

アブ・シール南丘陵遺跡における 三次元レーザー・スキャンについて

阪野 貴彦*¹・池内 克史*²

1. はじめに

2009年度の調査では、アブ・シール南丘陵遺跡ではレーザレンジセンサを持ち込み、三次元形状計測を行った。我々はこれまで、鎌倉大仏や奈良大仏 (Ikeuchi et al. 2003)、カンボジア王国のバイヨン寺院 (Ikeuchi et al. 2007; Banno et al. 2008) などの大型有形文化財をデジタル保存するための研究・技術開発を行ってきた。今回、我々の蓄積してきた手法を用いることで、アブ・シール南丘陵にある石積み遺構、カエムワセトの石造建造物、日乾煉瓦遺構、トゥーム・チャペルの埋葬室について三次元モデリングを行う。

有形文化財の三次元形状モデリングは、次の3つの段階を経て行う。まず実物体の形状を取得するための計測（スキャニング）を行う。大型の物体に対し、ミリメートル単位の精度を必要とする計測では、レンジセンサによる非接触の形状計測を行う。計測対象が大きくなると1回で形状全体を計測することができないため、レンジセンサの設置場所を変えて複数回計測することになる。そこで複数個のデータセットを繋ぎ合わせる作業が必要となる。これが2つ目の段階である位置合わせ（アラインメント）である。位置合わせによって得られるのは複数枚のメッシュモデルの集合体であるため、点密度の違いや、唯一であるはずの物体表面に何重もの表面データが構成される。したがって、位置合わせによって得られたメッシュ集合体を再構成して、一体化された均一のメッシュモデルを作成する。これが最後の段階である統合（マージング）である。以下に、これら3つのプロセスの詳細について述べ、得られた形状モデルについて報告する。

2. 三次元モデリング

(1) 計測（スキャニング）

正確な三次元モデルを作るためには、実物体の正確な三次元計測が必要である。実物体を三次元計測するための計測手法には様々あるが、アブ・シール南丘陵遺跡では、規模が大きいこととミリメートル以下の精度が必ずしも必要ではないことを考慮し、レーザレンジセンサを使用した。使用したレーザレンジセンサは、Leica Geosystems社製のレーザスキャナ HDS3000 (Fig.1) であり、当該機器はセンサヘッドの回転機構により周囲360度の全方向に向け、50メートル離れた物体の形状を6mmの精度で計測することができる。このセンサは、“Time-of-Flight”と呼ばれる計測原理を用いており、レーザ光源から照射されたレーザが対象物体表面で反射し、再びセンサに戻ってくるまでの時間を計測することで、センサ位置を基準とした三次元物体形状を取得できる。レーザでは照射され跳ね返ってきた1点の三次元空間座標が得られるが、レーザ光線の照射方向を動かしながら計測することで、ある画角範囲内の対象物体の三次元形状が取得できる。1回の計測操作につき測定できる部位は、センサから直接レーザが照射される範囲に限定され、センサから見るこ

*1 東京大学生産技術研究所特任助教

*2 東京大学大学院情報学環教授



Fig.1 レーザレンジセンサ (Leica Geosystems 社製 HDS3000)

とができない隠れ部位を計測することは出来ない。そこで、全ての対象領域を計測するためには、センサの位置を変更しながら複数回計測を行い、各計測形状データをつなぎ合わせる必要がある。

(2) 位置合わせ (アラインメント)

レンジセンサによって計測された形状データは、レーザ光源からの距離を計測しているため、その計測を行ったときのセンサ位置・姿勢を基準とした座標系で記述される。したがって、レンジセンサの設置位置を変えて計測した複数個のデータは、それら計測時のセンサ位置から見た形状となっており、これら複数個のデータセットをそのまま表示しても、空間的にばらばらになった状態で表示される。一体の形状データとして表わすためには、これらのデータ間の相対位置姿勢の変換関係を推定し、全てを同一の座標系で表現する必要がある。

全データを統一された座標系で記述するためには、個々の計測時でのレンジセンサの位置姿勢をGPSなどによって記録しておき、出力される計測データに座標変換を施す手法が考えられる。しかし、GPSによる位置姿勢では誤差が大きく、高精度なデータつなぎ合わせのためには精度が不十分である。そこで、レンジセンサで計測された形状データを繋ぎ合わせるため、まず2つの形状データにおいて重複している部位形状がぴったりと重なり合うように一方の形状データそのものを動かし、これを逐次おこなうことで複数のデータセットを位置合わせしていく方法が取られる。この手法では、各計測時におけるセンサの絶対的位置は分からないが、センサ間の相対的位置を決定することが出来る。

