

2016年熊本地震の震源地における マンホール変動量の推定と管路被害の分析

久保寺 貴彦¹・鈴木 崇伸²・田中 宏司³・奥津 大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 アイレック技建株式会社 (〒550-0002 大阪府大阪市西区江戸堀1-22-17)
E-mail: kouji.tanaka.fp@airec.co.jp

⁴正会員 日本電信電話株式会社 (〒305-0805 茨城県つくば市花畑1-7-1)
E-mail: okutsu.masaru@lab.ntt.co.jp

空中写真の分析によりマンホールの座標計算を行い、震災前後の永久変位を定量化する。さらに隣接するマンホールの相対変位を計算して被害調査結果と対比する。震災前の刺針点の座標値の算出方法を提案し、共通の刺針点から震災前後それぞれで空中写真測量を行えるようにして、三次元座標値を計測できるようにした。空中三角測量の結果、提案した震災前の刺針点の座標値の位置精度を検証できた。提案したマンホール変動量の推定の点検のため、変動量のわかっている基準点近傍におけるマンホールなどの変動量を算出して、基準点の変動量と比較した。この結果、算出した変動量は、基準点の変動量とほぼ同様であったことが確認できた。さらに、複雑な変状が疑われるエリアについてマンホールの変動量を推定した。この結果、基準点の変動量とは別の複雑な変状の可能性を示した。

Key Words : aerial-photogrammetry, GCP, GNSS, variation amount

1. はじめに

2016年4月に起きた熊本地震では震源地において極めて強い揺れが観測されるとともに、想定されていた日奈久・布田川断層帯に沿って地表面に多くの亀裂が観測されている。また地下の断層変位に伴う地表の変状により、道路や橋梁などの被害があったことが報告されている。こうした地表変状は埋設管などの線状構造物に大きな影響を及ぼす。現在の耐震設計では断層変位に伴う地表変状は地震外力として取り上げられていないが、日本には多くの断層があることがわかっており、重要度の高い設備では断層変位に抵抗できる性能が望まれる。設計に取り込むためには作用の定量化が必要であり、断層帯に沿ってどのような地表変状があったかを明確にする必要がある。

熊本地震ではリモートセンシング技術を応用した地表変状の研究が多く行われている^{1)~8)}。その中で著者らは震災前後の空中写真を対比して断層変位に伴う地表の変

状を定量化する方法を提案している⁸⁾。近年の写真の高精度化と画像処理技術の向上により、約10cm精度で変状検知ができるとされている。空中写真を利用するためには震災前後で写真に写った被写体が必要とされる。マンホールのふたや排水マスは地表に固定された被写体であり、空中写真で判読することができる。震災前後のマンホールの動きが定量化できれば断層変位による地表の変状を精度よく判定できると考えられる。

熊本地震によって多くの地下設備が被害となった^{9)~10)}。NTTの地下設備も断層が通過した益城町から阿蘇市にかけて壊滅的被害となり、復旧に時間を要している。通信サービス自体はバックアップ設備が準備してあったために通信が途絶した地区はわずかであったが、断層帯がある地域に対応した設備づくりも可能と考えられる。他の都市ライフラインも同様であり、作用が明確になれば、それに対応した性能を確保する設計が可能となる。

今回の研究は、空中写真の分析によりマンホールの座標計算を行い、震災前後の永久変位を定量化する。さら

に隣接するマンホールの相対変位を計算して被害調査結果と対比している。対象とする地域は益城町中心部であり、地表の変状とNTT管路被害の関連を分析している。

2. 震災前後の空中写真を対比する方法

著者らは、現地にてGNSS測量を行うとともに空中写真測量により震災後の地表面の三次元モデルを作成して、一方で、震災前の街区多角点に着目して幾何補正を行った震災前の空中写真を作成して、震災前後それぞれのマンホールとマス中心座標値を計測した⁸⁾。この方法は簡便であるが、震災前後で作成方法が異なり、震災前の幾何補正した空中写真には高さ情報がないので、鉛直変動量は算出できなかった。そうせざるを得なかった原因に、震災前の空中写真で判読可能な刺針点の座標値を算出する方法を確立できていなかったことが挙げられる。本稿では、震災前の刺針点の座標値の算出方法を提案し、共通の刺針点から震災前後それぞれで空中写真測量を行えるようにして、水平位置と標高を計測できるようにした。

