

古墳壁画の保存活用に関する検討会

装飾古墳ワーキンググループ（進捗報告）

開催経緯

- 第1回 平成29年6月30日（金曜日）文部科学省東館3F2特別会議室
- ・平成28年熊本地震における装飾古墳の被災状況及びその対応について
 - ・平成28年熊本地震による古墳の被災状況について
- 第2回 平成29年12月19日（火曜日）熊本県庁地下大会議室
- ・平成28年熊本地震における装飾古墳の被災状況及びその対応について
 - ・平成28年熊本地震により被災した装飾古墳の調査
 - ・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
- 第3回 平成30年2月20日（火曜日）文部科学省東館3F1特別会議室
- ・被災古墳の復旧に向けた取組みの現状と課題
 - ・井寺古墳の地中レーダー探査成果
 - ・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

第1回 装飾古墳WG

平成29年6月30日(金)

文部科学省(合同庁舎7号館東館)3階 3F2特別会議室

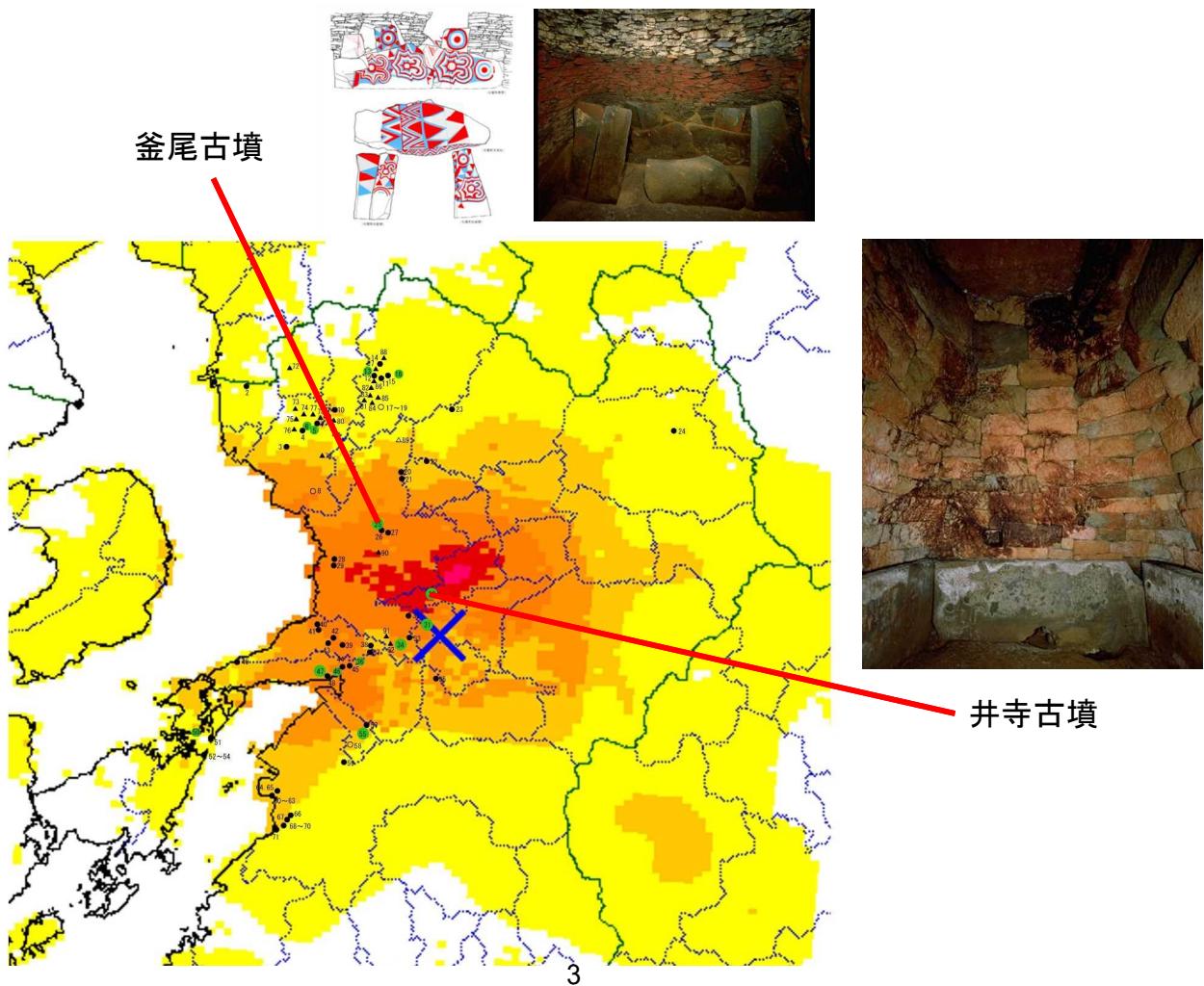
参考資料 1

古墳壁画の保存活用に関する検討会
装飾古墳ワーキンググループ(第1回)
H29. 6. 30

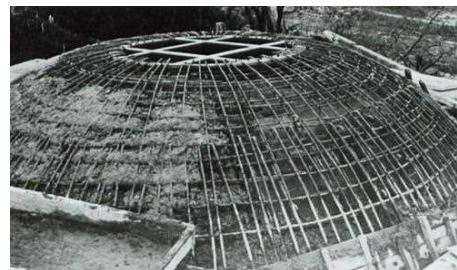
平成28年熊本地震における装飾古墳の 被災状況及びその対応について



熊本県教育庁教育総務局
文化課 村崎孝宏



釜尾古墳



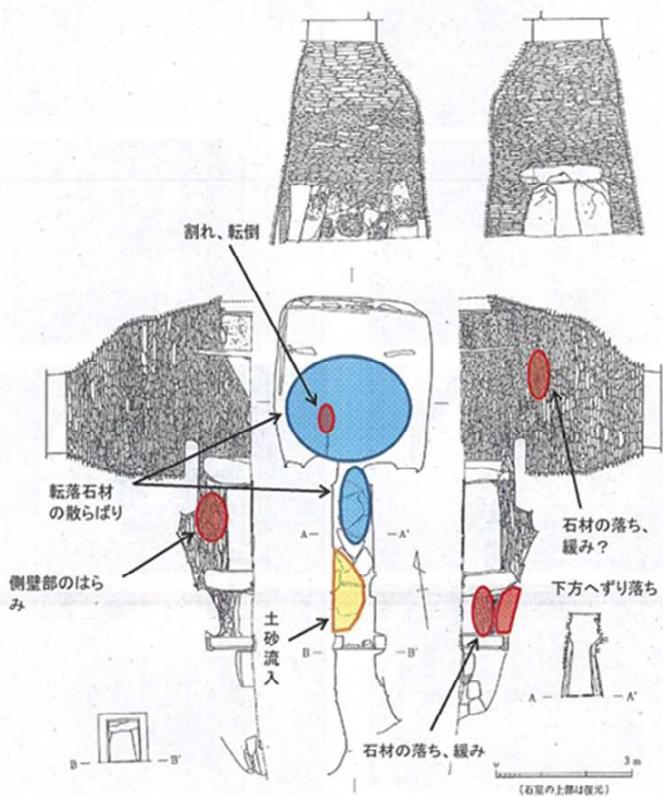
石室上部をコンクリートドームで覆い、
その上に土盛りを施す(昭和42年)

本震後



2017.6.21(水)現地確認

墳丘全面に亀裂、地すべり。
石室入口扉を土砂が塞ぐ。
石室: 石材の落下、緩み。羨道部土砂流れ込み。
左屍床の仕切り石割れ、転倒。
(2016.8.17 小型カメラによる内部確認)



石室内被害状況(カメラによる確認)



玄室被災状況



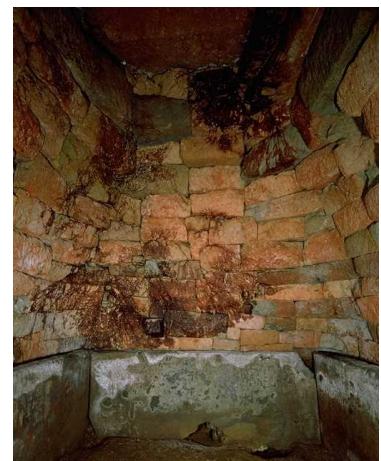
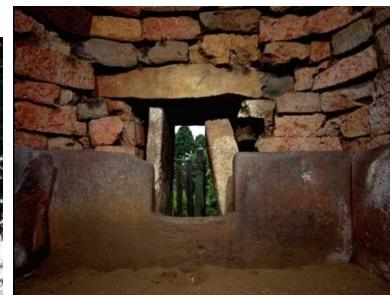
羨道部被災状況

- 管理団体指定の手続き中。
- ➡ 指定の後、測量を実施(11月～3月)。
- H30年度上半期、発掘調査
- H30年度下半期以降、復旧工事。

井寺古墳(嘉島町)

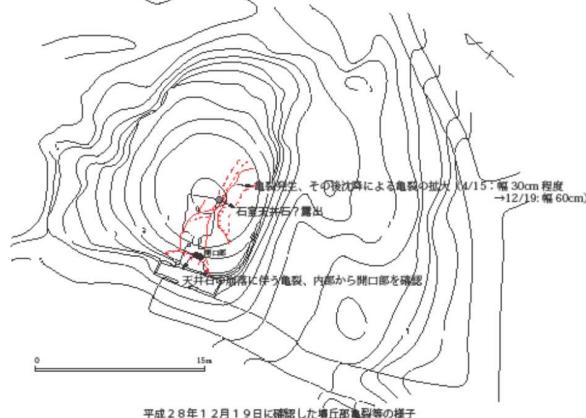


墳丘頂部に亀裂。開口部出口に向かって土の崩落。
☞ブルーシートで雨水対策。



2016.12.19撮影(嘉島町教委)

図は、熊本県教育委員会、1984『熊本県装飾古墳総合調査報告書』掲載の図面を基に作成



1



南側亀裂の拡大①(東側→頂上)



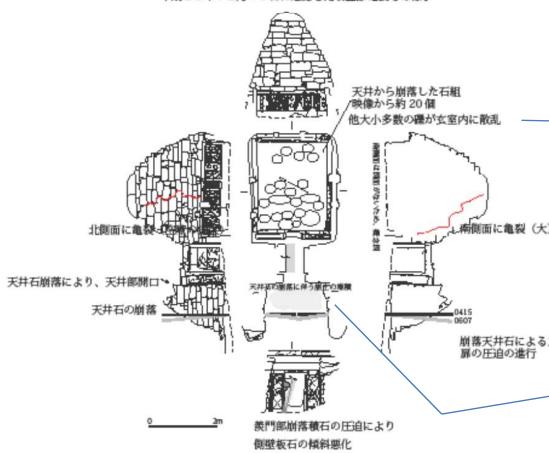
南側亀裂の拡大②(西側→頂上)



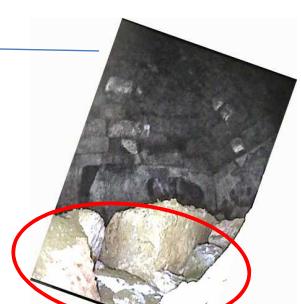
石室石材の露出(西→東)



亀列の堆土(頂上、東側)



※入口部に土砂が堆積

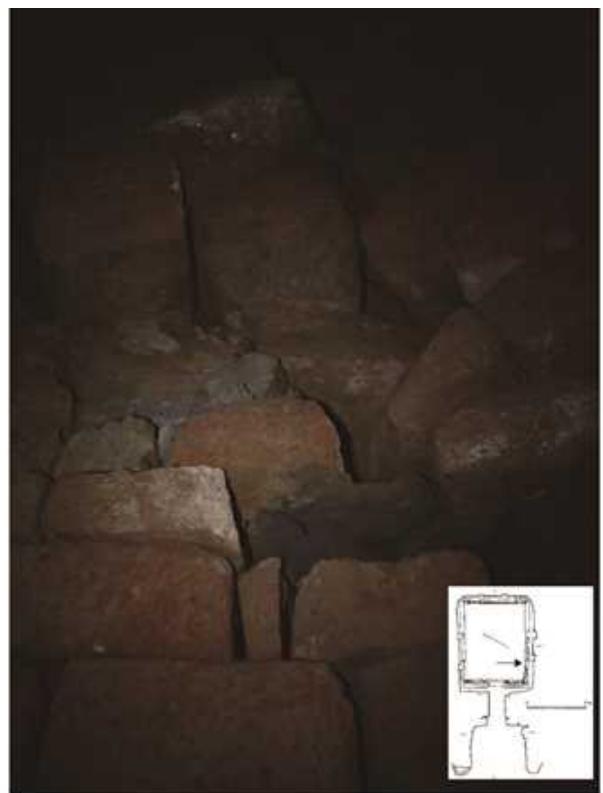


※玄室内に石材が落下

(2016.6.22 小型丸メモによる内部確認)