2つの重なり合う部分を位置合わせする手法としては、ベスルらが提案した“Iterative Closest Point (ICP)”が最も広く知られている (Besl et al. 1992)。この手法では2つの部分モデルに含まれる点群間で対応点を探索し、対応点間距離の二乗和が最小となるよう、一方の形状データに併進・回転運動を施し、形状データを繋ぎ合わせる。

2つの形状データを逐次的に位置合わせしていく手法では、データセット数が増えるに従って、誤差が蓄

積し、最終的に大きな誤差が生じてしまう。これを避けるため、2つのデータセットを逐次位置合わせするのではなく、全てのデータセットを用いて同時に位置合わせする手法が用いられる。我々は高速な同時位置合わせ手法 (Oishi et al. 2005) 及びこれを拡張して負荷分散、データ分散を考慮した並列同時位置合わせ手法 (Oishi et al. 2003) を用いた。

今回のエジプト計測においては、グラフィックスハードウェアを用いた高速な位置合わせによって大まかな位置合わせを行い、帰国後、PC クラスタを用いた並列計算によって同時位置合わせを行った。

(3) 統合 (マーキング)

位置合わせによって、複数のデータセットが統一された座標で記述された。ただし、これだけでは三次元モデルとしては不十分である。というのも、複数回の計測データの集合体では、位置合わせ時での誤差により、唯一であるべき物体表面が、重なり合った複数の面になってしまうためである。また、形状データを構成する点密度が、重なり合った部位があるため、場所によって異なる。マーキングとは、これらの問題を解決するため、複数データセットの集合体である位置合わせ後の形状データを、一体のメッシュモデルとして再構成することである。

我々の統合アルゴリズムは、ウィーラーらによって提案された手法 (Wheeler et al. 1998) を並列化したものである (佐川他 2003)。ウィーラーらの手法は全ての距離画像をボリュームによって表現する。まず空間を格子状のボクセルに分割し、各ボクセルには、ボクセル中心から最も近い物体の表面までの符号付距離を格納する。符号付距離が正の場合、ボクセルは表面の外側にあることを表し、負の場合には内側にあることを表す。これにより距離画像の統合問題は、複数の距離画像から陰表面関数が与えられたときに、この関数が0となる等値面を抽出する問題となる。

3. 計測結果およびその活用

各計測対象に関して得られたデータセット数は、以下のとおりである。

Table 1 計測対象別取得データセット数

石積み遺構	8
カエムワセトの石造建造物	40
日乾煉瓦遺構	11
トゥーム・チャペルの埋葬室	13

発掘現場において計測された各データセットは、現場に持ち込んだノート型 PC でただちに2枚の距離画像ごとの高速位置合わせを行い、データを保存する。保存されたデータは後日研究室に持ち帰り、全データセットを用いた同時位置合わせ手法によって、さらに高精度な位置合わせを行った。最後に、PC クラスタを用いたマーキング処理を行うことにより、計測対象の三次元形状モデルを得た。

位置合わせの様子を Fig.2 に示す。上側2つの画像は、石積み遺構に対して別の位置にレンジセンサを設置して取得した2つのデータを描画したものである。2つのデータセットは異なる座標系で記述されている。データを繋ぎ合わせるためには、両データで共通した計測部位が一致するように、一方の形状データに併進・回転を施す。Fig.2 の下側に示したのが、2つのデータセットを位置合わせした結果を描画した画像である。

今回、石積み遺構ではこのようなデータセットを8個取得し、これらを位置合わせした結果を点表示した

ものが Fig.3 左の画像となる。ただし、位置合わせのみによって得られる形状データでは、モデルを構成している点の密度が場所によって異なる、同じ部位が複数回に渡って計測されているためデータに冗長性が生じる、といった問題が残る。Fig.3 右の画像は、位置合わせ結果に統合処理を施して得られた最終的な三次元形状モデルである。点の密度は均一になっていることが分かる。また8データセットを位置合わせしたモデルのデータサイズは145MBであったが、統合処理によって37MBと軽減された。さらに、位置合わせ結果では欠損部分となっていた部分が、統合処理によって一部補填されていることが分かる。Fig.4 にこの結果を面表示したものを示す。

