

# ギザのケントカウエス女王墓の三次元形状データの PEAKIT による解析

河江 肖剰<sup>1)</sup>・千葉 史<sup>2)</sup>・横山 真<sup>2)</sup>・金谷 一郎<sup>3)</sup>・亀井 宏行<sup>4)</sup>

●キーワード：エジプト考古学 (Egyptian Archaeology), ギザ台地 (the Giza Plateau), 古王国時代 (the Old Kingdom), 三次元形状データ (3D data), 画像解析 (imagery analysis)

## 1. はじめに

本稿の研究対象であるケントカウエス女王墓は、古王国時代第四王朝に遡る三大ピラミッド（紀元前 2509-2442 年頃, Hornung: 2006）の建造直後に建てられたギザ台地最後の巨石建造物である（写真 1）。この墓を初めて発掘調査したセリム・ハッサンは「ギザの第四のピラミッド」と呼んだが（Hassan 1943）、実態は二段からなる階段状のユニークな建造物であり、石灰岩の累層から切り出された 10 メートル程の高さの岩塊の上に、8.2 メートル程の石積み建造物が載せられている形になっている。2006 年、アメリカ人考古学者マーク・レーナー率いる米国古代エジプト調査協会（Ancient Egypt Research Associates, Inc.）は、東京工業大学の亀井宏行率いる西方砂漠研究会と共同でギザ・レーザー・スキャニング調査隊（Giza Laser Scanning Survey team）を設立し、女王墓の三次元形状計測を行った（亀井：2009）。この調査によって、汎用性のある「生データ」としての点群モデルや、そこから墓の外部と内部の平面と立面のオルソ画像がそれぞれ作成された。それらのデータは物体表面の構造を直感的に理解することは可能にしたが、

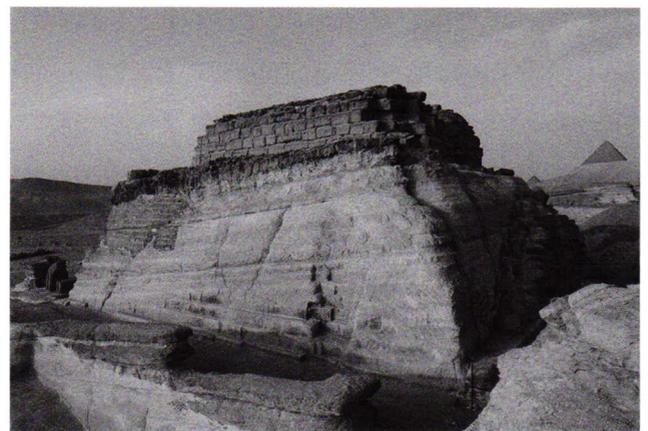


写真1 ケントカウエス1世女王墓。  
Photo 1 The tomb of Khentkawes I

考古学的に構造を把握する上で重視される形状特徴を認識するため、これまでにない新たな表示方法が求められた。そこで、筆者らが考案した“PEAKIT”という新しい三次元形状データの表示方法を用い、ケントカウエス女王墓の構造をより分析的に理解することを試みた。本稿ではその実施結果を報告する。

## 2. 三次元形状データの表示方法の現状と課題

### 2.1 三次元形状データの表示方法の発展

欧米の考古学において強い影響力を持つ『考古学（原

<sup>1)</sup> 名古屋大学大学院文学研究科附属人類文化遺産テキスト学研究センター 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 B4

<sup>2)</sup> 株式会社ラング 〒020-0834 岩手県盛岡市永井 20 地割 61 番地 5 CA ビル 1F

<sup>3)</sup> 長崎県立大学情報システム学部 〒851-2195 長崎県西彼杵郡長与町まなび野 1-1-1

<sup>4)</sup> 東京工業大学博物館 〒152-8550 東京都目黒区区大岡山 2-12-1

題“Archaeology”)』を著したイギリスのコリン・レンフルーとポール・バーンによれば、一般に考古学とは現場での発見が重要視される傾向にあるが、実際には「研究課題／アイデア／理論」の提示、その答えを導き出す適切な「研究方法」の発展、そして最後に「フィールドにおける発見」といった三つの様相からなっている(池田ら:2007)。これらの中で、本稿の主題としているのは研究方法であり、特に、近年増加しつつある三次元形状計測を用いた研究の最終段階であるデータの表示方法について述べていく。

文化財の三次元形状を正確にデジタル化し、コンピュータグラフィックス(CG)で再現しようという試みは1990年代から行われているが、デジタルデータの多目的利用は、汎用的なブラウザやフォーマットが存在しないことから、現在でも多目的利用が阻まれている(宮前:2015)。その一方で、2000年以降には考古学研究のための三次元形状データの表示方法の工夫も見られる。顕著な研究例としてT.J.ワトソン研究所によるピエタ像(サン・ピエトロ大聖堂)の三次元形状モデル表示(Bernardini:2002)およびマーク・レボイらによるデジタル・フォルマ・ウルビス・ロマエ計画が挙げられる(Koller:2006)。T.J.ワトソン研究所の研究例では、三次元形状レーザースキャナを用いて取得した三次元形状モデルを単に写實的に再現するだけでなく、観察者に光源位置を自由に操作させることで立体感を的確に表現する手法を開発した。一方、レボイらは同じく三次元形状レーザースキャナを用いて取得したフォルマ・ウルビス・ロマエの断片について、複数の断片同士の結合可能性を統計的に求めた上で、最終的に考古学者によって判断できるように三次元モデルに補助線を重畳するなどの工夫を加えた。また、多井らは銅鐸の三次元形状データからコンピュータ上で拓本(画像)を生成することを試みている(多井:2002)。これは銅鐸の考古資料として従来から拓本が多用されてきたことを鑑み、他の資料と比較するための資料として三次元形状データの表示方法に加えた工夫の例と言える。さらに、筆者らは地形情報学において考案された「開度」(3.1①を参照)処理による表示方法を、遺物や遺構に適用することで、考古学的解釈を容易にする試みをおこなった(Chiba and

Yokoyama:2009)。しかしエジプト考古学の現場では、現在でも表現方法はデータを計測した専門家に任されており、データそのものの表示方法に関する研究はほとんど進んでいない。現状は三次元形状データをいかに使いやすくするかというインターフェースの研究が主になっており(Prévôt:2013; Yasumuro:2012)、本稿のようにデータそのものを対象とした研究は少ない。さらに、各現場や研究対象で異なるであろう三次元形状データの必要密度、精度やノイズについても、具体的な記述を持つ報告書も限られている。

## 2.2 三次元データ表示方法の問題点と今回の試み

筆者らは、2009年に、ケントカウエス女王墓の建築要素の考古学的記述と、現場での三次元形状データの取得方法を発表した(亀井:2009)。しかし、点群テクスチャマッピング画像では、ケントカウエス女王墓の三次元形状データの欠損箇所を正確に把握できず、石材の組み合わせによって示される構造の分析などが困難であった。そこで本稿では、このケントカウエス女王墓の三次元形状データでの事例として、筆者らが開発したPEAKIT-これは開度という概念を表現方法のメインに据え、さらに対象物の特性に応じて陰影表現、段彩表現をオーバーレイさせる画像処理方法-を用いた画像処理による対策について報告する。

