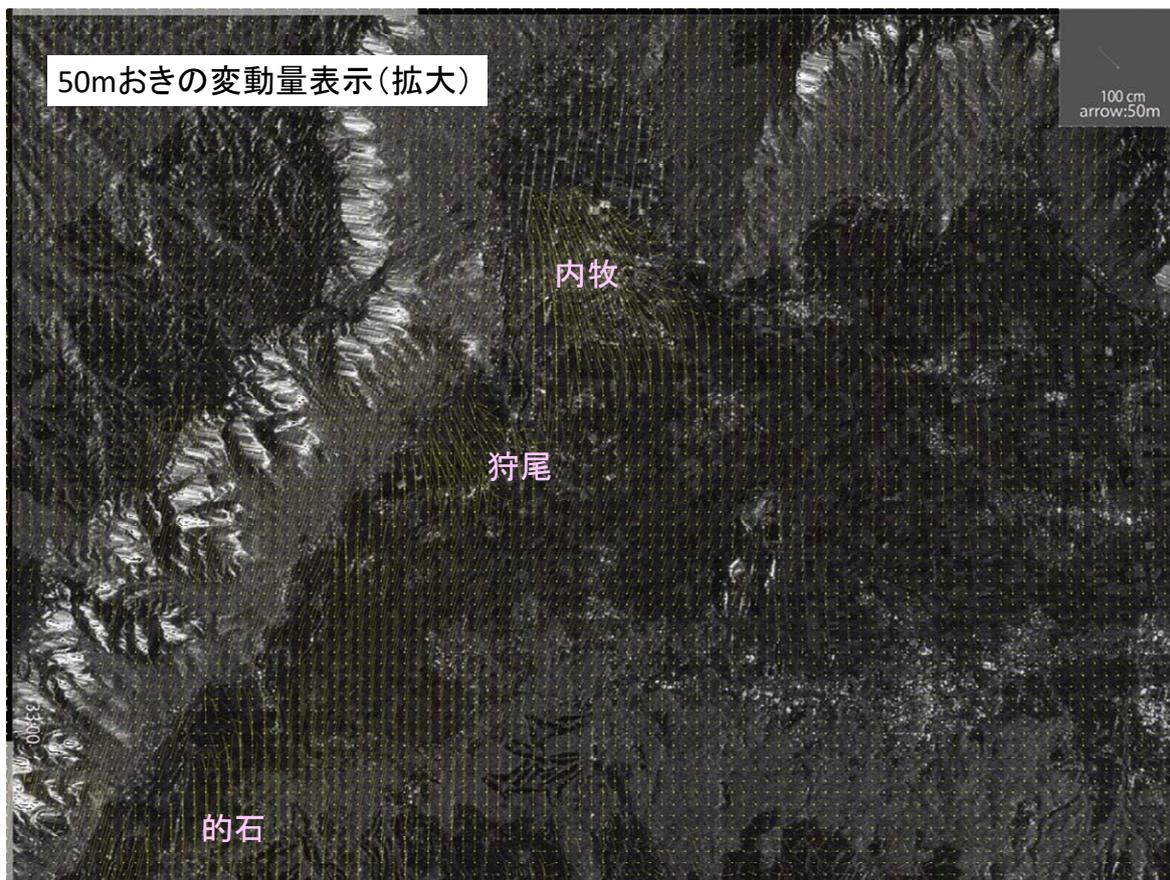


図1 地震前後の合成開口レーダー画像を処理して求めた地盤変動量の分布

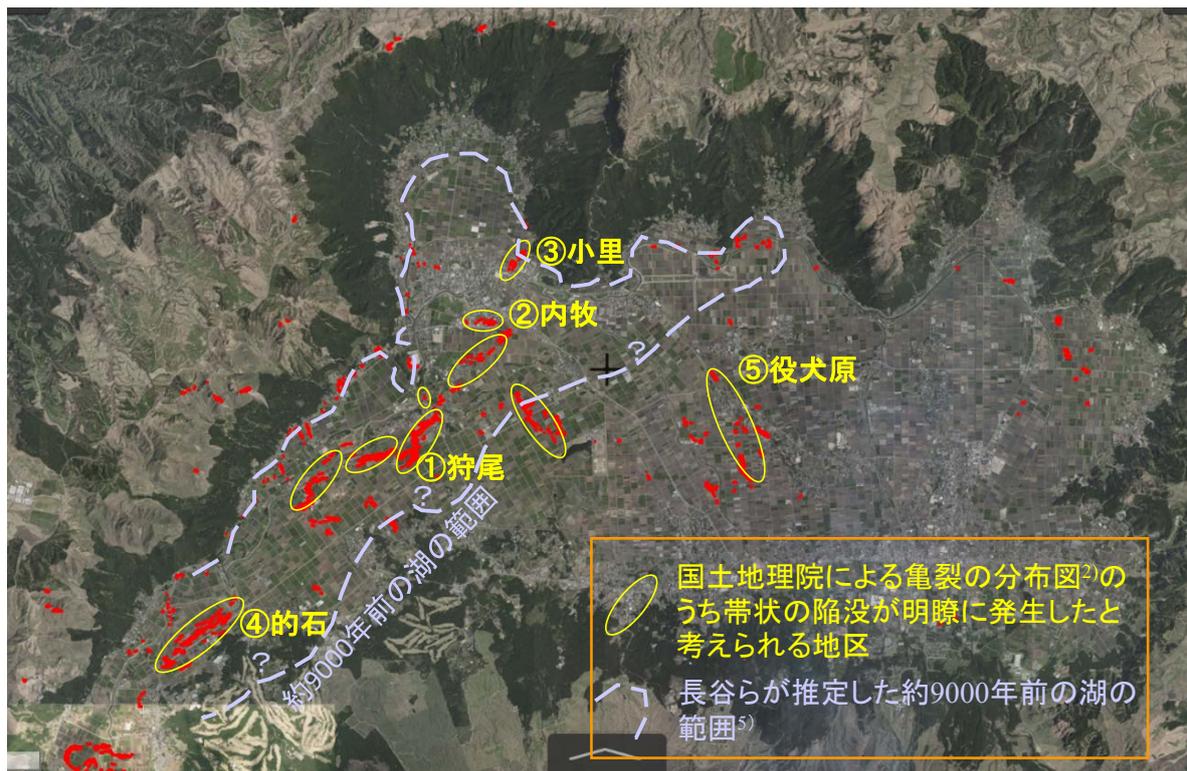


図2 国土地理院によって判読された亀裂発生箇所²⁾のうち帯状陥没が発生したと考えられる地区

震の前後で観測した画像を干渉処理することで、この間に生じた地表の変形量を計測することとした。具体的には2016年4月16日の熊本地震の本震を挟む前後2時期の画像を3方位軌道分用意し、各方位毎に差分干渉処理し、それらを成分分離し、地震により発生した東西・南北・鉛直変位成分の分布を求めた。

図1にこのようにして求めた50mおきの水平方向の変動量の分布を示す。北側の外輪山も含めて阿蘇谷全体で数十cmほど北側に変動しているようであるが、その中でも内牧や狩尾地区などでは変動量が特に大きい地区が存在していることが見てとれる。

