

GNSS測量と空中写真測量による 2016年熊本地震の地表面の変状の分析

久保寺 貴彦¹・鈴木 崇伸²・政春 尋志³・松尾 栄治⁴

¹正会員 東洋大学助教 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: kubodera@toyo.jp

²正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: tsuzuki@toyo.jp

³正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: masaharu@toyo.jp

⁴正会員 九州産業大学准教授 工学部都市基盤デザイン工学科 (〒813-8503 福岡市東区松香台2-3-1)

E-mail: ematsuo@ip.kyusan-u.ac.jp

2016年熊本地震の阿蘇市的石、永草地域における地表の鉛直変状を明らかにするため、現地でGNSS測量を行うとともに空中写真測量により地表のDEMを作成し、これをGISに展開して、震災前のDEMとの差分を算出した。作成したオルソフォトモザイクを半透明にして既存地図に重ねたことで被害状況の正確な位置を明らかにしつつ、震災前後のDEMの差分を解析した結果、鉛直変状を数値的かつ地域的に明らかにすることができ、着目した地域は全体的に0.0～0.4 mほど隆起していることがわかった。この差分を点検するため、GNSS測量を行った別の地点において、震災前DEMとGNSS測量成果の標高値を比較した結果、震災前後のDEMの差分は確からしいことが確認された。

Key Words : Aerial-photogrammetry, GNSS, DEM, GIS

1. はじめに

2016年熊本地震は震源が浅かったために大きな揺れが起きたことに加え、震源域に断層変位が生じて甚大な被害となった。ライフライン構造物は線状に構築されており、地表面の変状の影響を受けやすい。一方、住宅やビルは地表面の変状よりも揺れの影響を受けやすい構造物といえる。今回の震源域においては断層線に沿って地表面の変状が確認されている^{1)・3)}。ライフライン構造物への影響を考える場合には、目視で確認できない変位分布が必要とされる。

最近リモートセンシング技術の進展が著しく、国土の詳細なデータベースが整備され、観測体制が整っている。今回の熊本地震でも多くの最新測量技術により、被害把握が試みられている^{1)・9)}。中でも、2014年5月に打ち上げたALOS-2に関する報告が多い^{1)・5)・9)}。ALOS-2は、熊本県全域をカバーしており、搭載したセンサPALSAR-2は、夜、雨、雲でも災害を観測可能であり、地震による地殻変動を0.02 mの精度で計測できる利点がある一方、

光学センサを搭載していないので、カラー写真は撮影できない欠点がある。

災害状況をより近い観点で判読するには、空中写真が必須であり、空中写真を用いた変位計測としては1980年代に濱田ら^{10)・13)}が行った日本海中部地震の液状化による地盤変状の分析が有名である。

本研究は、熊本地震の震源地域の複数の空中写真および現地でGNSS測量成果を実施して、空中写真測量により地表の3次元(以下、3Dという)モデルを作成し、地表の変状を明らかにして、ライフライン構造物の被害と対比分析に役立てることである。

著者らは、被害状況の正確な位置を明らかにするため、作成した3DモデルをGISへ展開して、既存地図に重ね合わせるべきと考え、さらに、震災前後の地表の変状を数値的かつ地域的に明らかにするために、GISの解析機能に着目した。空中写真測量の際のGCP(Ground Control Point)を得るために、現地でネットワーク型RTK法VRS(Virtual Reference Station)方式のGNSS測量を10数点行った。

2. 対象地域、空中写真、GNSS測定の概要

著者らは、現地踏査を行って、益城町馬水、宮園地域は、水平変状が顕著である一方で、阿蘇市的石、永草地域は、鉛直変状が顕著であることを確認している。震災後、益城町の住宅被害や阿蘇大橋近傍の大規模土砂災害が最も早く注目⁴⁾されたが、これらに比べて阿蘇市的石、永草地域の地表の鉛直変状の被害報告は少ない。このことから、本稿では、阿蘇市的石、永草地域において、地表の鉛直変状を明らかにすることとした。

空中写真の標定図を図-1に示す。空中写真の撮影日は2016年7月5日である。空中写真は、布田川断層帯周辺の地表の亀裂の分布に沿って撮影されている。このうち、本稿では、C21コースの21枚の空中写真について、空中写真測量を行った。撮影したデジタルカメラは、DMC IIe230であり、RTK法GNSS測量とIMUによって、撮影時のカメラの3D座標値と姿勢が得られている。