## 3. PEAKIT とは

PEAKITとは、デジタル標高モデル(Digital Elevation Model, 以下DEM)を演算することによって作成される「開度」、「レリーフ」、「距離段彩」といった複数の画像を選択的にオーバーレイ表示する技術である(図1)。DEMを用いる利点は、正規化された配列形式であるため画像処理のアルゴリズムをそのまま適用できることで

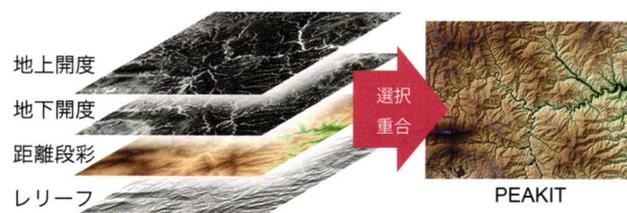


図1 PEAKITの作成概念  
Fig. 1 A visible example of PEAKIT

ある。DEM から作成される個別の画像はそれぞれ長所と短所を含むが、オーバーレイすることによって短所を相互に補い合い、対象物の形状特徴をより明確に表現することができる (Chiba and Yokoyama: 2009)。

### 3.1 PEAKIT で生成される画像

① 開度 (Openness) とは、地形情報学において考案された概念であり、着目地点から任意に設定した探索距離  $L$  の範囲内における周辺地形の見晴らし度合いを、地形における可視領域の計算原理 (terrain line-of-sight principle) を用いて数値化したものである (Yokoyama: 2002)。本稿で立面図を作成する際には、投影面に対する建物の表面が、この概念の地上の定義となっている。開度には地上開度と地下開度がある。地上開度は空中の見晴らし度合いを数値化したものであり、値が高い部分が尾根地形を表す。地下開度は地下の見晴らし度合いを数値化したものであり、数値の高い部分が谷地形を表す (図 2)。これらの画像は、隣接する画素との三次元的な位置関係を表現したものであるため、後述するように点群データのクオリティー検査に役立てることが出来る。

② レリーフ (Shaded Relief Maps) とは、物体表面の法線と光源の方向とのなす角の余弦の大きさを画像化したものである。この画像は陰影起伏図とも呼ばれ、物体表面に光を当てた時の陰影具合をシミュレーションしたものとなる。

③ 距離段彩 (Colored Distance Maps) とは、任意基準面からの距離値を量子化されたカラーテーブルに即して着色した画像である。この画像は、三次元形状データを二次元で表現する際、奥行きを表すことが出来るため、線画生成の際に不可欠なものと考えられる。本稿では、

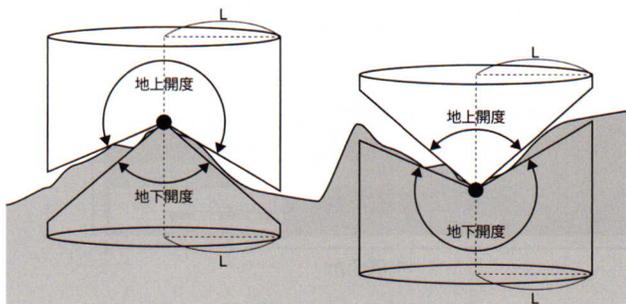


図 2 地上開度および地下開度の概念

Fig. 2 Concept of positive openness and negative openness

任意基準面を、平面図においては水平面に平行でかつ図 7 に示す Z 軸原点を通る面とし、立面図においては水平面に垂直でかつ視点に最も近い対象物に接する面としている。

各種画像はそれぞれ以下のような色付けで表現する (図 3)。

地上開度：青色の濃淡で表現

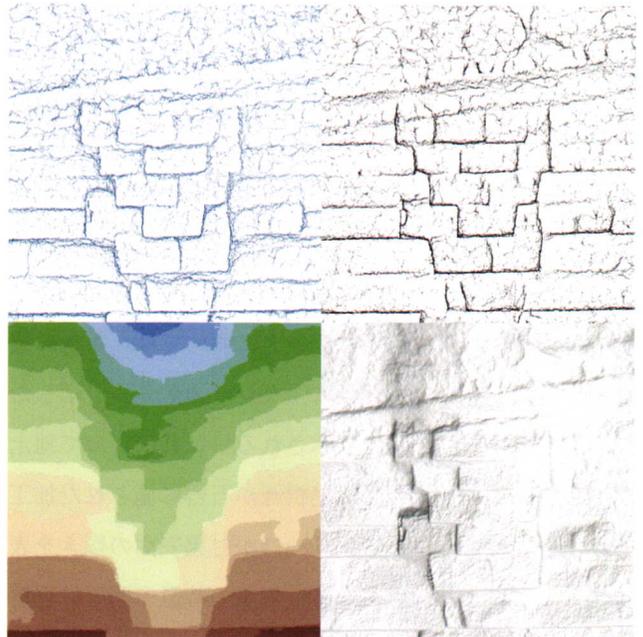


図 3 左上から時計回りに、墓の東面壁龕の「地上開度」、「地下開度」、「レリーフ」、「距離段彩」

Fig. 3 The recess on the east side of the tomb represented by positive openness, negative openness, shaded relief image and colored distance map (clockwise from top left)

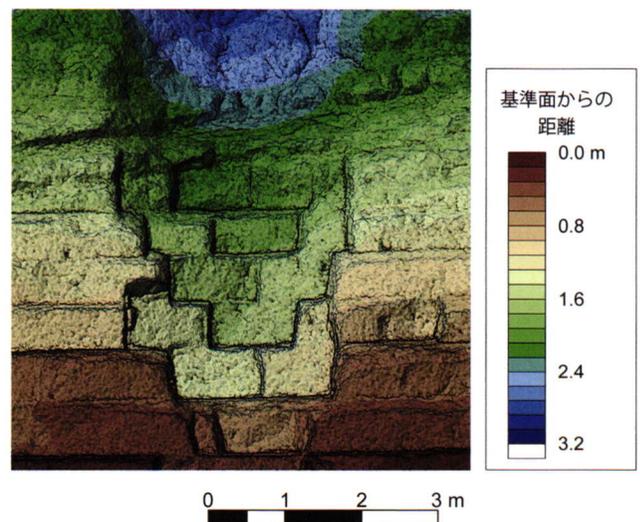


図 4 墓の東面壁龕の PEAKIT 表示

Fig. 4 PEAKIT image of the recess on the east side of the tomb

地下開度：グレースケールで表現  
レリーフ：グレースケールで表現  
距離段彩：地形標準の彩色（視点から遠いほど緑色、  
近いほど茶色）

これらの要素をオーバーレイ表示したものが図4である。

### 3.2 PEAKIT の遺構・遺物への適用

PEAKIT は、小さな遺物から広大な遺構まで一貫したアルゴリズムに基づいた、多様な表現を作成できるところに利点がある。

① 遺物への適用：考古学者が石器や土器などの遺物を実測する場合、遺物表面の尾根構造線を基準として描くのが一般的である。したがって遺物の PEAKIT の適用には、地上開度とレリーフの組み合わせが有効である。そのため石器の三次元形状データにおいては、茶色の濃淡で示したレリーフを背景に、グレースケールで示した地上開度をオーバーレイ表示される。これによって地上開度演算により抽出された尾根線が石器に施された加工の単位を表現し、さらにレリーフが対象表面の傾きを表現することにより、考古学者は対象の特徴を明確に理解することができる。

