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年熊本地震による地表面の変状を明らかにするため、現地にてGNSS測量を行うとともに空中写真測量により地表面の3Dモデルを作成した。また、検証点において、作成したモデルの位置精度を検証した。作成した震災後の地表モデルをGISにより震災前の地表モデルに重ね合わせて、地表面の変状を分析することとした。阿蘇市的石・永草地域において、震災前後DEMの差分を解析した。その結果、鉛直変状を面的かつ定量的に明らかにすることができた。さらに、益城町安永地域において、震災前後のマスとマンホールを中心位置の座標値を計測した。その結果、水平変状を面的かつ定量的に明らかにすることができた。

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。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⁾。上・下水道管などのライフライン構造物は、線状に構築されており、地表面の変状を受けやすく圧縮、引っ張りや曲げによって破壊に至る。断層を考慮したライフライン構造物の設計法は確立しておらず、地表面とライフライン構造物の変状を明らかにするために、地表面の変状の分析が必要である。

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、天候に左右されず、昼夜を問わずに地表面を観測可能であり、地震による地殻変動を衛星への視線方向については相対的に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。災害状況をより直感的に判読するには、空中写真が必須であり、空中写真を用いた変状計測としては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。

本研究の目的は、熊本地震の震源域における複数の空中写真測量、および現地におけるGNSS測量を通して地表面の三次元(以下、3Dという)モデルを作成し、地表面の変状を明らかにすることで、地表面で確認できるライフライン構造物の被害との対比分析に役立てることである。なお、ライフライン構造物は、マスとマンホールに着目した。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、震災前の地表面に重ね合わせるべきと考え、さらに、震災前後の地表面の変状を面的かつ定量的に明らかにするために、着目地域における震災前後の較差を算出した。なお、空中写真測量の際のGCP (Ground Control Point)を得るために、現地にてネットワーク型RTK法VRS (Virtual Reference Station)方式のGNSS測量を行った。

2. 研究の概要

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・永草地域の地表面の鉛直変位の被害報告は少ない。このことから、阿蘇市的石・永草地域において、地表面の鉛直変位を明らかにするため、作成した震災後DEMを震災前DEMと比較して差分を算出することとした。さらに、住宅被害が著しい益城町において、地表面の変位とライフライン構造物の被害と対比分析に役立てるよう、益城町安永地域の水平変位を明らかにすることとした。このため、作成した震災後3Dモデルからマンホールとマスの中心位置を算出して、震災前の空中写真のマンホールとマスの中心位置と比較して較差ベクトルを算出することとした。最近ではドローンによる測量が行われているが、震災前の地表モデルは、航空機から測量された成果であるので、震災後の地表モデルを震災前の地表モデルと比較する場合には、航空機による空中写真測量が適していると考えられる。

(1) 対象地域と空中写真

空中写真の標定図を図-1に示す。青丸が示す空中写真は、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。撮影したデジタルカメラは、キャリブレーションがされて内部定位が明確であり、RTK法GNSS測量とIMUによって、撮影時のカメラの3D座標値と姿勢が正確に得られている。図-1(a)は、阿蘇市的石・永草地域を含む阿蘇3地区であり、空中写真の撮影日は、2016年7月5日である。このうち、1コースの空中写真について、空中写真測量を行った。図-1(b)は、益城町安永地域を含む熊本断層地区Bであり、空中写真の撮影日は、2016年4月29日である。このうち、2コースの空中写真について、空中写真測量を行った。

(2) 実施したGNSS測量

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、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 Ver 1.0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。

(a) 阿蘇市的石・永草地域を含む阿蘇3地区

(b) 益城町安永地域を含む熊本断層地区B

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

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、PhotoScan Professionalである。PhotoScan Professionalは複数の空中写真と複数のGCPを用いて自動的に空中三角測量可能である。また、イメージマッチングによりDSMの3D点群を自動的に作成でき、グラウンドに分類したポイントクラウドのみを使用することでDEMを作成可能である。さらに、オルソフォトモザイクを自動的に作成可能である。

作成した3Dモデルを図-2に示す。図-2(a)は、阿蘇市的石・永草地域を含む阿蘇3地区であり、図-2(b)は、益城町安永地域を含む熊本断層地区Bである。上空の青色の長方形が空中写真の3D位置と姿勢を示して、地表面の丸がGNSS測量を実施したGCPの3D位置を示している。空中写真測量の結果、地表面の3D点群モデルが作成できた。