一方、国土地理院では地震後に撮影された航空写真から亀裂の分布図を作成し公開されている²⁾。これらの亀裂が帯状の陥没に起因したものかどうか、現在まだ同定作業を行っている途中であるが、地震後数回にわたっておこなってきた現地調査結果から大まかに判断してみると、図2中に楕円で示した地区がこれに該当するのではないかと考えられる。これらは阿蘇谷内の、役犬原からの的石にかけての約7kmの範囲に発生したようである。小里～的石にかけては北東～南西方向、役犬原付近では北西～南東にかけて細長い陥没が発生した。そのうち、狩尾、内牧、小里、的石、役犬原地区での被災状況を写真1～5に示す。これらのうち、狩尾地区は特に被害が甚大であり、また、ヒアリングなどもまずこの地区で行ったので、本稿では狩尾地区での調査結果を示す。

3. 狩尾地区の被災状況の詳細な調査

現地の被災状況の詳細な調査に関して、まず住宅に被害が多く発生した小里、内牧、狩尾で合計7人の住民の方々からインタビュー方式でヒアリングを行い、さらに現在も他の住民の方々からの調査を進めている。このうち、地震から1年1か月後に狩尾で現地の案内もしてもらいながら5名の方にお聞きした結果³⁾を以下に示す。