② 遺構への適用：それぞれ加工の施された複数の部材からなる建造物を考古学的観点から線画生成する場合は、上述した遺物の場合とは異なり、尾根構造線と谷構造線の双方を基準として描くのが一般的である。さらに建造物は水平と垂直の概念を保持するため、これらの構造線とは別にコンター図を作成することで地面との位置関係を示す場合がある。したがって、通常、地上開度、地下開度、レリーフ、距離段彩、全ての情報をオーバーレイするのが効果的である。

## 4. ケントカウエス女王墓の三次元データへの PEAKIT の適用

### 4.1 ケントカウエス女王墓の三次元形状データ

#### ① 三次元形状データの諸元

本稿の研究対象である女王墓の三次元形状データは、RIEGL LMS-Z420i laser scanner および RIEGL LPM-

25HA laser scanner により、色情報を保持する点群データとして取得された。データの諸元は以下の通りである。

- ・データの点数：287,975,386 点
- ・X 方向の範囲：約-995 m～約 1001 m, 幅約 1,997 m
- ・Y 方向の範囲：約-1,044 m～約 826 m, 幅約 1,870 m
- ・Z 方向の範囲：約-254 m～約 443 m, 幅約 697 m
- ・データサイズ：約 14.0 GB

#### ② 三次元形状データの座標系と対象領域の設定

座標は、ギザ台地マッピングプロジェクト (Giza Plateau Mapping Project) によって設定された任意のローカル座標系であり (Lehner and Wetterstrom: 2007), 図5はその点群のテクスチャ情報を平面上にプロットしたものである。

RIEGL LMS-Z420i laser scanner は、長距離レーザー・スキャニング機器であるため、研究対象である女王墓の背後にある三大ピラミッドの一部も計測しているが、ここでは対象領域を以下のように狭め、さらに四角形を呈する女王墓を図面の方向と一致させるために、目視判断で XY 平面に対して時計回りに 8 度回転させた。

- ・X 方向の範囲：約-24.0 m～約 23.3 m, 幅約 47.4 m
- ・Y 方向の範囲：約-22.5 m～約 24.2 m, 幅約 46.8 m

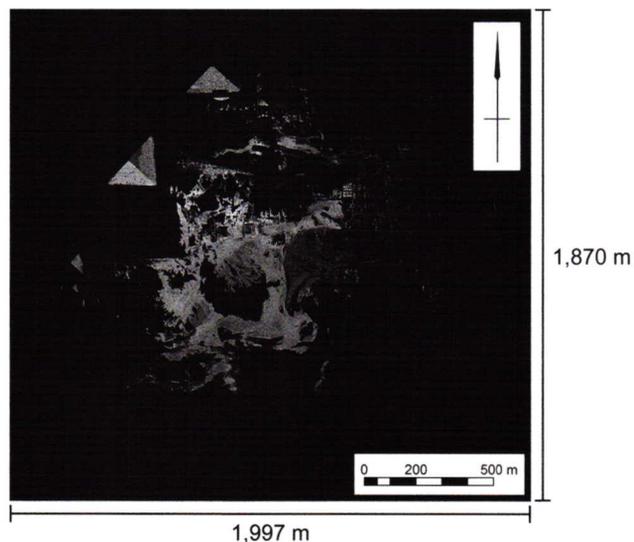


図5 対象データの点群プロット図

Fig. 5 An orthophotographic plan of point cloud image of the target data

・Z方向の範囲：約-1.6m～約19.7m，幅約21.3m

図6と図7は，対象領域における通常の点群のテクスチャマッピング画像（後述）である。XY平面における原点は，対象遺構の平面形のほぼ中心部分に設定し（図中丸），Z軸の原点は，床面にあたると考えられた図6の囲みの部分のうち，最も低い地点とした。

#### 4.2 三次元形状データの欠損箇所の視覚化対策

##### ① 点群データの欠損箇所を把握できない？

通常，レーザー・スキャニング機器で取得した古代遺跡の三次元形状データは，全体が完璧に取れることは少なく，欠損箇所を含んでいる。これは，入り組んだ遺跡

の形状や計測を行う際のレーザー・スキャニング機器設置場所の問題からくるものである。遺跡の三次元形状データは点群データであり，面情報も法線情報も含まれていないため，通常その表示方法には点群テクスチャマッピング画像が採用される。これは点群に付加された色情報（テクスチャ情報）を，任意に設定した投影面にマッピングした画像である。その際，背景色には黒や白など目立たない色が適応される。しかし，図6と図7からも分かるように，データの欠損箇所は，点群テクスチャマッピング画像だけでは判別が難しい。そのため，本稿では，まず以下の処理をおこない欠損箇所を含むデータの分布を視覚的に把握した。