2016年7月23日と24日の両日、著者らは、GCPの3D座標値を求めるため、ネットワーク型RTK法VRS方式のGNSS測量を実施した(写真-1)。使用したGNSS測量機は、Nikon Trimble社のTrimble R10である。使用した衛星は、GPS、GLONASSとQZSSの3種であり、使用した周波数帯はL1とL2の2周波である。使用したジオイド・モデルは、日本のジオイド2011 Ver1.0である。GCPは、撮影コースの四隅、車で入れる地点、空中写真に明瞭に映っている舗装のライン標示に着目して10数点選点した。測量計算の結果、GNSS測量による最確値の標準偏差は、0.01 m程度であった。

3. 実施した空中写真測量

使用した写真測量ソフトウェアは、Agisoft社のPhotoScanである。作成した3Dモデルの画面を図-2に示す。上空の青長方形が空中写真の3D位置と姿勢を示していて、地表の丸がGCPの3D位置を示していて、作成した地表の3Dモデルがある。PhotoScanは複数の空中写真から、複数のGCPを用いて自動的に空中三角測量可能、イメージマッチングによりDSMの3D点群を自動的に作成可能、フィルタリング処理により自動的にDSMからDEMを作成可能、自動的にオルソフォトモザイク作成可能である。

空中三角測量を行った結果、設定したGCP9点の最確値の標準偏差を表-1に示す。平面直角座標系XとY、標高Hの標準偏差は、すべて0.15 m以内であった。

イメージマッチングによりDSMの3D点群を自動的に

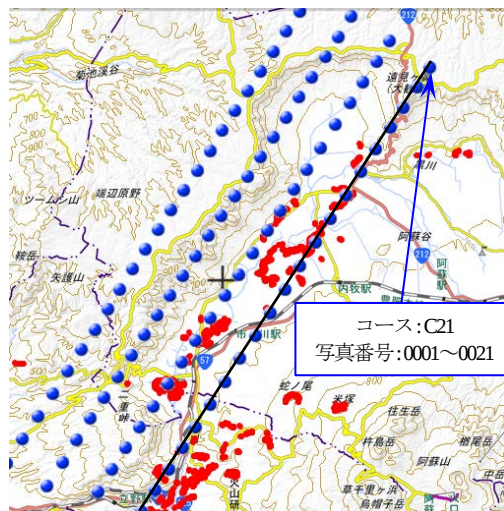


図-1 空中写真の標定図(赤丸は、国土地理院による布田川断層帯周辺の地表の亀裂の分布図)



写真-1 実施したネットワーク型 RTK 法 VRS 方式の GNSS 測量

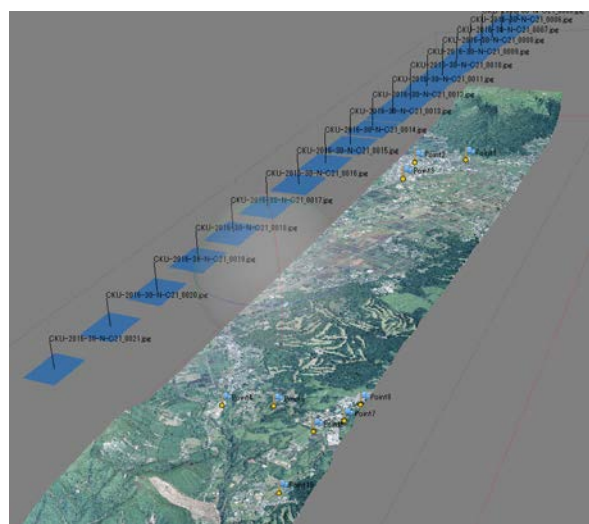


図-2 空中写真測量により作成した 3D モデル

表-1 空中三角測量 GCP9 点の最確値の標準偏差

	X[m]	Y[m]	H[m]
標準偏差	0.088	0.149	0.149

作成して、震災前のDEMと比較するため、フィルタリング処理によりDSMからDEMを作成した。震災前のDEMと標高値の差分を算出するため、作成したDEMをラスタ形式に変換した。

被害状況を判読できるようにするため、3D点群と空中写真からオルソフォトモザイクをラスタ形式で作成した。

4. GISに展開した空中写真測量成果

使用したGISソフトウェアは、ESRI社のArcGIS 10.3である。位置確認のため、背景地図は地理院地図を用いた。3Dデータのサイズは大きいので、スムーズに解析・表示できるよう、着目地域を狭めて空中写真測量成果を抽出した。

作成したオルソフォトモザイクをGISに展開した(図-3)。座標系は、日本測地系2011の平面直角座標系第2系とした。然るべき位置に展開できていることがわかる。作成したオルソフォトモザイクから確実に陥没が見られる箇所を特定して、オルソフォトモザイクを半透明にして既存地図に重ねたことで被害状況の正確な位置を明らかにすることが可能となった(図-4)。水田地帯に発生した断層の亀裂を確認できる。

