

論文 Original Paper

赤外線サーモトレーサ及び3Dレーザスキャナを用いた
2016年熊本地震による熊本城石垣の被害調査に関する研究橋本隆雄*¹, 鈴木彩加*², 石作克也*³Study about the Damage Survey of Stone Retaining Masonry in
the Kumamoto Castle by the 2016 Kumamoto Earthquake using
Infrared Thermography and 3D Laser ScannerTakao Hashimoto *¹, Sayaka Suzuki *², Katsuya Ishizukuri *³

2016年熊本地震では、震度7が2回、震度6弱以上が7回発生し、熊本都市圏及び阿蘇地方を中心に18万棟を超える家屋被害や大規模な土砂災害をはじめ広範囲に甚大な被害をもたらした。熊本城では、2016年6月10日時点の熊本城調査研究センターの速報によると、前震で重要文化財建物10棟、復元建造物7棟、石垣の崩落箇所6ヶ所、本震で全ての重要文化財建物13棟、復元建造物20棟、石垣の崩落・はらみ・緩み517面、地盤の陥没・地割れ70ヶ所と石垣全体の30%、崩落は、全体の10%の被害を受けた。そこで、本研究は、赤外線サーモトレーサを用いた熱画像を用いた検出及び3Dレーザスキャナを用いた石垣の測量を実施した。

本論文では、これらの調査結果から石垣の浮石部分や隙間、はらみ現象等の被害状況分析を行ったものである。

Key words: Kumamoto earthquake, stone wall, survey, infrared thermography, 3D laser scanner

1. はじめに

2016年熊本地震の一連の地震活動による強震動の作用によって、4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震（以後、前震と呼ぶ）、その約28時間後の4月16日1時25分に熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震（以後、本震と呼ぶ）が発生した。熊本城では、強震動の作用により、写真-1及び写真-2に示すように石垣の崩壊・はらみ出し、櫓・長塀の損壊などの甚大な被害が熊本城内のほぼ全域で広範囲にわたって発生した。

熊本城調査研究センターの速報（熊本市役所内掲示：2016年6月10日時点）による被害概要では、前震で重要文化財建物10棟、復元建造物7棟、石垣の崩落箇所6ヶ所であるが、本震で全ての重要文化財建物13棟、復元建造物20棟、石垣の崩落・孕み・緩み517面、23,600 m²（うち崩落は50ヶ所、229面、約8,200 m²）、地盤の陥没・地割れ70ヶ所（約12,345 m²）と報告されている。本震を経た石垣の被害は実に全体の30%にも及び、崩落は全体の10%で、その被害は余震でも進行している。城



写真-1 百間石垣の崩壊



写真-2 重要文化財「北十八間櫓」の崩壊

*¹正会員 国士舘大学教授 理工学部まちづくり系*²非会員 アミック主任*³非会員 日測 取締役

壁の石垣は、近世における石垣築造（普請）の技術的頂点に位置し、わが国が誇るべき建設文化的遺産であるが、石垣の修復には明確な基準がなく、経験的に行われていることが多い。一方、百間石垣や熊本城本丸付近等においては、同じ高さ、構造であるにもかかわらず、崩壊部分と崩壊していない部分が隣接しており、そのメカニズムが明らかとなっていない。これまで秦らは図-1に示すように2016年熊本地震の前震時ならびに本震時に熊本城内に作用した地震動を常時微動計測などの現地調査からサイト増幅特性を評価した結果¹⁻³⁾、熊本城内における地盤震動特性は概ね一様であり、H/Vスペクトルのピーク周波数は、1.5~4Hz付近に多く分布していることを明らかにしている。橋本・齋藤が行った百間石垣脇の駐車場から二の丸広場方向に高さ12 mの斜面を挟んだ比抵抗2次元（電気）探査⁴⁾では、測線の中央法面付近を境に急にずれているため断層構造である可能性があることが明らかとなった。石垣の崩壊が顕著だった百間石垣と本丸周辺地区について表面波探査を行い、崩壊地点は他に比べ地盤が軟らかいことが分かった。

これから石垣の復旧を行う際に、崩壊した箇所や変状を生じている箇所について、その健全度を検証する必要があるが、この評価する調査法がない。そこで本研究では、赤外線サーモトレーサ⁵⁾及び3Dレーザスキャナ⁶⁾を用いた調査で熊本城石垣の変状程度を把握できるかの検討を行った。

2. 熊本城石垣の変遷

近世熊本城の築城は1590年頃には開始されていたが、豊臣秀吉の没後、加藤清正は1599年から城地を移して新城の築城に取り掛かり、1607年に本丸までが成就したとされている⁷⁾。最終的に完成した城域は、城内掲示板より周囲約5.3 km、総面積は980,000 m²で、櫓門49、櫓門18、城門29の規模であったとされている。

熊本城の石材は主に「祇園山」（現在の熊本市西区にある標高132.2メートルの山）である。阿蘇火山灰層の

軟弱な地盤上の石垣で、石垣を構築することは極めて困難であった。一般に地盤が軟弱であると萩城のように弓状に描く勾配で、上方からの荷重圧力が石積み下方に分散する構造となる。二様の石垣（写真-3）には、加藤家時代の緩勾配の石垣と細川家時代とされる急勾配の石垣が重なる。前者は穴太（あのを）積みと呼ばれ、安土城（写真-4：1576年着工 - 1582年焼失）築城で実績を積んだ近江国の石工集団の穴太衆が駆使した技法で、隅石（角の部分の石）に同じ大きさの石を積み上げ、清正

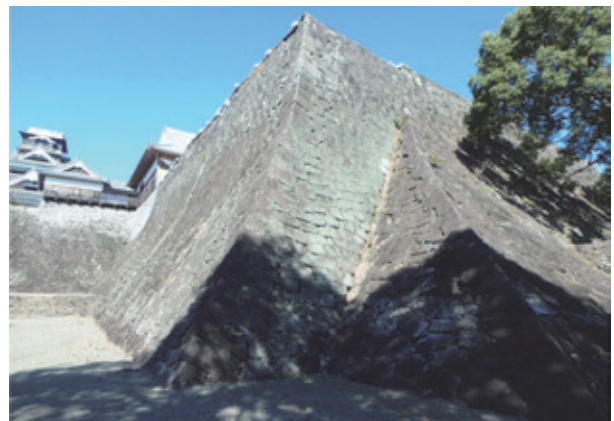


写真-3 熊本城二様の石垣
注1) 加藤家時代（緩勾配：手前）
注2) 細川家時代（急勾配：奥）



写真-4 穴太工法例（安土城）⁸⁾



図-1 熊本城内でのH/Vスペクトルのピーク周波数の分布¹⁻³⁾



写真-5 算木積み例（名古屋城）⁸⁾

が近江から穴太衆を連れて帰って重用したことから、清正流と呼ばれている。後者の算木（さんぎ）積みは、加藤家後期と細川家初期に採用され、長方形の石の長辺と短辺を交互に積み上げる工法で、これによって、最下部急勾配を持つ急勾配の石垣が構築される⁸⁾。算木積み⁸⁾の例を写真-5に示す。