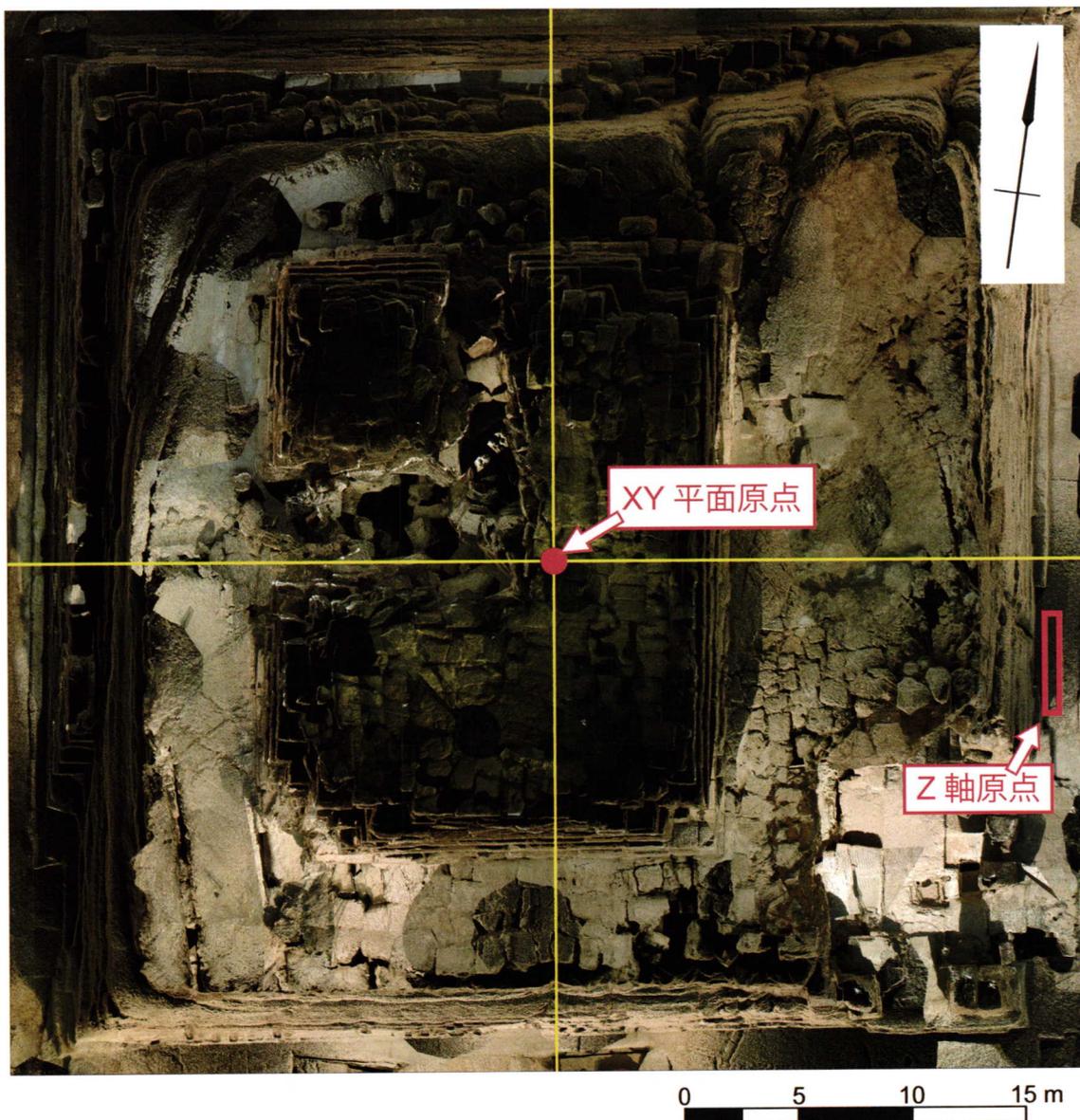


図6 対象領域のテクスチャマッピング画像（平面）

Fig. 6 Texture mapping image of the target data (the plan view)

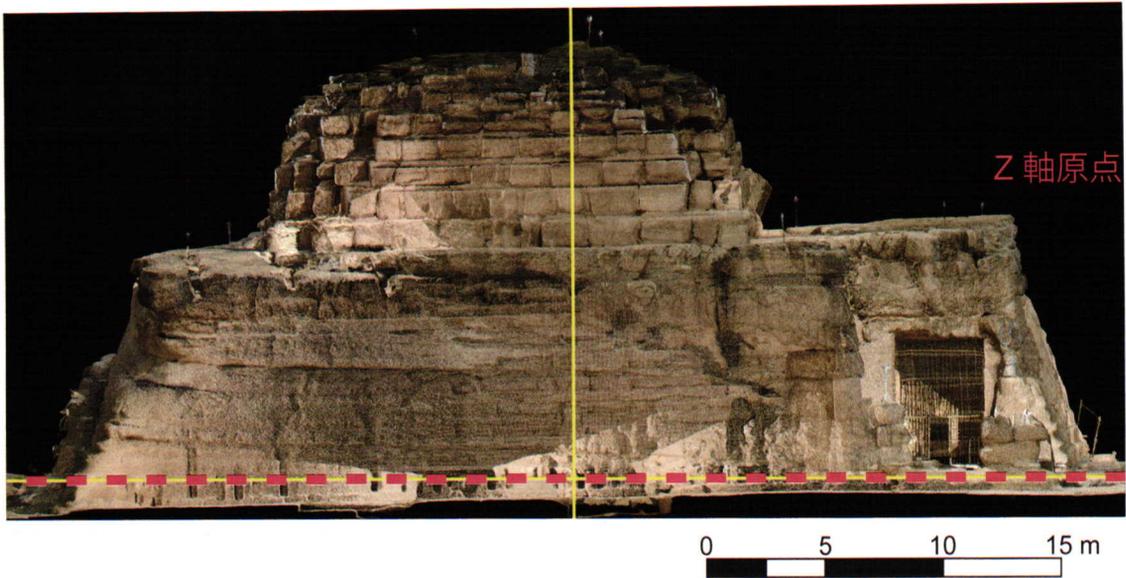


図7 対象領域のテクスチャマッピング画像（立面，南側）  
 Fig. 7 Texture mapping image of the target data (the south elevation)

