

### 3次元レーザースキャナを用いた熊本城城郭石垣における変状分析－平櫓を事例として

関西大学 学生会員 ○桑島 流音 正会員 小山 倫史  
 横浜国立大学 学生会員 神谷 圭亮 正会員 菊本 統  
 広島大学 正会員 橋本 涼太

#### 1. はじめに

2016年4月14日、16日に発生した熊本地震により、熊本城は大きな被害を受けた。特に、城郭の石垣において被害は甚大であり、石垣全体の30%に孕み出しなどの変状が確認されるとともに、石垣全体の10%は崩壊した。現在、崩壊した石垣については、石材の落下を防止するためのネットやコンクリートによる吹付けなどで応急的な処置がとられている。一方、崩壊に至っていないものの孕み出しなどの変状が見られる石垣については、今後、余震・降雨などにより変状がさらに進行し、場合によっては崩壊に至る可能性が考えられる。中でも、重要文化財に指定されている平櫓(図-1)の北石垣においては、目視でも確認できるほどの孕み出しやその上部の石材の石垣内側への倒れこみ(図-2)が確認され、変状が進行する可能性が懸念されている。

本研究では、地震による孕み出しがみられる平櫓北石垣を対象に、3Dレーザースキャナによる石垣の形状を定期的に計測し、地震後の余震や降雨に伴う変状の進行の有無を明らかにすることを目的とする。

#### 2. 3-Dレーザースキャナを用いた城郭石垣の変状分析

3次元レーザースキャナは、方位と仰角を高速に変化させながら対象物までの距離をレーザー距離計により計測する機器で、計測器を原点として360度全方向の対象物の3次元座標を15～20分程度(ただし、解像度



図-1 平櫓の全景

に依存する)で数値化することができる。また、複数位置から計測した点群データは重ね合わせることで、対象構造物の3次元形状を取得することができる。なお、本調査で用いたレーザースキャナはFARO製のFocus3DX130である。

本研究では、2016年4月(地震直後)、2017年5月、8月に3次元レーザースキャナにより取得した平櫓北石垣における点群データをそれぞれ重ね合わせ、差分解析および断面抽出による形状観察を実施し、変状がさらに進行しているのかどうかを調べた。なお、点群データの重ね合わせ、差分解析および断面抽出にはCloudCompare<sup>1)</sup>を用いた。点群の重ね合わせはICP(Iterative Closest Point)アルゴリズム<sup>2)</sup>を用いた。

#### (1) 石垣点群データの差分解析

異なる日時に計測し取得した点群データの差分をとり、石垣全体として面的な変状の把握を試みた。まず、基準データとなる2016年4月に取得した平櫓北石垣における点群データについて、座標変換を行った。座標変換を行うことは、差分解析、断面抽出において変状の方向を明確に示すために必要不可欠である。石垣左下端点に原点をとり、鉛直上向きにz軸、下端ラインに沿って水平方向にy軸、z軸およびy軸に垂直な方向をx軸に設定した。比較データとなる2016年4月に取得した。



図-2 平櫓北面石垣における孕み出しの様子

キーワード 熊本地震, 熊本城, 平櫓北石垣, 石垣, 3Dレーザースキャナ

連絡先 〒569-1098 大阪府高槻市白梅町7-1 関西大学社会安全学部 TEL:072-684-4126

点群データを、座標変換した基準データに重ね合わせ、差分をとった。

図-3 に差分解析の結果を示す。紙面の都合により2016年4月と2017年5月の比較のみ示す。本図の右側において0.1m以上の差分量が確認された箇所は植生の成長によるものであり、石垣の変状ではない。また、石垣表面における所々変位が疎らにみられる箇所も同様である。石垣の右上部において、石垣の変状が確認できた。孕み出し変位量は2.0~3.0cmであり、内側への倒れこみ箇所においては3.0~4.0cmの変位が確認された。2016年4月と2017年8月の差分解析結果からもほぼ同様の変状が確認でき、2017年5月と8月の差分解析結果から石垣の変状はみられなかった。

(2) 断面抽出による形状観察

石垣形状を詳細に把握し、変状の進行の程度をより詳細に見るため、平櫓北石垣において特定の断面を抽出した。断面を抽出する際にも座標変換および、重ね合わせが必要不可欠であり、差分解析と同様に行った。この操作を行うことで、ある特定断面を抽出し、z-xグラフに示すことにより詳細な形状の比較および経時変化を分析することができる。