3. 赤外線トレーサによる調査

3.1 調査概要

(1) 調査目的

本調査は、写真-6に示すように赤外線サーモグラフィ法を用いて、石垣の表面温度分布を可視化し、一般の石積擁壁と同様に空隙等の異常高温部を検出することが可能かどうかを確認することを目的として行った。

(2) 測定原理

石垣の内部あるいは背面に存在する空洞、漏水等の欠陥部は、図-2に示すように健全な部分と熱伝導率や比熱、密度等の物理的性質が異なるために、これらの存在は、石垣表面に温度差となって現れる。

浮きが発生している箇所においては、仕上げ背面に密閉空気層が生じることになる。この密閉空気層は熱伝導率が小さく、日射や外気温上昇により石垣面から熱が供給された場合、躯体コンクリート側への熱伝導率が小さくなるため、周辺健全部に比べて高温になる。夜間には、逆に浮き部分は低温に現れる。

(3) 撮影時間帯

赤外線法では、浮き部に温度差を生じさせるために、何らかの熱源を必要とする。一般的には、太陽からの日射を熱源とするので、太陽の移動に合わせて撮影面も変わる。極力、太陽光が試験面正面を照射する時間帯を最適時間帯とする。

(4) 使用機器

赤外線サーモトレーサの機器の性能は、以下のようになる。

- ① 装置名：サーモトレーサ H2630
- ② 製造会社：日本アビオニクス株式会社
- ③ 温度測定範囲：レンジ1：-40℃～120℃
- ④ 測定精度：±2%（読取値）
- ⑤ 測定波長：8～13μm
- ⑥ 空間分解能：0.6mrad
- ⑦ 視野角：水平21.7°×垂直16.4°（標準レンズ）、水平45.2°×垂直33.7°（2倍広角レンズ）

(5) 調査方法

撮影時間は石垣に太陽光が当たる時間とし、1日目は午前9時30分から西面に最も太陽光が当たる午後17時



写真-6 赤外線サーモトレーサ

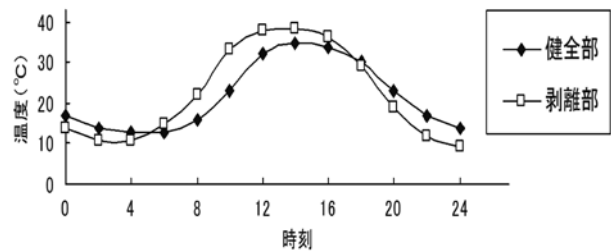


図-2 健全部と剥離部の表面温度差例

表-1 24日の熊本市気象データ

熊本 2016年10月24日 (1時間ごとの値)													
時	気圧(hPa)	降水量(mm)	気温(℃)	露点温度(℃)	蒸気圧(hPa)	湿度(%)	風速(m/s)	風向	日照時間(h)	全天日射量(MJ/m ²)	曇雨	積雪	積雪量(cm)
1	1007.7	1012.3	—	17.8	12.9	14.9	74	3.0	北北東		×	×	
2	1008.3	1012.9	—	17.0	12.8	14.7	76	3.5	北北東		×	×	
3	1008.3	1013.0	—	16.4	12.6	14.5	78	1.9	北		×	×	0+
4	1008.4	1013.0	—	16.7	11.8	13.7	72	2.6	北		×	×	
5	1008.9	1013.8	—	15.9	11.3	13.4	74	2.7	北		×	×	
6	1009.5	1014.2	—	15.3	11.7	13.7	79	2.5	北北西	0.00	×	×	0+
7	1010.2	1014.9	—	16.3	11.0	13.2	71	4.2	北北東	0.3	0.05	×	
8	1011.1	1015.7	—	17.8	11.4	13.5	66	3.6	北東	1.0	0.54	×	
9	1011.2	1015.8	—	19.3	10.8	13.0	58	3.6	北北東	1.0	1.23	×	0+
10	1010.9	1015.5	—	20.8	11.7	13.8	56	2.2	北北東	1.0	1.82	×	
11	1010.6	1015.2	—	21.9	11.9	13.9	53	2.4	北東	1.0	2.28	×	
12	1010.0	1014.8	—	21.9	11.3	13.4	51	1.7	北北東	1.0	2.51	×	0+
13	1009.6	1014.1	—	23.5	11.9	13.9	48	2.0	西	1.0	2.50	×	
14	1009.1	1013.8	—	24.7	10.2	12.4	40	1.8	北北西	1.0	2.28	×	
15	1008.8	1013.3	—	25.1	12.3	14.3	45	2.3	西	1.0	1.85	×	0+
16	1008.8	1013.3	—	24.4	12.4	14.4	47	2.4	西北西	1.0	1.25	×	
17	1008.9	1013.4	—	23.2	13.4	15.4	54	2.4	北西	1.0	0.57	×	