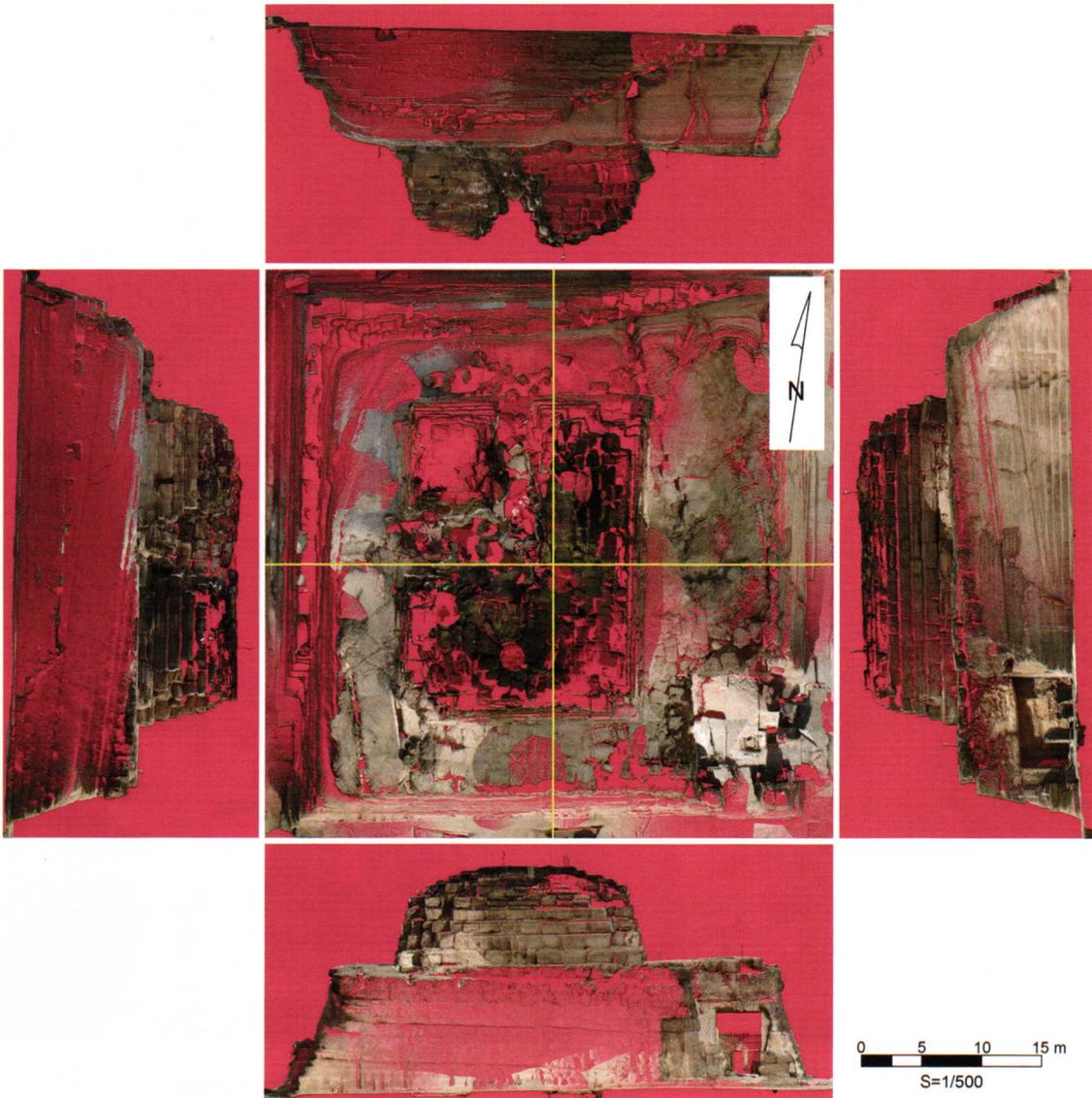


図8 対向する面側の点群を削除してマッピングをした立面図  
 Fig. 8 Orthophotographic images of point cloud after the cut of unnecessary points

## ② 点群データの欠損箇所を視覚化する方法

まず対象遺構南側から見た点群テクスチャマッピング画像において、投影面の画素サイズを1ピクセルあたり10mmとして、同じ画素内に複数の点が存在する場合には最も手前にある点を採用し、画素内に点が存在しない場合には、赤色を着色した。このデータは一見すると欠損箇所が少なく、良好である印象を与えたが、実際には、南面側の点を含まない画素では、北面側の点の情報が採用されているため、表示方法としては不適切だった。そこで、対向面に属する点群を除去するため、図6のX軸よりも北側の点群を削除した。これによって、南面の立面画像における点群分布の現状を適切に把握できるよう

になった。東面、西面、北面についても同様に、対向する面側の点群を削除してマッピングをした立面図を作成した(図8)。この画像によって、点群データの欠損箇所の確認ができ、さらに目視によって、平面と東面ではおよそ10mm間隔で点群が分布し、西面と南面の中央部分ではおよそ20mm間隔で点群が分布していることが判明した。

## 4.3 三次元形状データのクオリティチェック対策としてのPEAKITの適用

従来、オリジナルデータの作成途上において、データのクオリティを检查するための手段は、生の点群デー

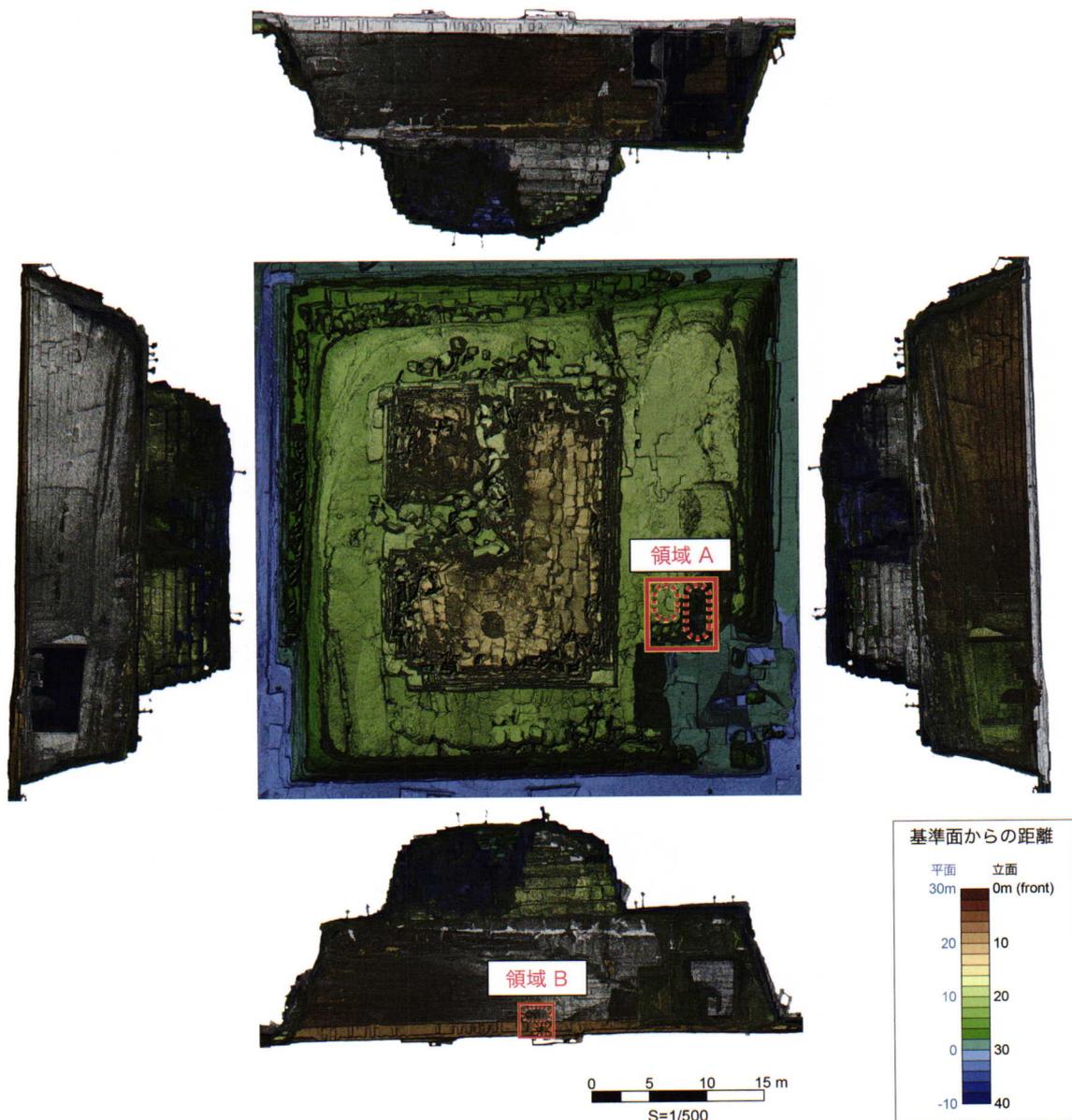


図9 ケントカウエス女王墓のPEAKIT画像(改良前)

Fig. 9 PEAKIT images of the tomb of Khentkawes before improvement

タの表示に限られていた（ここでは対象物の形状再現性に関わるリアリティについてではなく、ノイズや不均一性などといった機器由来の問題を含むデータそのもののクオリティについてのチェックについて述べる）。しかし点群表示では、隣接する点との三次元的な位置関係の把握が難しいため、点群密度の不均一性や、データノイズの検査には適しているとは言えなかった。それに対して、上述したようにPEAKITの「開度」は隣接する画素との三次元的な位置関係を表現したものであるため、データの問題点を視覚的に表示することが可能である。

