

3次元データによる熊本地震前後の井寺古墳の変状解析

東京大学生産技術研究所
大石岳史 石川涼一 鈴木諒
東京文化財研究所
朽津信明

本報告では、2016 年 4 月に発生した熊本地震による井寺古墳内の変状を、3次元データを用いて解析した結果を示す。本解析では、写真測量によるレーザ計測による3次元データを用いて、正射投影画像による主観的な形状比較を行い、さらに石室石材のデータを個別に分割して地震前後で位置合わせすることによって各石材の移動方向・大きさを定量的に求めて可視化した。

■ 写真測量による3次元データ

本解析では、橋口剛士氏がデジタルカメラによって古墳内部を撮影して生成した地震前後の3次元データを用いた（図1、2）。写真を用いた密なステレオによる3次元再構成手法では、スケール情報や必ずしも正しい形状は得られないが、地震前後の変状を視覚的に解析するには十分な精度が得られているものと考えられる。



図1 写真測量による2015年の3次元データ

<https://sketchfab.com/models/e096a017ec884eb8803aba585e84ebcd>

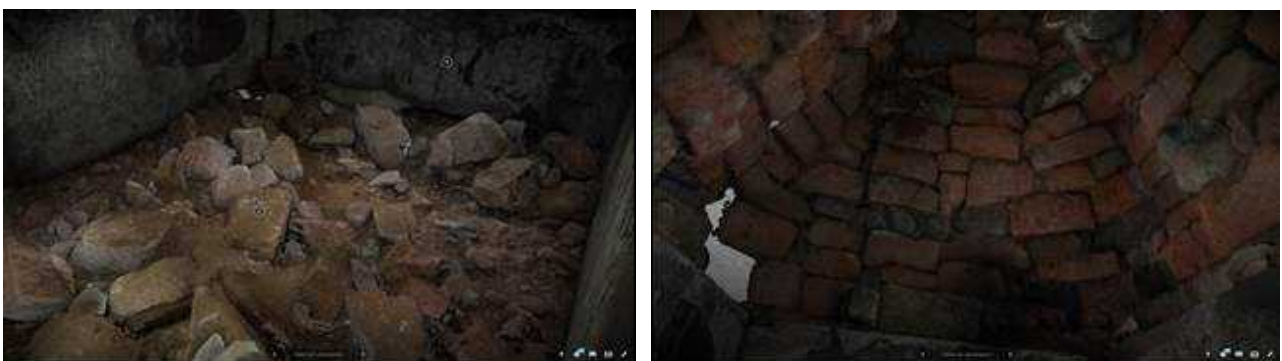


図2 写真測量による2017年の3次元データ

<https://sketchfab.com/models/f6ca6e9931354f15b6d51e13655106ee>

■ スケールおよび座標系の統一

前述のように写真測量によって再構成された 3 次元データにはスケール情報が含まれておらず、また各々異なる（ローカル）座標系で記述されているため、これらを統一する必要がある。地震前後のデータの相対スケール・位置姿勢は、最近傍点探索に基づく ICP ベースの位置合わせ手法によって推定した。井寺古墳の石障・側壁石材はすべて異なる方向・大きさに移動しているため、図 3 に示すように大きな面積を占め且つ移動が比較的小さいと考えられる前障のみを用いて推定を行った。