表-2 25日の熊本市気象データ

熊本 2016年10月25日 (1時間ごとの値)													
時	気圧(hPa)	降水量(mm)	気温(℃)	露点温度(℃)	蒸気圧(hPa)	湿度(%)	風速(m/s)	風向	日照時間(h)	全天日射量(MJ/m ²)	曇雨	積雪	積雪量(cm)
1	1011.1	1015.7	—	17.8	14.1	16.1	80	0.9	北		×	×	
2	1010.9	1015.6	—	17.2	13.7	15.7	80	1.2	北東		×	×	
3	1010.2	1014.9	—	16.8	14.3	16.3	85	0.7	北		×	×	10-
4	1009.5	1014.5	—	16.5	14.5	16.5	88	1.0	北北東		×	×	
5	1009.9	1014.6	—	16.4	14.8	16.8	90	0.5	北北東		×	×	
6	1010.2	1014.9	—	16.1	14.5	16.5	90	1.1	北北西	0.00	×	×	1
7	1010.9	1015.6	—	16.2	14.2	16.2	88	1.3	北東	0.0	0.02	×	
8	1011.1	1015.7	—	17.5	15.0	17.0	85	0.8	北東	0.0	0.23	×	
9	1010.9	1015.5	—	19.1	15.4	17.5	79	0.9	東北東	0.1	0.56	×	10-
10	1010.2	1014.8	—	22.5	15.1	17.2	63	0.3	東南東	0.1	0.86	×	
11	1009.7	1014.2	—	23.9	15.2	17.2	58	0.6	南東	0.3	1.37	×	
12	1009.3	1013.8	—	24.2	16.2	18.4	61	2.2	南西	0.1	0.86	×	10-
13	1008.7	1013.2	0.0	23.9	17.2	19.6	66	1.6	南西	0.0	0.41	×	
14	1008.3	1012.8	0.0	24.4	17.9	20.5	67	1.6	南南西	0.0	0.42	×	
15	1008.2	1012.7	0.0	23.8	18.9	21.9	75	1.3	南南西	0.0	0.42	×	
16	1008.9	1013.5	2.5	21.1	20.1	23.5	94	2.0	西北西	0.0	0.09	×	10-

※ 天気図記号の補足（気象庁HPより）

○：快晴，⊙：晴れ，⊕：薄曇，⊗：曇

0+：雲はあるが、雲量が1に満たない場合を表す。

※現地調査場所では、連続した日射があることを確認している。

まで、2日目は午前9時30分から午後14時まで行い、それぞれの地点で温度の変化を記録した。

(6) 天候及び外気温度

調査当日の熊本市の気象データを表-1及び表-2示す。調査時の天候は気象データとほぼ同じであり、24日は赤外線撮影条件としては良好であったが、25日は曇りが多かった為、撮影条件はやや不良であった。

3.2 調査結果

本調査は、赤外線サーモグラフィを用いて、石垣の表面温度分布を可視化し、一般の石積擁壁と同様に剥離等の異常高温部を検出することが可能かどうかを確認することを目的として行った。

(1) 二様の石垣

以下の条件で撮影した結果、カラーの熱画像では、赤丸部分に石の隙間が確認された。

- ① 撮影日：2016年10月24日（月）
- ② 撮影時刻：13:00～13:30
- ③ 天気：晴れ
- ④ 気温（℃）：23.5℃
- ⑤ 湿度（%）：48%
- ⑥ 風速（m/s）：2.0m/s

写真-7の南面及び写真-8の西面北側では、カラーの熱画像では浮石部分だけが熱を持って明確に赤くなり、モノクロの熱画像では浮石部分だけが白くなって検出できることが明らかとなった。

また、写真-9の西面南側及び写真-10の西面中央側ではカラーの熱画像で上部の石垣に青い隙間（すじ）の箇所が沈下し、その分下部の石垣が熱を受けて赤くなっている箇所がはらみ現象を起こしていることが分かる。モノクロの熱画像では肉眼やカラーの熱画像でも識別できないが変状箇所が飛び出すようにくっきりとは浮き出て検出することができることが明らかとなった。

(2) 天守閣一東面

以下の条件で撮影した結果、熱画像（モノクロ）にて石垣の変状が確認された。

- ① 撮影日：2016年10月25日（火）
- ② 撮影時刻：12:00～12:30
- ③ 天気：曇り
- ④ 気温（℃）：24.2℃
- ⑤ 湿度（%）：61%
- ⑥ 風速（m/s）：2.2m/s

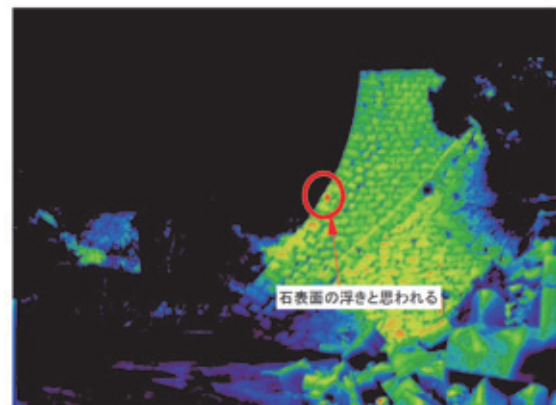
写真-11の西面ではカラーの熱画像で上部の石垣が熱を受けて赤くなっているためはらみ現象を起こし、下部に石垣に青い隙間があることが分かる。モノクロの熱画像では肉眼やカラーの熱画像でも識別できないが変状箇所



(a) 撮影位置図



(b) 可視画像



(c) 熱画像（カラー）



(d) 熱画像（モノクロ）

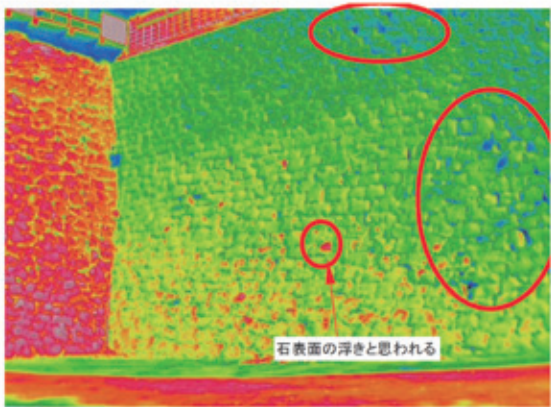
写真-7 二様の石垣（南面）



(a) 撮影位置図



(b) 可視画像



(c) 熱画像 (カラー)



(d) 熱画像 (モノクロ)

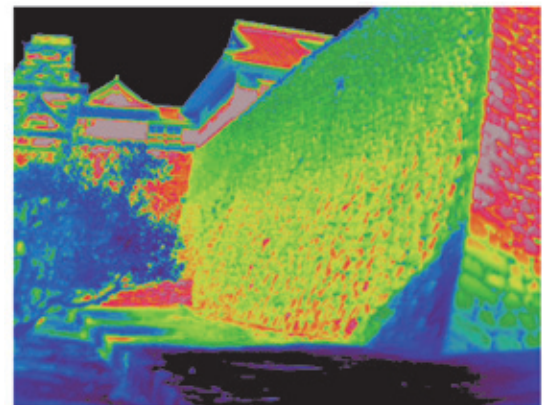
写真-8 二様の石垣 (西面北側)