図3に陥没や地割れが発生した概略の位置を示す。図中実線で示したのは国土地理院で調べられた亀裂であるが、この地区では図4に示すように住民の方も詳細に亀裂や陥没の分布を調べられている。これを見ると国土地理院の分布に加えて図3中の③の地区でも亀裂や陥没が発生している。また、⑤の田



写真1 狩尾地区の被害



写真2 内牧地区の被害



写真3 小里地区の被害



写真4 的石地区の被害



写真5 役犬原地区の被害



写真6 とがと呼ばれる硬い層

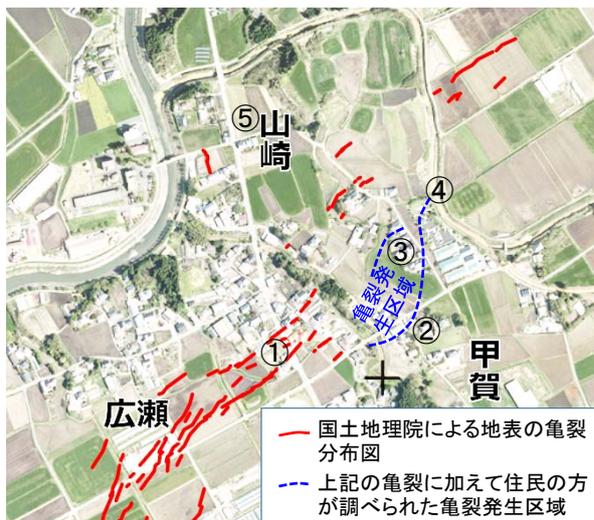


図3 国土地理院で調べられた狩尾地区の亀裂分布に住民の方が調べられた亀裂を加筆した図³⁾

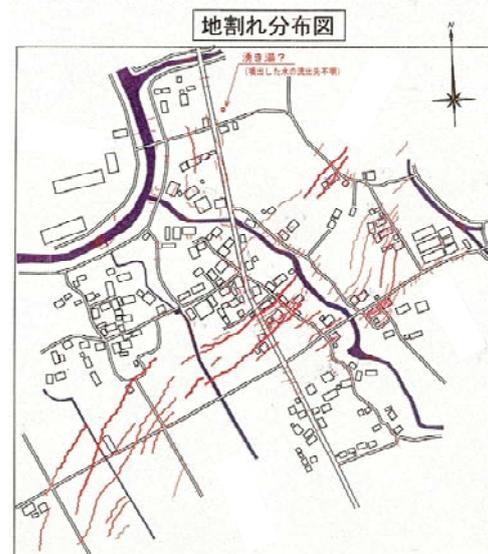


図4 住民の方が作成された地割れ分布図 (高橋広作氏作成)

んぼの中には温かい水が噴き出したとのことで、1年経っても噴き出しが続いていた。地震時の状況に関しては4月14日に発生した前震の際には陥没は発生せず、16日未明の本震で陥没が発生したとのことである。狩尾地区で陥没深さが最も大きく1.3mも生じた地点①の2名の方によると、i)揺れはあまり感じずにストンと家が落ちた、ii)灯籠や家具が倒れず窓ガラスも割れなかった、iii)幅50cm程度の地割れが発生しそこに竿をさし込んだところ6mほどはいった、とのことである。

一方、陥没深さは余り深くないが地割れは多く発生した地点③の2名の方は、i)地震の最初に突き上げられその後横に揺すられた、ii)テレビや灯籠も倒れた、と話されており、同じ地区内でも少し震動の様子は異なったようである。地震後の変化に関しては、地点①の方によると地震後に地盤変状は進んでいないとのことである。ただし、地震後しばらくは雨が亀裂に入り宅地に水が溜まることはなかったが、ツユ末期になってからは溜まり出したとのことである。地面が少し低い南々西側の田んぼには水が溜まり、池のようになっていた。なお、地点②の方によると古くから家が建てられてきた箇所の上層には写