#### 4.4 PEAKITの適応により明らかになった問題点（点群密度の不均一性とデータノイズの問題）

ケントカウエス女王墓のデータに対してPEAKITを適用した。その際、DEMの格子間隔を10mmとした。これは対象物を55箇所から計測した際、仰俯角、水平角ともに0.05度の角度で計測したことと、一般に格子間隔は小さい方が緻密な画像を得られるが、レーザースキャナーのビーム径の大きさから生成点群の解像度が10mm程度になると推量したため、それ以下の間隔にしても意味を成さないと判断したためである。解析の結果、データノイズが存在している箇所や、点群密度に不均一性が見られる箇所は、特徴線が不鮮明になったり、不規

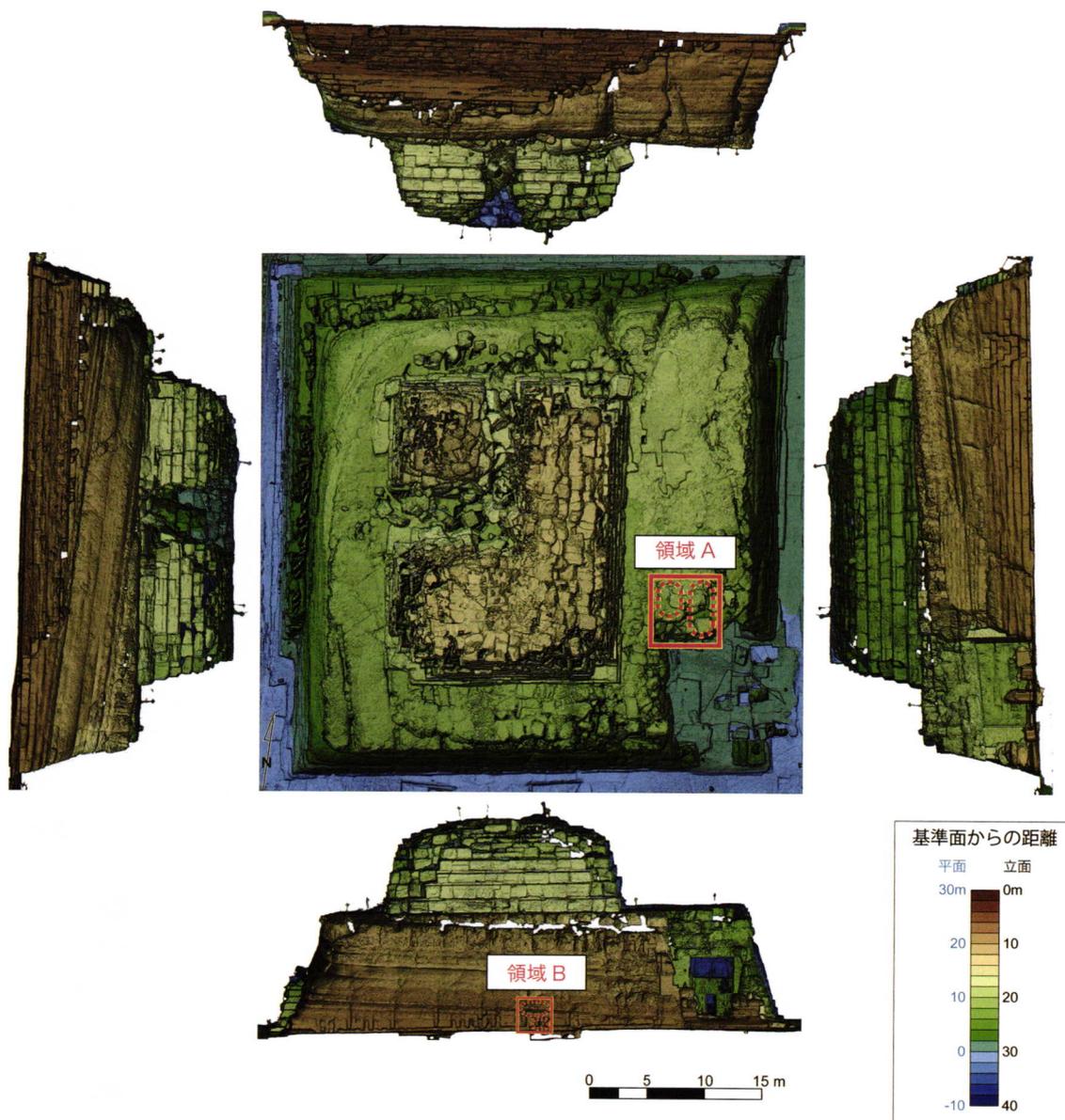


図10 ケントカウエス女王墓のPEAKIT画像（改良後）  
Fig. 10 PEAKIT images of the tomb of Khentkawes after improvement

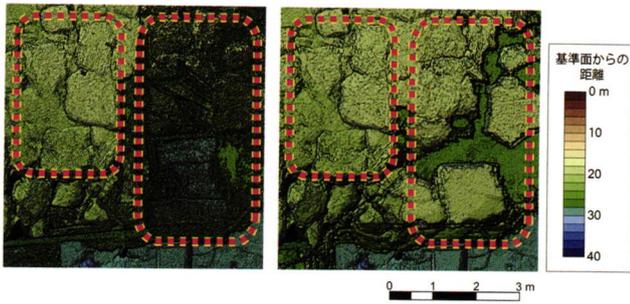


図11 領域AにおけるPEAKIT処理結果。改良前(左), 改良後(右)

Fig. 11 Region A before improvement (left) and Region A after improvement (right)

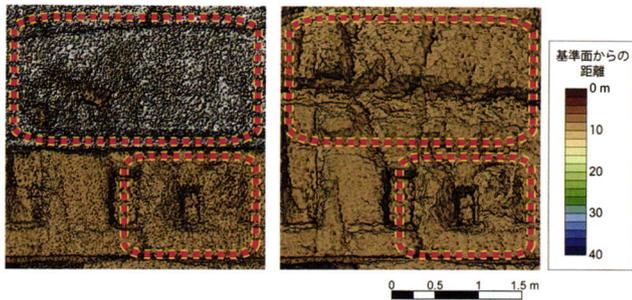


図12 領域BにおけるPEAKIT処理結果。改良前(左), 改良後(右)

Fig. 12 Region B before improvement (left) and Region A after improvement (right)

則になったりする傾向が見られた(図9)。例えば, 下部の岩塊の上部南側に敷かれた舗装された床面(図9領域A)は実際には連続した平面が存在するが, 「4.2 三次元形状データの欠損個所の視覚化対策」でも示されたが, この面の点群密度が低いために, その下に存在する横穴部屋の天井面が表示され, 特徴線が不規則を呈している(詳細は図11左の右半部の囲み)。また南面に残されたファサード装飾の一部(図9領域B)は, 計測ノイズの影響をうけて, 特徴線が不鮮明になっている(詳細は図12左の右下の囲み)。こういった問題は, 中・長距離型のレーザースキャナーを使用して多方向から計測した複数データを合成する方式をとる場合, 完全には避けがたい課題である。