(a) 撮影位置図



(b) 可視画像



(c) 熱画像 (カラー)



(d) 熱画像 (モノクロ)

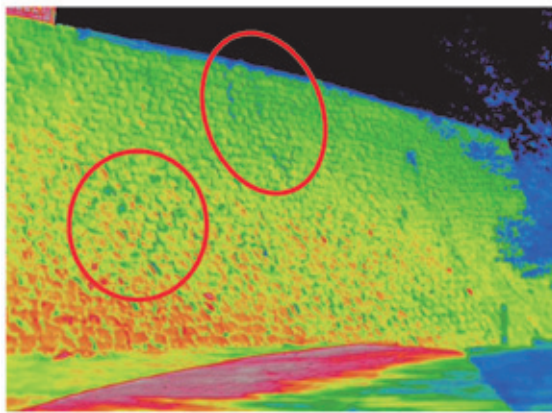
写真-9 二様の石垣 (西面南側)



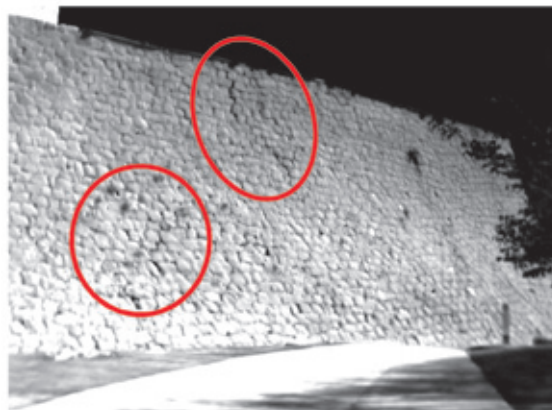
(a) 撮影位置図



(b) 可視画像



(c) 熱画像 (カラー)



(d) 熱画像 (モノクロ)

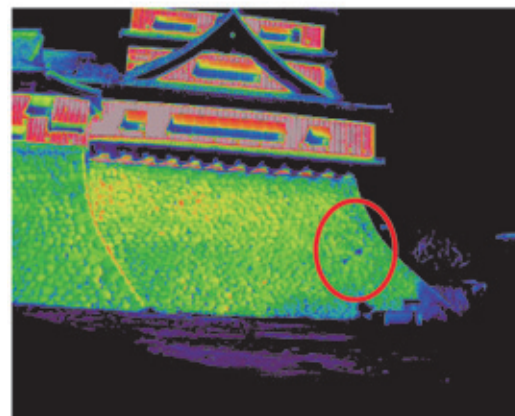
写真-10 二様の石垣 (西面中央側)



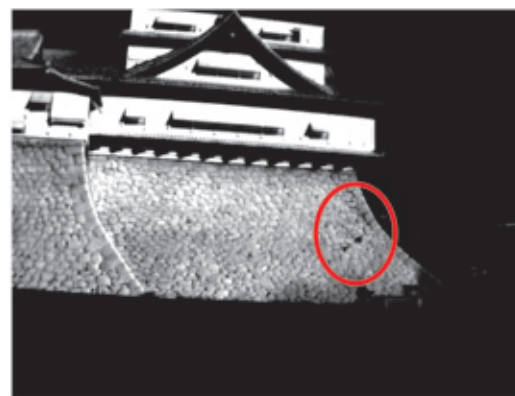
(a) 撮影位置図



(b) 可視画像



(c) 熱画像 (カラー)



(d) 熱画像 (モノクロ)

写真-11 天守閣の石垣 (西面)

所が飛び出すようにくっきりとは浮き出て検出することができると明らかとなった。

4. 3Dレーザスキャナによる調査

4.1 3Dレーザスキャナの概要

3Dレーザスキャナは、図-3のように装置から1秒間に数千発のレーザが周辺に照射され、計測対象物とセンサの間をレーザパルスが往復する時間を計測することで距離を計測する。同時にレーザビームを発射した方向を計測することで、計測対象物の3次元座標を取得するのである。

計測方法には、レーザを発射してから対象物に反射して帰ってくるまでの時間を計測して距離を算出するタイムオブフライト方式と、出射光と反射光の時間的なズレ(位相差)を距離に換算する位相差方式があるが、今回は位相差方式で行った。図-4は3Dレーザスキャナによる調査の作業手順である。

4.2 調査結果

写真-12は、3Dレーザスキャナを行った位置図であ



図-3 3Dレーザスキャナの測定イメージ

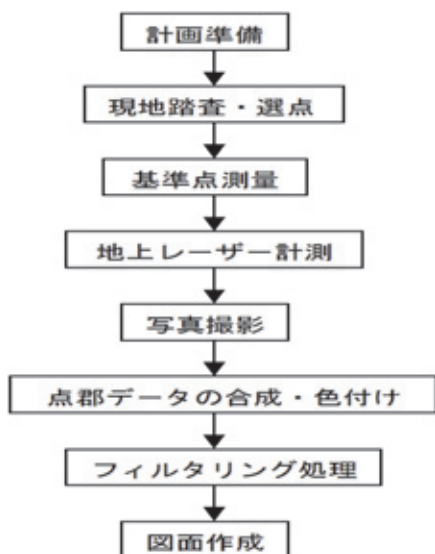


図-4 作業手順

る。主な調査箇所は、百間石垣と本丸・天守閣を中心とした北十八間櫓、二様の石垣である。取得した計測データをGNSS測量にて観測した公共座標系(世界測地2011)に変換した。点群画像の座標数は、以下のようになる。