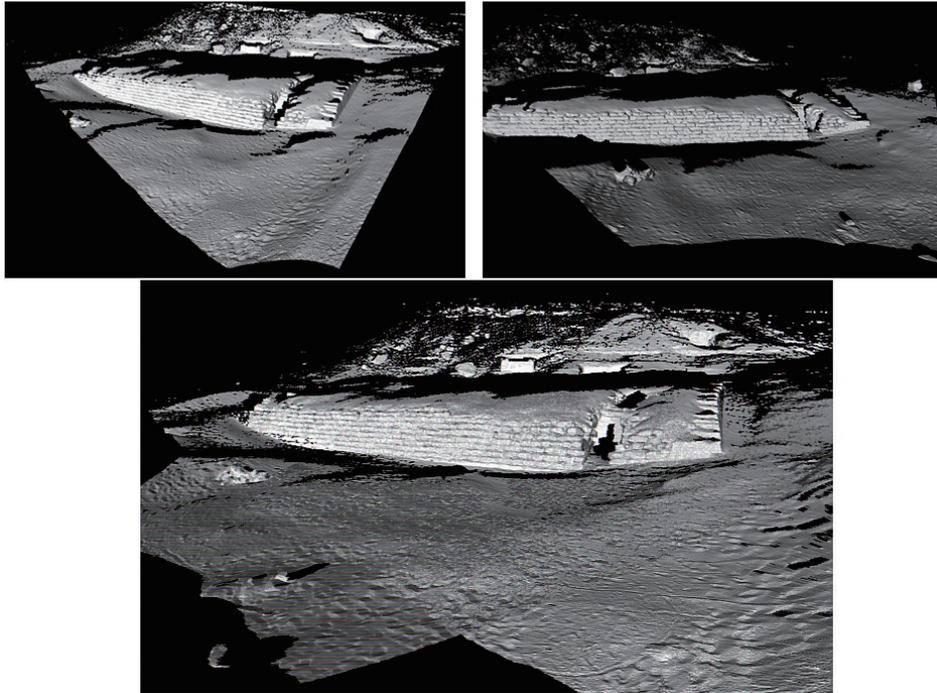


Fig.2 位置合わせ結果

(上：異なるセンサ位置から取得した2つのデータセット下：2つのデータセットを位置合わせしたもの)

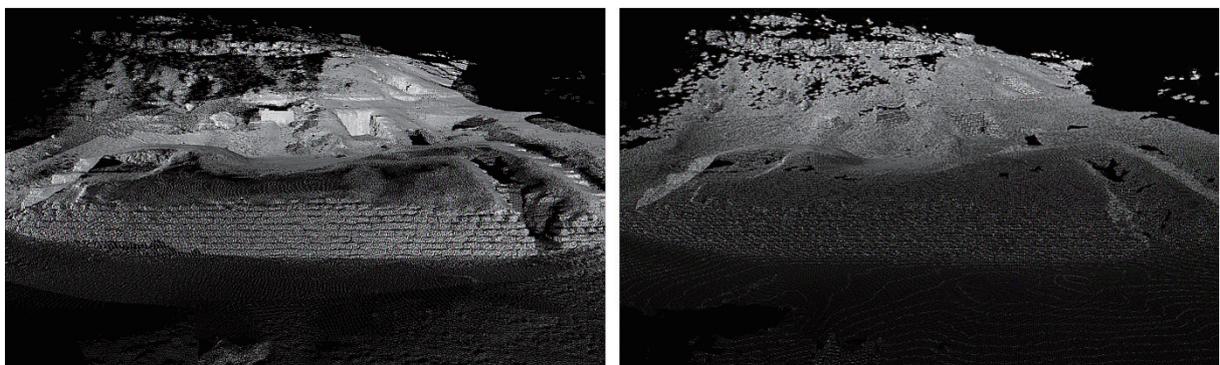


Fig.3 統合結果 (左：統合処理前の位置合わせ結果を点表示したもの。右：統合処理結果を点表示したもの)