(1) 震災前後の空中写真

使用した震災前後の空中写真の諸元を表-1に示す。デジタルとアナログの違いはあるものの撮影高度や撮影縮尺は同条件といえる。デジタル航空カメラは、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。震災後の空中写真はオーバーラップする7枚、震災前の空中写真はオーバーラップする2枚を用いた。震災前後の空中写真ともにマンホールの判読が可能であった。空中写真測量を行う際、これらカメラ名称をもとにしてカメラ諸元が必要となる。

(2) 震災前の刺針点の座標値の算出方法

空中写真測量の際のGround Control Point (GCP) の座標値を得るために、空中写真で判読可能な刺針点の座標値を得る必要がある。震災後の刺針点の座標値は直接観測できるが、震災前の刺針点の座標値は直接観測できないため、基準点の変動量に着目した。

未知数である震災前の刺針点の座標値の算出方法を図-1に示す。XとYは平面直角座標系であり、Hは標高である。1stと2ndはフローの順序である。

1番目に、基準点において、震災後の観測による座標値(X'_c, Y'_c, H'_c)と震災前の既知の座標値(X_c, Y_c, H_c)から変動量($\Delta X, \Delta Y, \Delta H$)を算出した。この算出式を式(1)に示す。

2番目に、基準点近傍で同様の変動量と仮定できる刺針点において、震災後の観測による座標値(X'_p, Y'_p, H'_p)から1番目で算出した変動量($\Delta X, \Delta Y, \Delta H$)を減算して、震災

表-1 使用した空中写真の諸元

	震災後	震災前
撮影年月日	2016年4月29日	2008年10月2日
撮影高度[m]	1,390	1,536
撮影縮尺	10,000	10,000
カメラ名称	UltraCamX	RC30UAGA-F
焦点距離[mm]	100.500	153.660
写真種別	デジタル	アナログ

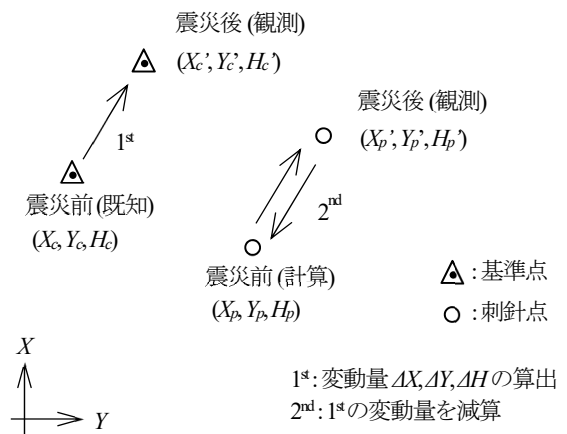


図-1 震災前の刺針点の座標値の算出方法

前の刺針点の座標値(X_p, Y_p, H_p)を算出した。この算出式を式(2)に示す。

$$\begin{cases} \Delta X = X'_c - X_c \\ \Delta Y = Y'_c - Y_c \\ \Delta H = H'_c - H_c \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_p = X'_p - \Delta X \\ Y_p = Y'_p - \Delta Y \\ H_p = H'_p - \Delta H \end{cases} \quad (2)$$

震災後の座標値を得るために、電子基準点のみを既知点とするネットワーク型RTK法GNSS測量によって、簡便に観測を行った。刺針点は、益城町中心部において震災前後それぞれの空中写真で判読可能な地表面の地物であり、かつ、基準点近傍である。

以上から、未知数である震災前の刺針点の座標値を算出することができた。

3. ネットワーク型RTK法GNSS測量による基準点における変動量の算出

基準点¹¹⁾における変動量を算出するため、ネットワーク型RTK法GNSS測量を行った。震災前後の座標値から基準点の変動量を算出した結果を表-2に示す。この結果をもとにした基準点における変動量ベクトルを図-2に示す。メッシュサイズはX方向500m, Y方向400mとした。このエリアをP1~P9まで命名した。1015A, 1016A,