作成した震災後のDEMをGISに展開した(図-5)。標高490 mほどの比較的平坦な地帯であるが、北西に向かって徐々に低くなっていく地帯であることが確認できる。

第2著者が震災直後に、着目した水田地帯周辺を撮影した(写真-2)。水田地帯に幾つかの断層亀裂が生じていて、目視で6 mほどの幅で、地表面から2 mほど陥没している。

5. 震災前後のDEMの差分

震災前のDEMは、基盤地図情報の2015年の成果(5 mメッシュ、標高値0.01 m単位、航空レーザ測量成果)を用い



写真-2 着目した水田地帯周辺の震災直後の様子

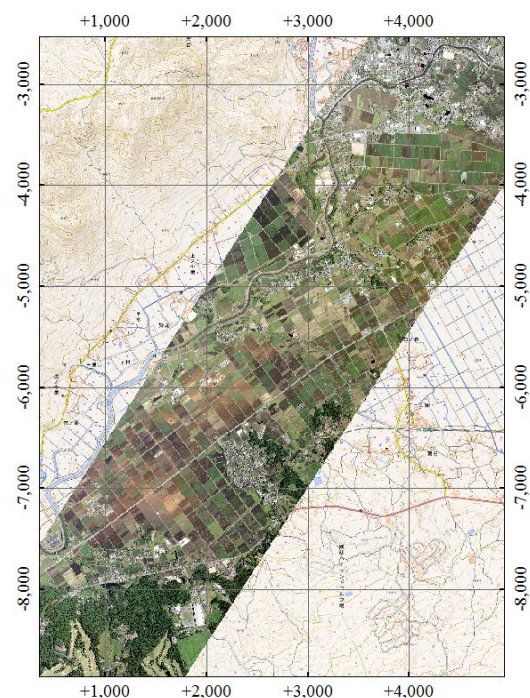


図-3 作成したオルソフォトモザイクをGISに展開

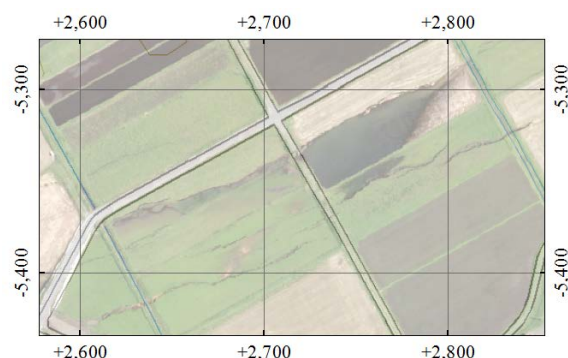


図-4 水田地帯に発生した断層の亀裂を特定

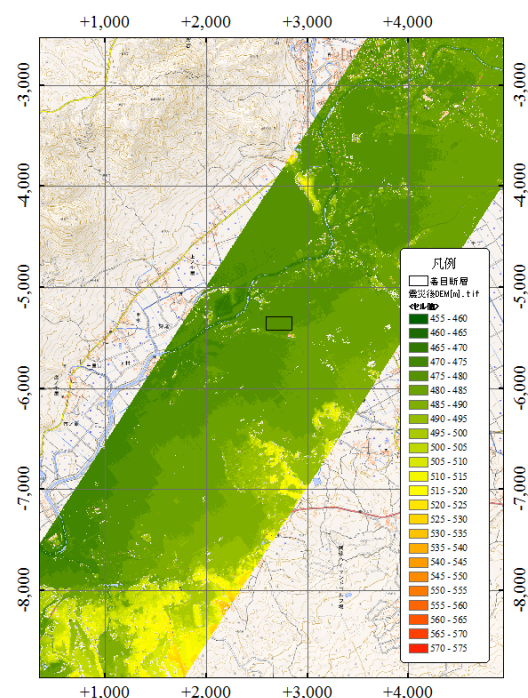


図-5 作成した震災後のDEMをGISに展開

た．震災前のDEMは，地域メッシュ単位であるので着目地域を抽出して，震災後のDEMと標高値の差分を算出するため1mメッシュサイズのラスター形式に変換した．

震災前後のDEMの差分を解析した結果を図-6に示す．標高値を示すピクセル値について，震災前DEMを基準としたので，差分結果は震災後DEM引く震災前DEMとした．森林と建物相当は黒色とした．メッシュサイズは1mとした．震災前後のDEMの差分により，鉛直変状を数値的かつ地域的に明らかにすることができた．解析結果から，着目した地域は，全体的に0.0～0.4 mほど隆起していることがわかった．