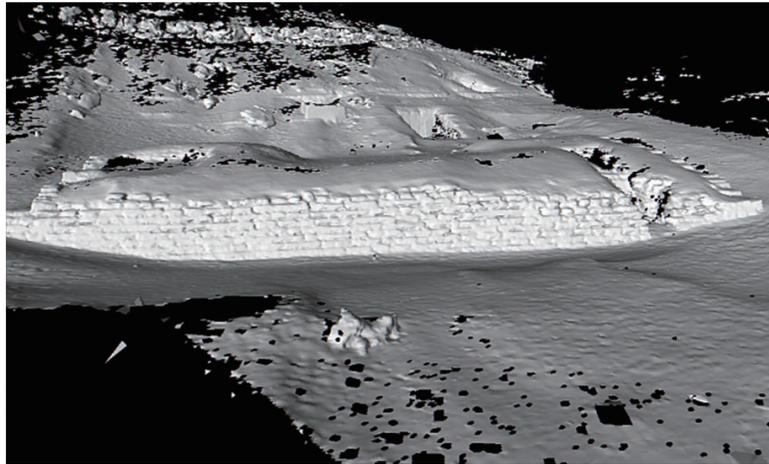


Fig.4 石積み遺構の三次元形状モデル

同様に、カエムワセトの石造構造物、日乾燥瓦遺構、トゥーム・チャペルの埋葬室を計測し、得られた三次元モデルを Figs.5～10 に示した。

三次元モデルが得られれば、これを用いた様々な利用法が考えられる。ここでは、トゥーム・チャペルの埋葬室を例に取り上げる。三次元モデルでは、仮想的な取り扱いが可能となり、その一例が正確な断面図の作成である Fig.11 左は、埋葬室を外から見た図に、20の切断面を示したものである。これは仮想的に設定できるため、ユーザーが望むような切断面を設定することができる。Fig.11 右に示したのが、得られた20枚の切断図を上から見た図である。精密な三次元形状モデルを用いているため、得られた断面図は正確である。このように、実際の遺跡では現実に行うことのできない処理や考察が、デジタル化された三次元形状モデルでは可能であり、考古学におけるコンピュータビジョンの利用法として考えられる。