## 5. PEAKIT 画像の改善のためのフィルター処理

ここでは元データに対する対策として, 点群密度の不均一性の対策として新たに考案した「近接差分除去フィルタ」をオリジナルの点群に適用し, データノイズの対

策として「メディアンフィルタ」による平滑化をDEMに対して適用した(Chiba: Forthcoming)。

### 5.1 群密度の不均一性の対策(近接差分除去フィルタの適用)

近接差分除去フィルタとは, DEMを作成する前の点群データにおいて, 目的とする面に属さない点を削除するフィルタである。手順としては, [1] 除去基準値を設定する(座標はローカル座標とし, 立面図では奥行き方向の座標がZ軸となる)。[2] 計測点群を等間隔に区切る。区切られた領域は以下, 画素と表記する。[3] 各画素において, 画素に含まれる点のZ値を調べ, 最も高いZ値を画素値として格納する。[4] 各点を着目点とし次のステップを繰り返す。[5] 着目点のZ値よりも8近傍すべての画素値が, 予め設定した除去基準値よりも大きい場合に, 着目点を除去する。

### 5.2 データノイズの対策(メディアンフィルタの適用)

メディアンフィルタとは, 平滑化をおこなうためのフィルタの一種である。通常の加重平均の平滑化では全体を均一に平滑化するため, 値の急変するエッジ部分も滑らかになってしまう。エッジを保存したい場合の平滑化フィルタとして, メディアンフィルタが提案されている。DEMから尾根線, 谷線などのエッジを抽出するPEAKITの適用を前提とする場合には, メディアンフィルタが有効である。メディアンフィルタは, 着目画素を含む近傍画素について(近傍のサイズは任意に指定可能), それらの値の中央値を対象画素値として割り当てるものである。

## 6. フィルタ処理後のPEAKITの結果とその評価

上記の2つのフィルタ処理によってオリジナルデータのノイズ除去並びに平均化を行った後, 「開度」, 「レリーフ」, 「距離段彩」の全ての画像をオーバーレイ表示する本来のPEAKITを適用した(図10)。結果, 当初のデータと比べると, 以下のような改善点が確認できた。

舗装された床面に関しては, 改良前の画像の右半部では, 連続する平面において, その下に存在する本来表示

されるべきではない横穴部屋の天井部に属するデータが表示され、あたかも左半部と右半部で高低差があるかのように見えていた。改良後は、この部分が舗装された床面から連続した同一平面であることが確実に認識できるようになった。また左半部に認められた計測ノイズも除去され、舗装された床面の構造がより鮮明に表されている(図11右)。

南面に残されたファサード装飾の一部に関しては、改良前は画像の上半部において、本来表示されるべきではない北面側の石灰岩層理断面の浸食による凹凸が表示されていたが、改良後は南面のみが表示できるようになった。さらに、Rebate 凸部分の右2つ(右下の囲み)については改良によりノイズが除去され、南面の構造がより鮮明に表されている(図12右)。

## 7. まとめと今後の課題

### 7.1 まとめ

本稿では、巨石建造物の記録方法として一般化してきた三次元形状計測に、PEAKITという新たな画像処理を導入した結果を述べた。これは上述した考古学の三つの様相の中の「研究方法」における、記録作業についての新しい提案である。PEAKITの利用は二段階に分け、一段階目を「データのクオリティーチェック」とし、二段階目を考古学的解釈のための形状特徴、対象表面の傾き、そして奥行きを表現する「オーバーレイ表示画像の作成」とした。ケントカウエス女王墓のオリジナルデータには、機器由来の点群密度の不均一性、およびデータノイズという二つの問題点が含まれているが、これが一段階目の過程で明示されたため、近接差分除去フィルタによる不要な点の除去とメディアンフィルタによる平滑化を図った。これらの改良を適用することによって、最終的に、女王墓の良好な画像が得られた。

通常、三次元形状データを紙などの二次元の媒体に載せるということは、自明の問題として、その特徴を完全に表現するのは困難である。しかし三次元形状データの正射画像は、遺跡の形状を経験に基づき表現された実測図とは異なり、その細かさや質感から、計測データの考古学的解釈に定性的な幅を与えてくれる。例えば、遺構の復元図を作成する際には、線画という限定された情報

とは異なり、それぞれの研究者が、あたかも遺跡そのものから独自の解釈を展開することができ、さらに本稿で示したようにPEAKITを適用した画像は、通常の画像表記からでは分からない考古学的特徴を可視的に表現することも可能である。地上開度が個々の部材に施された加工の単位、地下開度が個々の部材の輪郭、レリーフが表面の傾き、距離段彩が遺構の奥行きを表現することにより、考古学者は対象の構造を明確に理解することができるのである。

### 7.2 今後の課題

本稿の最後に、今後の課題との関係から、レンフルーとバーンが提示した「研究課題」と「フィールドにおける発見」についても、この三次元形状データの関わりから概略を述べる。この墓の埋葬者に関する系譜かつ王権についての議論に「ケントカウエス問題」と呼ばれるものがある(Verner: 1995)。その中で、この女王墓には、彼女の持つ歴史的アスペクトが反映されているかどうかということが長く議論されている。上述のハッサンや、「ケントカウエス問題」を包括的に研究したミロ斯拉フ・ヴェルナーは、墓は二段階に分けて作られたと述べている(Ibid.)。彼らによれば、最初に、ファサード装飾で覆われた岩窟墳墓が造られ、その後、上部構造と外装石が付け加えられたという。この変更の理由を明確には述べていないが、ケントカウエスと王権との関わりをほのめかしている(Hassan: 1943; Verner: 1995)。しかし、現場で行った目視による定性的評価と本プロジェクトで取得した三次元形状データは、墓は二段階ではなく一段階で作られたということを示している(Kawae: 2011)。例えば、先行研究では指摘されなかったことの一つに、墓の下部構造を為す元の岩塊の形状や性質がある。図10で示されるように、平面画像で見ると、北側と西側は大きく削り取られており、さらに岩塊上部の南西に残された、石を切り出すための三本の溝が計測されている。北側の立面画像には、岩塊の割れ目が三箇所計測されているが、古代エジプト人はこういった自然の亀裂を利用して、採石活動を行ったことが知られている(Lehner: 2003; Kawae: 2011)。そのため岩塊は、ハッサンやヴェルナーの仮説とは異なり、岩窟墳墓を造るのには明らかに適し

ておらず、最初から外装石で被われる計画になっていたと考えられる。王権との関わりから問題とされているファサード装飾についても、PEAKITのレリーフと開度の画像によって、オリジナル形状の復元が可能となったが、これも南面だけしか作られておらず、ヴェルナーが述べているように四面全て装飾されていないことは現場の考察からも明らかである。言い換えれば、現場での観察と墓の三次元形状データから考察する限り、ケントカウエスが墓の造りを大きく変更した跡は見られず、そのため、王妃から王への権力の移行を示す証左にはなり得ない。

本研究の今後の課題のひとつとして、更なる定量的なアプローチの必要性が挙げられる。例えば、ローカル座標系から対象物を平面上において任意に8度回転させたが、垂直性を議論する際には壁面の点群を抽出して、その壁の平均的な角度を計算するといった定量的評価を試