羨道南側壁面（土砂堆積）



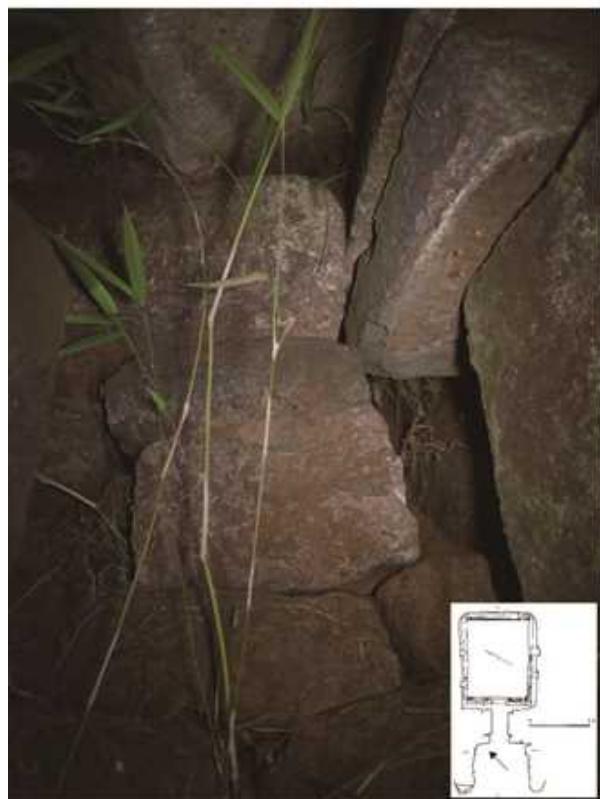
玄室南側壁面（石材破碎・脱落）



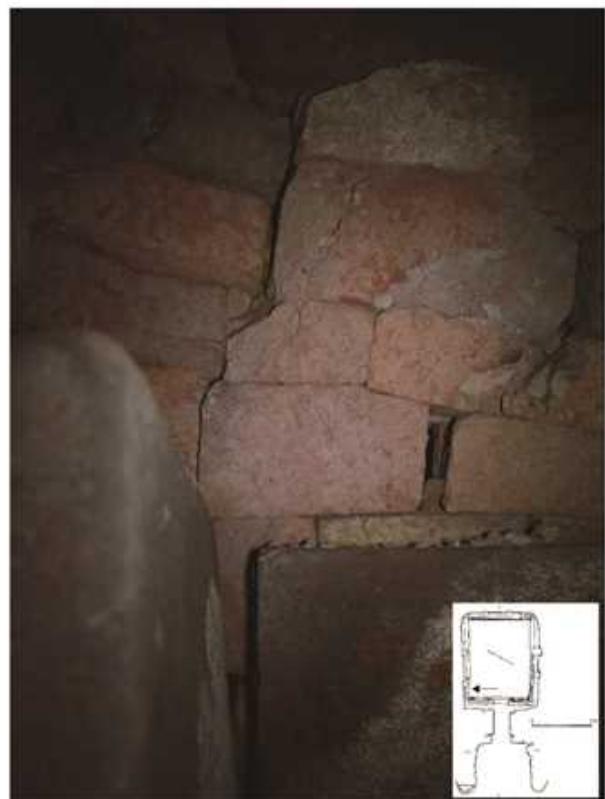
玄室北側壁（奥壁側）亀裂



羨道南側壁（奥壁側）石材破碎・脱落



羨道北側壁面（袖石のずれ・傾斜）

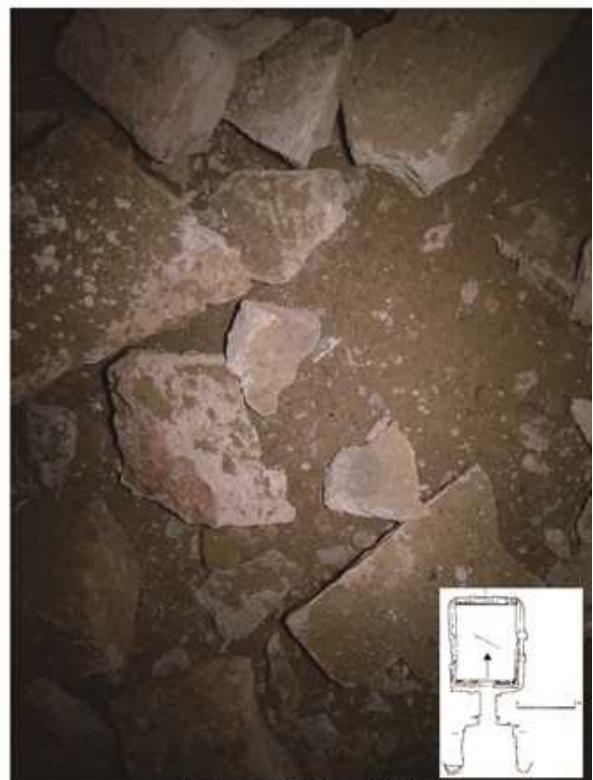


玄室北側壁面（石材破碎・脱落）

-6-



玄室北側壁②(刀置状突起破損・脱落)



玄室床面（破碎石材散乱）

-6-

20170620



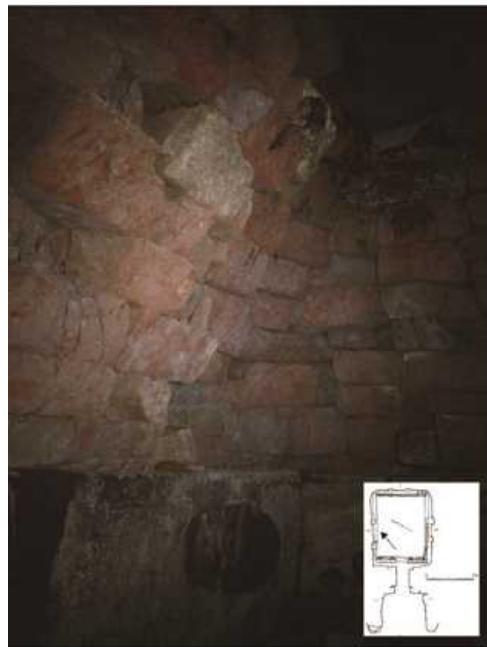
20150913



南側壁（奥側）天井付近石材の突出



奥壁石障に生じた亀裂



北側壁（中央～奥側）石材の孕み



奥壁石障に生じた亀裂



地震前（上段）と地震後（下段）撮影データを元にした3次元モデルの比較

○ H29年6月初旬、内部調査を実施.

※ ステンレス扉に穴を開け、撮影ポールにワイヤレスで操作できるカメラを差し込み、内部を撮影した.

- ☞ 南側壁の亀裂が、石材の破碎と脱落により積石に隙間が生じていること.
- ☞ 石障(玄門側)上部にある北側から出る突起(刀置)が損壊.
- ☞ 北側壁の孕み.



平成 28 年熊本地震による古墳の被災状況について

平成 29 年 7 月

文化庁

熊本県教育庁文化課

第2回 装飾古墳WG

平成29年12月19日(火)
熊本県地下大会議室

参考資料2

古墳壁画の保存活用に関する検討会
装飾古墳ワーキンググループ (第2回)
H29. 12. 19

平成28年熊本地震における装飾古墳の 被災状況及びその対応について



熊本県教育庁教育総務局
文化課 村崎孝宏

井寺古墳(嘉島町)

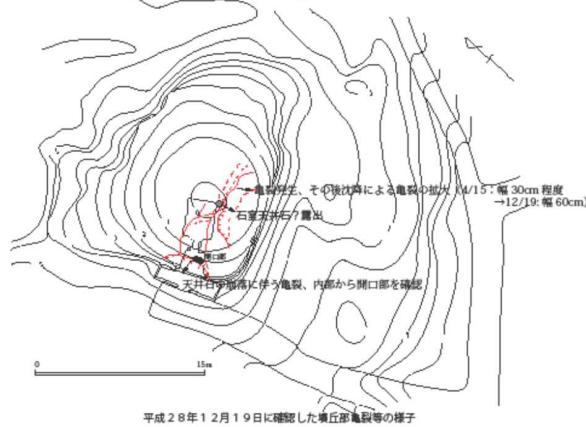


▽装飾古墳館レプリカの3次元計測

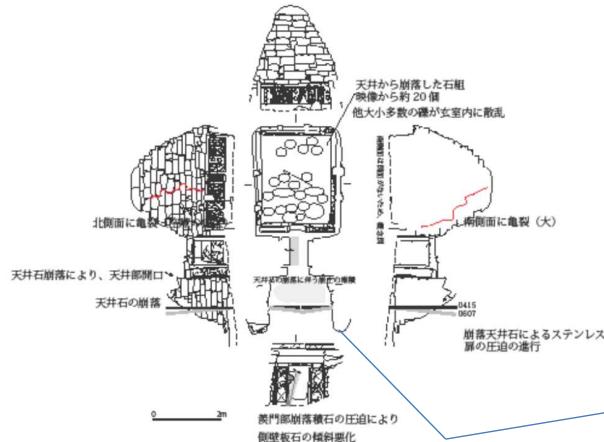
第1回 嘉島町史跡保存整備検討委員会(H29.7.25)

- 被害状況の確認
- 周溝確認調査結果報告
- 石室内部の被害状況を踏まえた危険度判断
- 石室内部における支保工等について





平成28年1月29日に確認した墳丘部亀裂等の様子



平成28年6月22日に実施した内部状況調査結果を反映した被害状況図

△ 図作成:嘉島町教育委員会



※奈文研によるレーダー探査(2017.11.27-30)



※東大大石研究室による
石室3次元計測(2017.11.20)

※写真撮影:嘉島町教育委員会

金尾古墳

第1回 古墳の復旧方法等に対する意見聴取委員会(2017.10.4-5)

○金尾古墳及び塚原古墳群の復旧方法等について検討.

小椋委員(京都大学教授:建築環境、整備)
杉井委員(熊本大学准教授:考古学)
山尾委員(熊本大学名誉教授:土木工学)

□ 内部の状況を肉眼で観察.

- ☞ 地震後初めて、羨道入口の扉を開けた.
- 羨道部に大量の土砂の流れ込みを確認.
- 羨道部天井石が落石する可能性あり.
- ☞ それ以上の内部確認は、次回以降に持ち越し.
- 羨道部に設置していたデータロガーを回収.
- ☞ 地震後、外気の影響がみられる.



- 今後、羨道部天井石をジャッキで固定する等安全性を確保した上で、内部立ち入りを行う.



△写真撮影:熊本市文化振興課

塚原古墳群

- 琵琶塚古墳、くぬぎ塚古墳で墳丘測量を実施.
- りゅうがん塚古墳、くぬぎ塚古墳、三段塚古墳、琵琶塚古墳で発掘調査を実施(10/25～).
- 石之室古墳で墳丘測量、石棺実測.
- ⇒復旧方法の検討.



2, 三段塚古墳(写真撮影:熊本市文化振興課)



塚原古墳群内被害位置図 (図作成:熊本市文化振興課)



6, くぬぎ塚古墳(写真撮影:熊本市文化振興課)

- 1 りゅうがん塚古墳
- 3 花見塚古墳
- 4 琵琶塚古墳
- 5 丸山2号墳
- 7 石之室古墳

永安寺西古墳



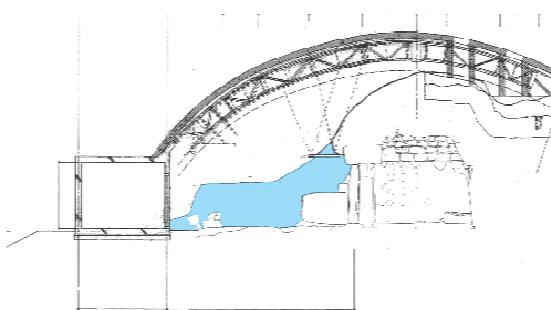
- 墳丘残存部や保護施設の盛土が崩落.
- 雨水入れ口が破損、墳丘土が流失.

永安寺東古墳

- 石室前室及び玄室における石材の落下、剥落など.
- 石材間から石室内への土砂の流入.
- 墳丘の一部に亀裂が発生.
- 石室天井石からの漏水、床面の穿孔.



△写真撮影:玉名市教育委員会



△図作成:玉名市教育委員会

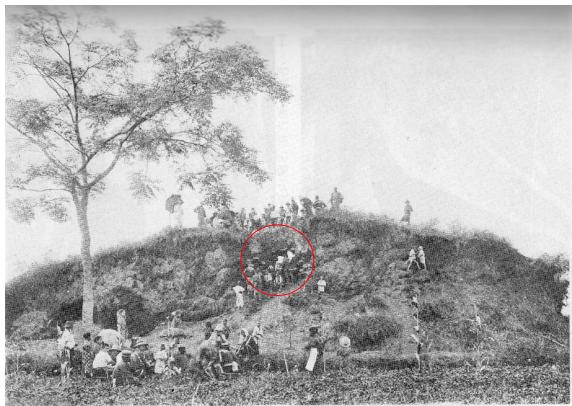
⇒ 平成30年2月に復旧検討委員会を設置予定.

* 保存科学、土木工学、考古学(各1人)と市文化財保護審議会会長の計4人で構成.

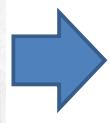
平成30年度、復旧方法等を検討.

平成31年度、実施設計・復旧工事の実施.

