

モンゴル国における17世紀の寺院跡Sardgiin khiidの デジタルアーカイブ

正司哲朗*・A.エンフトル**・E.オルタナサン**・S.チョルン***

Digital Archive of the 17th century Mongolian Temple Sardgiin khiid

Tetsuo SHOJI, A. ENKHTUR, E. URTNASAN, S. CHULUUN

要 旨

モンゴル国では、数多くの重要な遺跡が残っているが、修復や保存がされているものは少なく、消失の危機にある遺跡もある。遺跡の現状を保存するためにデジタルアーカイブすることが急務である。本研究の目的は、これらの遺跡をデジタル化することであり、本稿では、17世紀にザナバザルによって建立された仏教寺院であるSardgiin khiidをデジタルアーカイブした方法について述べる。本研究では、3次元レーザ計測装置によるレーザ計測とドローン（小型無人飛行機）を利用した画像計測の2種類の方法を用いた。3次元レーザ計測装置は、精度の高い計測が可能であるが、広範囲を計測する場合には時間がかかる。一方で、ドローンを使って上空から遺跡を撮影し、画像計測をする場合には、3次元レーザ計測装置よりも精度は低い、広範囲を短時間で計測することが可能である。計測した結果から、Sardgiin khiidの構造を明らかにした。さらに、構造をより明確に提示できるようにするために、3Dプリンタを利用してデジタル化したSardgiin khiidを、出力した結果について述べる。

【キーワード】 3次元レーザ計測、画像計測、小型無人飛行機（ドローン）、ザナバザル、3Dプリンタ

I. はじめに

モンゴル国には、数多くの遺跡が存在するが、遺跡の保護・保存が進んでおらず、あと数年のうちに崩壊してしまうものも多数存在している。歴史的文化遺産が失われていくことは、人類全体にとって大きな損失である。しかしながら、現存している遺跡の保護・保存には多大なコストもかかるという問題があるため、現状の構造情報をデジタル化し、保存することが必要不可欠である。そのため、これまで、モンゴル国において、遺跡のデジタルアーカイブを行ってきた。2012年には、ウイグル時代、契丹（遼）時代、16世紀から17世紀に築かれた遺跡を中心に、ハル・バルガス城の土塔、バイバリク城の城壁、ハル・ブフ城の仏塔¹⁾を、2013年には、烽火台、オラン

平成28年8月30日受理 *社会学部総合社会学科 准教授

**モンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所 研究員

***モンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所 所長

ヘレム城の西門跡、ハル・ブフ城の寺院跡²⁾を、2014年には、東モンゴルにある契丹（遼）時代に建立されたとされるヘルレンバルスホト1の仏塔^{3) 4)}をデジタルアーカイブした。

また、モンゴル国立カラコルム博物館において、上記の3年間にデジタル化した遺跡の一部を「モンゴル国の遺跡デジタルアーカイブ」として常設展示を行っており、大型タブレットを用いて、デジタル化した遺跡を閲覧できるシステムを展示している。この展示に対して、国内外から多くの来館者があり、モンゴル国内でも高い評価を得ている。

本稿では、2015年に調査した17世紀の寺院跡Sardgiin Khiidをデジタルアーカイブした結果について述べる。デジタルアーカイブは、2種類の方法で行った。1つは、ドローン（小型無人飛行機）を利用して空撮し、得られた画像列から計測データを得る方法である。もう1つは、3次元レーザ計測装置を用いて、詳細なデータを得る方法である。また、デジタルアーカイブの利活用の1つとして、3次元レーザ計測装置により得られた点群データからポリゴンメッシュ化し、近年、急速に普及している3Dプリンタへ印刷する方法について述べる。3Dプリンタを利用して、寺院跡を印刷することで、構造情報を把握しやすくなり、さらに博物館などで展示することも容易である。

Ⅱ. Sardgiin khiid遺跡の概略

1. Sardgiin khiidを建立したジェブツンダンバ・ホトクト1世

1654年にザナバザル（1635年～1723年）によって建立された寺院であり、ハルハ、オイラトの内紛で、ガルダン軍がヘンティ山、ヘルレン川まで攻撃し、1687年に焼失した。ザナバザルは、1635年にトシュート・ハーンの第2子として誕生し、チベット仏教の一宗派であるジョナサン派の高僧ターラナータの転生として認定された。14歳のときにチベットに留学し、帰国後はラサのガンダンジ寺をモデルとした同名の寺をモンゴルに建立した。ハルハ・モンゴルにおいて、最も崇敬され影響力の大きかった最初の活仏であり、ジェブツンダンバ・ホトクト1世となる。ハルハが清朝に帰属した後、清の康熙帝により全ハルハにおける最高位のラマと認められ、ボグド・ゲゲーン（御聖人様）と称えられた^{5) 6) 7)}。