みることや、PEAKITを適用した後の改善の度合いを定量的に確認することなどが課題となるだろう。

これに加え、上述の「ケントカウエス問題」について、オープンに議論するために、データのネット上の公開も課題として挙げられる。現状では三次元形状データの公開は、容量の大きさから現実的ではないが、このPEAKITの高解像度二次元画像（平面図と立面図）の公開が、学術的には有用だと考えられる。そのためウェブ上における最適な表示方法について、今後さらに研究を深める必要があるだろう。

#### 付記

本研究は、マーク・レーナー博士率いる米国古代エジプト調査協会（Ancient Egypt Research Associates Inc.）との共同研究の一環として行われ、一部は、JSPS 科研費 JP15K02977 により遂行された。

#### 引用文献

- 池田裕・常木晃・三宅裕（監修・訳）、松本建速・前田修（訳） 2007 『コリン・レンフルー＋ポール・バーン 考古学 理論・方法・実践』 東洋書林 p.21
- 多井 堅一郎・金谷 一郎・塚本 敏夫・佐藤 宏介 2002 「高精細 3次元形状データを用いた拓本画像作成」 情報考古学 8(2) pp.1-10
- 亀井宏行・河江肖剰・塚本敏夫・金谷一郎・岡本篤志 2009 「2006年度ギザ・レーザー・スキャニング調査報告—ギザのケントカウエス女王墓の再考察と3次元計測による記録作業—」 西アジア考古学会 10号 pp.51-63
- 宮前知佐子 2015 「文化財の三次元計測の現場から」 考古学と自然科学第69号 pp.59-76
- Bernardini, F., Rushmeier, H., Martin, I., Mittleman, J., Taubin, G 2002 "Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pieta" IEEE Computer Graphics and Applications 22 pp.59-67
- Chiba, F. and Yokoyama, S. 2009 "New Method to Generate Excavation Charts by Openness Operators" Proceeding of 22nd International Symposium CIPA pp.1-5
- Chiba, F., Yokoyama, S., Kanaya, I. and Kawae, Y. Forthcoming "Introduction of "PEAKIT" to 3D data of the tomb of Khentkawes [I] at Giza" In: Lehner, M. and Wetterstrom, W. (eds.) Giza Occasional Paper 6
- Hassan, S. 1943 "Excavations at Giza vol. IV. 1932-1933" 62p
- Hornung, E., Krauss, R. and Warburton, D. A. 2006 "Ancient Egyptian chronology" 517p
- Kawae, Y. 2009 "Giza Laser Scanning Project" In: Lehner, M., Kamal, M. and Tavares, A. (eds.) Giza Occasional Paper 3 pp.166-174
- Kawae, Y. 2011 *3D data of the tomb of Khentkawes [I] and its interpretation*. Docorate thesis. The Graduate School of Letters, Nagoya University. 114p

- Koller, D. and Levoy, M. 2006 "Computer - Aided Reconstruction and New Matches in the Forma Urbis Romae" *Bullettino Della Commissione Archeologica Comunale di Roma, Supplementi* 15 pp.103-125
- Lehner, M. 2003 *The Giza Plateau Mapping Project. The Oriental institute Annual Report 2002-2003* [https://oi.uchicago.edu/sites/oi.uchicago.edu/files/uploads/shared/docs/02-03\\_Giza.pdf](https://oi.uchicago.edu/sites/oi.uchicago.edu/files/uploads/shared/docs/02-03_Giza.pdf)
- Lehner, M. and Wetterstrom, W., 2007 "Giza reports: The Giza Plateau Mapping Project: Project History, Survey, Ceramics, and the Main Street and Gallery Operations" 324p
- Maragioglio, V. and Rinaldi, C. 1967 "L'architettura delle Piramidi Menfite. parte VI. La Grande Fossa di Zauiet el-Aryan, La Piramide di Micerino, il Mastabat Faraun, la Tomba di Khentkaus" 214p
- Prévôt, N. 2013 "The digital puzzle of the talatat from Karnak: a tool for the three-dimensional reconstruction of Theban buildings from the reign of Amenhotep IV" In: Polis, S. and Winand, J. (eds.) *Texts, languages & information technology in Egyptology: selected papers from the meeting of the Computer Working Group of the International Association of Egyptologists* pp.129-138
- Verner, M., Posener-Kriéger, P. and János, P. 1995 "Abusir III: the pyramid complex of Khentkaus" 183p
- Yokoyama, R., Shirasawa M. and Pike, R. J. 2002 "Visualizing topography by Openness: A new application of image processing to digital elevation models" *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63(3) pp.257-265
- Yasumuro, Y, Ito, D., Nishigawa, T. and Suita, H. 2012 "Heterogeneous strategy for scanning Mastaba Idout / 異種計測技術の統合によるイドウトのマスタバの三次元形状計測" *Semawy Menu* 4 pp.235-244

(2015年5月20日受付, 2017年6月3日受理)

# PEAKIT analysis of 3D data of the tomb of Khentkawes I at Giza

---

Yukinori Kawae<sup>1)</sup>, Fumito Chiba<sup>2)</sup>, Shin Yokoyama<sup>3)</sup>, Ichiroh Kanaya<sup>4)</sup>, and Hiroyuki Kamei<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Research Center for Cultural Heritage and Texts, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi Prefecture 464-8601, Japan

<sup>2)</sup> LANG CO., LTD., CA Building 1F, 20-61-5 Nagai, Morioka, Iwate Prefecture 020-0834, Japan

<sup>3)</sup> LANG CO., LTD., CA Building 1F, 20-61-5 Nagai, Morioka, Iwate Prefecture 020-0834, Japan

<sup>4)</sup> Information Systems, the University of Nagasaki, 1-1-1 Manabino, Nagayo, Nishisonogi District, Nagasaki, 851-2195, Japan

<sup>5)</sup> Museum, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan

---

In this paper, we explain a 3D laser scanning approach that may be valuable as a mapping technology and tool for analysis in the field of archaeology. In 2006, the Giza Laser Scanning Survey, which was a collaborative project with Ancient Egypt Research Associates Inc. led by Dr. Mark Lehner, used laser scanning technology to map the funerary monument of Queen Khentkawes I in three dimensions. The 3D data for the monument were analyzed with our image processing technology, "PEAKIT". PEAKIT can perform data quality verification by providing a visual display of the irregularity of the point cloud density and measurement noise. We obtained information about the construction method of the tomb from a multi-layered PEAKIT image showing structural features, the undulation of surfaces, and depth. In archaeology, academic research using 3D digitizing technology has become more popular, but current field studies are focused on data acquisition. In this study, we reveal a pioneering approach to the practical use of 3D data of megalithic structures in archaeology. Primary data in archaeology consists of the archaeological remains themselves; however, research data, including line drawing plans and sections, are also considered raw data although they are archaeologists' interpretations. In the future, with the widespread use of 3D surveys in archaeology, 2D line drawing should no longer be considered archaeological raw data. Instead, 3D point cloud data—archaeological remains presented as they really are—should become accepted as raw data. Each archaeological project would undoubtedly develop its own way of presenting 3D displays, just as they have established their own standards and conventions for line drawing. Our new 3D display method, generated with PEAKIT, could possibly become a widely used method of archaeological recording.