真 6 に示すような「とが」と呼ばれる硬い砂質土層（リモナイトではないかと思われる）があるとのことで、地震でそれが割れて家が傾いたのではないかと推測されていた。また、地点④にはかつて 10 数 m の北落ちの滝があったとのことで、この硬い砂質土層の分布の境界に該当するのかもしれないと思われた。

4. 既往の地盤調査結果の収集および表面波探査

阿蘇谷内の地層構成を把握するために、阿蘇市や熊本県などで実施された既往の地盤調査結果を収集した。また、狩尾、内牧、小里の 3 地区では陥没区間およびその両側の表層地盤状況を調べるため、それぞれ 200m～300m の区間で表面波探査を行った。図 5 に狩尾地区における表面波探査区間と結果を示す。図中左側は北側に相当するが、陥没区間の南側に比べて北側の方が全体に S 波速度が遅い結果となった。また、陥没区間では北側より少し S 波速度が遅い結果となった。

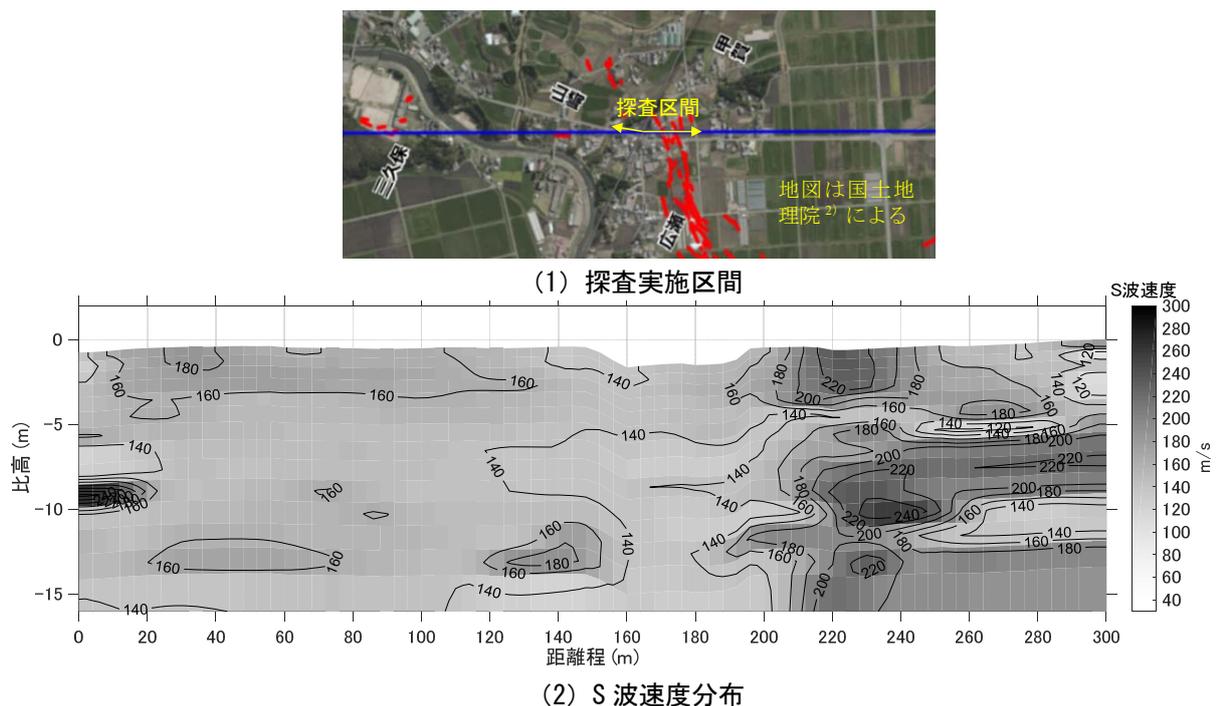


図 5 表面波測定区間および測定結果

5. 狩尾地区を通る測線における変動量、地層構成、ライフライン被害の比較

狩尾地区では図 3 に示すように、県道 175 号線にほぼ直交して帯状の陥没が発生した。そこで県道に沿った北北西～南南東の向きで図 6 に示す長さ約 3 km の測線①-①'をとり、この測線沿いの地盤の変動や地層構成などを比較してみた。図 7 (1) にまず国土地理院によるクラック発生位置を示す。