空中三角測量を行った結果、設定したGCPの最確値の残差の標準偏差を表-1に示す。表-1(a)は、阿蘇市的石・永草地域を含む阿蘇3地区におけるGCP9点の最確値の残差の標準偏差であり、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。表-1(b)は、益城町安永地域を含む熊本断層地区BにおけるGCP5点の最確値の残差の標準偏差であり、平面直角座標系 X と Y 、標高 H の標準偏差は、すべて0.06 m以内であった。なお、熊本断層地区Bでは、GCPの最確値の残差が大きい地点を外して空中三角測量を行ったため、阿蘇3地区より高い精度であった。

イメージマッチングにより震災後DSMの3D点群を自動的に作成した。阿蘇市的石・永草地域において、震災前DEMと標高値の差分を算出するため、1mメッシュの震災後DEMのラスタ形式を作成した。

阿蘇市的石・永草地域において被害状況を判読できるようにするため、益城町安永地域において水平変状を明らかにするため、それぞれ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. 阿蘇市的石・永草地域における鉛直変状

(1) オルソフォトモザイクによる断層亀裂の位置特定

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系を用いた。使用したGISソフトウェアは、ArcGIS 10.4.1である。位置確認のため、背景地図は地理院地図を用いた。この結果、作成したオルソフォトモザイクは、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透過率50%にして既存地図に重ね

(a) 阿蘇市的石・永草地域を含む阿蘇3地区

(b) 益城町安永地域を含む熊本断層地区 B

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 GCP の最確値の残差の標準偏差

(a) 阿蘇3地区における GCP9 点			
	$X[m]$	$Y[m]$	$H[m]$
標準偏差	0.088	0.149	0.149

(b) 熊本断層地区 B における GCP5 点			
	$X[m]$	$Y[m]$	$H[m]$
標準偏差	0.027	0.042	0.058

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。

第二著者が震災直後に、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

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

写真-2 着目した水田地帯周辺の震災直後の様子

図-5 作成した震災後DEMをGISに展開

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。

(2) 震災前後DEMの差分

作成した1mメッシュの震災後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。

震災前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)を用いた。震災前後DEMの差分の解析のため、震災前DEMと震災後DEMのメッシュサイズをそれぞれ1mに揃えた。測量分野において、重みに距離を用いることが多いため、内挿法は、IDW (Inverse Distance Weighted)法を用いた。

震災前後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－震災前DEM)とした。

3m以上の明らかな高低差がある箇所は、森林と建物相当と考えられるので、黒色とした。メッシュサイズは1 mである。震災前後DEMの差分により、鉛直変状を面的かつ定量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ほど隆起していると考えられる。水田は、農道に比べて隆起を示しているが、特徴のない箇所ではイメージマッチングが正確性に欠ける可能性が考えられる。なお、近傍の水準点2点において、国土地理院が水準測量を実施した結果、+0.16 mと+0.09 mの変動量がわかっている¹⁴⁾。

(3) 震災前DEMと震災後GNSS測量との標高値の較差

震災前後DEMの差分の数値を検証するため、現地にてGNSS測量を行った地点のうち空中写真の標定用GCPに用いなかった別の地点(以下、検証点という)において震災後DEM、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、これら検証点では、震災後

DEMと震災後GNSSの標高値は近似していて、較差は+0.031 m~+0.196 mであった。また、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。すなわち、これら検証点において、震災後DEMは標準偏差0.118 mの精度で確からしいといえる。また、差分から一様に隆起していることが示された。

(4) 震災前後DEMの横断面図での比較

図-6の中心の長方形の箇所において、震災前後の差分が見られていなくても、図-4のオルソフォトモザイクから陥没が確認できる箇所が存在した。これは、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DEMを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DEMの差分を示す。この地域は、図-4で示した地域と同一である。実際には、陥没しているものの、震災前後DEMでは差分があまりない結果である。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。A点から3 m離れた地点をB点、20 m離れた地点をC点、30 m離れた地点をD点、60 m離れた地点をE点、70 m離れた地点をF点とした。図-8に、着目した横断面図を示す。A点からB点までは、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点からC点まではこの隆起が続いている。しかし、C点からE点までは震災前より急激に沈下していることがわかる。沈下が最も深いD点では、地表面から約2 mの高低差があることがわかる。F点からA'点までは、再び隆起の状態に戻っていることがわかる。震災後DEMの波形は、農道に比べて水田地帯が乱れている。これは、植生のような明確でない箇所ではイメージマッチングが正確性に欠けると考えられる。全体としては、断層の亀裂による鉛直変位を面的かつ定量的に明らかにすることができた。

5. 益城町安永地域における水平変状

(1) 震災前マンホールとマスの中心位置の座標値計測

益城町安永地域における震災前マンホールとマスの中心位置の座標値を求める場合、台帳図の位置精度は低いことがわかっている¹⁵⁾ことから、それ以上の精度が期待できるよう震災前の空中写真1枚について、震災前の街区多角点に着目して幾何補正を行った。さらに、幾何補正の精度を高めるため、着目地域を高低差や写真の歪みの影響が少なくなるよう実際にライフライン構造物の被害が確認されている地域周辺に狭めて、幾何補正の参照点を設定することとした。参照点には、震災前の街区多角点の座標値¹⁶⁾を入力した。