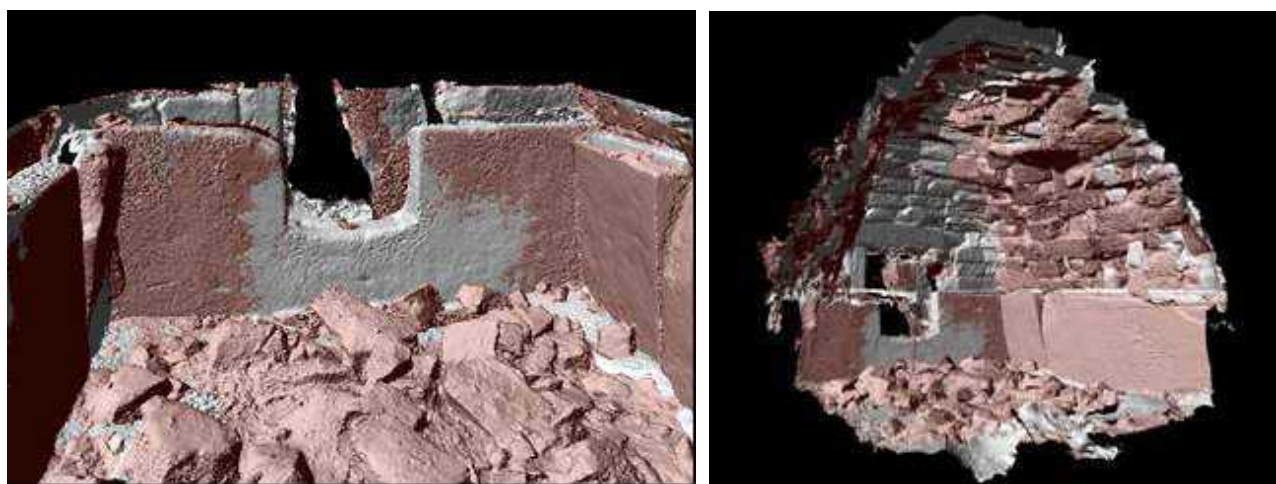


図 3 前障を用いたスケール位置合わせ

■ 立面画像による変状の可視化

図 4.1～4.6 は、相対スケール・位置姿勢を合わせたデータを、正射影によって各方向から可視化したものである。石障は比較的移動量が少ないが、他の側壁石材は石障に対して全体的に崩れて下方方向に移動していることがわかる。また複数の石材の表面が剥離し、表面形状が異なっていることもわかる。図 4.3 は古墳内部から見上げた図であり、全体的に内側、入口側に側壁石材が移動し、天井石も入口側に大きく移動していることがわかる。