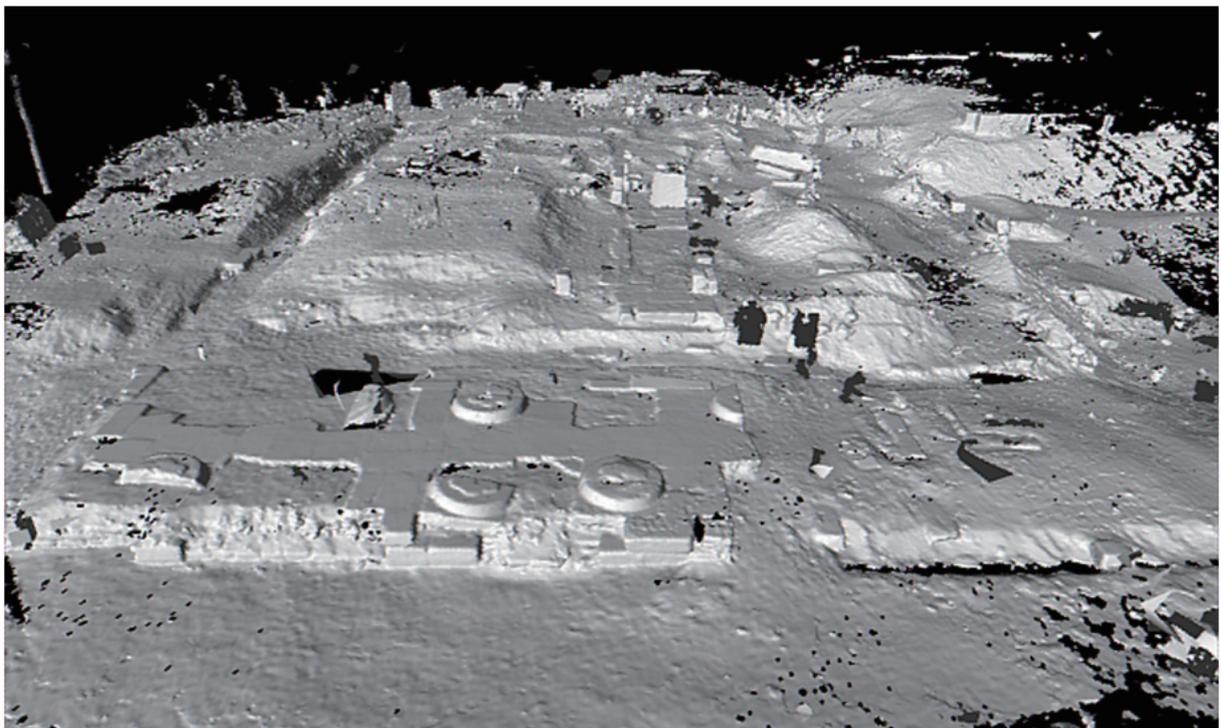


Fig.5 カエムワセトの石造建造物の三次元形状モデル

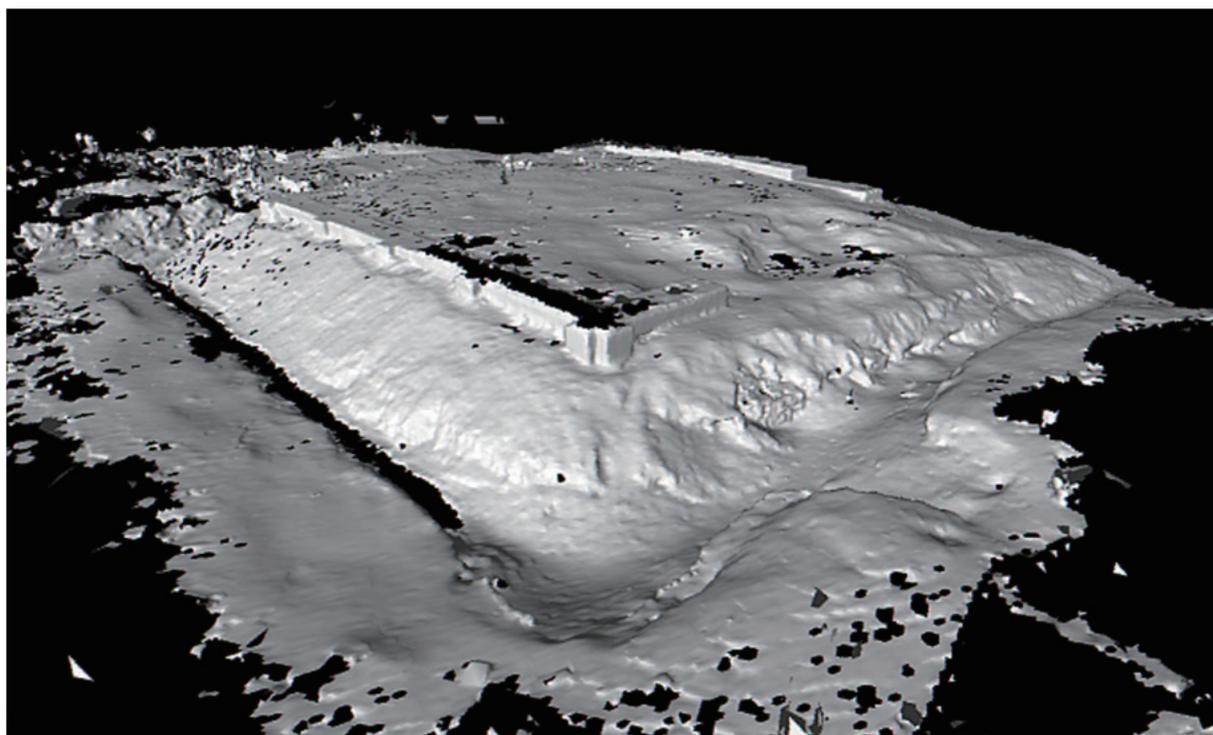


Fig.6 日乾燥瓦遺構の三次元形状モデル