表-2 震災前後の基準点における変動量の算出

点名	変動量		
	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔH [m]
10A08	0.559	1.047	-0.538
10A10	0.569	1.030	-0.593
10A11	0.588	1.038	-0.578
10A16	0.598	1.033	-0.496
10A18	0.568	1.036	-0.528
10A19	0.603	1.020	-0.542
10A26	0.575	0.603	-1.086
10A29	0.507	1.147	-0.631
10A34	0.462	1.176	-0.646
10A59	0.523	1.097	-0.579
1015A	0.347	0.876	-1.368
1016A	0.228	0.646	-1.194
1017A	0.410	1.032	-0.979

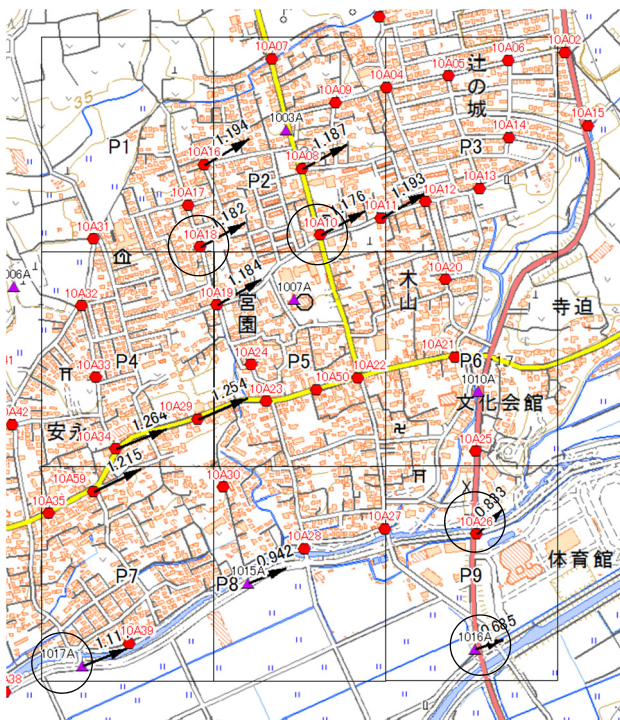
1017Aについて、著者らが観測した震災後の座標値と国土交通省土地・建設産業局地籍整備課が公表した震災後の座標値¹²⁾の較差は3cm以内であった。また、この変動量ベクトルは、国土交通省都市局市街地整備課が公表した水平変動ベクトル図¹³⁾と同様の結果であった。

一見、一様な変状を示しているようだが、10A26の変動量 ΔY と ΔH は、他の基準点の変動量と比べて0.4~0.5mほど異なっていた。10A26に隣接する1016Aの変動量 ΔX は、他の基準点の変動量と比べて0.3mほど異なっていた。P7~P9のエリアの変動量は、P1~P6のエリアの変動量と異なると考えられるが、10A26, 1015A~1017Aでは0.2~0.4mでそれぞれ異なっていた。この辺りで、複雑な変状があったのではないかと考えられる。複雑な変状を解明するため、空中写真測量によってマンホールの変状を分析した。

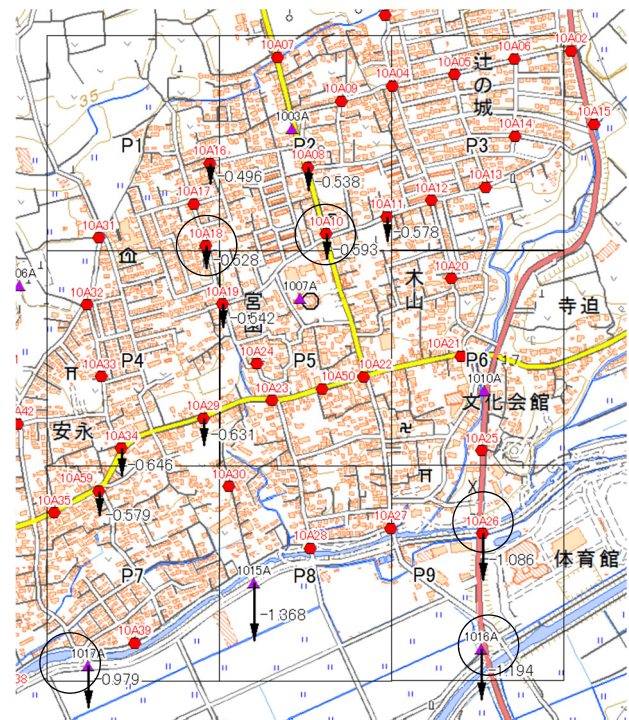
GCPは、バランスよく設定する必要があるため、図-2に示す黒丸5点を設定した。震災前後の空中写真に写っている共通の刺針点について本稿で提案した震災前の刺針点の座標値の算出方法によって震災前後の座標値が揃った。