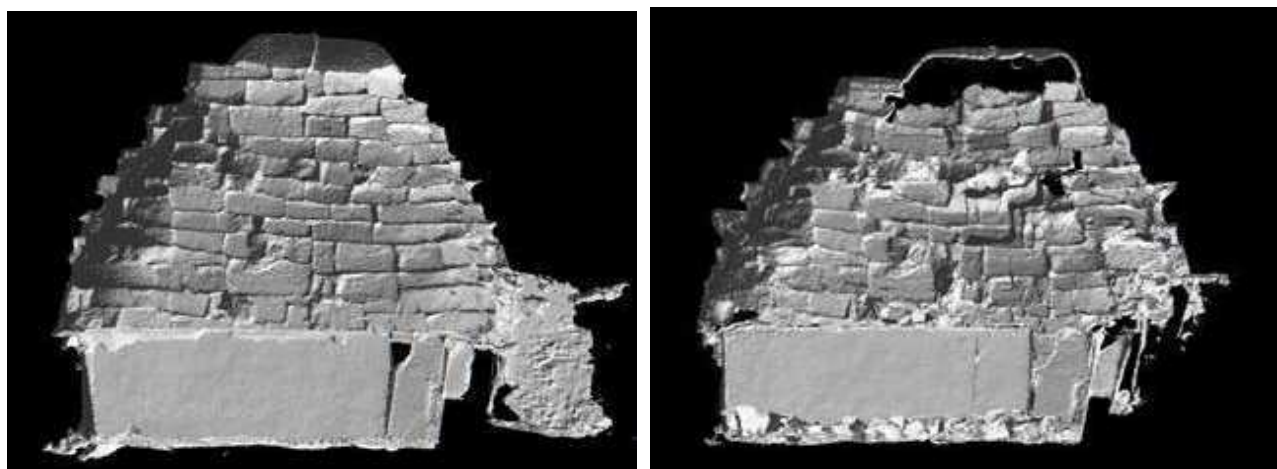


図 4.1 右側面（左：2015 年、右：2017 年）

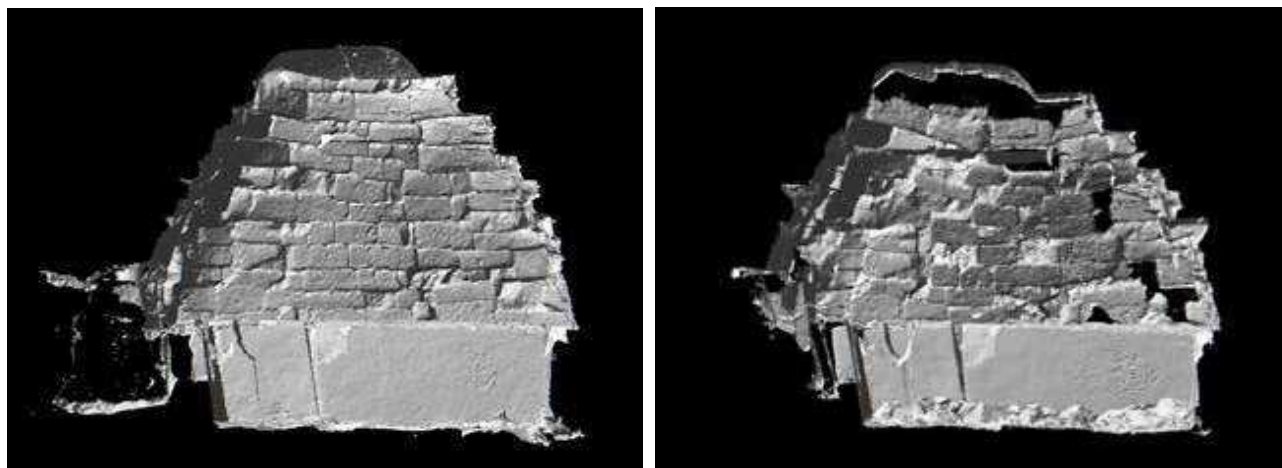


图 4.2 左侧面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

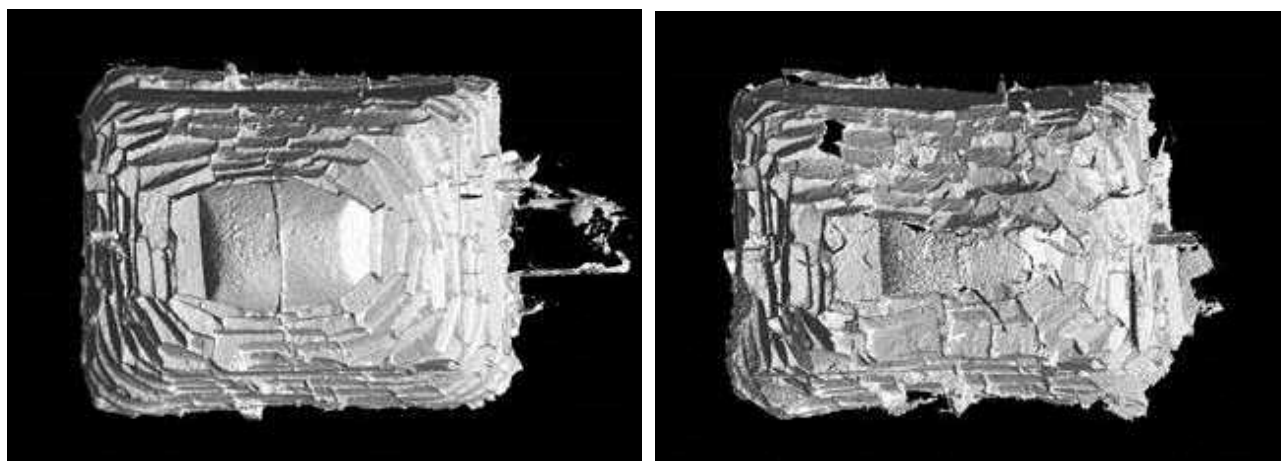


图 4.3 上面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

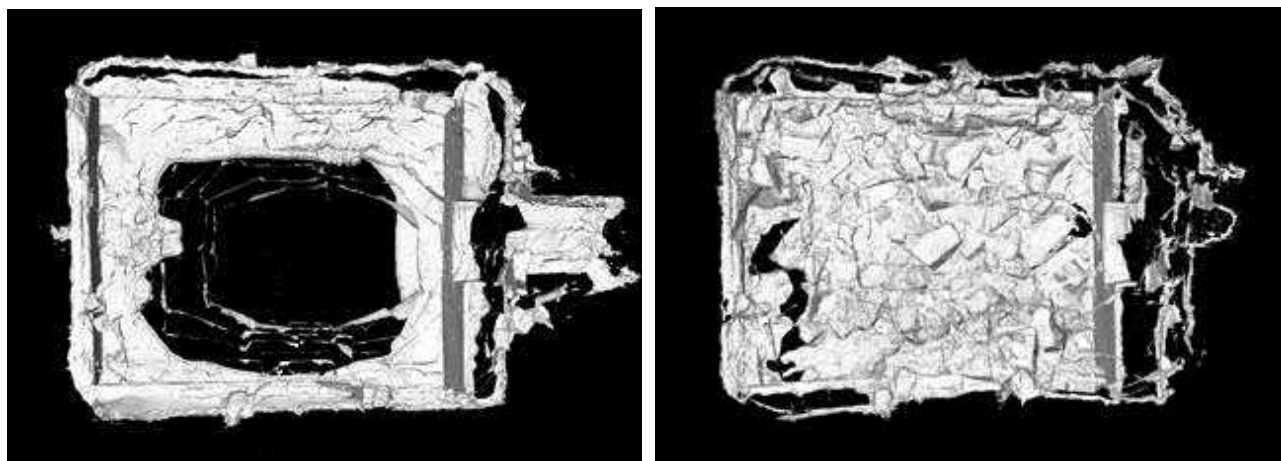


图 4.4 下面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