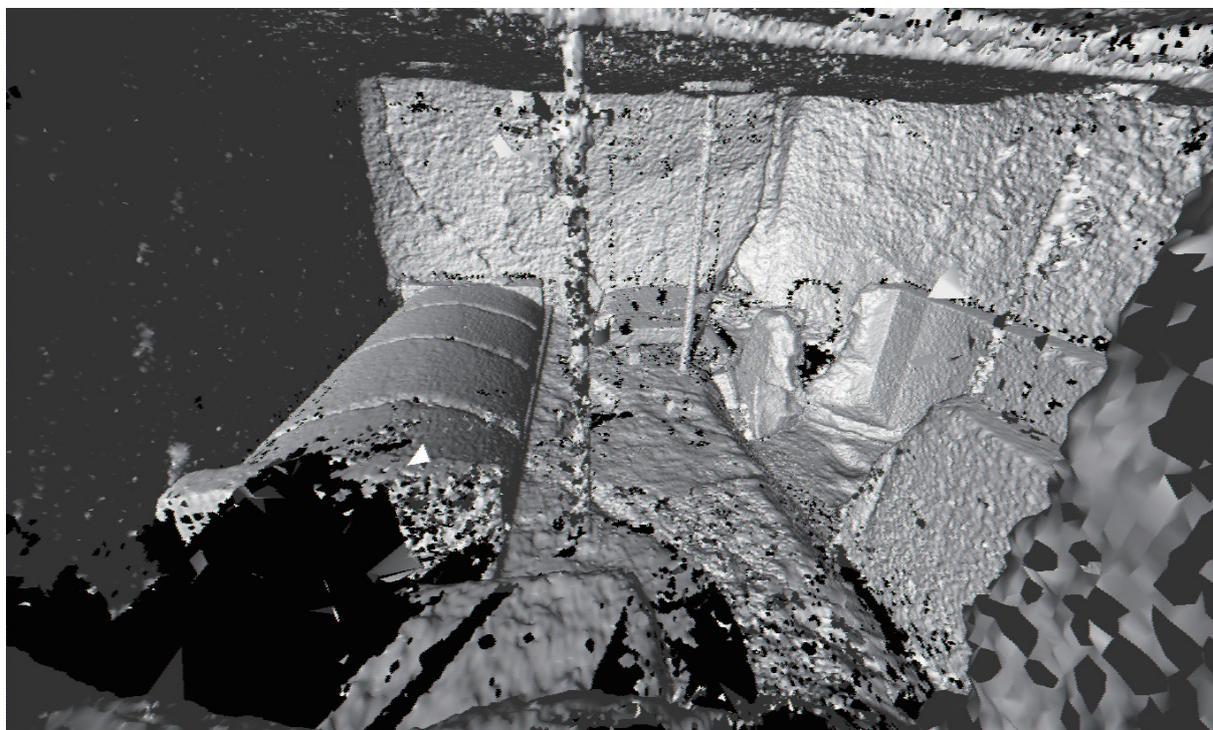


Fig.7 トゥーム・チャペルの埋葬室の三次元形状モデル (1)

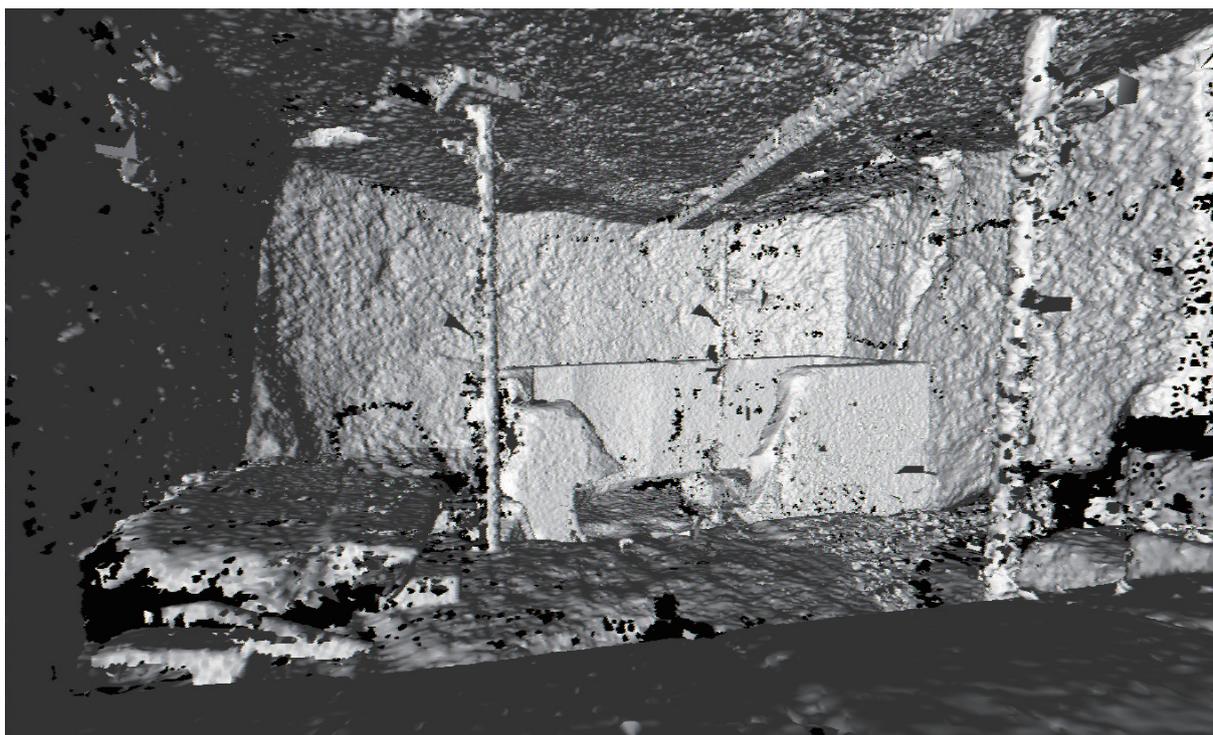


Fig.8 トウム・チャベルの埋葬室の三次元形状モデル (2)