①百間石垣エリア 約380,000,000点

②本丸・天守閣エリア 約700,000,000点

図-5は、3Dレーザスキャナで計測データを用いた全体鳥観図である。3Dレーザスキャナによる鳥観図では、天守閣付近の色々な角度からの断面図を作成することもできる。

ここでは、以下の2箇所についてまとめた。

(1) 二様の石垣

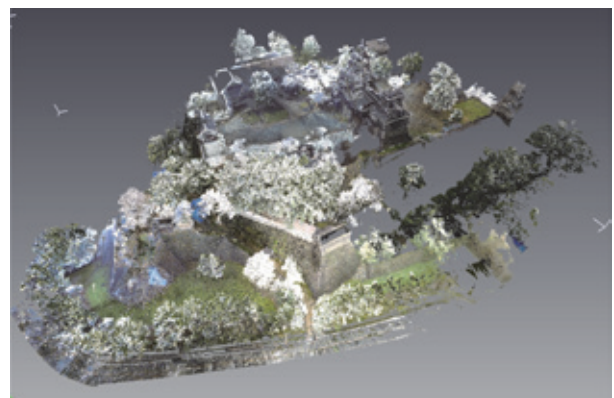
写真-11は二様石垣の被災状況で、図-6は二様石垣の点群画像である。

(2) 天守閣の石垣

写真-12は天守閣石垣の被災状況で、図-7は天守閣石垣の点群画像である。



写真-12 3Dレーザスキャナ位置図

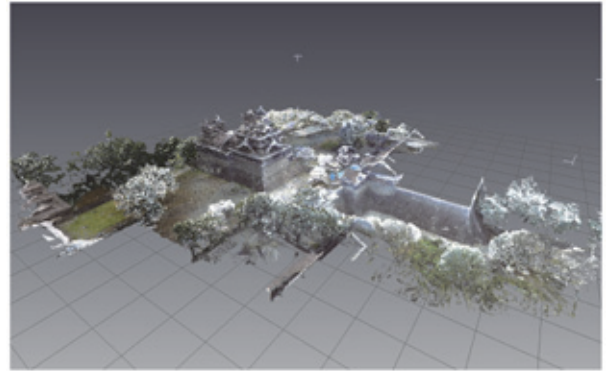


(a) 北東側

図-5 天守閣付近の3Dレーザスキャナ鳥観図



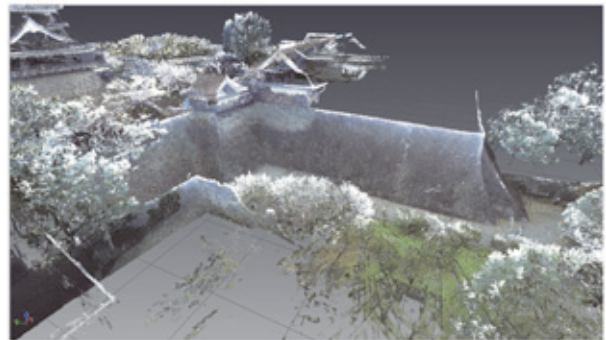
(a) 西面南側



(a) 南西側



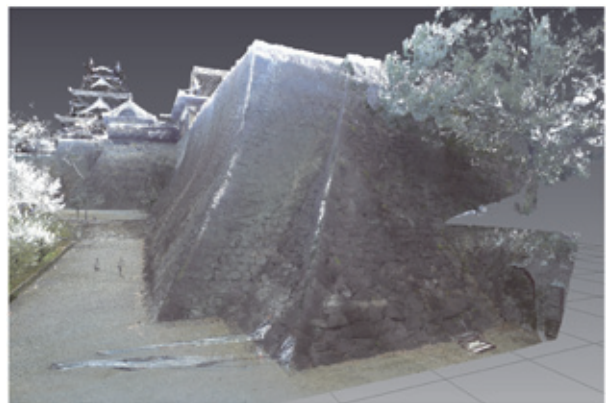
(b) 西面南部



(b) 南西側



(c) 西面中央部



(c) 西面南側



(d) 西面北側



(d) 西面中央部

図-6 二様石垣の点群画像

写真-11 二様石垣の状況



(a) 東側の石垣崩壊



(b) 北西側の石垣崩壊

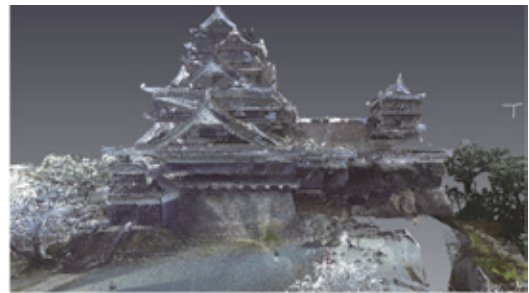


(c) 建物杭の露出



(d) 南側

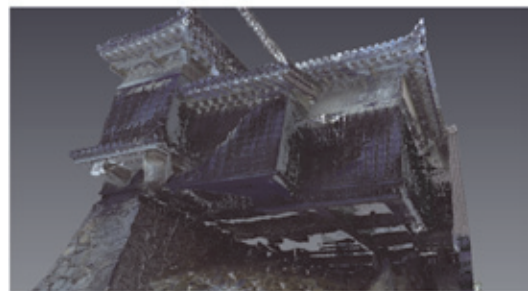
写真-12 天守閣石垣の状況



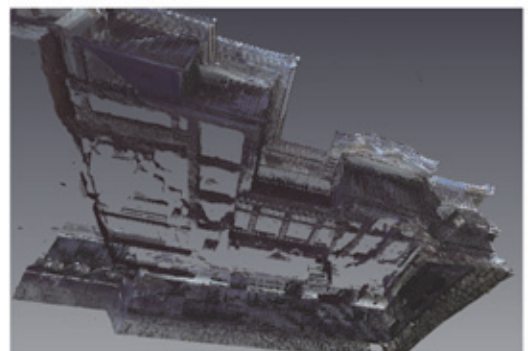