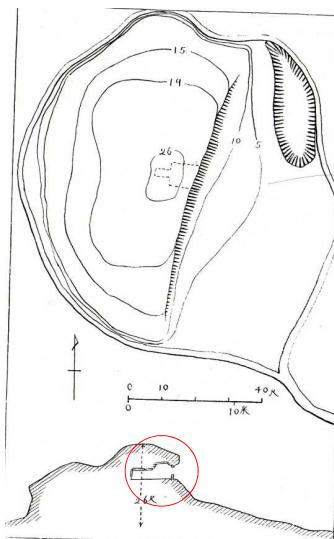
小坂大塚古墳



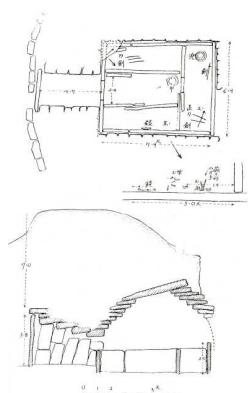
△ 石室発見当時の様子(大正9(1920)年)



△ 試掘調査前の様子(H29.6.27)



△ 5世紀中頃、円墳
石障系肥後型石室



- 墳丘の周囲(西-南-東)に第二明星学園が所在。
☞ 地震被害により建替え。
- 墳丘のみ町指定。
- 周囲は周知の埋蔵包蔵地の取扱なし。
☞ 試掘調査結果、周溝確認、遺跡発見の手続き。
- トレンチ3か所で、周溝を確認。

平成28年(2016年)熊本地震により 被災した装飾古墳の調査

奈良文化財研究所
高妻洋成

調査対象

- ・塚原古墳群（熊本市）
- ・井寺古墳（嘉島町）

調査目的

- ・被害状況の把握
- ・将来にわたって使うことのできる現況の記録



整備方針の検討
維持管理法の検討

調査内容

・石室内部の構造と状態の計測・記録

SfM-MVS(Structure from Motion - Multi View Stereo) (嘉島町実施)

3次元レーザー計測 (東大大石研実施)

温湿度の計測と記録 (予定)

・古墳の構造と状態の計測・記録

SfM-MVS(Structure from Motion - Multi View Stereo)

3次元レーザー計測

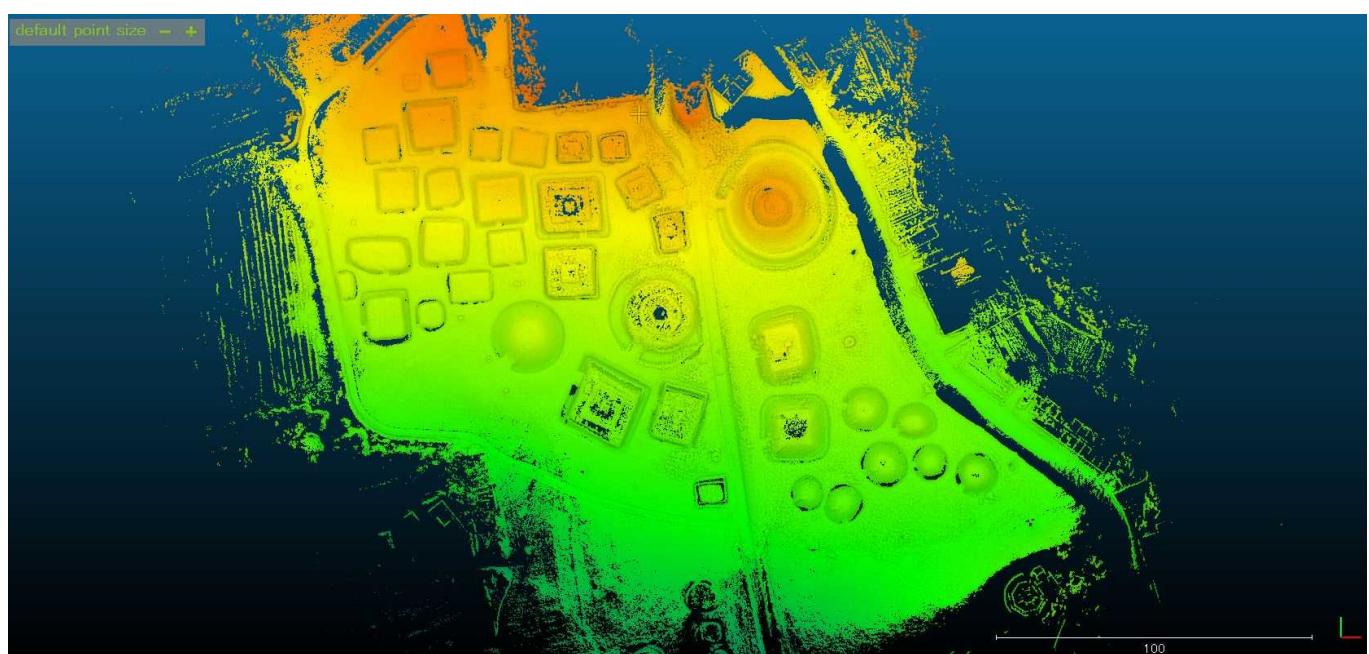
地中レーダー探査

電気探査 (予定)

土壤水分の計測と記録 (予定)

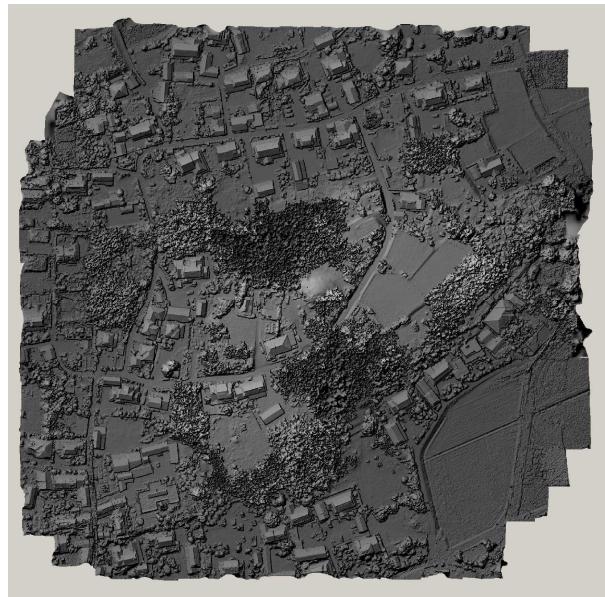
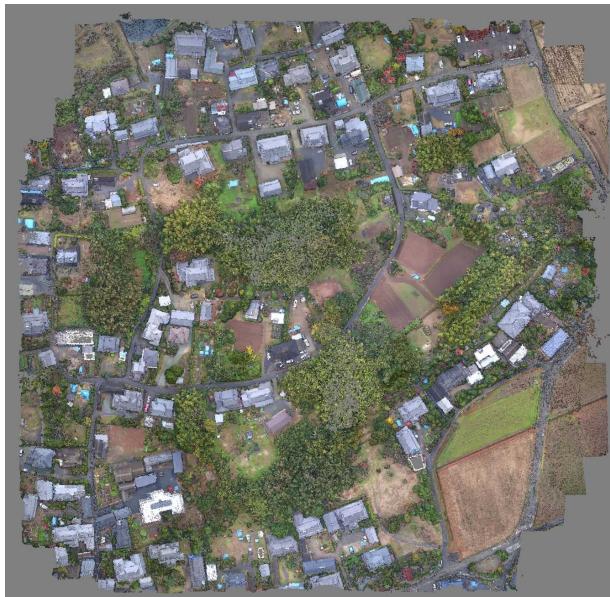
地中温度の計測と記録 (予定)

・古墳の構造と状態の計測・記録



LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)による地形測量

- ・古墳の構造と状態の計測・記録



UAV (Unmanned Aerial Vehicle)による撮影とSfM-MVS

- ・古墳の構造と状態の計測・記録



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3次元データを正規化し、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・大きさで移動しているため、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。