4. 震災前後の空中写真測量

震災前後の共通の刺針点において、本稿で提案した震災前の刺針点の座標値の算出方法によって震災前後の座標値が揃い、震災前後それぞれで空中写真測量を行える



(a) 水平方向の変動量ベクトル



(b) 鉛直方向の変動量ベクトル

図-2 基準点における変動量ベクトル

ようにして、三次元座標値(X, Y, H)を計測できるようにした。また、空中三角測量の結果、提案した震災前の刺針点の座標値の位置精度を検証できた。

(1) デジタルステレオ図化機による三次元計測

写真測量ソフトウェアは、デジタルステレオ図化機を用いた。デジタルステレオ図化機は、Structure from Motion (SfM)に比べて、アナログ空中写真特有の画像周辺の黒い枠¹⁴⁾にも対応、長時間かかる三次元点群データの解析前に地物を計測可能、公共測量作業規程の準則で標準とされている方式であり実績ある精度管理が可能である。デジタルステレオ図化機は、アジア航測社の図化名人GE2を使用した。

(2) GCPの最確値の残差の標準偏差

GCPの設定後、バンドル・ブロック調整法による空中三角測量を行った。その結果、空中三角測量GCP5点の最確値の残差の標準偏差を表-3に示す。最確値は、最も確からしい値であり、一般に最小二乗法により求める¹⁵⁾、その精度は、標準偏差で表わされる。標準正規分布において、観測値である確率変数が、平均値を中心として標準偏差の範囲内にばらつく確率は68.3%、さらに標準偏差の3倍の範囲内にばらつく確率は99.7%ということがわかっている¹⁶⁾。平面直角座標系 X と Y 、標高 H の標準偏差は、当然ながら震災前が若干劣り、標高が劣るものす

表-3 空中三角測量 GCP5 点の最確値の残差の標準偏差

	X [m]	Y [m]	H [m]
震災後	0.045	0.029	0.143
震災前	0.119	0.038	0.143

表-4 基準点近傍におけるグレーチングとマンホールの震災前後の変動量の算出

(a) 基準点近傍におけるグレーチングの震災前後の変動量の算出

名称	震災後の座標値			震災前の座標値			変動量		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔH [m]
グレーチング最確値	-22958.281	-17137.231	33.335	-22958.636	-17138.233	33.651	0.355	1.002	-0.316
最確値の標準偏差	0.022	0.037	0.126	0.083	0.090	0.048	0.086	0.097	0.135
近傍の基準点10A10	-22959.530	-17148.499	33.479	-22960.099	-17149.529	34.072	0.569	1.030	-0.593
グレーチングと10A10の変動量の較差							-0.214	-0.028	-0.277

(b) 基準点近傍におけるマンホールの震災前後の変動量の算出

名称	震災後の座標値			震災前の座標値			変動量		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔH [m]
N10最確値	-23467.136	-17629.684	17.303	-23467.445	-17630.821	18.728	0.309	1.137	-1.425
最確値の標準偏差	0.022	0.048	0.104	0.026	0.051	0.085	0.034	0.070	0.134
近傍の基準点10A34	-23457.889	-17624.534	18.248	-23458.351	-17625.710	18.894	0.462	1.176	-0.646
N10と10A34の変動量の較差							-0.153	-0.039	-0.779

べて0.15 m以内であった。また、この結果から、本稿で提案した震災前の刺針点の座標値の算出方法によるGCPの相互の水平位置と標高の関係は、標準偏差0.15 m以内で整合性があるといえる。