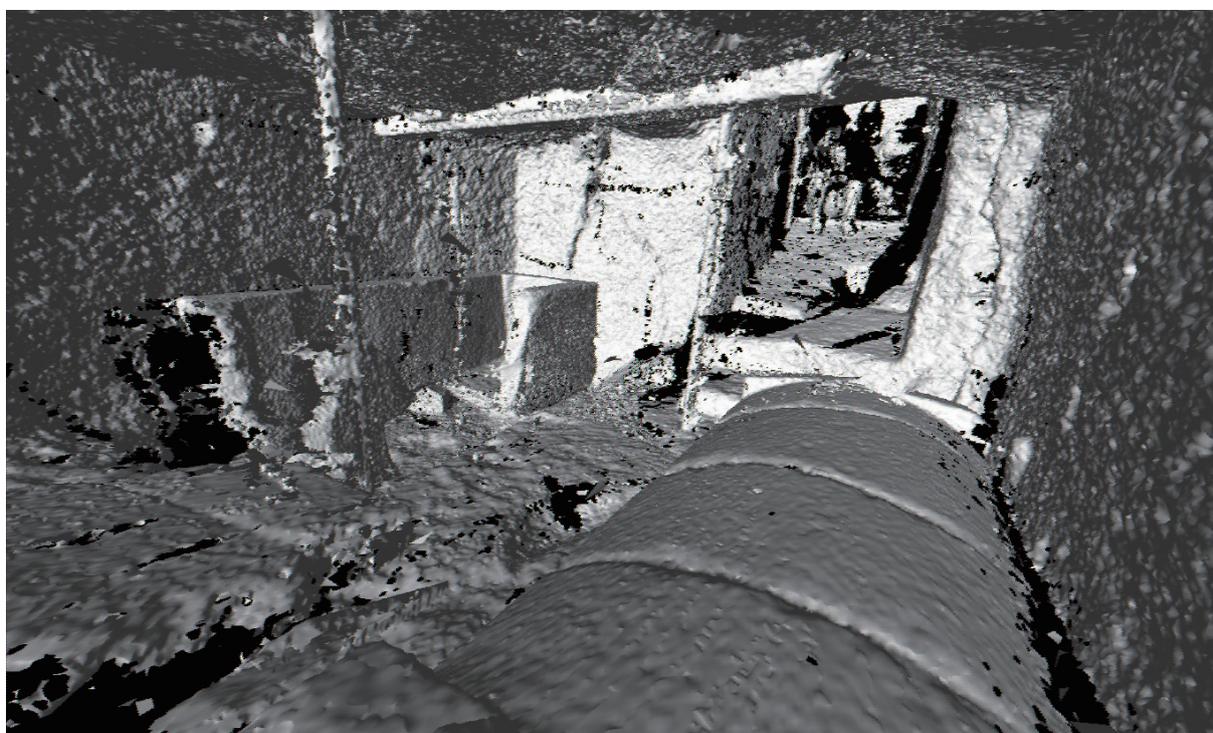


Fig.9 トウム・チャベルの埋葬室の三次元形状モデル (3)