2. Sardgiin khiid遺跡

Sardgiin khiid（Ribo-Gejai-Gandan-Shadublin）は、図1に示すようにウランバートルから北東約100kmにあり、北緯48度27分39.63秒、東経107度59分48.34秒、標高1970mに位置する。夏場は、地面がぬかるんでいるため、車で行くことはできない。本調査は2015年8月に行ったため、途中から馬に乗り換え、Sardgiin khiidまで片道2日間かった。



図1 Sardgiin khiidの位置



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

図2 17世紀の寺院跡Sardgiin khiid

Sardgiin khiidは、1915年から1916年にP.A.Witterによって編成された探検隊によって初めて見つけられた。その後、1994年にはトブ県の博物館、1995年には、モンゴル科学アカデミー歴史研究所とトブ県の博物館の合同グループにより、小規模な発掘が行われた。さらに、現モンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所所長S.チョルンにより、2013年から2016年に、広範囲な遺跡の発掘調査が行われた。発掘調査では、数多くの仏像、石器や、鎧、鉄兜、刀、槍や火縄銃といったものが数多く出土した。

Sardgiin khiidは、図2 (a) に示す中央の寺院、その周囲に図2 (b) に示すような4つの寺院・建物、図2 (c) (d) に示す仏塔が3つある。この寺院は、山の南側斜面に建てられており、一部の建築物は地台で建てられていた。建築物の壁は、図2 (e) (f) に示すように、大きな石を四角に切り重ねて、その間に薄い石で2-4層を積み、外側を石灰で白く塗っていた。

一部の建築物の壁が異なるのは、完成までに数年を要したからである。モンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所による発掘調査から、中央寺院はチベット様式の屋根があったことが観察されており、屋根は緑、黄色、オレンジ色の瓦で覆われていたことがわかった。中央寺院は、城壁で囲まれており、南、東、西側に門があり、城壁の厚さは1mであり、本研究では、中央寺院を対象にデジタルアーカイブを行った。

2015年6月末から9月末までの3ヶ月間、モンゴル科学アカデミー歴史・考古学研究所によって、中央寺院を中心に発掘作業が行われ、建築部材や大小様々な仏像が出土している。さらに、図2 (g) に示す小さな仏像が大量に出土している。この大量の仏像は、恐らく多くの参拝者によって、奉納されたものと推察される。また、図2 (h) に示すように、寺院の柱が焼け焦げており、焼失したことがうかがえる。

Ⅲ. Sardgiin khiid遺跡のデジタルアーカイブと利活用

1. 空撮を利用したデジタルアーカイブ

ドローン（小型無人飛行機）を用いて、中央寺院を中心に空撮を行った。利用したドローンは、DJI社のPhantom 3 Professionalであり、搭載カメラは4K解像度（4000×3000）である。図3にドローンを利用し、上空から中央寺院を撮影している様子を示す。空撮は、ドローンをホバリングさせて、連続的に画像を撮影した。画像計測は、Agisoft社のPhotoscan Professionalを利用して、撮影画像からカメラの位置情報を推定し、画像からマッチングに利用できる特徴点を抽出し、それをもとに画像間の対応関係を求め、3次元座標を推定し、3次元モデルを生成した。ただし、この方法を行う場合、あらかじめ対象物体のスケールが分かっている必要があるか、もしくは画像中に標定点を入れる必要がある。

本研究では、標定点を入れていないが、GPSにより大まかなスケールがわかる。また、次に述べるように、3次元レーザ計測装置も利用して、対象を計測しているため、対象物体のスケールを知ることができる。使用した画像枚数は、147枚であり、生成したモデルを図4に示す。空撮を利用した画像計測は、簡易に計測することができるが、全体的に平滑化された形状になっているのがわかる。