6. 震災前DEMと震災後GNSS測量との標高値の較差

震災前後のDEMの差分の数値を点検するため，現地でGNSS測量を行った別の地点において震災後DEMおよび震災前DEMの標高値および差分を比較した(表-2)．この結果から，震災後GNSSの標高値を真値と仮定したときの震災後DEMの標高値の標準偏差は，0.118 mであった．これら地点では，一様に隆起していることが示され，震災後GNSSの標高値と震災後DEMの標高値は近似していて，震災前後のDEMの差分は標準偏差0.118 mの精度で確からしいことが確認された．

7. 震災前後のDEMの横断面図での比較

図-6において，震災前後の差分が見られていなくても，オルソフォトモザイクから陥没が確認できる箇所は，全体的に隆起して，局所的に下がった可能性が考えられる．このため，震災前後のDEMの横断面図で比較することとした．図-7に，着目した横断線と震災前後のDEMの差分を示す．この地域は，図-4で示した水田地帯に発生した断層の亀裂と同一地域である．実際には，陥没しているものの，震災前後のDEMでは差分があまりないような結果である．周囲が隆起して，相対的に陥没が生じたものと考えられる．図-8に，着目した横断面図を示す．A地点から約3 mまでの距離は，舗装された農道であり，地震によって約0.9 mほど隆起していることがわかる．A地点から約20 mまでの距離では，この隆起が続いているが，A地点から約20 m～60 mまでの距離は，震災前より急激に沈下していることがわかる．A地点から約30 mの距離にあたる最も深いところでは，地表面から約2 mの高低差があることがわかる．A地点から約70 m～A'地点までの距離は，隆起の状態にほぼ戻っていることがわかる．

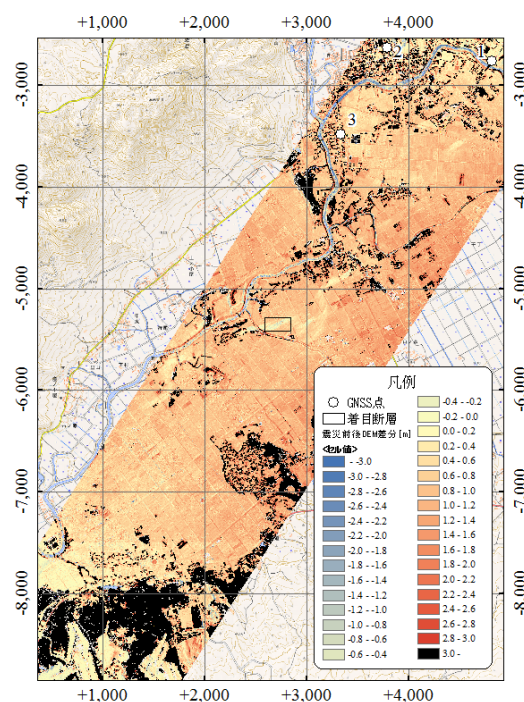


図-6 震災前後のDEMの差分

表-2 GNSS測量地点における標高値と差分の比較

点名	標高値[m]			差分[m]		較差[m]
	震災後GNSS	震災後DEM	震災前DEM	震災後GNSSと震災前DEM	震災後DEMと震災前DEM	
1	482.577	482.608	482.437	+0.140	+0.171	+0.031
2	479.888	479.938	479.605	+0.283	+0.333	+0.050
3	478.084	478.280	477.911	+0.173	+0.369	+0.196