(a) 東側正面図



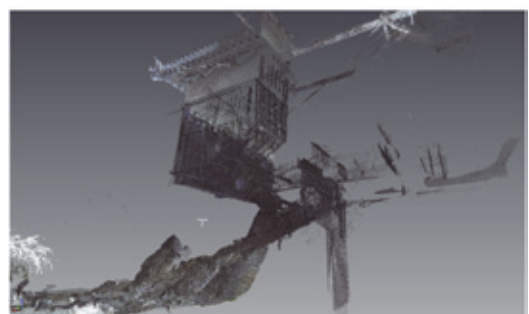
(b) 石垣崩壊部正面図



(c) 石垣崩壊部



(d) 石垣崩壊部の裏面



(e) 石垣崩壊部

図-7 天守閣崩壊部の点群画像

4.3 石垣断面の比較による変状分析

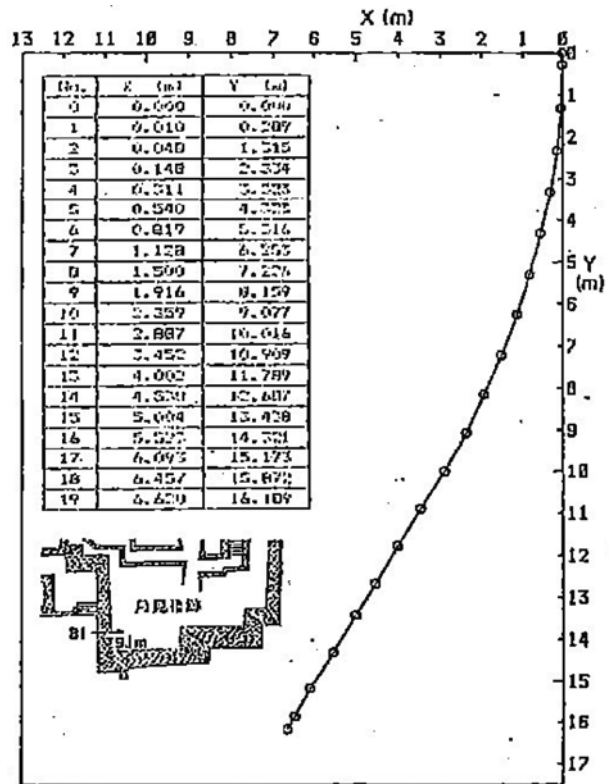
(1) 二様の石垣

桑原は昭和59年に図-8に示すように熊本城23箇所の石垣を実測し、正確な石垣曲線を明らかにした結果を報告書⁹⁾にまとめている。石垣勾配の測量方法は、石垣天端よりプリズム反射鏡を取付けたそりをロープにより下降させ、石垣前方より光波タキオメーターを用いて、プリズム反射鏡までの斜距離と仰角を測定した。実測した石垣勾配の中から勾配の異なる代表的な4例を選び、土圧論より求めた石垣曲線と実測値はその形状が良く似ていることから、築造時にこのような土圧論による考えがあったとは思われないが、完成した石垣の形状は力学的に見て合理的なものであることを明らかにしている。

ただし、天守の石垣は、天守閣の一部が石垣方向に突出しているため、従来の方法で行われた。

そこで、取得データから石垣の断面図を作成し、桑原が昭和59年に計測した石垣勾配（形状）との比較を行った。

図-9は桑原が測定した写真-13の二様の石垣曲線図である。断面位置は誤差が考えられるために図-10のように図面から計測した断面の他に両サイドに0.7mも断面を取り比較を行った。図-11は二様の石垣の2断面を比



(a) B1断面

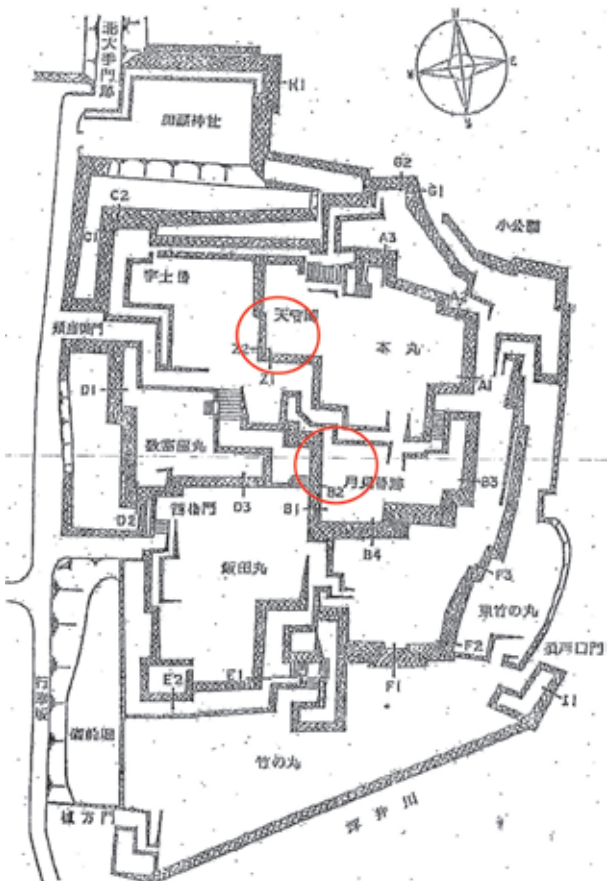
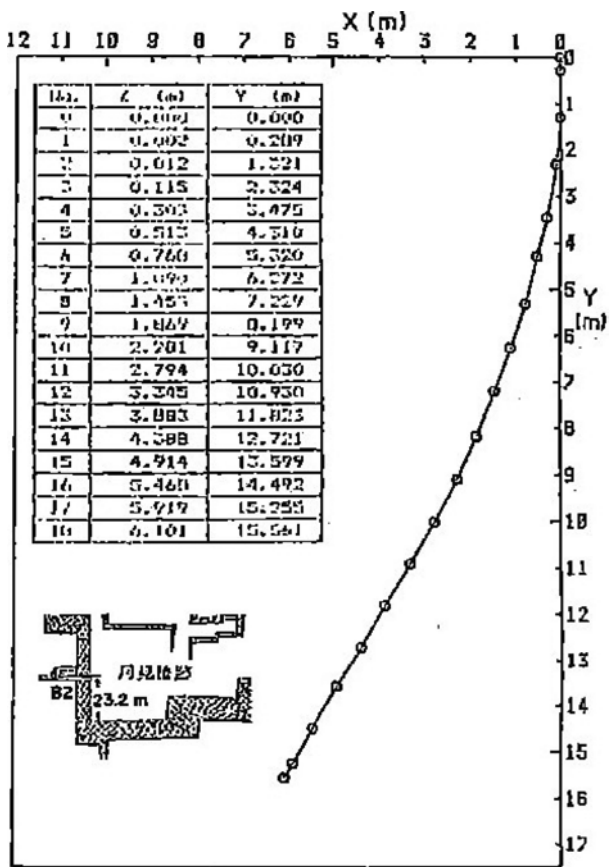