(3) 三次元座標値および変動量の最確値と最確値の標準偏差の算出

デジタルステレオ図化機により震災前後それぞれの三次元座標値を計測可能になった。三次元座標値の計測精度を高めるため、1つの地物の計測に3回計測を行って三次元座標値(X, Y, H)それぞれの最確値と最確値の標準偏差を算出した¹⁷⁾。この座標値の最確値と最確値の標準偏差から、変動量と最確値と最確値の標準偏差を算出した¹⁷⁾。変動量の最確値は、震災後の座標値の最確値から震災前の座標値の最確値を引いて算出した。

5. マンホール変動量の推定の点検

本稿で提案したマンホール変動量の推定の点検のため、変動量わかっている基準点近傍におけるグレーチング中心とマンホール中心の変動量を算出して、基準点の変動量と比較した。着目したグレーチングは、GCPに使用した基準点10A10近傍のグレーチングである。一方、着目したマンホールN10は、GCPに使用しなかった基準点10A34近傍のマンホールである。これらの点における変動量の算出結果を表-4に示す。

震災後の座標値の最確値の標準偏差は、 X と Y が0.05m以内であり、 H が0.13m以内であった。一方、震災前の座標値の最確値の標準偏差は、 X, Y, H が0.09m以内であった。

グレーチング中心と10A10の変動量の較差は、 ΔX で0.214m、 ΔY で-0.028m、 ΔH で0.277mであった。着目したGCP近傍において、算出した変動量は、基準点の変動量と同様であったことが確認できた。

N10と10A34の変動量の較差は、 ΔX で-0.153m、 ΔY で-0.039m、 ΔH で-0.779mであった。鉛直方向の較差が大きい原因に写真測量そのものの性質と立体視する計測技術によるところが考えられる。GCP以外に着目した地点においても、算出した変動量は、基準点との変動量とほぼ同様であったことが確認できた。

6. マンホール変動量の推定結果

NTT管路被害が報告されているマンホールのうち、P6エリアとP9エリアのマンホールについて、震災前後の変動量を推定した。なお、P9エリアは、前述の変動量のわかっている基準点から複雑な変状が疑われる。

(1) P6エリアでのマンホールの変動量

NTT管路被害が報告されているマンホールのうち、P6エリアで2つのマンホール(H3とH5)について変動量を推定した。マンホール中心の震災前後の変動量の算出結果を表-5に示す。H3とH5との点間距離は、150mほどである。H3の変動量 ΔX と ΔY は、P2エリアの基準点の変動量に近い値であった。一方、H5の変動量 ΔX と ΔY は、P9

エリアの基準点の変動量に近い値であった。このため、H3とH5の変動量の較差は、 ΔX で0.267m、 ΔY で0.369m、 ΔH で0.092mであった。前述のマンホール変動量の推定の点検で得られた変動量の較差の結果とは異なる結果となった。なお、震災後にH3にてネットワーク型RTK法GNSS測量による実測値とデジタルステレオ図化機による計測値を比較したところ、較差は X で-0.071m、 Y で0.111m、 H で-0.066mであった。デジタルステレオ図化機での精度は、0.1m程度と高い精度も得られることがわかった。

(2) P9エリアでのマンホールの変動量

NTT管路被害が報告されているマンホールのうち、P9エリアで2つのマンホール(T2とT4)について変動量を推定した。なお、P9エリアは、前述の変動量のわかっている基準点から複雑な変状が疑われる。マンホール中心の震災前後の変動量の算出結果を表-6に示す。H3とH5との点間距離は、470mほどである。T2とT4とも変動量 ΔX と ΔY は、基準点における変動量にはみられないケースであった。基準点の変動量とは別の複雑な変状の可能性を示した。T2とT4の変動量の較差は、 ΔX で-0.335m、 ΔY で-0.088m、 ΔH で0.117mであった。