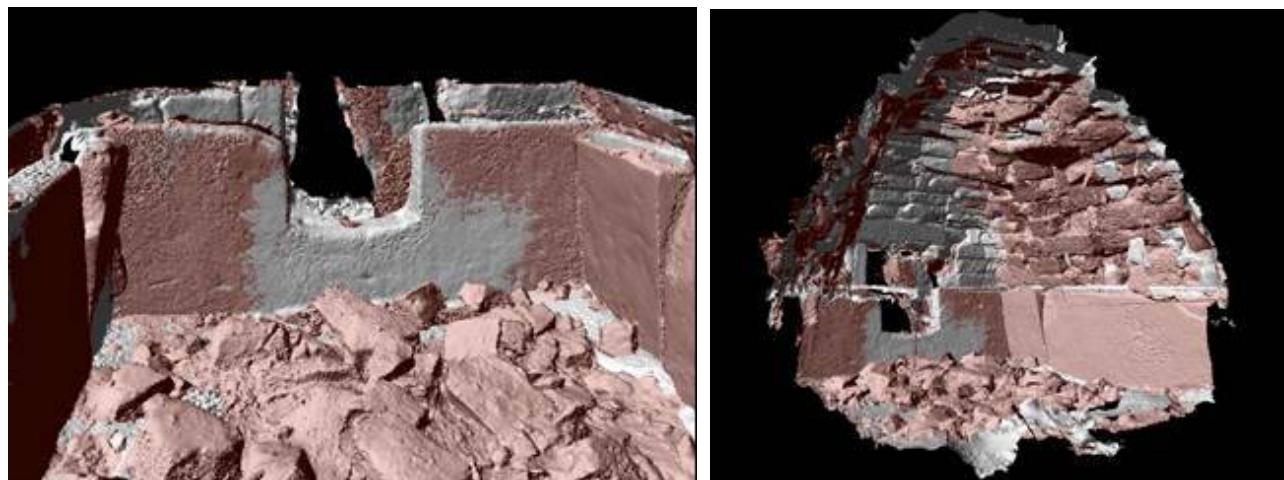


図 3 前障を用いたスケール位置合わせ

■ 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。

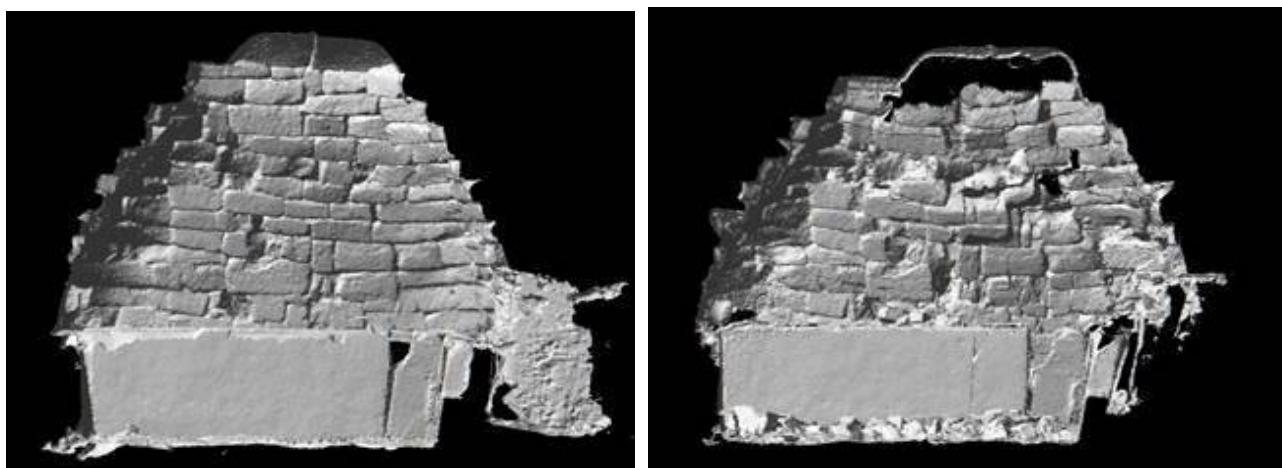


図 4.1 右側面（左：2015 年、右：2017 年）

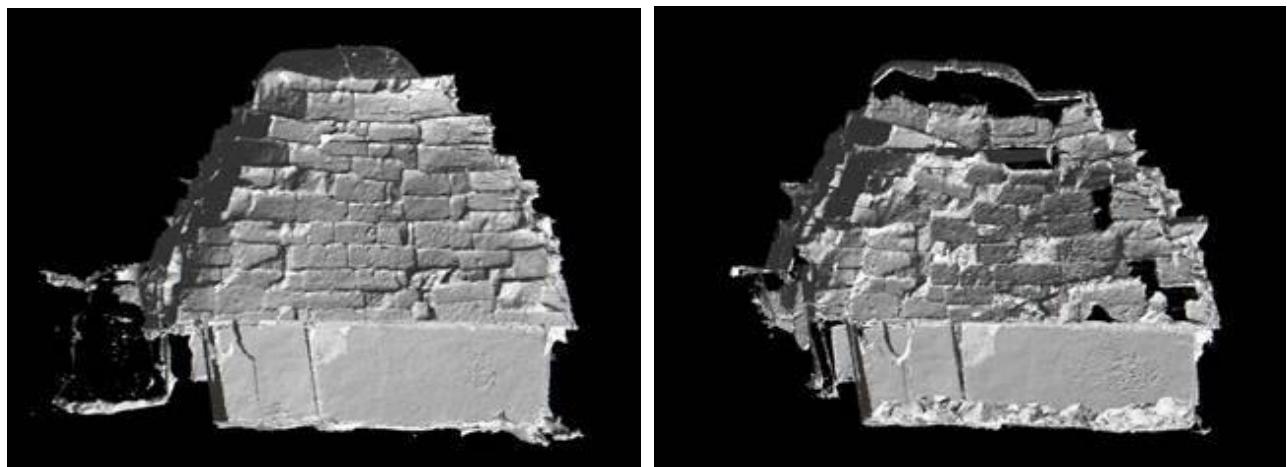


図 4.2 左側面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

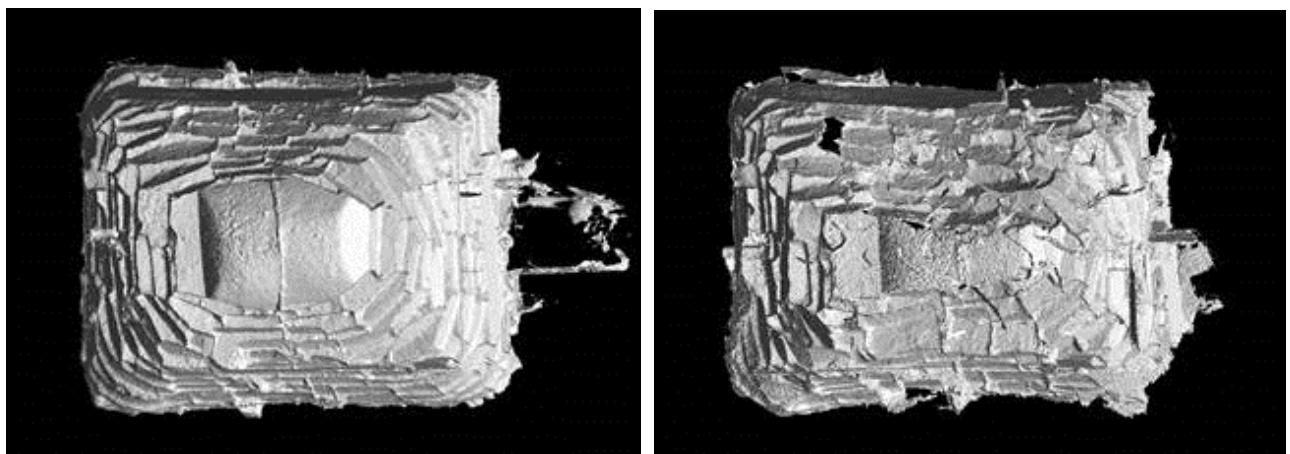


図 4.3 上面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

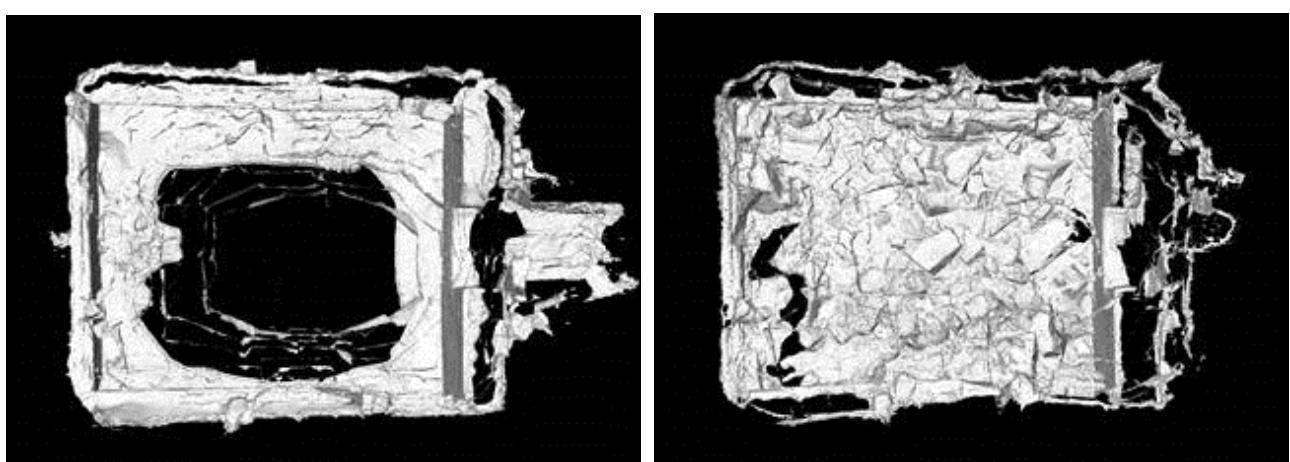


図 4.4 下面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

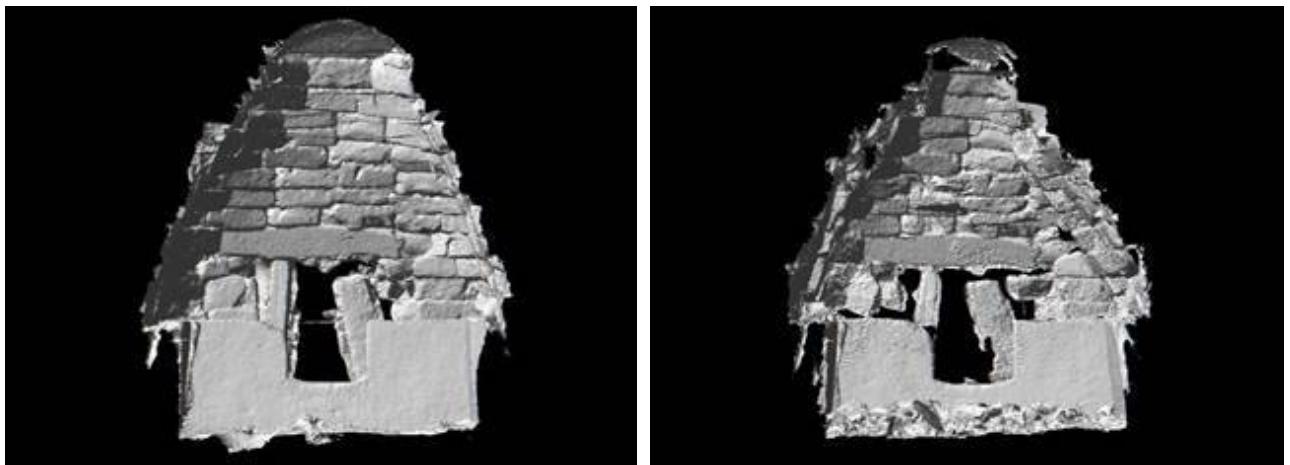


図 4.5 入口面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

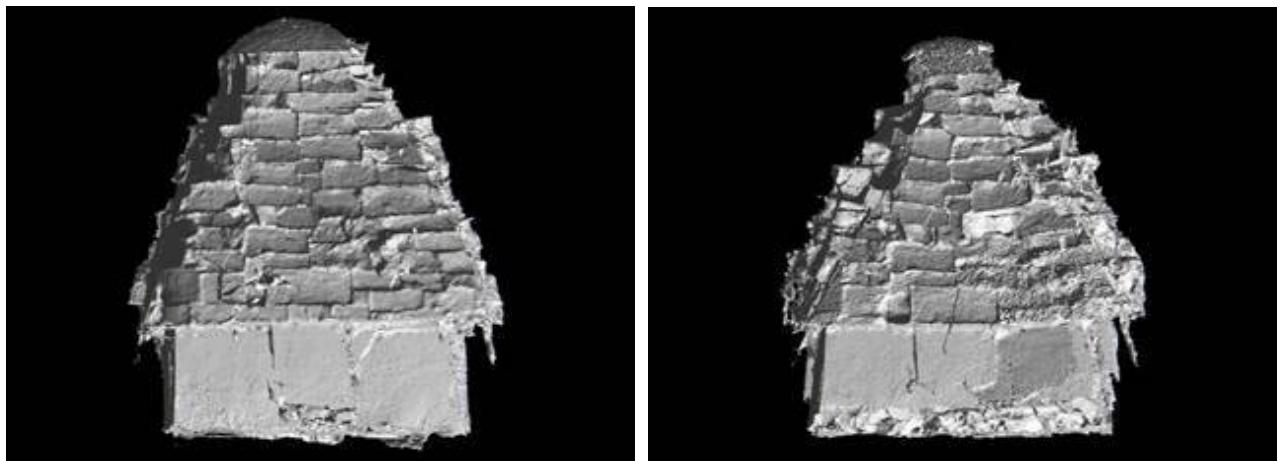


図 4.6 正面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

■ 各石材の移動方向、移動量推定

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い、移動方向、相対的移動量を推定した。図 5 中の矢印は各石が移動した方向、大きさを表している。石障の移動が比較的小さいものとすると、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であり、地震前後で表面形状が変化している、つまり表面が剥離して地面に落下した石であると考えられる。

■ まとめ

本報告では、写真測量による 3 次元データを用いて、2016 年の熊本地震前後の井寺古墳の変状解析した結果を示した。スケール位置合わせした 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、側壁石材が奥側、左右、入口側でそれぞれ異なる方向に移動していることを明らかにした。また複数の石材の表面が剥離していることも示した。

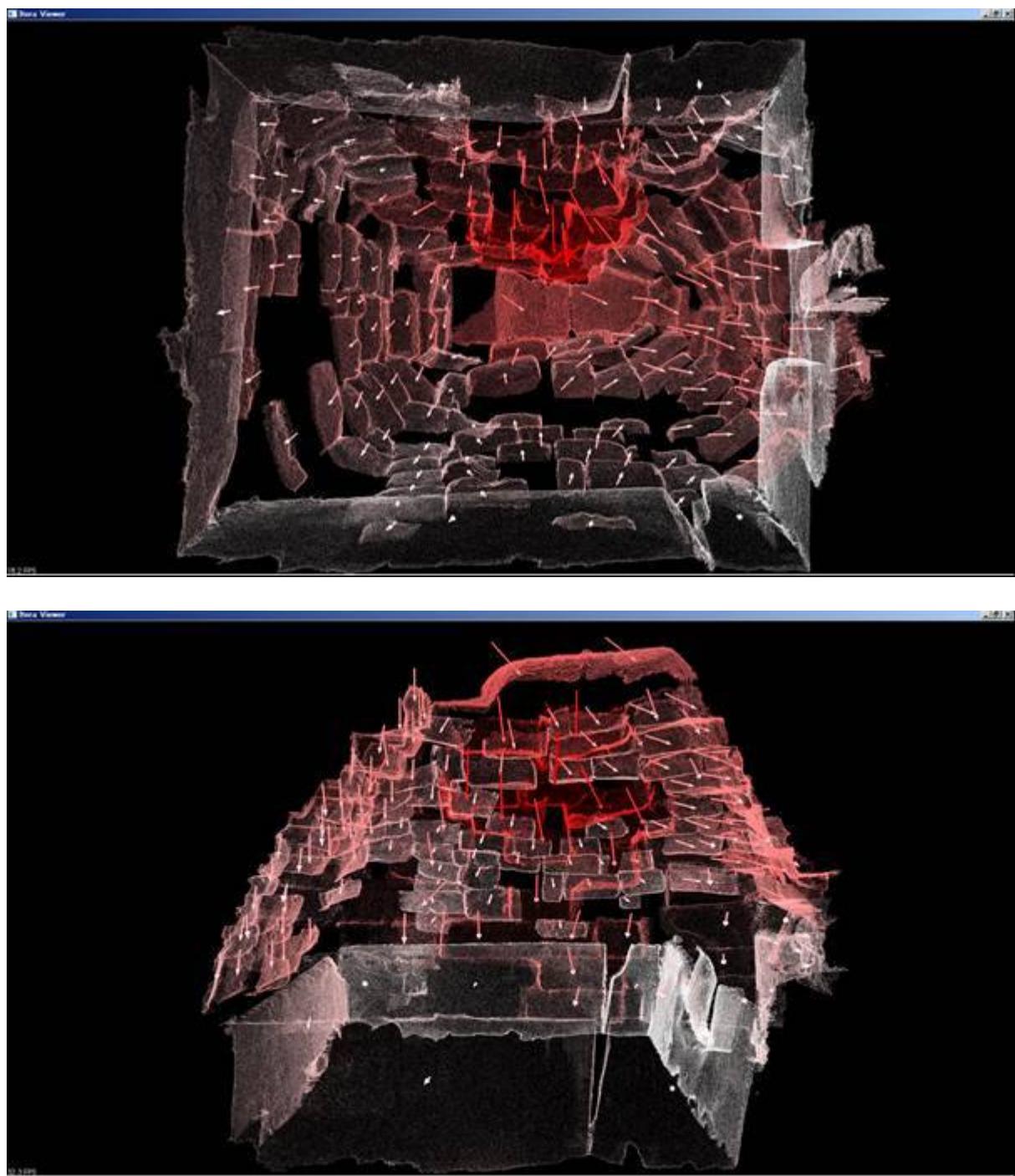


図 5 石材ごとの変状可視化

被災古墳の復旧に向けた取組みの現状と課題



2018年2月20日
熊本県教育庁教育総務局文化課

■ 第2回 古墳の復旧方法等に対する意見聴取委員会(2018.2.1)

○ 釜尾古墳及び塚原古墳群の復旧方法等について検討.

■ 塚原古墳群

□ 石之室古墳の復旧方法について.

- ☞ 墳丘(整備)盛土及びコンクリート製覆屋を解体
撤去, 石棺を外部に搬出, 新たに設置する作業小屋で修復.

□ くぬぎ塚古墳の復旧方法について.

- ☞ 墳丘を極力削らず, 緑化ブロックで斜面を保護.



りゅうがん塚古墳

■ 釜尾古墳

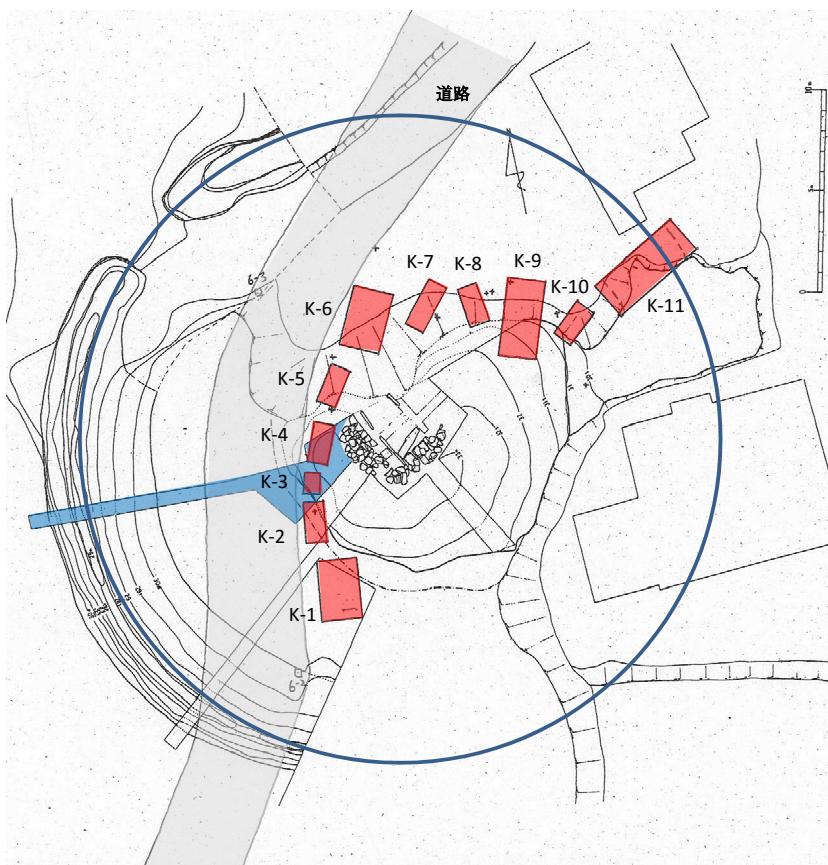
□ H30年度発掘調査の実施を計画.