図-4 に平櫓北石垣において断面を抽出した計測ラインを示す。また、図-5 で抽出を行った断面をグラフ化した結果を示す。原稿サイズの関係上、孕み出し位置が最も把握できる計測ライン E の全体および、C の高さ17m~18m間、D の14.5m~15m間、E の14m~14.5m間を拡大したもののみ示す。断面 E の高さ13m~16m辺りにおいて大きな孕み出しが存在する。この孕み出しの変状は進行しており、断面 D および E で確認できる。特に2016年4月から2017年5月の間に断面 D および E において、最大で約2.0cm変状が進行している。

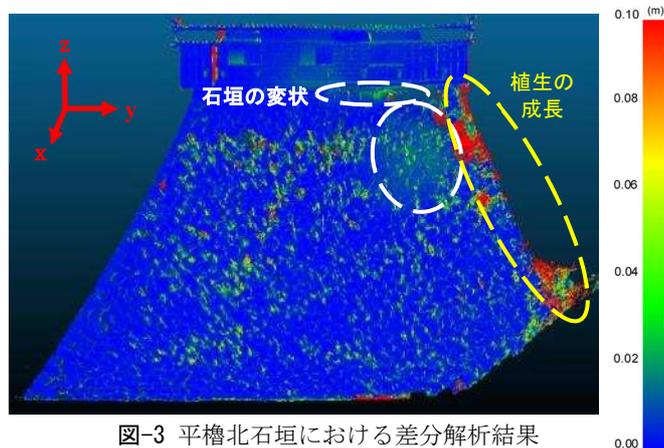


図-3 平櫓北石垣における差分解析結果 (2016年4月と2017年5月の比較)

さらに、断面Cの高さ17.4mから石垣最上部において、石垣内部側へ変状が進行している。その直上の櫓においても沈下がみられる。この櫓の沈下は断面 D および E においても確認できた。

3. まとめと課題

平櫓北石垣において変状の進行が進行していることが確認できた。主な変状の進行は2016年4月から2017年5月の間で発生しており、それ以降はさらなる進行は見られない。変状の進行は熊本地震後の余震や降雨による雨水浸透による可能性が高い。変状の進行が今後も継続しているかの判断はさらなる3次元レーザー計測による点群データの比較を行う必要がある。

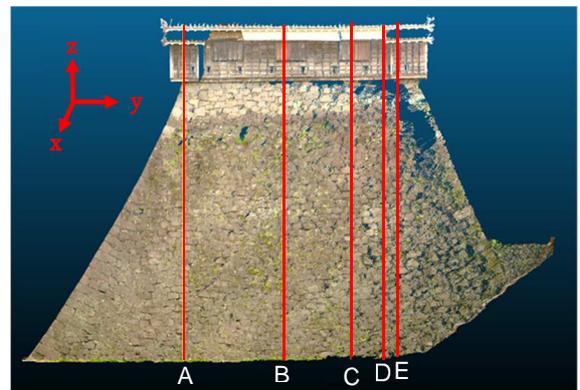


図-4 平櫓北石垣において断面を抽出した計測ライン

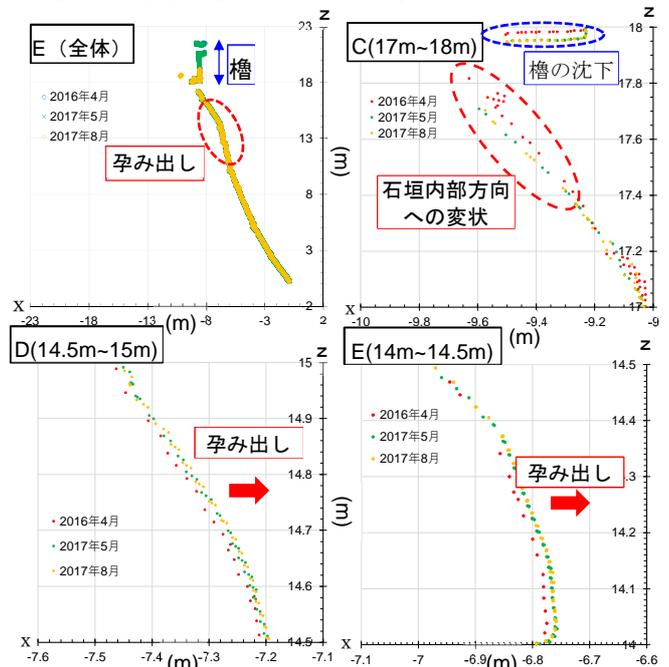


図-5 各断面における石垣形状の比較

参考文献

- 1) Cloud Compare, user manual <http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf> (2018年1月15日現在)
- 2) Besl, P. J. and McKay, N. D. A method for registration of 3-d shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992; 14(2): 239-256.