また、図 7 (2) には測線沿いに 5 メッシュ DEM から求めた地表面標高を、起点①からの距離とともにプロットして示す。県道 175 号線での明らかな陥没区間は図 3 に示すように 50m 程度であるが、図 4 によると南側（終点側）にもう少し広い範囲でクラックが発生しているようなので、とりあえずここでは始点①からの 1600m～1800m の区間を陥没発生区間と見做して考察をしてみる。地表面標高を見ると終点の①'から 1800m 付近にかけて約 1/100 の傾きで標高が低くなっている。その後勾配は緩やかになり、1100m 付近でほぼ平らになっている。ただし、1800m～1100m の間でも 1050m 付近など局所的に低い所も 3 箇所あるが、これらは小河川を横断している所である。

続いて図 1 や図 6 に示す合成開口レーダーから得られた変動量をもとに、測線沿いの水平変位および

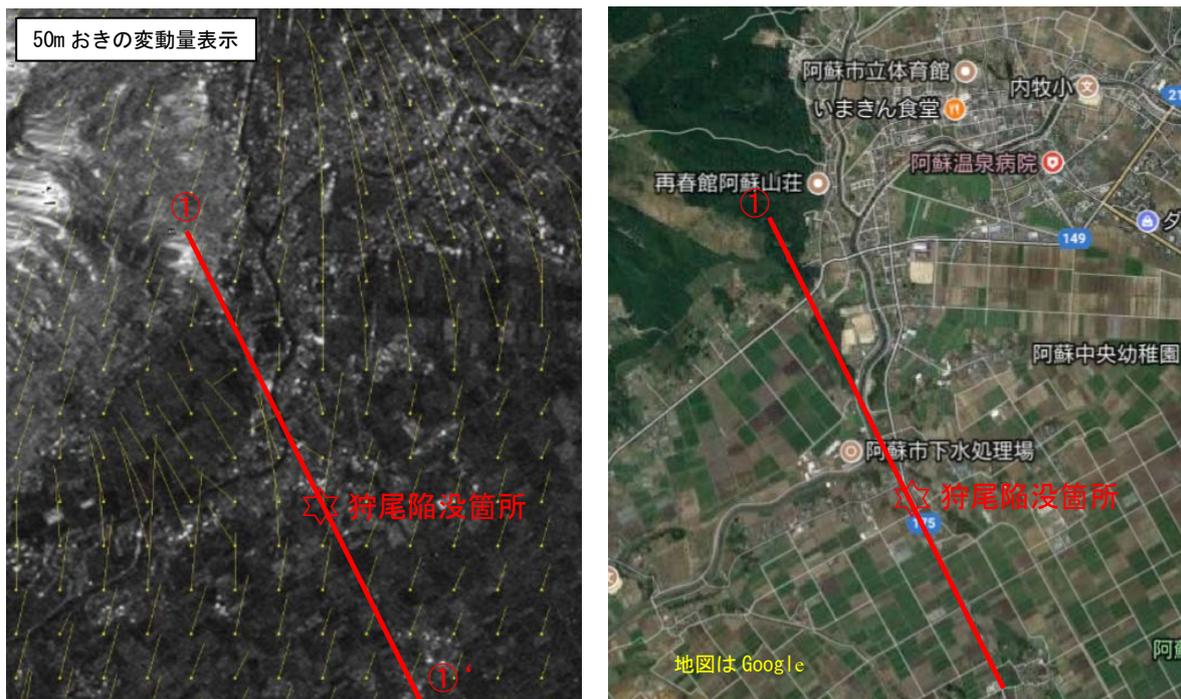


図 6 狩尾地区で設定した測線位置

鉛直変位の分布を求めると図 7 (3)、(4) となった。なお、ここでのプロット間隔は約 27.6m である。また、水平変位は北北西の起点①の方向に向いた場合に+としてある。さらに、この水平変位の分布から地表面の水平方向のひずみ分布を計算してプロットすると図 7 (5) となった。この場合は圧縮を+と表示してある。これらの水平・鉛直変位および水平方向のひずみ分布を陥没発生箇所と比較すると、以下のようなことが考察される。