- ・ コンクリート製ドームの劣化状況.
- ・ コンクリート製ドームの位置と範囲.
- ・ 整備盛土と墳丘盛土, 及び崩落土の状況.
- ・ 葦道, 前室部分の盛土, 裏込めの状況.



くぬぎ塚古墳

塚原古墳群(くぬぎ塚古墳)



K-5 トレンチ(写真撮影:熊本市文化振興課)



K-6 トレンチ(写真撮影:熊本市文化振興課)

国指定史跡 釜尾古墳 (熊本市北区)



(写真提供:熊本市文化振興課)



羨道部西側をジャッキアップ (写真撮影:熊本市文化振興課)

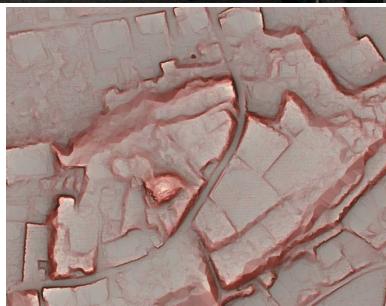
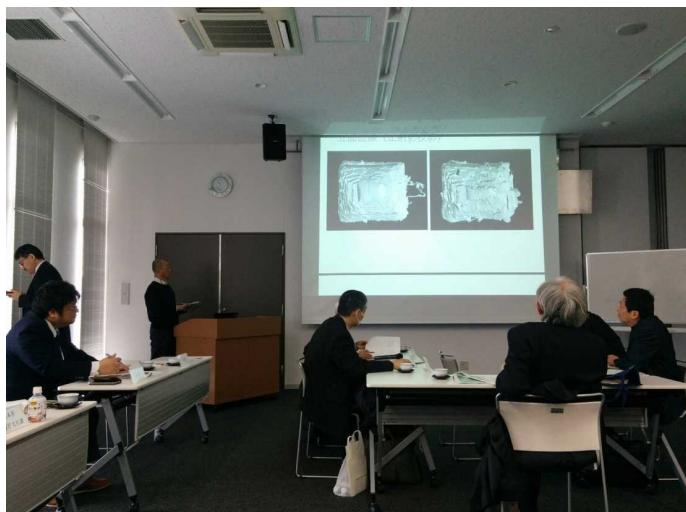


被災前 (写真撮影:熊本市文化振興課)



玄室西側の装飾ある石材が破損していることが確認。
(2018.1.19 内部確認) (写真撮影:熊本市文化振興課)

■ 第2回 嘉島町史跡保存整備検討委員会 (2018.2.7)



レーザー航測で作成された赤色立体図
(提供:嘉島町教育委員会)

(報告) 第1回開催後に実施した調査等について

- 墳丘レーダー探査
- 石室内レーザー計測

(意見交換)

○ 石室への進入方法について

- ・南壁、北壁が石室中央に向かって傾いている。
- ・天井石の見え方が小さくなっている。
- ☞ 天井石を外して入るのは危険。
羨道部側からの進入か。
但し、羨道部に流入した土砂を除去することで石室への影響はないのか。

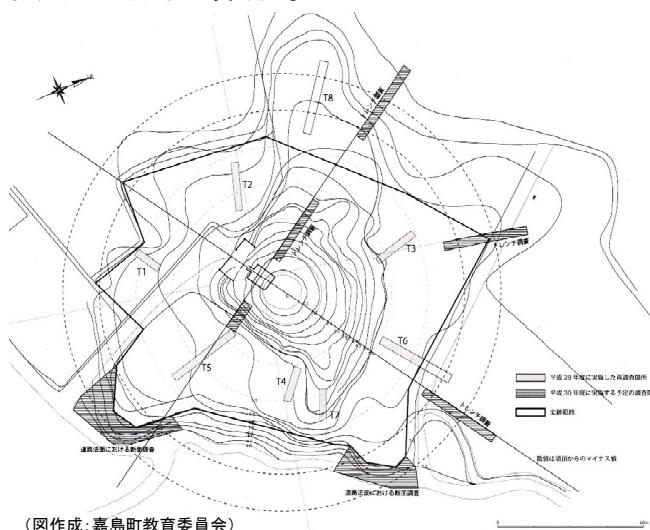
○ 墳丘の形状調査(御船町小坂大塚古墳例を踏まえて)

- ・墳丘の規模と周溝の確認が重要。
- ☞ H30年度計画のトレーンチ設定(次頁図参照)。
- ☞ 墳丘南・北側に設定されるトレーンチは、石室への影響を考慮すれば、損傷を見極めてから実施すべき。

○ 墳丘南側における支持基盤について

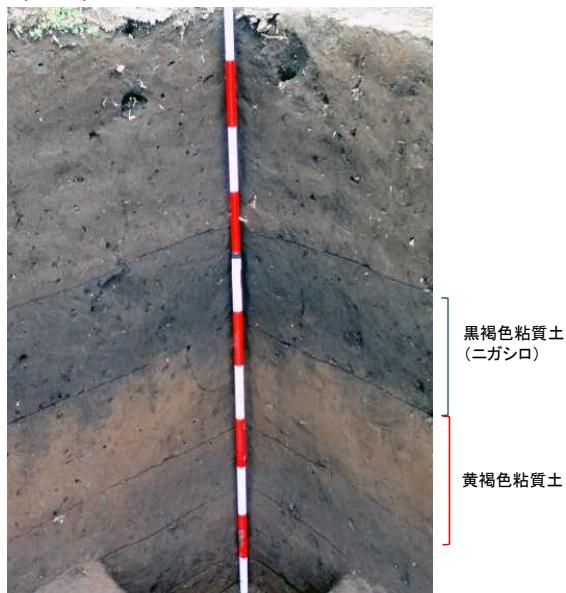
- ・墳丘の亀裂は断層に沿う(東西方向)。
- ・当該地の基盤層との関係か。
- ・軟弱地盤か、礫等の影響かは改めて電気探査を実施し解明。

国指定史跡 井寺古墳(嘉島町)



(図作成:嘉島町教育委員会)

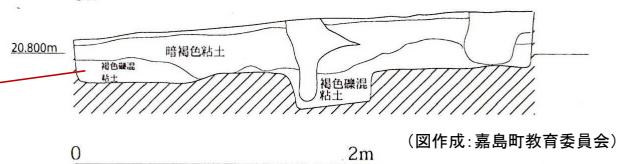
(参考) 上官塚遺跡



(写真撮影:嘉島町教育委員会)

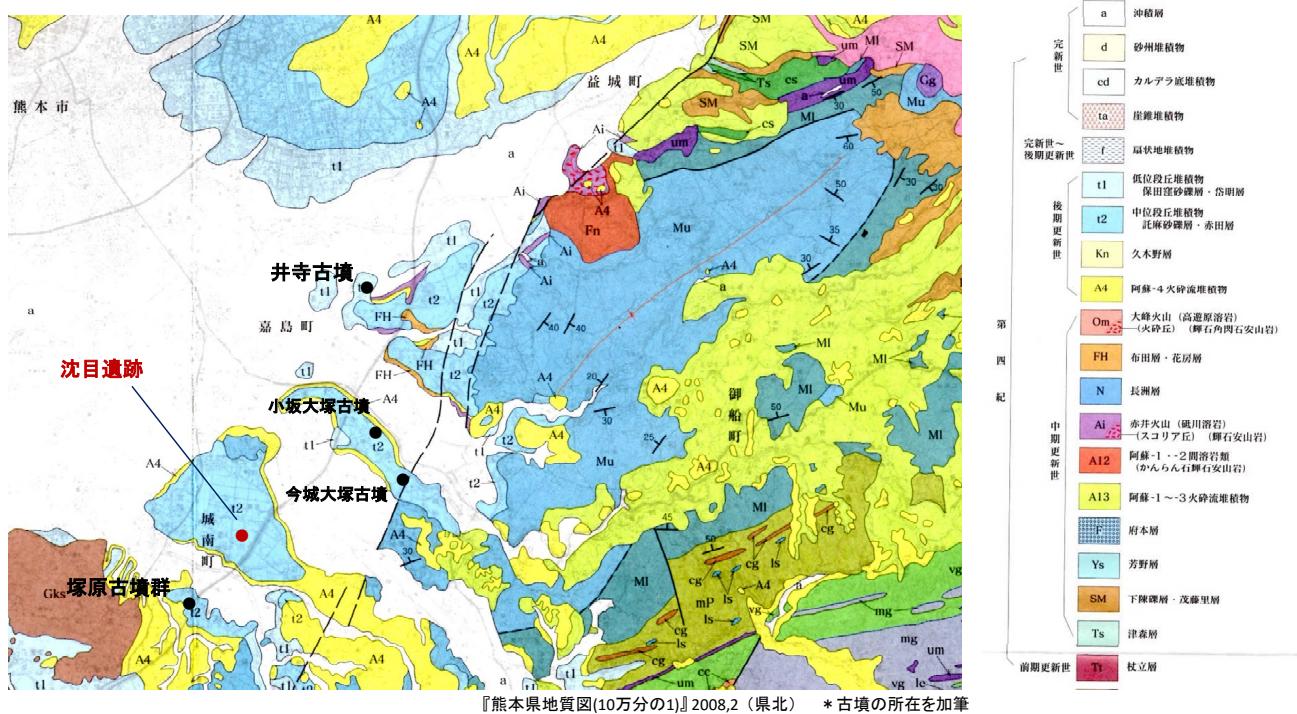


6トレーンチ (写真撮影:嘉島町教育委員会)



○砂っぽく、ジャリジャリした土質、風化礫を含む。
*「黄褐色ローム層」に比べ、粘性が弱く、軟らかい。

井寺古墳周辺の地質図



- 井寺古墳 低位段丘堆積物(保田窪砂礫層)
- 小坂大塚古墳
- 今城大塚古墳] 中位段丘面堆積物(託麻砂礫層)

(参考) 小坂大塚古墳(御船町)

* 中位段丘堆積物(託麻砂礫層)

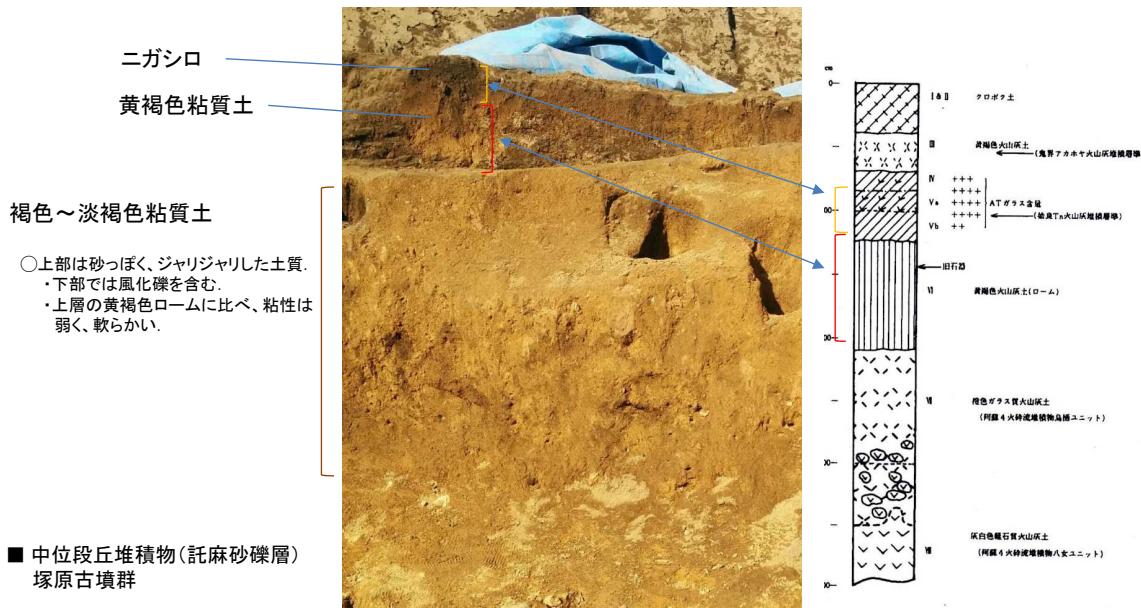


図1 曲野遺跡の遺物包含層

- 領家帶
主として泥質岩(片麻岩・結晶片岩)
(肥後変成岩類)



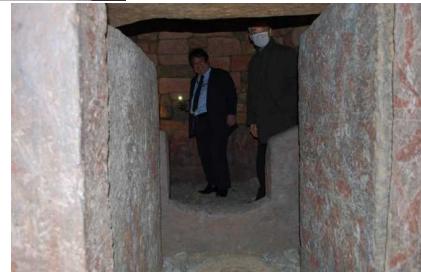
オブサン古墳 (山鹿市)



井寺古墳 (装飾古墳館レプリカ)



井寺古墳 (美術館レプリカ)



天神山古墳(宇土市)



- 平成28年熊本地震により、天神山古墳前方部の墳丘が一部崩落し、同じく6月の豪雨により後円部墳丘の一部も崩落。
- 法面の復旧や防災工事を行うにあたって主体部(未調査)を傷つけないよう、主体部の位置を確認するため、地中レーダー探査を実施(平成29年8月8日(火)～10日(木))。