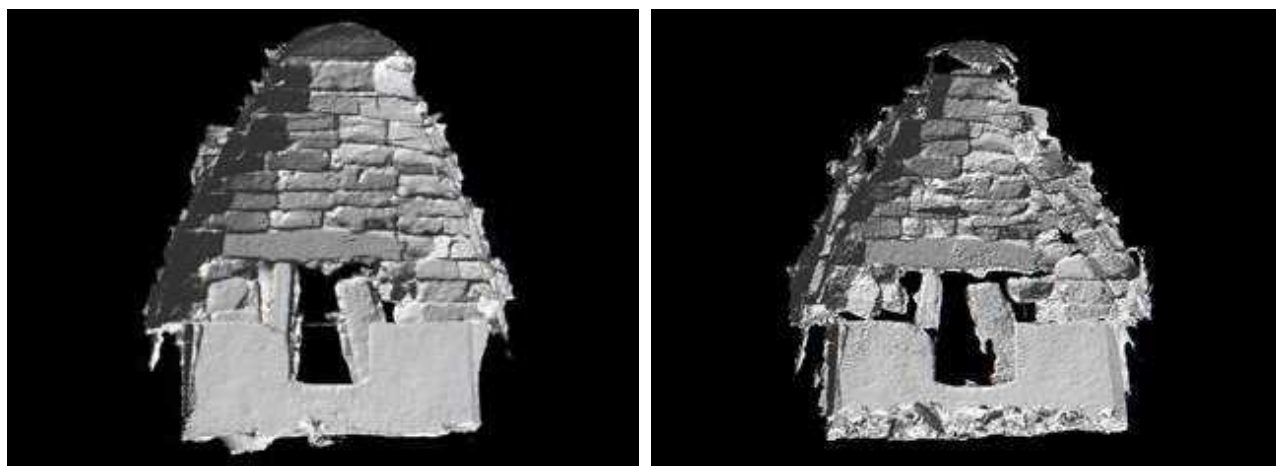


図 4.5 入口面（左：2015 年、右：2017 年）

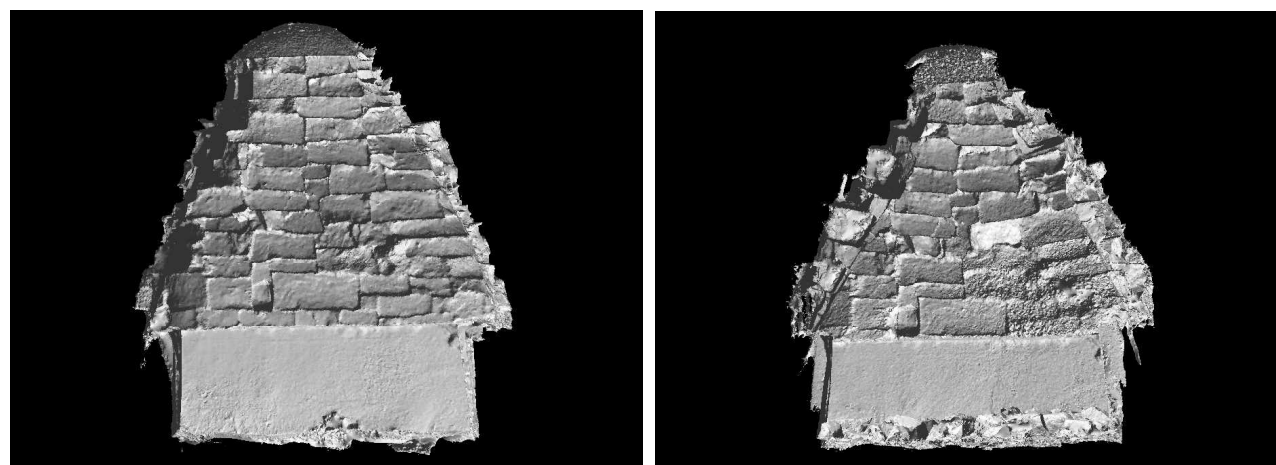


図 4.6 正面（左：2015 年、右：2017 年）

■ 各石材の移動方向・量の推定

各々の石材がどの方向にどの程度移動したかを解析するために、3次元データを石材ごとに分割し、地震前後で石材表面の位置合わせを行った。図 5 および図 6 は分割された各石材データを異なる色で表したものである。分割された各石材データが重なるように相対位置姿勢を求めることによって、移動量・方向を推定することができる。