- (1) 終点①' ~1800m 付近にかけては、水平変位はこの地域全体で発生している 50cm 程度以上には発生していない。また鉛直変位、水平ひずみとも発生していない。
- (2) 1800m~1700m 付近にかけて水平変位と沈下量が急増し、大きな引張りひずみが発生している。そして水平変位は約 2.5m (上記の地区全体の変位量を差し引いた値)、引張りひずみは約 2.5%の負のピーク値に達したあと、水平変位量は 1450m 付近まで減少し、水平ひずみは引張りから圧縮に転じて 1600m 付近で約 2.5%のピーク値に達したあと小さくなり、1450m 付近では再度引張りに転じている。
- (3) 1450m~1050m 付近にかけて水平変位は 1400m 付近で一度大きくなった後徐々に減少し、鉛直変位も 1400m 付近で一度小さくなった後 1050m 付近まで徐々に増加している。水平ひずみは 1400m~1100m 付近で比較的一定な 0.5~1%の圧縮ひずみが発生している。

次に、4. で前述した既往地盤調査データのうち測線沿いのものを抽出し、図 7 (6) に距離に応じて表示した。これを見ると 2400m~1800m 付近にかけては表層に硬い砂質土層が堆積しているのに対し、1800m~1050m 付近にかけては表層には軟弱な粘性土が堆積している。なお、これらの地盤調査は地表面から 20m 程度の深度までしか行われていないが、その中でも深い 2 カ所の調査結果によると標高約 460m 付近で深は軟弱な粘性土層になっている。長谷らによると、約 9000 年前には図 2 に示したように阿蘇谷には湖が形成されていた⁵⁾ のことであり、この軟弱粘性土はこの湖に堆積した層で、厚さは数十 m と厚いのではないかと考えられる。

図 7 (7) には上下水道の被害箇所を示す。陥没区間では道路陥没や亀裂によって水道管の寸断や下水道管の破損・たるみが発生している。その他、この地域ではマンホールへの管路の突出しやマンホール自体の被害も発生している。