マンホールのように地物の変動量を短い間隔で推定し続けることが可能となったので、基準点の補間では追えない変状を解明できる可能性を示した。

表-5 P6エリアのNTTマンホール中心の震災前後の変動量の算出

名称	震災後の座標値			震災前の座標値			変動量		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔH [m]
H3最確値	-23189.634	-16818.571	19.774	-23190.112	-16819.545	20.200	0.478	0.974	-0.426
最確値の標準偏差	0.020	0.012	0.150	0.006	0.007	0.011	0.021	0.014	0.150
H3(GNSS)	-23189.563	-16818.682	19.840	-	-	-	-	-	-
H5最確値	-23260.901	-16690.522	17.504	-23261.112	-16691.127	18.022	0.211	0.605	-0.518
最確値の標準偏差	0.006	0.014	0.224	0.053	0.036	0.048	0.053	0.039	0.229
H3とH5の変動量の較差							0.267	0.369	0.092

表-6 P9エリアのNTTマンホール中心の震災前後の変動量の算出

名称	震災後の座標値			震災前の座標値			変動量		
	X [m]	Y [m]	H [m]	X [m]	Y [m]	H [m]	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔH [m]
T2最確値	-23602.757	-17004.414	11.114	-23603.136	-17004.787	11.839	0.379	0.373	-0.725
最確値の標準偏差	0.011	0.009	0.032	0.006	0.043	0.046	0.013	0.044	0.056
T4最確値	-23967.399	-16704.944	11.305	-23968.113	-16705.405	12.147	0.714	0.461	-0.842
最確値の標準偏差	0.009	0.006	0.022	0.058	0.070	0.060	0.059	0.070	0.064
T2とT4の変動量の較差							-0.335	-0.088	0.117

7. おわりに

震災前の刺針点の座標値の算出方法を提案し、共通の刺針点から震災前後それぞれで空中写真測量を行えるようにして、三次元座標値(X, Y, H)を計測できるようにした。その結果、次の事柄が得られた。

- 1) 空中三角測量の結果、提案した震災前の刺針点相互の座標値の関係は、標準偏差0.15 m以内で整合性があるといえる。
- 2) 提案したマンホール変動量の推定の点検のため、変動量わかっている基準点近傍におけるマンホールなどの変動量を算出して、基準点の変動量と比較した結果、算出した変動量は、基準点の変動量と同様であったことが確認できた。
- 3) 複雑な変状が疑われるエリアについてマンホールの変動量を推定した結果、基準点の変動量とは別の複雑な変状の可能性を示した。
- 4) マンホールのように地物の変動量を短い間隔で推定し続けることが可能となったので、基準点の補間では追えない変状を解明できる可能性を示した。

今後、設備被害との関連性の分析のため、管路被害が報告されているマンホールについて、本稿の手法によって震災前後のマンホールの三次元座標値を連続的に算出して、変動量を管軸方向と管軸直角方向でも分析する予定である。また、地形からも分析できるように沈下コンターマップも作成予定である。

謝辞：本研究で用いた震災後の空中写真は、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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 頓田修一郎, 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.
- 7) 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.
- 8) 久保寺貴彦, 鈴木崇伸, 政春尋志, 松尾栄治: 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, 第36回地震工学研究発表会, 2016.
- 9) 若竹雅人, 張秋松, 末富岩雄, 鈴木崇伸: 熊本地震による被害を受けた通信埋設管の概況について, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.193-194, 2017.
- 10) 原昌弘, 庄司学, 永田茂: 2016年熊本地震における下水道管路網の被害と入力地震動の関係, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.197-198, 2017.
- 11) 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/gaiku/> (2017年8月30日閲覧)
- 12) 国土交通省地籍調査 Web サイト熊本地震に伴う被災地域境界基本調査の成果: <http://www.chiseki.go.jp/plan/hisaikyukai/kumamoto/index.html> (2017年8月30日閲覧)
- 13) 国土交通省都市局「熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する報告書最終報告」, p57: http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi08_hh_000034.html (2017年8月30日閲覧)
- 14) 政春尋志, 久保寺貴彦, 佐藤佑樹: 熊本地震前後の空中写真から作成したDSMの差分による倒壊建物の抽出, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, pp.275-276, 2017.
- 15) 測量用語辞典編集委員会 編: 測量用語辞典, pp.103, 2011.
- 16) 田島稔, 小牧和雄: 最小二乗法の理論とその応用 改訂版, pp.78-79, 1996.
- 17) 田島稔, 小牧和雄: 最小二乗法と測量網平均の基礎, pp.40-46, pp.97-98, 2003.