1日も早い復旧と創造的な復興を目指して総力を挙げて取組んで参ります。



今後とも、ご支援よろしくお願ひします。

井寺古墳の地中レーダー探査成果

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所

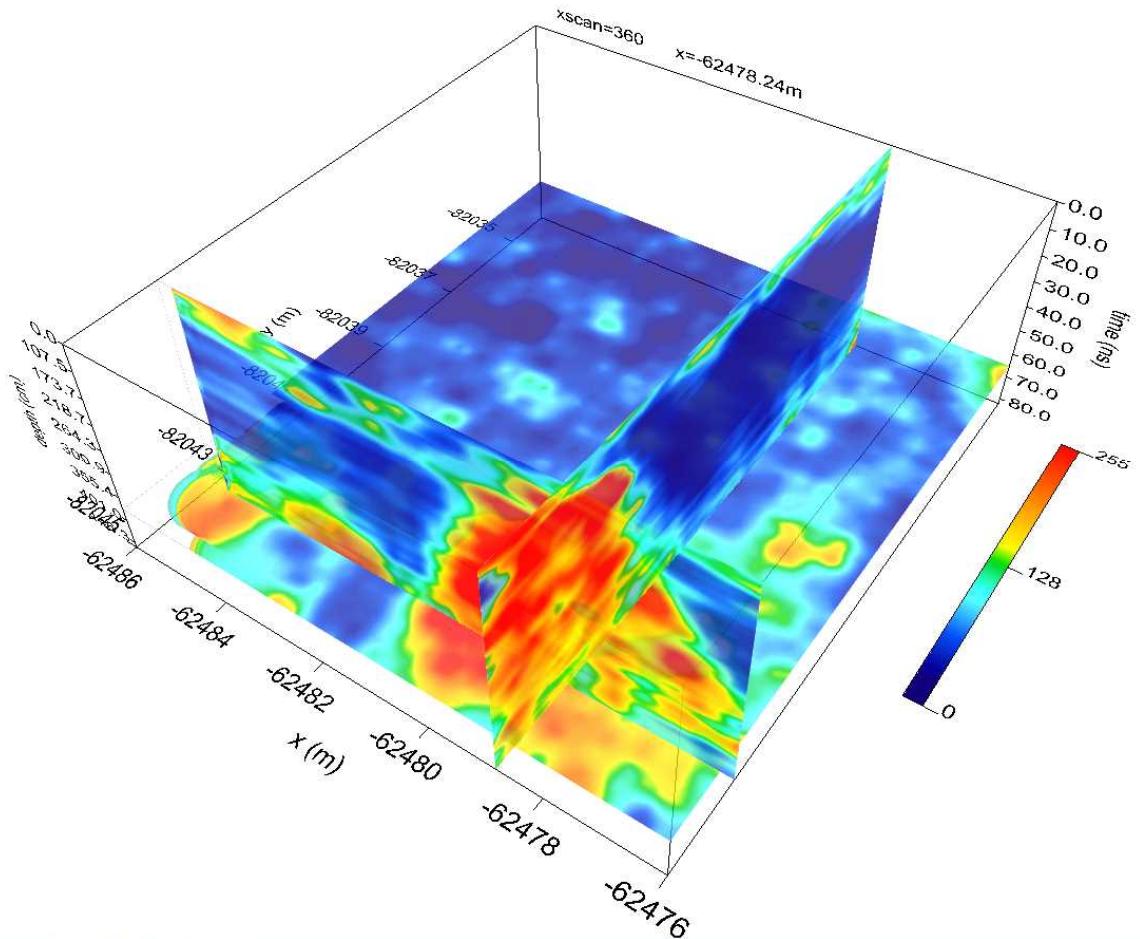


Fig. 1) 井寺古墳の探査成果 3 次元表現



Fig. 2) 計測風景

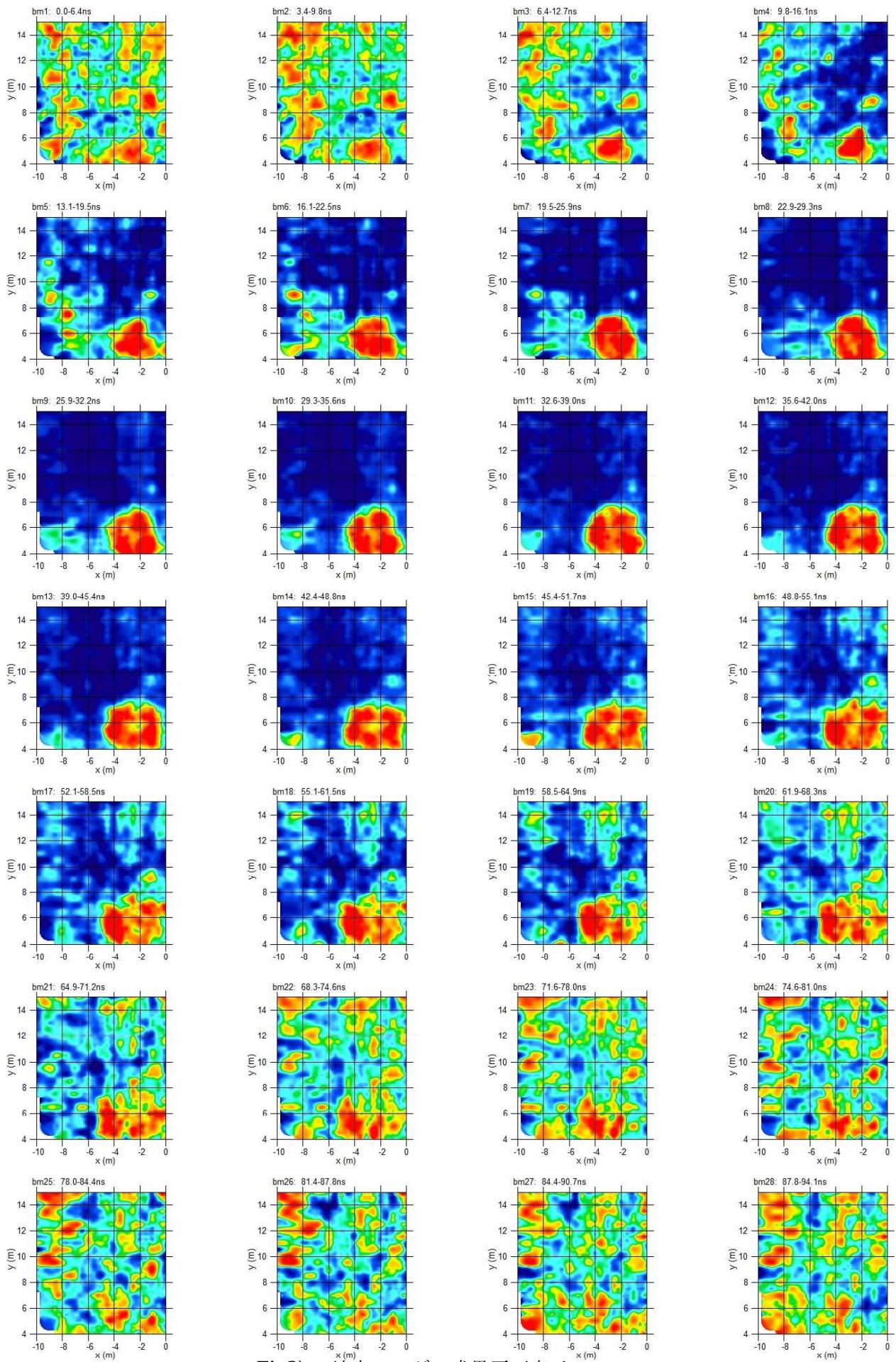


Fig3) 地中レーダー成果平面表示

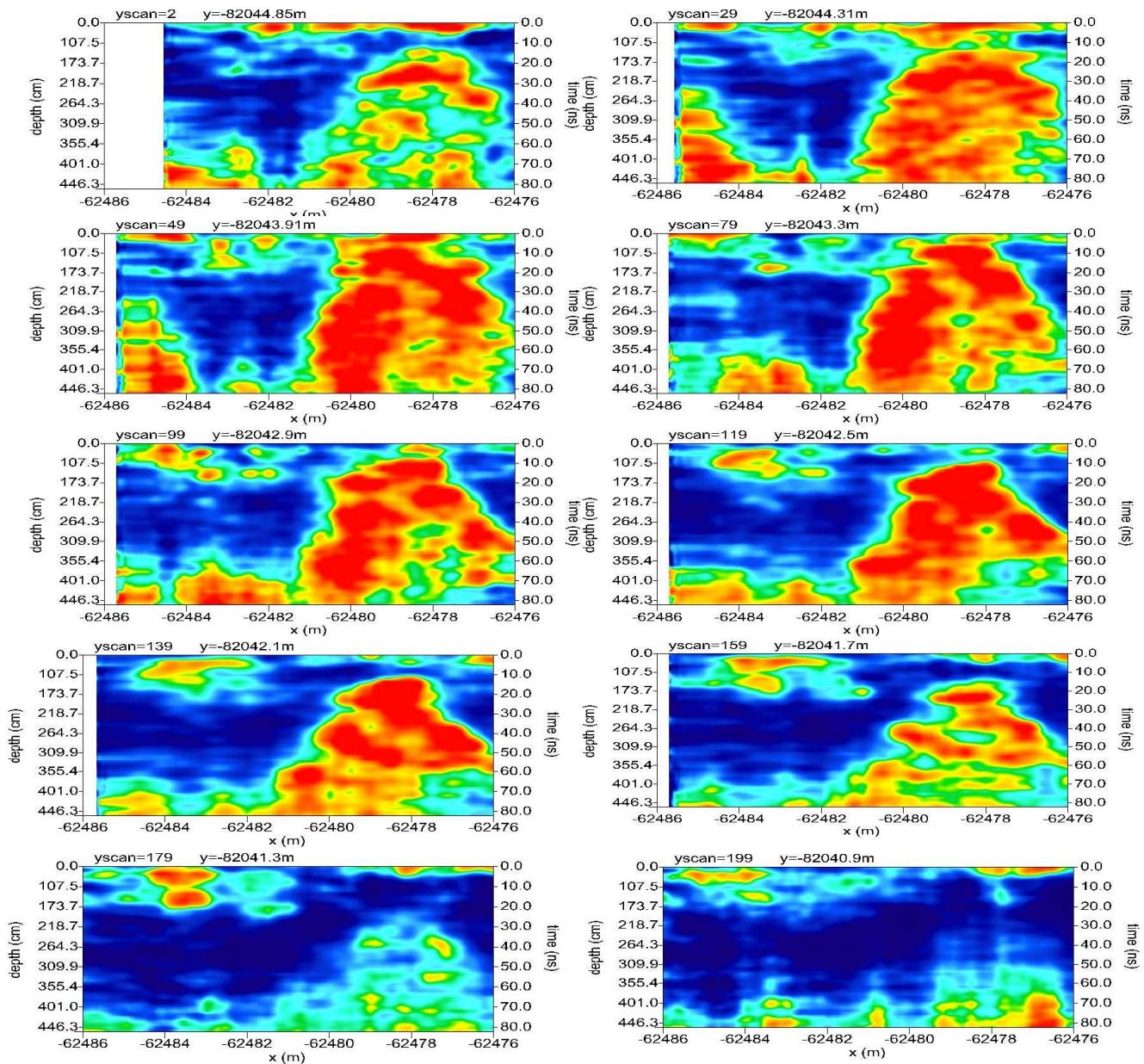


Fig.4) 地中レーダー成果断面表示（石室横断面方向）

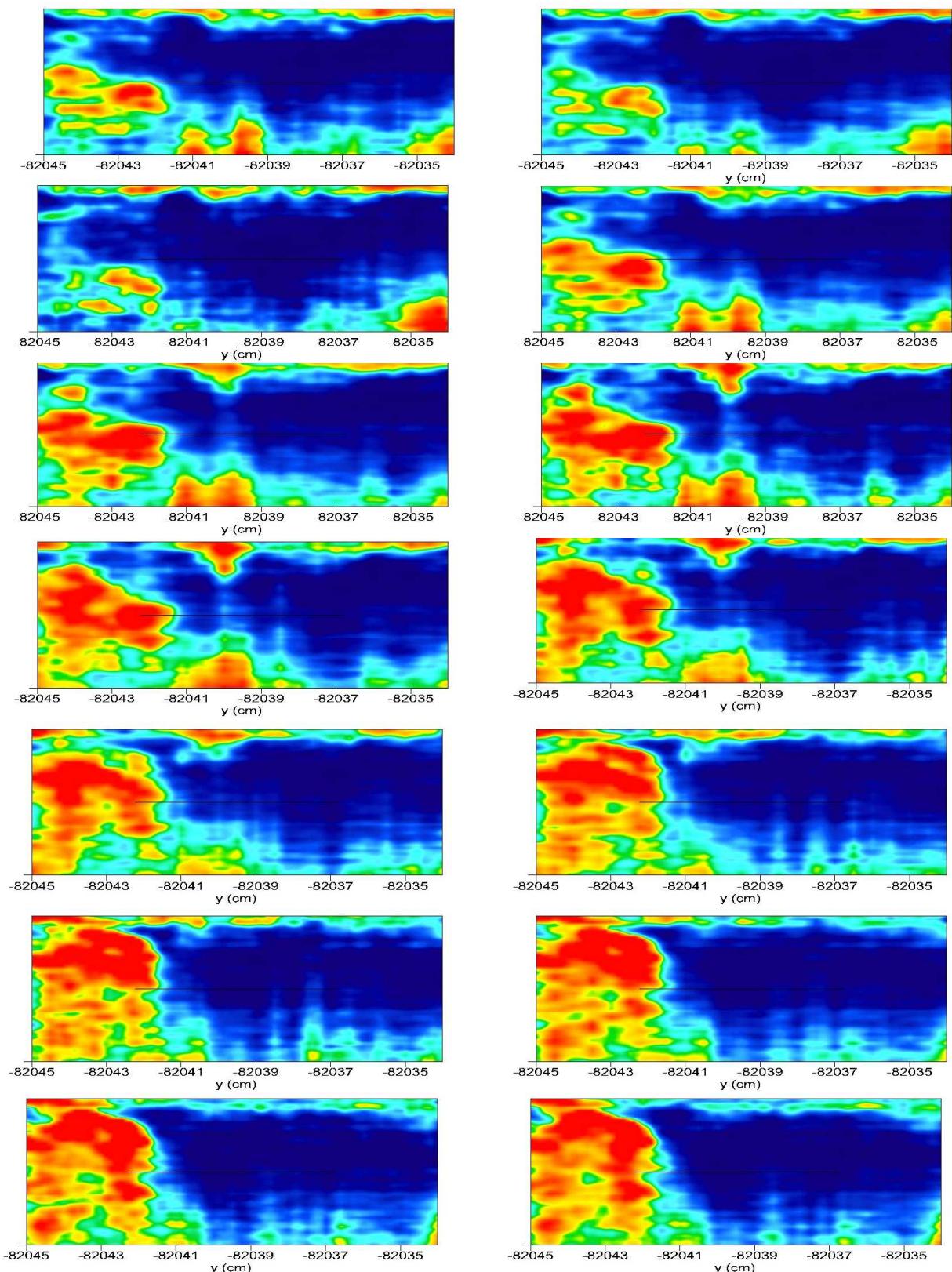


Fig.5) 地中レーダー成果断面表示（石室縦断面方向）

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・大きさで移動しているため、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。