図-6 震災前後 DEM の差分

表-2 検証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 DEM の差分

図-8 着目した横断面図

図-9に、幾何補正した震災前の空中写真を示す。使用した空中写真は2008年10月撮影の撮影縮尺1/10000であり、使用した街区多角点の座標値は2006年1月7日と9日の成果である。着目地域を実際に路面の変状が大きい地区に注目して、この地域周辺について、参照点を4点設定して、アフィン変換を行った。その結果、RMSEは、0.165 mであった。直接観測された街区多角点の座標値を幾何補正の参照点としたことで、比較的高い精度で幾何補正が行われたと考えられる。この幾何補正した震災前の空中写真から震災前マンホールとマスの中心位置座標を計測することが可能になった。

(2) 作成した震災後オルソフォトモザイクの水平位置精度の検証

作成した震災後オルソフォトモザイクの水平位置精度を検証するため、現地にてGNSS測量を行った地点のうち、検証点においてGNSS測量およびオルソフォトモザイクの座標値を比較した(表-3)。これらから、GNSSの座標値を真値と仮定したときのオルソフォトモザイクのX座標値の標準偏差は0.042 mであり、Y座標値の標準偏差は0.109 mであった。辺長を算出すると、作成した震災後オルソフォトモザイクの水平位置は標準偏差0.117 mの精

度で確からしいことが確認された。この標準偏差0.117 mは、ネットワーク型RTK法VRS方式GNSS測量による標準偏差0.01 m程度より大きいものの、台帳図による標準偏差0.3 m程度¹⁵⁾より小さいことから、この手法と精度は、ライフライン構造物の被害との対比を目的として、災害によってGNSS測量をライフライン構造物に対して行えない場合、有効であると考えられる。

(3) 震災前後マンホールとマスの中心位置の較差ベクトル

判読可能なマンホールとマスに注目して変位計算を行った。震災後マンホールとマスの中心位置座標は、作成したオルソフォトモザイクから計測した。計測した震災前後マンホールとマスの中心位置座標、較差ベクトルの方向角と長さを表-4に示す。着目したマンホール2点とマス6点の計8点について、較差ベクトルの方向角は、平均値 $29^{\circ}24'17''$ 、標準偏差 $20^{\circ}33'01''$ であり、長さは、平均値0.609 m、標準偏差0.173 mであった。方向角の標準偏差が大きいことは、マンホールとマスの震災前後の位置が近いことに起因すると考えられる。精度向上のためには、震災前のマンホールとマスの位置計測の精度を高める必要があるので、高い地上分解能の空中写真の入手、幾何

図-9 幾何補正した震災前の空中写真(2008年10月撮影)

表-3 検証点におけるGNSS測量とオルソフォトモザイクの座標値の比較

点名	GNSS測量		オルソフォトモザイク		較差	
	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]
1	-23019.735	-17238.494	-23019.683	-17238.361	+0.052	+0.133
2	-23881.407	-16762.981	-23881.394	-16763.075	+0.013	-0.094
3	-23884.690	-16763.292	-23884.738	-16763.387	-0.048	-0.095

表-4 計測した震災前後マンホールとマスの中心位置座標, 較差ベクトルの方向角と長さ

点名	震災前の水平位置		震災後の水平位置		較差ベクトル	
	X [m]	Y [m]	X [m]	Y [m]	方向角 [ddmmss]	長さ [m]
マス1	-23219.240	-17594.069	-23218.868	-17593.568	53° 24' 20"	0.624
マス2	-23229.633	-17591.508	-23229.358	-17591.150	52° 28' 12"	0.451
マス3	-23241.529	-17588.421	-23241.199	-17588.234	29° 32' 20"	0.379
マス4	-23252.373	-17585.664	-23251.826	-17585.520	14° 44' 56"	0.566
マス5	-23263.232	-17582.902	-23262.696	-17582.625	27° 19' 46"	0.603
マス6	-23274.037	-17580.133	-23273.265	-17580.073	04° 26' 39"	0.774
マンホール1	-23236.383	-17588.784	-23236.075	-17588.371	53° 17' 09"	0.515
マンホール2	-23281.732	-17577.093	-23280.770	-17577.092	00° 03' 34"	0.962
平均値					29° 24' 17"	0.609
標準偏差					20° 33' 01"	0.173