図3 ドローンを利用した空撮

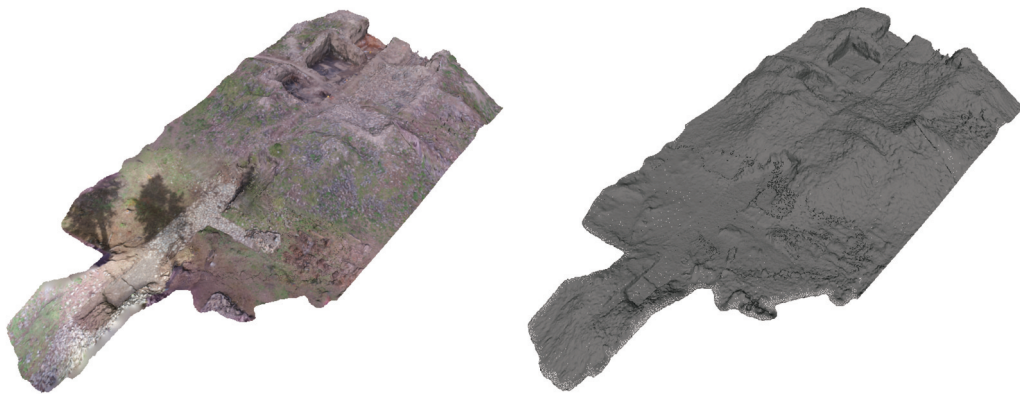


図4 画像計測に基づきデジタルアーカイブした結果



図5 3次元レーザ計測装置を利用して計測している様子

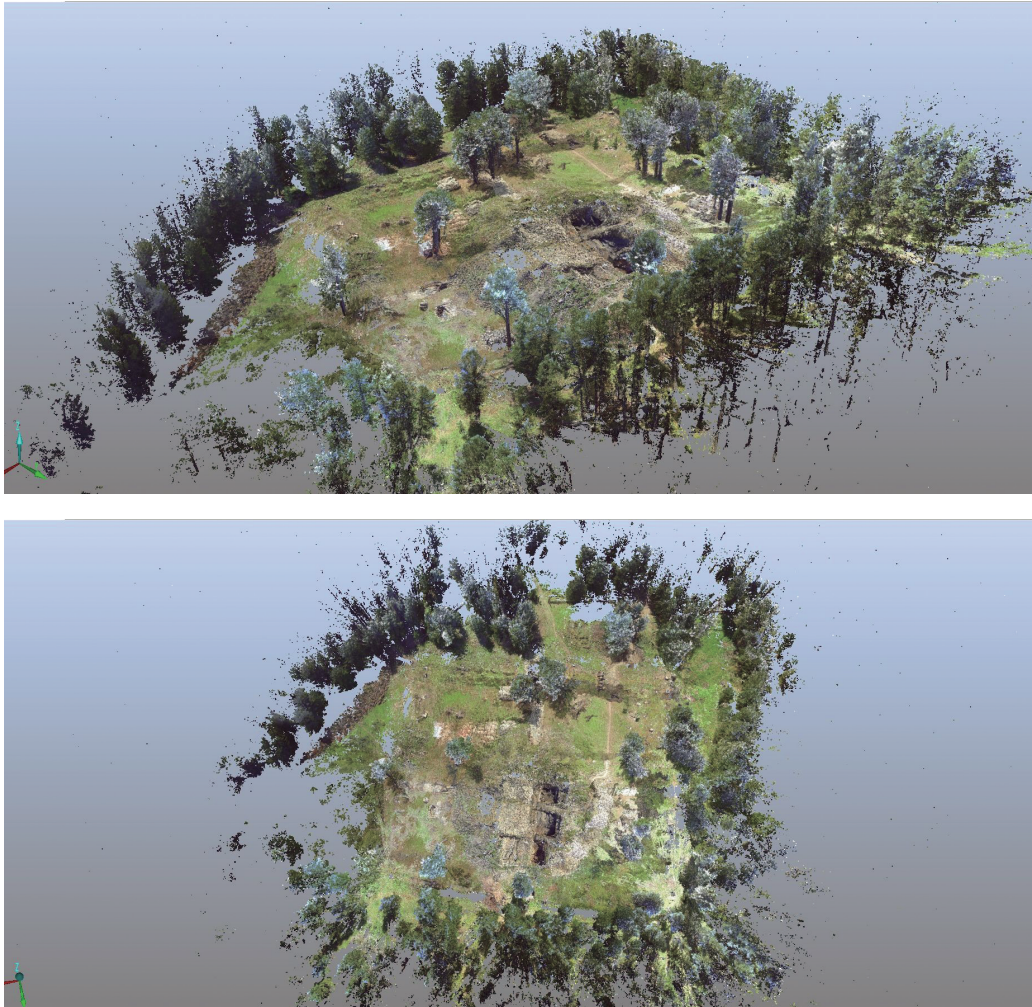


図6 3次元レーザ計測に基づきデジタルアーカイブした結果

2. 3次元レーザ計測装置装置を利用したデジタルアーカイブ

本調査で利用した3次元レーザ計測装置は、図5に示すFARO社のFocus 3 Dであり、2日間かけて計測を行った。計測箇所は、52地点であり、計測によって得られた点群データは約 4.0×10^9 、計測結果から東西89m、南北76mであることがわかった。デジタルアーカイブした結果を図6に示す。計測データからは、詳細な形状が得られていることがわかる。

3. 地上と上空からのデータ統合に関する検討

本研究では、上空からドローンで撮影した画像から画像計測により3次元モデルを生成した(図7(右))。また、地上からは、3次元レーザ計測装置を用いて、3次元モデルを生成した(図7(左))。上空からは広範囲な3次元モデルを獲得できるが精度は低い。一方、地上から計測したデータは精度が高いが、計測に時間がかかり、図7に示すように、レーザが当たっていない領域には欠損が見られる。