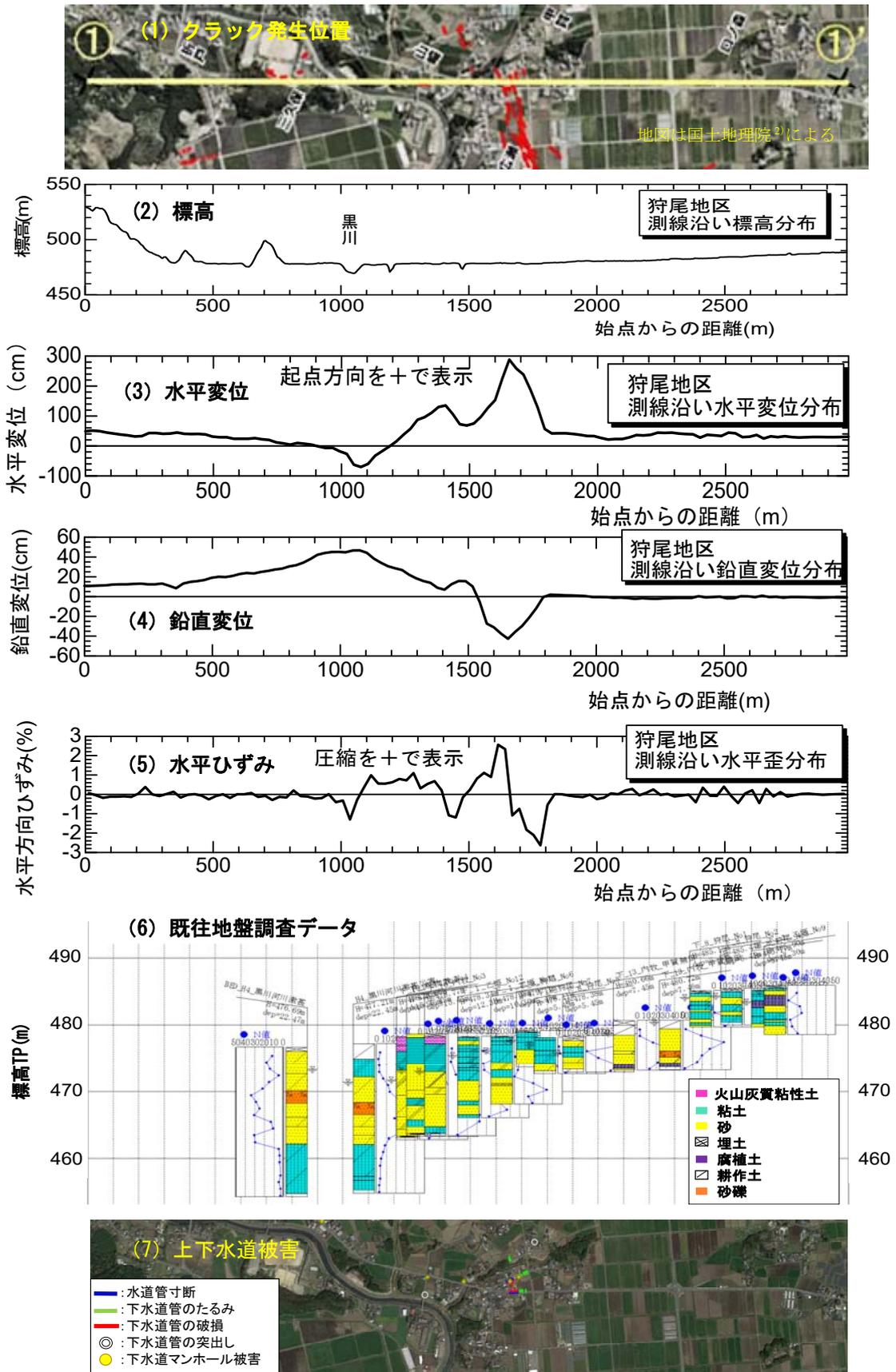


図7 狩尾を通る測線での各種調査結果の比較

6. まとめ

2016年熊本地震により阿蘇谷で発生した帯状の陥没のメカニズムや復旧方法などに関して、地震発生の1年後から詳細な調査を開始した。これまでに地盤変状、被害状況、表層の地層構成などを調べてきて、本稿では狩尾地区でのこれらの結果を報告した。ただし、メカニズムを確定するまでには深い地層構成や、詳細な地盤調査・試験、解析などを行っていく必要がある。現在、微動アレー観測を広い範囲で行ってきたところであり（一部は6）で報告）、これから詳細な地盤調査、各種土質試験などを行っていく予定である。そして狩尾地区だけでなく全地区での調査・試験・解析結果をもとに、帯状陥没の発生メカニズムや復旧方法に関して検討していく予定である。

なお、本研究はJSPS 科研費基盤研究(B)17H03306 の補助を受けて10名（安田進（東京電機大学）・大保直人（地震予知総合研究振興会）・島田政信（東京電機大学）・千葉達朗（アジア航測）・原口強（大阪市立大学）・永瀬英生（九州工業大学）・村上哲（福岡大学）・先名重樹（防災科学技術研究所）・伊東周作（基礎地盤コンサルタント）・石川敬祐（東京電機大学）で共同研究を行っている。また、実施にあたっては阿蘇市役所および住民の方など多くの方々にお世話になっており、感謝する次第である。

参考文献

- 1) 安田進・石川敬祐・佐藤剛・永井慎太郎：熊本地震による地盤関係の被害と過去の被害との比較、日本地震工学会第12回年次大会梗概集、2016、O1-5.
- 2) 国土地理院：平成28年熊本地震・空から見た（航空写真判読による）布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図、<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>. （参照2017-6）
- 3) 安田進・村上哲・永瀬英生：2016年熊本地震による阿蘇カルデラ内の陥没被害に関するヒアリング、日本第四紀学会講演要旨集、2017、p.12.
- 4) 国土地理院：基盤地図 情報数値標高モデル（航空レーザー測量）、<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>. （参照 2017-9）
- 5) 長谷義隆・宮縁育夫・春田直紀・佐々木尚子・湯本貴和：中部九州阿蘇カルデラ北部阿蘇谷の最終氷期後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、2010、pp.1-10.
- 6) 大保直人・先名重樹・安田進・石川敬祐・野村勇斗：熊本地震による阿蘇カルデラ内で発生した陥没周辺の地盤構造評価、土木学会第37回地震工学研究発表会、2019。（投稿中）