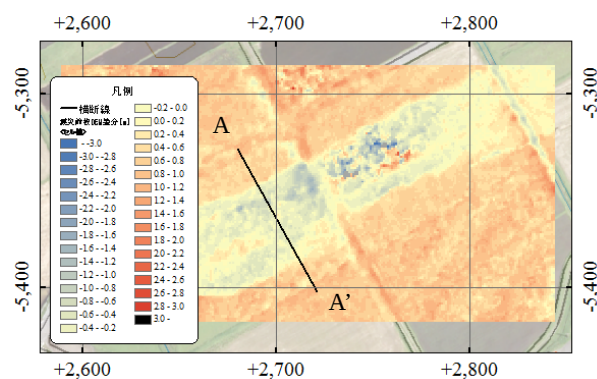


図-7 着目した横断線と震災前後のDEMの差分

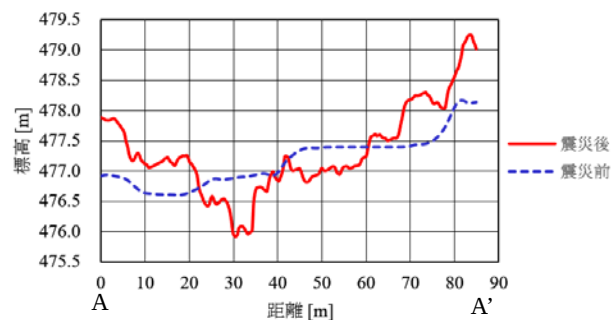


図-8 着目した横断面図

断層の亀裂による鉛直変状を定量的に明らかにすることが可能となった。

8. おわりに

地表の変状を明らかにするため、現地でGNSS測量を行って空中写真測量により地表のDEMを作成し、GISに展開して、震災前のDEMとの差分を算出した。その結果、次の事柄が得られた。

- 1) 作成したオルソフォトモザイクを半透明にして既存地図に重ねたことで被害状況の正確な位置を明らかにすることが可能となった。
- 2) 震災前後のDEMの差分を解析した結果、鉛直変状を数値的に明らかにすることができ、着目した地域は、全体的に0.0～0.4 mほど隆起していることがわかった。
- 3) 震災前後のDEMの差分の数値を点検するため、現地でGNSS測量を行った別の地点において震災前DEMとGNSS測量成果の標高値を比較した結果、震災前後のDEMの差分は標準偏差0.118 mの精度で確からしいことが確認された。

ライフライン構造物の被害との対比分析に役立てるため、同様の手法によって、益城地域の水平変状を明らかにする予定である。特に震災前後のマンホールの中心について、較差ベクトルを算出する予定である。

謝辞：本研究で用いた空中写真は、熊本県等が実施する復旧の支援のため、国土地理院非常災害対策本部情報提供支援班から提供いただいた。国土地理院非常災害対策本部情報提供支援班に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 矢来博司，小林友勝，森下遊，藤原智，三浦優司，宮原伐折羅，SAR 解析グループ：だいち 2 号の干渉 SAR による熊本地震の地殻変動の把握，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.166-167，2016。
- 2) 小林浩，三浦博之：二時期の垂直写真から見る変状

- と被害，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.158-159，2016。
- 3) 石黒聡士，松多信尚，井上公，中田高，田中圭，石山達也，箕田友和，竹竝大士，森木ひかる，廣内大助：UAV を用いた平成 28 年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成，日本リモートセンシング学会誌，Vol.36，No.3，pp.214-217，2016。
 - 4) 国土地理院基本図情報部災害対策班，国土地理院ランドバード：平成 28 年熊本地震の緊急撮影活動，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.152-153，2016。
 - 5) 高橋陪夫，石野達哉，櫻井洋祐，宮崎景太，千葉丈久，高田裕司，山本英子，根本沙織，内藤一郎，田殿武雄，大木真人，夏秋嶺，永井裕人，石原光則，本岡毅，鈴木新一：だいち 2 号および国際チャータ・センチネルアジアによる平成 28 年熊本地震の対応。写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.154-155，2016。
 - 6) 古田竜一，小林優介：FORMOSAT-2 衛星による平成 28 年熊本地震の観測，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.156-157，2016。
 - 7) 千葉達朗，織田和夫，高山陶子，藤田浩司：航空レーザ計測差分による熊本地震本震前後の益城町近辺の変状解析，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.160-161，2016。
 - 8) 頼田修一郎，阿部直樹，榊原庸貴，望月貫一郎：PALS による平成 28 年熊本地震の災害撮影について，写真測量とリモートセンシング，Vol.55，No.3，pp.162-163，2016。
 - 9) 石塚師也，辻健，松岡俊文：2016 年熊本地震に伴う江津湖・水前寺周辺の局所的な地表変動，日本リモートセンシング学会誌，Vol.36，No.3，pp.218-222，2016。
 - 10) 濱田政則，恵本克利，磯山龍二，安田進：地盤の永久変位と地震被害について，地震工学研究発表会講演概要，Vol.18，pp.349-352，1985。
 - 11) 久保慶三郎，濱田政則，磯山龍二：日本海中部地震における地盤の永久変位の測定，地震工学研究発表会講演概要，Vol.18，pp.353-356，1985。
 - 12) 濱田政則，安田進，磯山龍二，恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集 III，No.376，pp.211-220，1986。
 - 13) 濱田政則，磯山龍二，佐藤修：液状化による鉛直方向の地盤の永久変位，地震工学研究発表会講演概要，Vol.19，pp.181-184，1987。