補正用の多数の参照点確保のために現地にてTS(Total Station)とプリズムによって街区多角点からの多数点の偏心観測などが考えられる。

図-10に、震災前後マンホールとマスの中心位置の較差ベクトルを示す。背景地図は、オルソフォトモザイク(2016年4月)である。強調のため、較差ベクトルの長さを20倍とした。較差ベクトルの方向角と長さは似た傾向ではあるが、個々に異なっていることが確認できる。なお、近傍の三角点1点において、国土地理院が再測を実施した結果、北東に0.80 m程度の変動量がわかっている¹⁴⁾ことから、本研究の提案手法による成果は、三角点の変動量との整合性が認められる。また、本研究の提案手法による成果は、三角点と異なって面的に水平変状を明らかにでき、地殻変動による複雑な地表面の変状を捉えられる可能性を示した。さらに、地表面のライフライン構造物の変状を個別に着目できるため、地表面の変状とライフライン構造物の被害との対比分析に役立てる可能性を示唆した。

6. おわりに

地表面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面の3Dモデルを作成した。作成した震災後の地表モデルをGISにより震災前の地表モデルを重ね合わせて、地表面の変状を分析した。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) 阿蘇市の石・永草地域において、震災前後DEMの差分を解析した。その結果、鉛直変状を面的かつ定量的に明らかにすることができ、着目した地域は、

図-10 震災前後マンホールとマスの中心位置の較差ベクトル

全体的に0.0~0.4 mほど隆起していると考えられる。

- 3) 阿蘇市の石・永草地域の検証点において、震災後DEMとGNSS測量の標高値を比較した。その結果、震災前後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。
- 4) 益城町安永地域の検証点において、GNSS測量およびオルソフォトモザイクの座標値を比較した。その結果、作成した震災後オルソフォトモザイクの水平位置は標準偏差0.117 mの精度で確からしいことが確

認された。

- 5) 作成した震災後オルソフォトモザイクの水平位置の標準偏差0.117 mは、ネットワーク型RTK法VRS方式GNSS測量による標準偏差0.01 m程度より大きいものの、台帳図による標準偏差0.3 m程度より小さいことから、この手法と精度は、ライフライン構造物の被害との対比を目的として、災害によってGNSS測量をライフライン構造物に対して行えない場合、有効であると考えられる。
 - 6) 益城町安永地域において、震災前後マンホールとマスの中心位置座標を計測した。その結果、水平変状を面的かつ定量的に明らかにすることができた。
 - 7) 本研究の提案手法による成果は、三角点と異なっただけで面的に水平変状を明らかにでき、地殻変動による複雑な地表面の変状を捉えられる可能性を示した。さらに、地表面のライフライン構造物の変状を個別に着目できるため、地表面の変状とライフライン構造物の被害との対比分析に役立てる可能性を示唆した。
- 標定方法、幾何変換方法、使用するソフトウェアによって精度が異なること、写真測量技術の向上によって精度が向上することが明らかであるので、現在の手法と精度を示しつつ高精度を目指して研究を蓄積する必要がある。

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る。

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, No. 376/III-6, 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.
- 14) 国土地理院 熊本地震で変動した基準点の新しい成果を公表: <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60019.html> (2016 年 10 月 31 日閲覧)
- 15) 久保寺貴彦, 那須充, 草野克己, 姫野賢治: 基準点測量, 細部測量および GIS による下水道施設を対象とした高精度 3D データ作成, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 71, No. 1, pp. 30-42, 2015.
- 16) 国土交通省地籍調査 Web サイト都市再生街区基本調査及び都市部官民境界基本調査の成果の提供システム: <http://gaikuchosa.mlit.go.jp/gaikuf/> (2016 年 11 月 3 日閲覧)

(2016. 11. 4 受付, 2017. 1. 4 修正, 2017. 2. 18 受理)

ANALYSIS ON SURFACE DEFORMATION BY 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE USING GNSS AND PHOTOGRAMMETRY

Takahiko KUBODERA, Takanobu SUZUKI, Hiroshi MASA HARU and Eiji MATSUO

The 3-D model of surface deformation was made by aerial photogrammetry and the GNSS surveying was also done in the actual ground, in order to clarify the surface deformation by the 2016 Kumamoto Earthquake. At the verification points, the accuracy of the constructed model was verified. The surface deformation was analyzed by overlaying the 3-D model after the earthquakes on the 3-D model before the earthquakes using GIS. The difference between the DEM before the earthquakes and the DEM after the earthquakes was analyzed in Matoishi and Nagakusa area, Aso-shi. As the result, the vertical surface deformation could be found two-dimensionally and quantitatively. The coordinate values at the center of gully holes and manholes before and after the earthquakes were also measured in Yasunaga area, Mashiki-machi. As the result, the horizontal surface deformation could be found two-dimensionally and quantitatively.