ただし、前述のように写真測量データにはスケールが含まれておらず、照明条件や対象表面のテクスチャ（模様）によって正しい形状が得られない場合がある。そこでスケール推定と精度検証のために、2017 年 9 月 19 日（図 7）および 2017 年 11 月 21 日（図 8）に LiDAR (FARO s150) によって石室内のレーザ計測を行った。図 9 に示すのはスケール位置合わせ後の写真測量データとレーザ計測データである。写真測量データの場合、撮影環境によって詳細な形状が得られていない部分が見て取れるが、おおむね正しい形状が得られていることが分かる。地震前のデータについては写真撮影環境が地震後よりも良いと考えると、比較には十分な精度が得られているものと考えられる。

レーザ計測データに位置合わせした写真測量データをもとに、各石材が移動した方向、大きさを推定し、表現したのが図 10 である。石障の移動が比較的小さいものとする、奥側の側壁石材は鉛直下向きに、左右の石材は内側下向きに、入口側の石材および天井石は入口方向に移動していることがわかる。

また最大で 40cm 以上移動している石材もある。またデータが表示されていない部分は、位置合わせできなかった石材であり、データ精度が不十分であるか、表面が剥離している石材である。

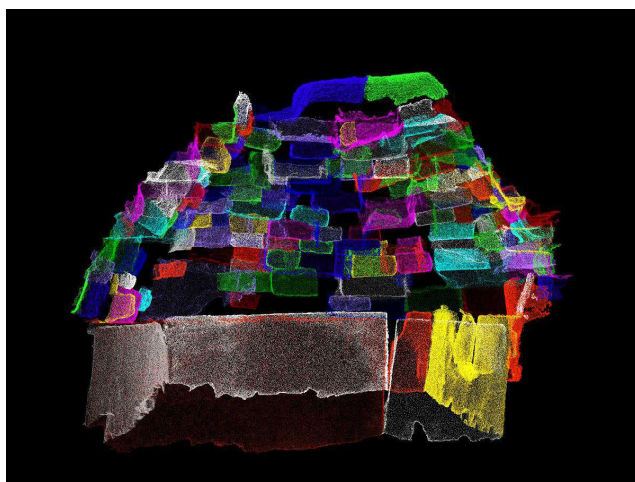
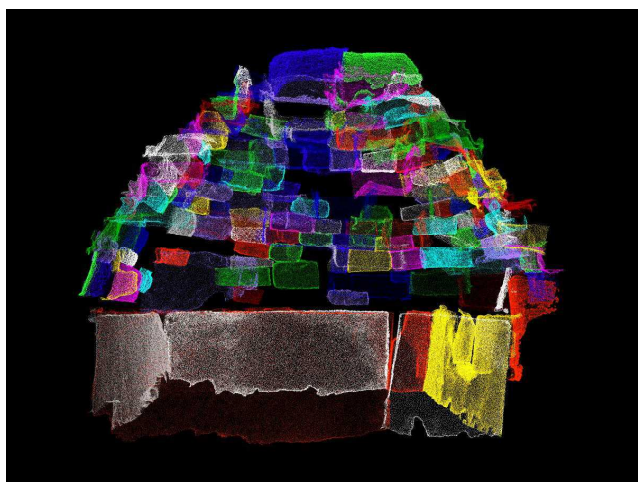


図 5 石材データの分割と地震前後の様子（左：地震前、右：地震後）

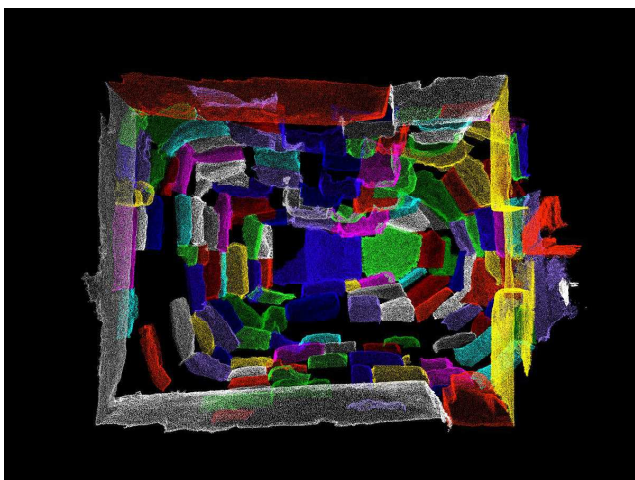
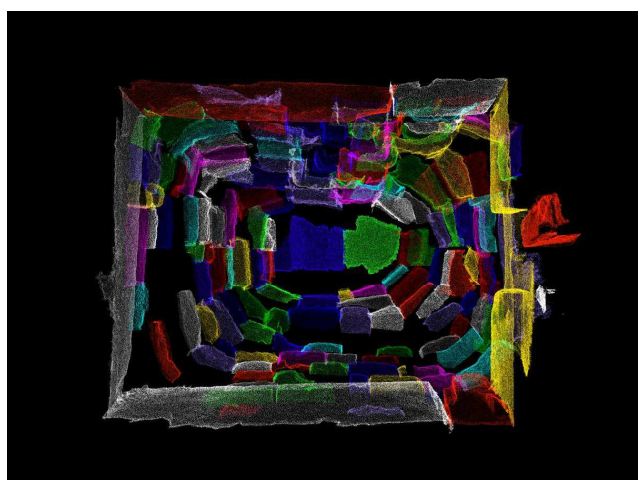