図-8 熊本城石垣の測量⁹⁾



(b) B2断面

図-9 二様の石垣曲線図⁹⁾



写真-13 二様の石垣：B1, B2断面付近

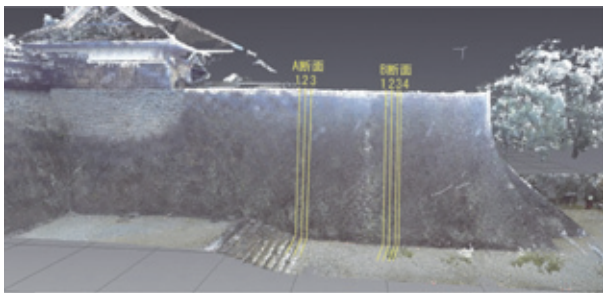
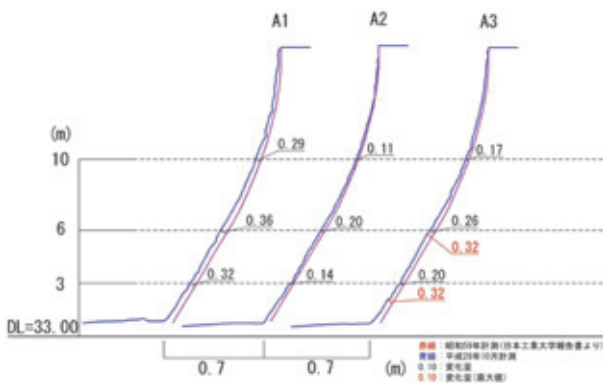
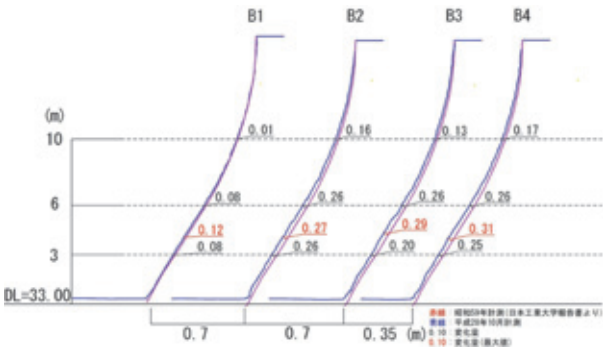


図-10 二様石垣の断面位置図



(a) A断面 (図-8のB2断面)



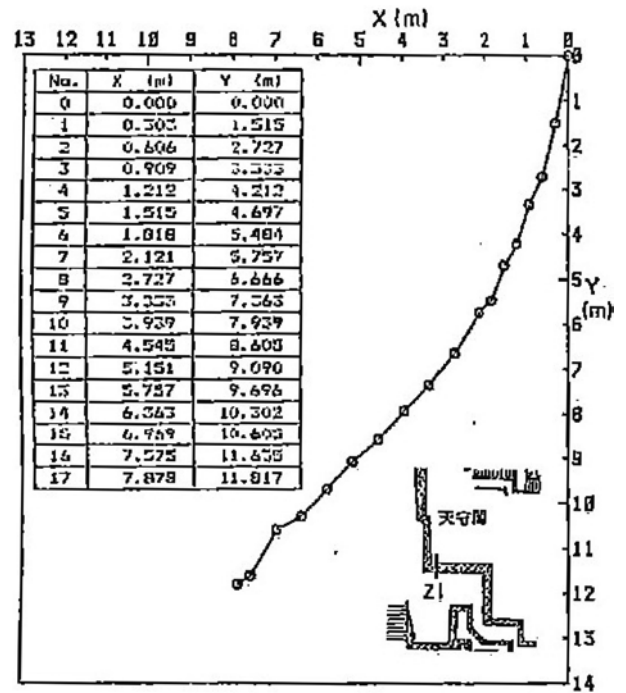
(b) B断面 (図-8のB1断面)

図-11 石垣斜面比較図

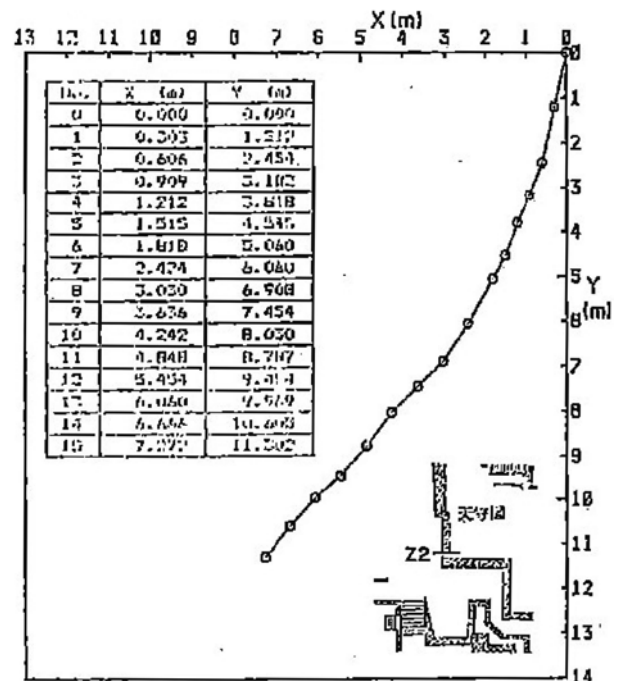
較した結果でB1断面で最大31cmのはらみ、B2断面で最大32cmのはらみが生じていることが明らかとなった。

(2) 天守閣の石垣

図-12は桑原が測定した写真-14の天守閣の石垣曲線図である。図-14は図-13のように天守閣の石垣の2断面を比較した結果で、Z1断面で最大22cmのはらみ、Z2



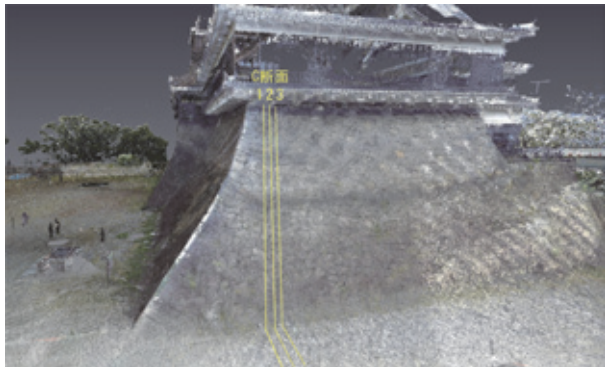
(a) Z1断面 (南面)



(b) Z2断面 (西面)

図-12 天守閣の石垣曲線図⁹⁾

断面で最大60cmのはらみが生じていることが明らかとなった。



(a) 南面の断面位置図



(b) 西面の断面位置図

図-13 天守閣（西側石垣）の断面位置図

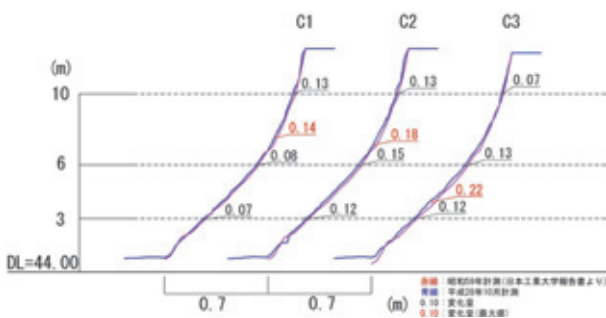


(a) 南西面の石垣 (Z2断面付近)