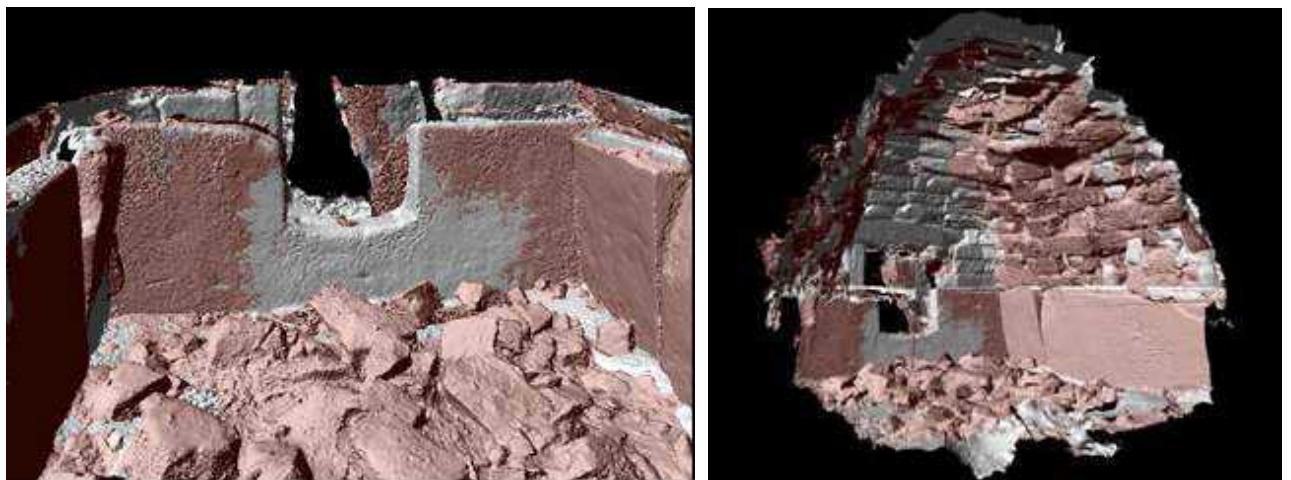


図 3 前障を用いたスケール位置合わせ

■ 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。

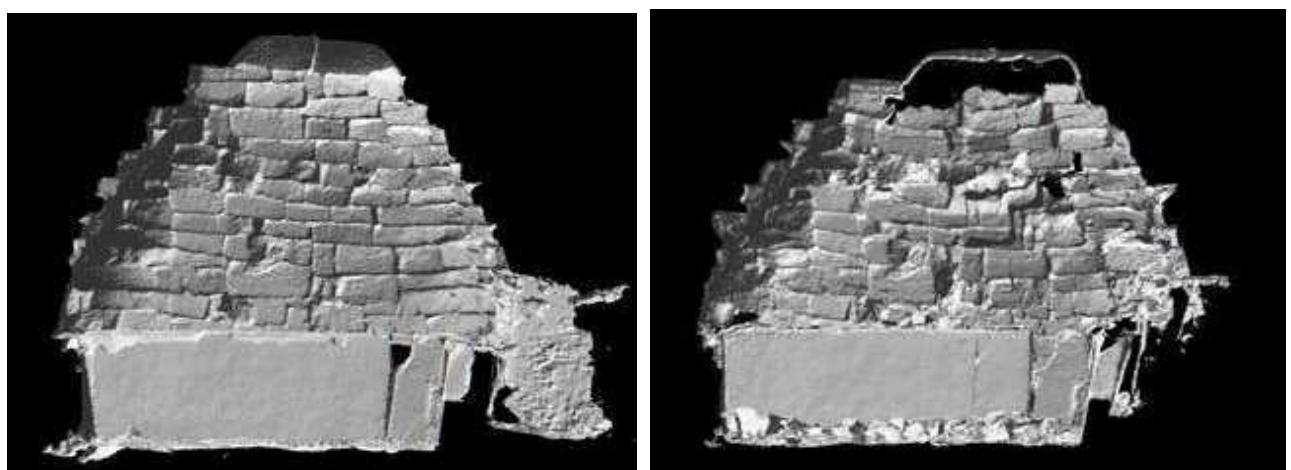


図 4.1 右側面（左：2015 年、右：2017 年）

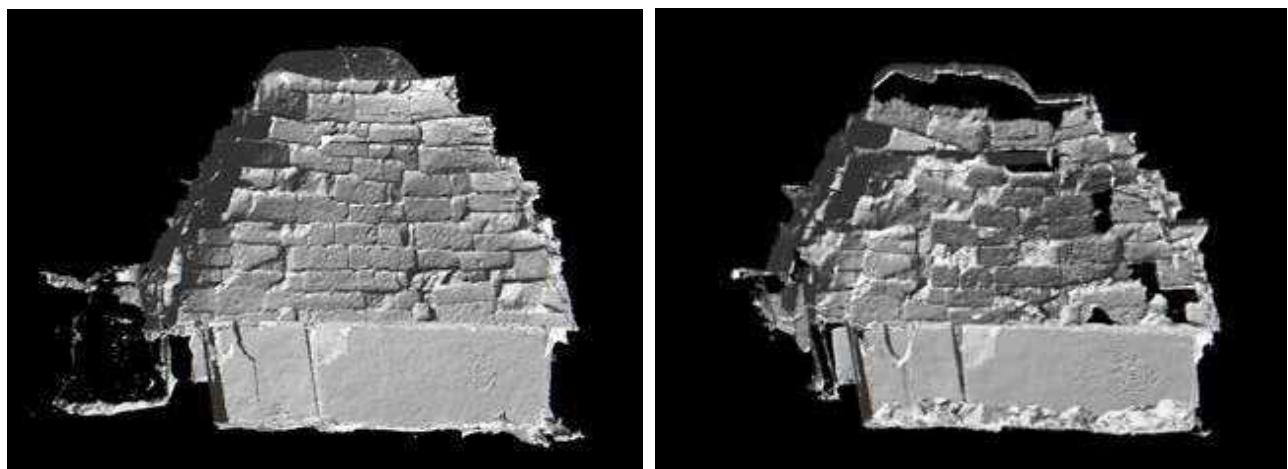


図 4.2 左側面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

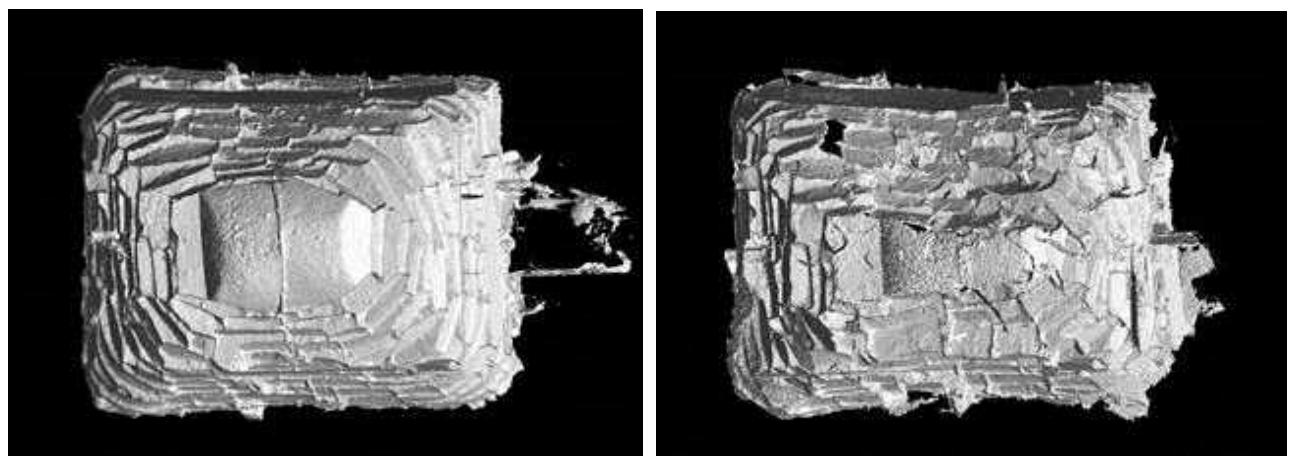


図 4.3 上面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

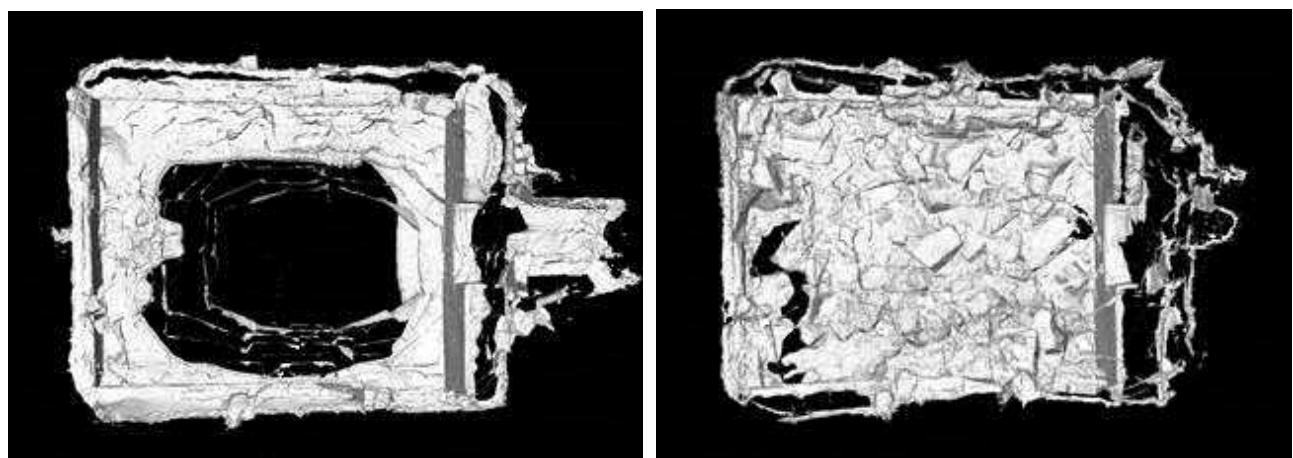


図 4.4 下面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

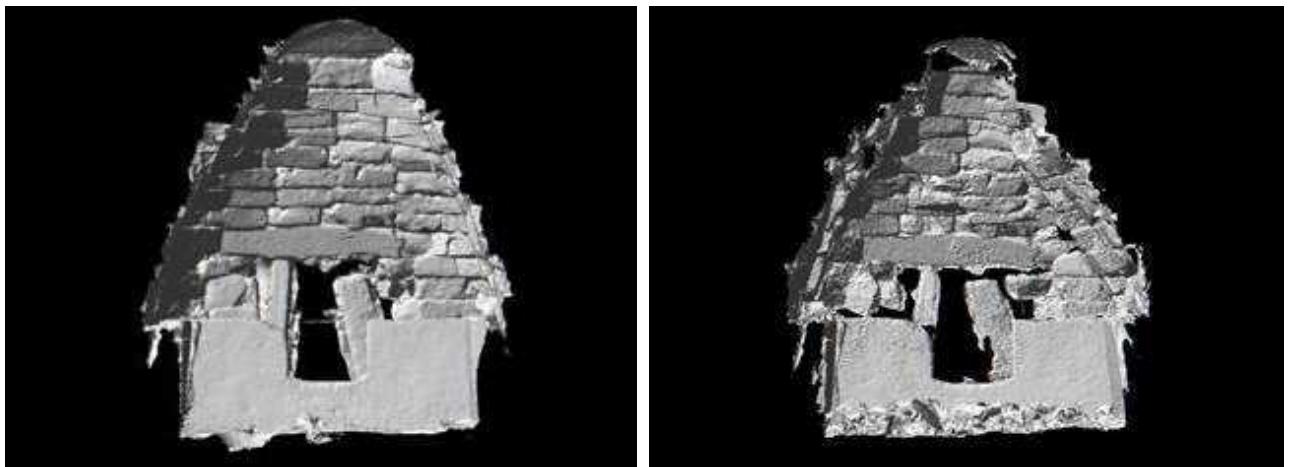


図 4.5 入口面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

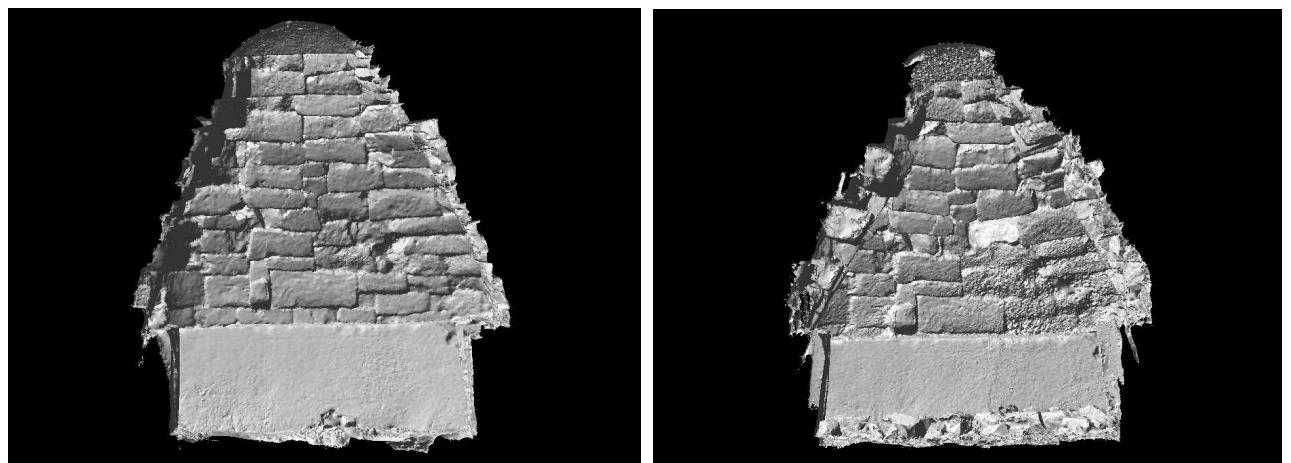


図 4.6 正面 (左 : 2015 年、右 : 2017 年)