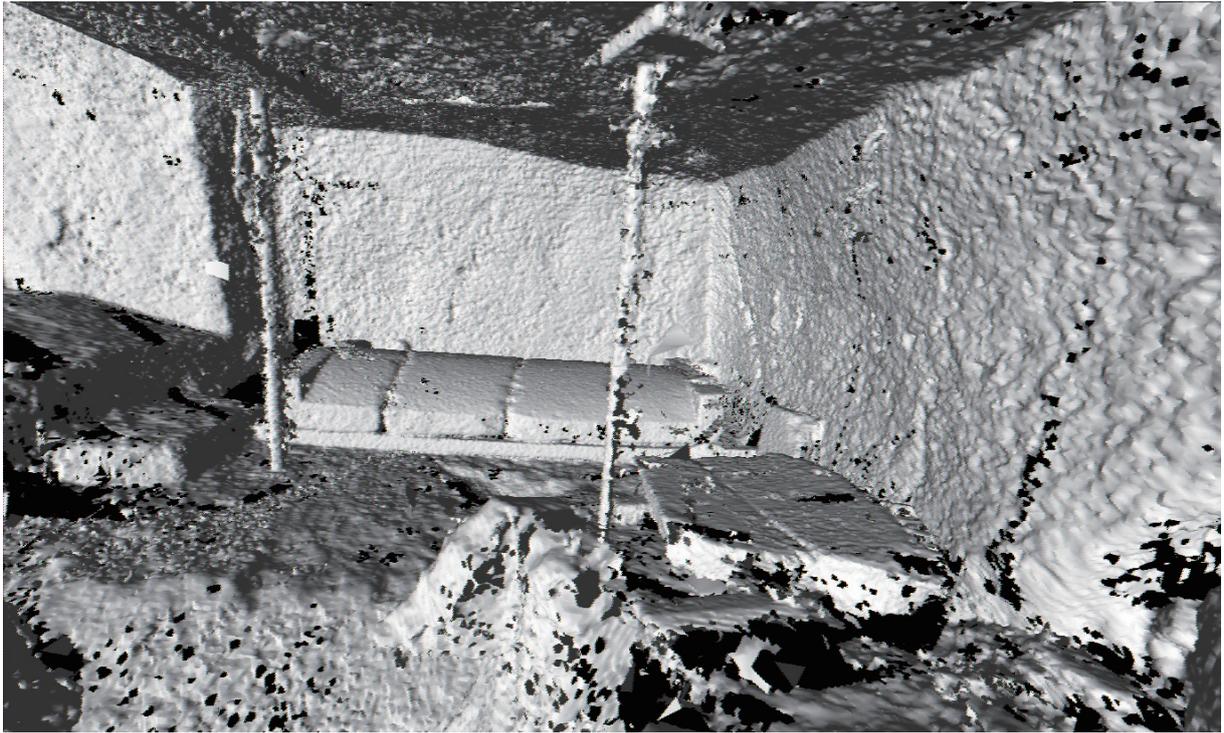


Fig.10 トゥーム・チャペルの埋葬室の三次元形状モデル (4)

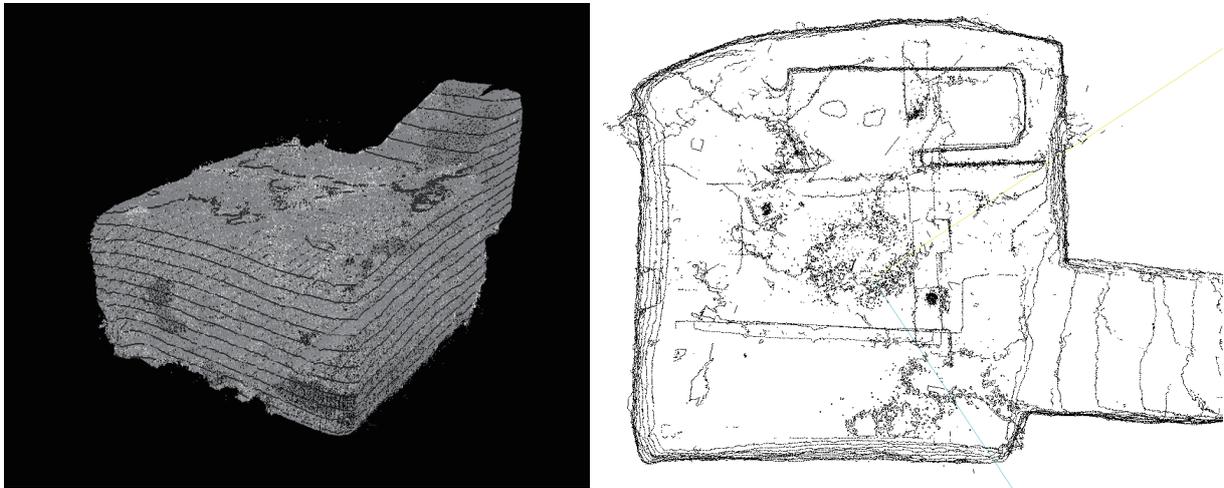


Fig.11 トゥーム・チャペルの埋葬室の断面図 (左: 埋葬室と切断面を外からみたところ。右: 上から見た 20 枚分の断面図)