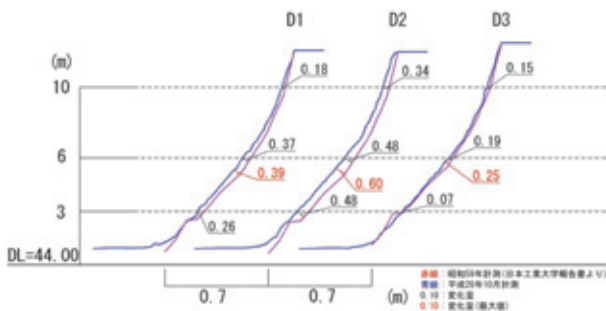


(b) 南面石垣 (Z1断面付近)

写真-14 天守閣の石垣状況

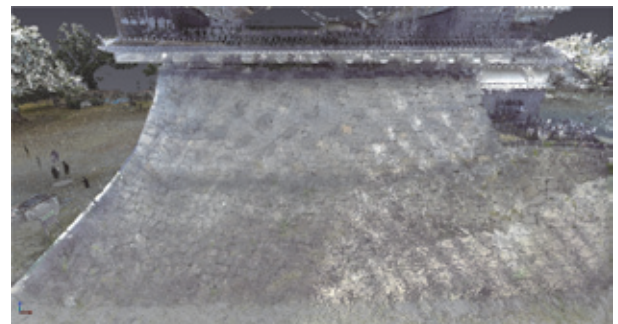


(a) C断面 (図-8のZ1断面)

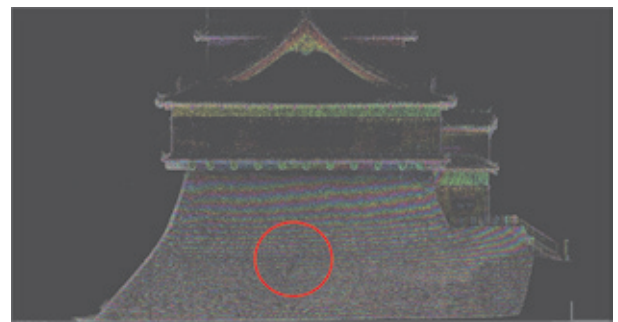


(b) D断面 (図-8のZ2断面)

図-14 石垣斜面比較図断面



(a) 点群画像



(b) 石垣段彩図

図-15 天守閣南側石垣の段彩図

4.4 段彩図による地盤変状分析

段彩図とは、標高値を高度の段階毎に分け、その段階毎に色付けを行う表現方法である。色を付けることで、より直感的に地形の高低やその間隔を把握出来る。そこで、段彩図手法を用いて石垣の変状を把握するために天守閣西面のZ1断面、南面のZ2断面における段彩図を作成した。について図-15に示すような段彩図を作成した。その結果、Z2の段彩図は、大きいはらみではあるが一樣に変化しているため差が明確ではない。しかし、写真-14(b)の南面Z1の方は肉眼では把握できないが、石垣の中腹に局部的にV字状の変状があることが明らかとなった。

5. ま と め

本研究は、赤外線サーモグラフィ及び3Dレーザスキャナを用いた調査で熊本城石垣の変状程度を把握できるかの検討を行ったものである。以下に主要な結論を示す。

- (1) 赤外線サーモグラフィを用いた調査では、肉眼では把握できない浮石部分や隙間、はらみ現象をカラーやモノクロの熱画像を用いることによって明確に検出することができることが明らかとなった。
- (2) 過去の地震前の石垣の測量断面と地震後の3Dレーザスキャナを用いた石垣の測量断面の比較では、石垣のはらみが二様の石垣で均一に30cm程度、天守閣の石垣で最大60cm生じているなど検証できることが明らかとなった。
- (3) 天守閣の石垣では、等高線による地形表現を見やすくするため段彩（グラデーション）をつけた地形図（段彩図）手法を用いて肉眼では把握できない石垣の異常箇所を把握することも明らかとなった。

謝辞

熊本城内での3Dレーザスキャナによる熊本城石垣等調査にあたっては、熊本城調査研究センターの鶴嶋文化財保護主幹、東園主任技師、嘉村文化財保護主事等の職員の皆様にご同行いただきました。また、公益財団法人鹿島学術振興財団研究助成金による助成を受けたものです。末筆ながら記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 秦吉弥, 村田晶, 宮島昌克: 2016年熊本地震時に熊本城に作用した強震動の推定に向けた基礎的検討～過去および現在の地震観測点におけるサイト増幅特性の評価～, 第55回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.252-253, 2016.
- 2) 秦吉弥, 村田晶, 池本敏和, 橋本隆雄, 宮島昌克: サイト増幅特性置換手法に基づく2016年熊本地震における熊本城の地震動の評価, 土木学会論文集A1, Vol.73, No.4, 2017.
- 3) 秦吉弥, 村田晶, 池本敏和, 橋本隆雄, 宮島昌克: 常時微動計測に基づく2016年熊本地震によって熊本城の石垣に作用した強震動の評価, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.39-46, 2017.
- 4) 橋本隆雄, 斎藤猛: 比抵抗2次元探査及び表面波探査による熊本城石垣等の地盤調査, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.65-74, 2017.
- 5) 橋本隆雄, 鈴木彩加: 赤外線サーモグラフィ法による熊本城石垣等調査, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.75-91, 2017.
- 6) 橋本隆雄, 石作克也: 3次元レーザスキャナによる熊本城石垣等調査, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.53-64, 2017.
- 7) 鶴嶋俊彦: 「熊本城の歴史と地震被害」季刊『永青文庫』No.97号, 18p～20p, 公益財団法人永青文庫 2017.
- 8) 大角 恒雄: 加藤家時代の遺構は細川家時代のものより地震に強いのか?, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.31-38, 2017.
- 9) 桑原文夫: 熊本城の石垣勾配, 日本工業大学研究報告書第14巻2号, 1984.