■ 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と、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。

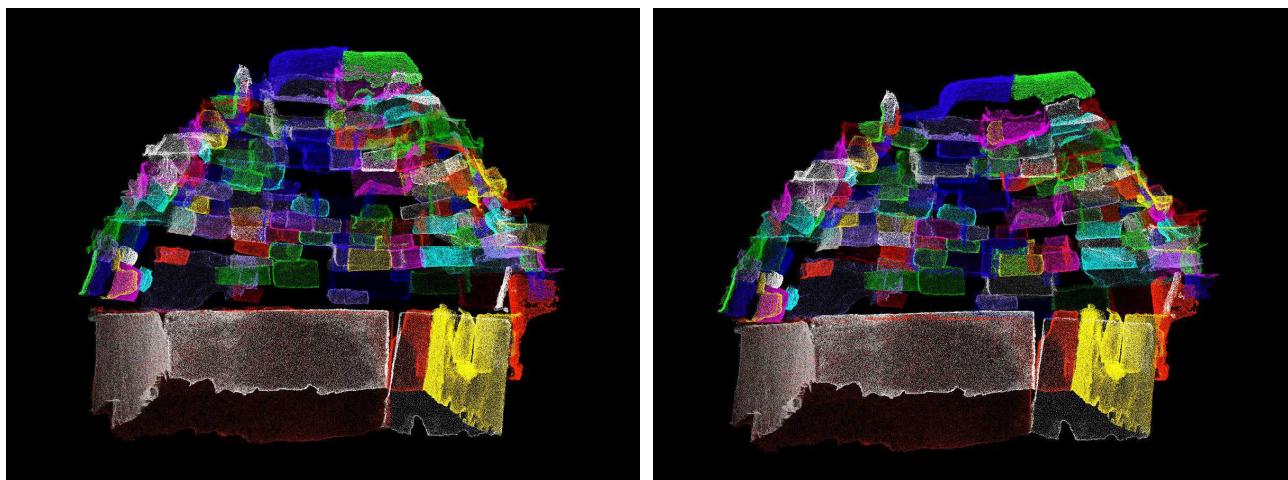


図 5 石材データの分割と地震前後の様子（左：地震前、右：地震後）

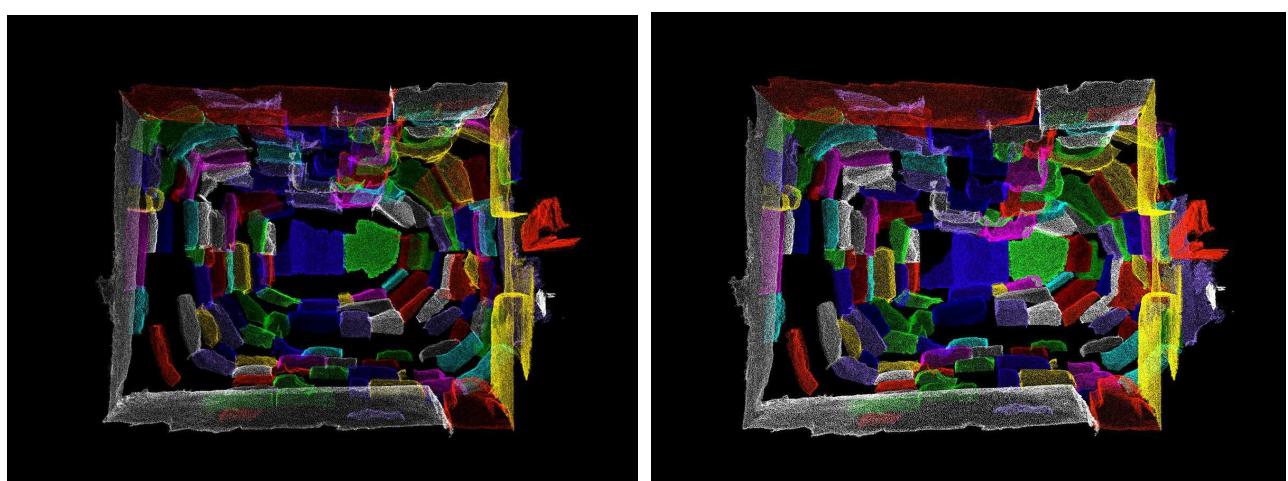


図 6 石材データの分割と地震前後の様子（左：地震前、右：地震後）



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）

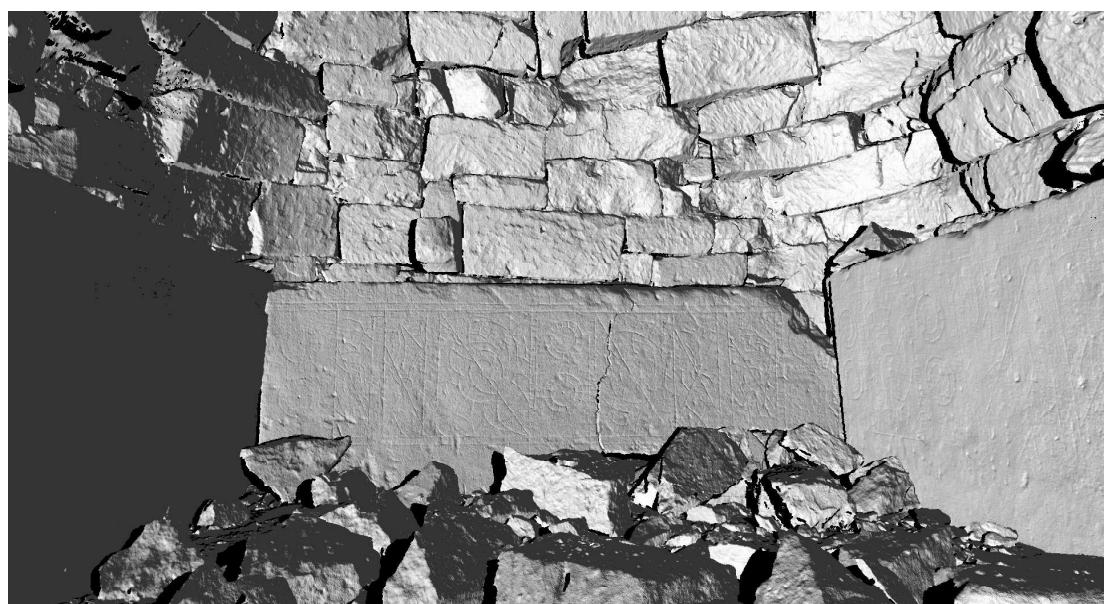
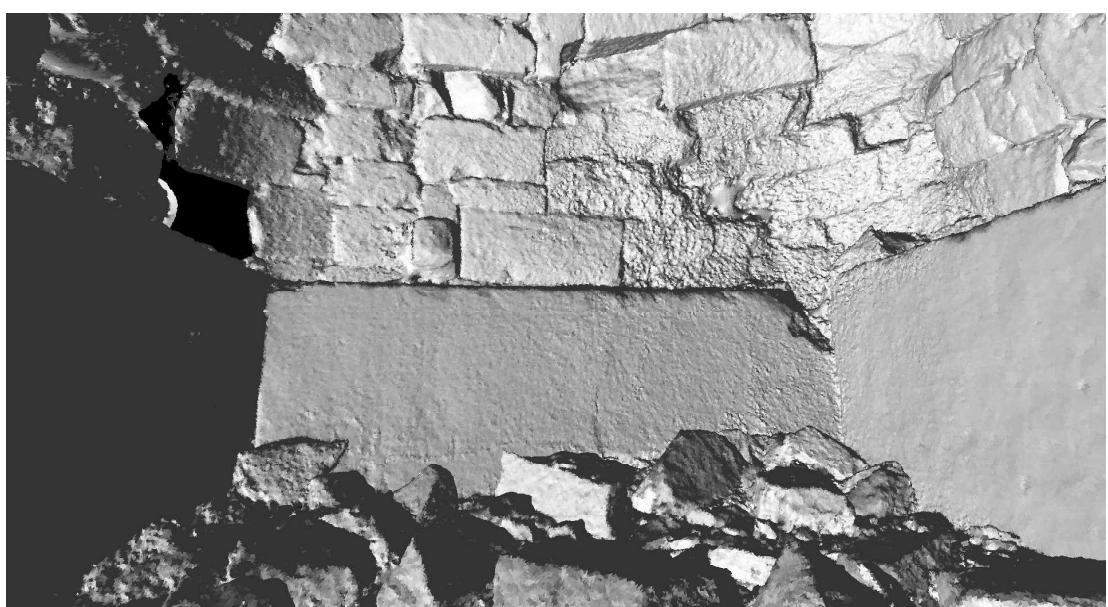


図9 写真測量データとレーザ計測データの比較（上：写真測量、下：レーザ計測）

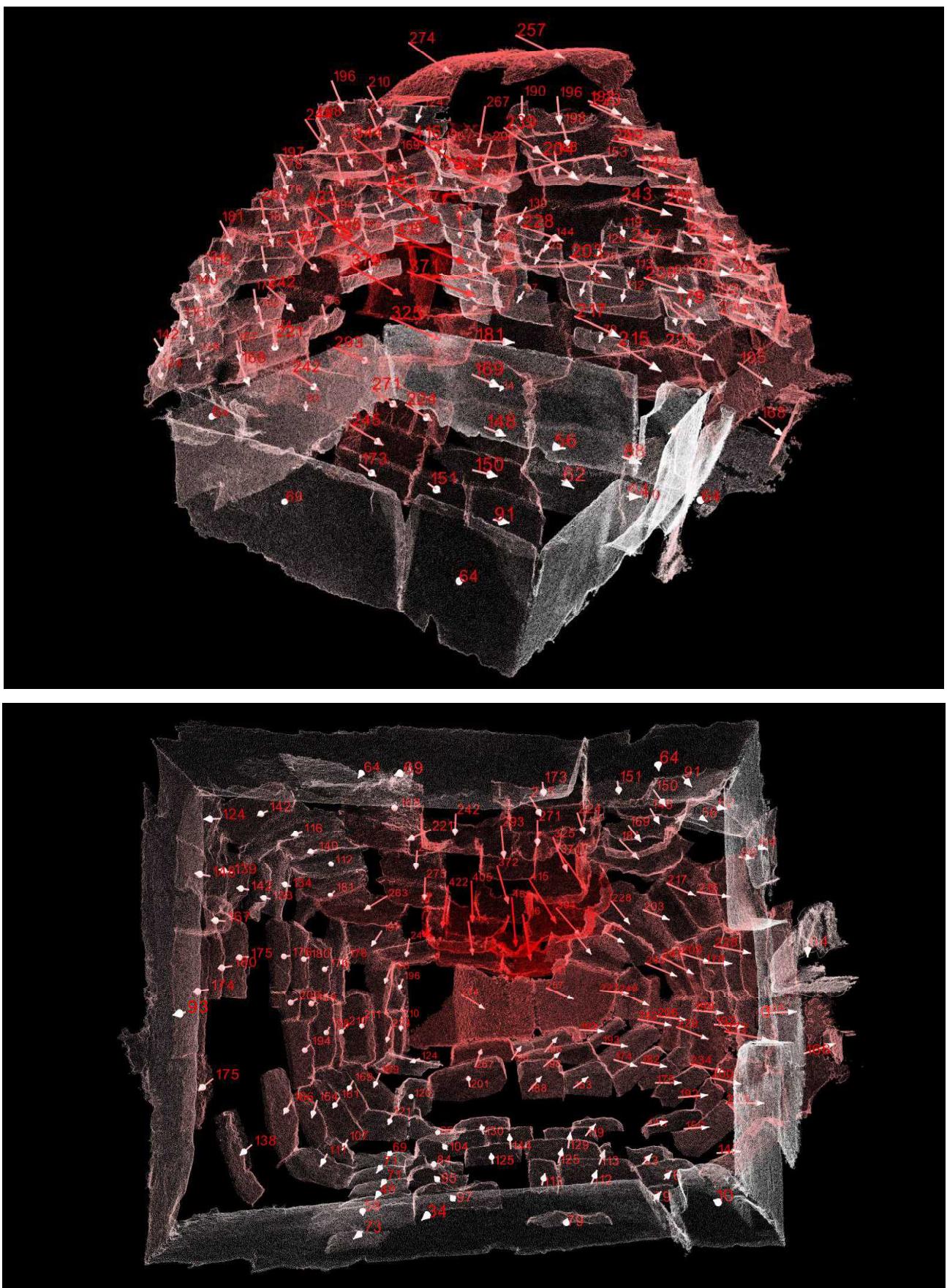


図 10 石材ごとの変状可視化

■ 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40cm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。