図 6 石材データの分割と地震前後の様子（左：地震前、右：地震後）

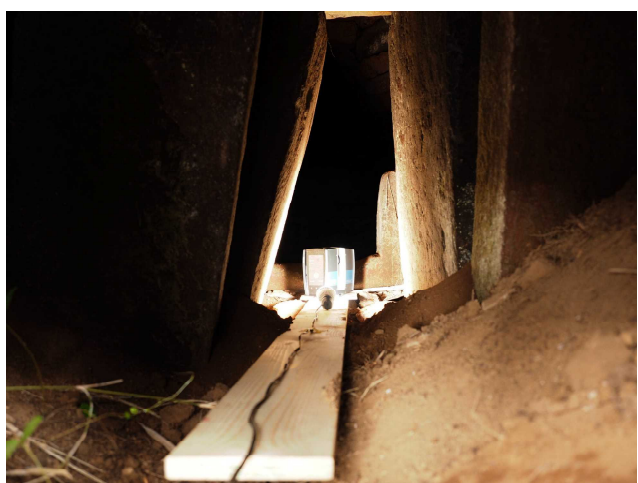


図 7 井寺古墳レーザ計測の様子（2017 年 9 月 19 日）

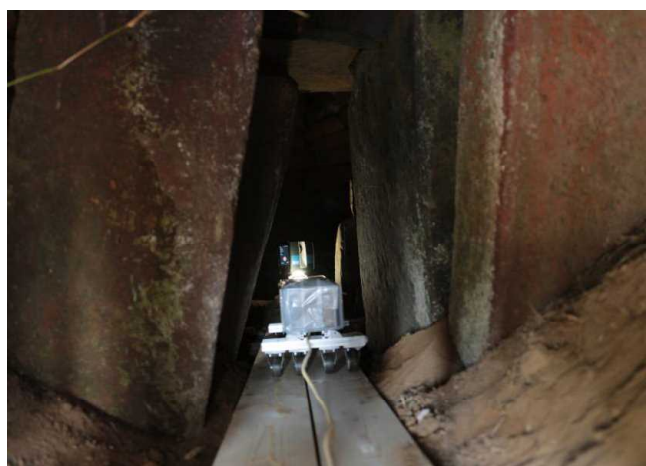


図8 井寺古墳レーザ計測の様子（2017年11月21日）

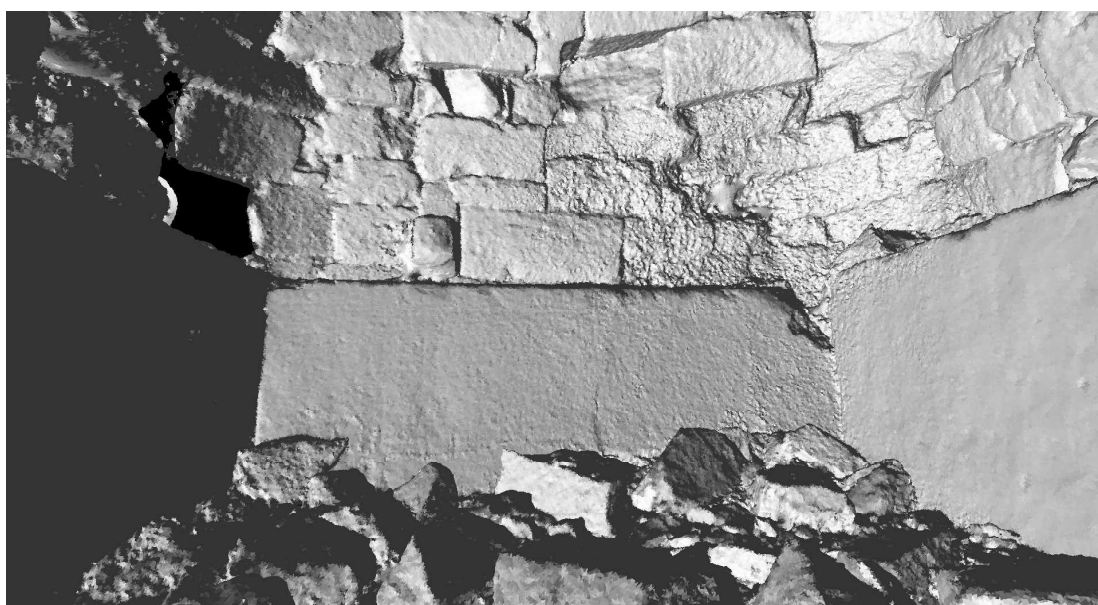


図9 写真測量データとレーザ計測データの比較（上：写真測量、下レーザ計測）

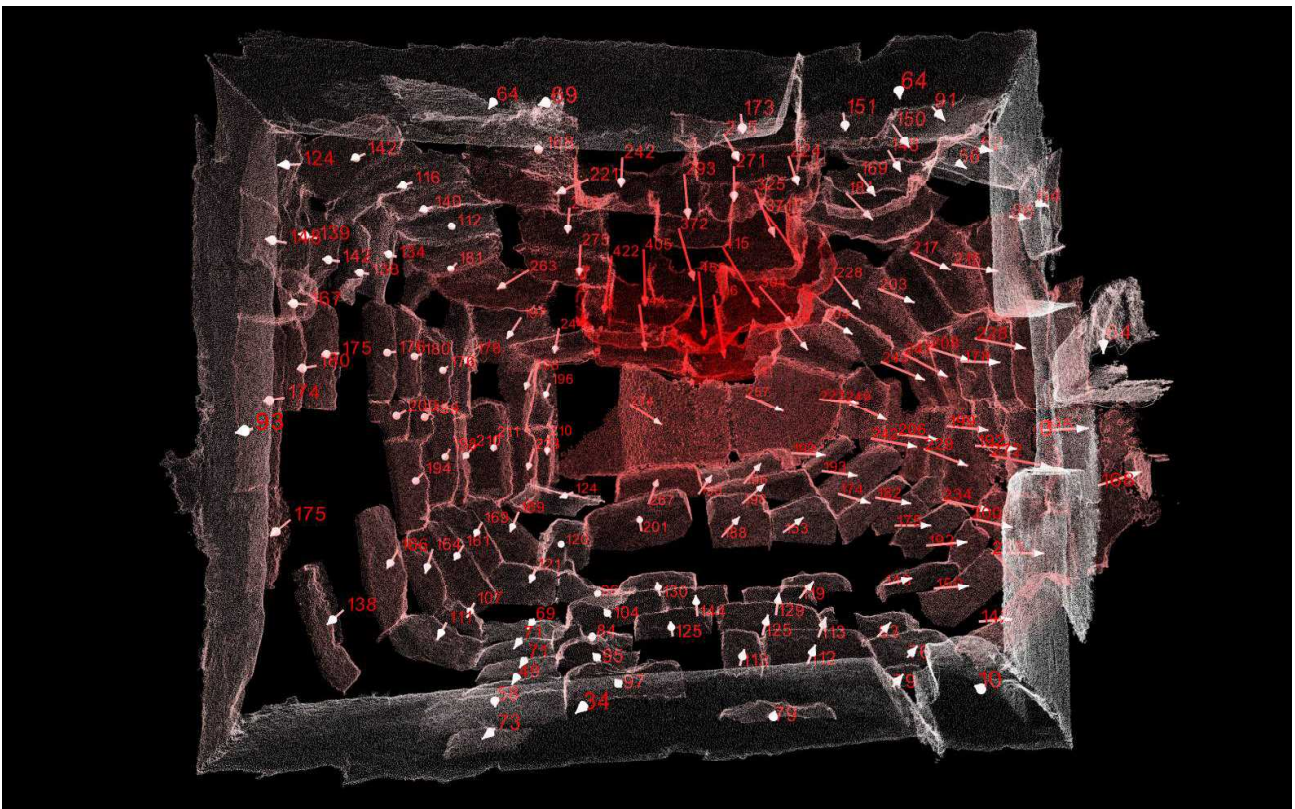
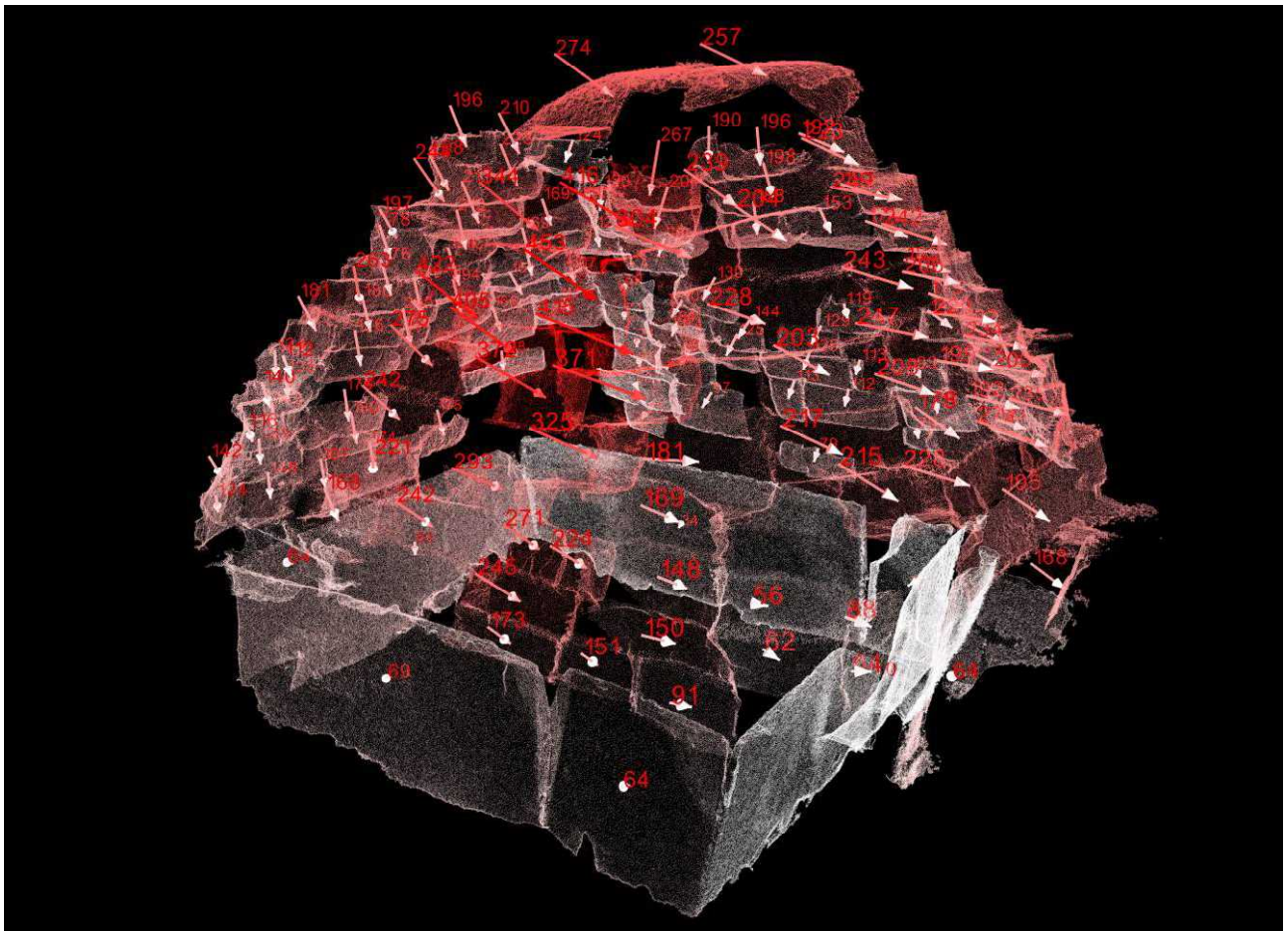


図 10 石材ごとの変状可視化

■ まとめ

本報告では、写真測量による 3 次元データおよびレーザ計測データを用いて、2016 年の熊本地震前後の井寺古墳の変状解析結果を示した。スケール位置合わせした地震前後の 3 次元データから立面画像の生成と各石材の移動方向・大きさを可視化した。また 3 次元データを石材ごとに分割し、地震前後でそれぞれ位置合わせすることによって、各石材の移動方向、大きさを推定し、可視化した。その結果、積石はそれぞれ奥壁、左右側壁、前壁でそれぞれ異なる方向に移動しており、西側では 40 cm 以上移動している石材もあることが分かった。また奥壁および東側壁の複数の石材の表面が剥離していることも明らかとなった。今後はレーダ探査のデータや、周囲の形状データと併せて解析することによって、地震発生時の様子を明らかにしていきたいと考えている。