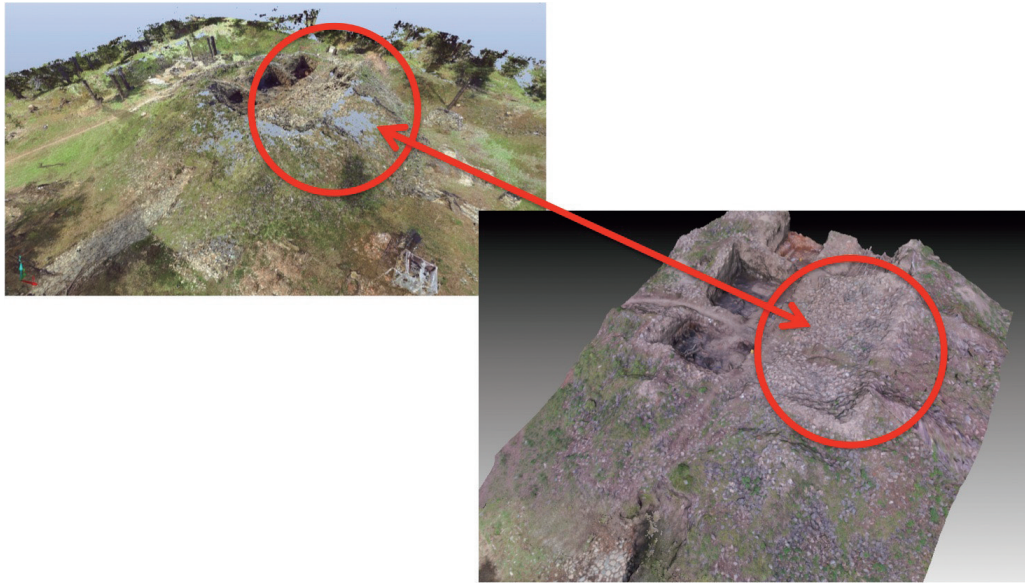


図7 地上と上空から得られた3次元モデルの比較

これらのデータを統合するためには、両者の計測時に、共通の標定点（GPSによる位置情報）を入れる必要があるが、その場合においても、形状にずれが生じる可能性が高い。このため、それぞれの3次元モデルから形状の特徴を抽出し、形状マッチングを行う必要があるため、形状特徴の抽出・マッチング手法の検討が必要となる。

4. 点群データ処理

一般的に、3次元レーザ計測装置で得られた計測データは、膨大な点群データである。点群データは、3次元座標値、および色情報を持っているが、2次利用するときには扱いづらいデータである。ここでは、これらの膨大な点群データから2次利用が容易に行えるように、ポリゴンメッシュ化する方法について述べる。点群データからポリゴンメッシュ化する方法は、一般的には、

（1）点群データから法線を計算、（2）点群データからポリゴンメッシュ化、（3）余分なポリゴンメッシュを編集・削減の3つである。ただし、点群データが膨大な場合には、（1）の法線を計算する前に、あらかじめ、点群データを間引く必要がある。（2）のポリゴンメッシュ化するアルゴリズムは様々あり、代表的なものはBall Pivotingアルゴリズム⁸⁾、Poissonアルゴリズム⁹⁾がある。閉じている形状に関しては、Poissonアルゴリズムが比較的有効である。

Sardgiin khiidのデジタルアーカイブしたデータは、約 4.0×10^9 点あるため、まず、法線を計算する前にデータを間引いた。次に、削減したデータに対して法線を計算し、Poissonアルゴリズムを利用してポリゴンメッシュ化を行った。さらに、ポリゴンメッシュ化したデータを、3Dプリンタで印刷するには、データ量が大きすぎるため、ポリゴンメッシュ数を削減した。

5. 3Dプリンタの利用

博物館などで展示できるようにするために、近年、急速に普及してきた3Dプリンタを使って、デジタルアーカイブしたSardgiin khiidを印刷する方法について述べる。ここでは、熱で溶解する樹脂を1層ずつ積層していく熱溶解積層方式であるFLASHFORGE社Dreamer（図8）を利用した。この3Dプリンタの出力できる最大サイズは、225mm×145mm×140mmであり、造形精度は0.05mmから0.3mm、使用できる樹脂は、主にABS、PLAの2つである。PLA樹脂は、ABSに比べて収縮せず、歪みが少ない反面、表面加工や塗装しにくいという特徴がある。この3Dプリンタを利用して、上記で得られたポリゴンメッシュデータを印刷できるように修正し、STL形式で出力したもの（図9（a））を、PLA樹脂を使って印刷した。積層間隔は0.08mmで、印刷時間は約14時間である。印刷した結果を図9（b）に示す。印刷したものは、0.09m×0.07m、実際のSardgiin khiidの約1/1000スケールであり、形状を直感的に把握しやすいものとなった。

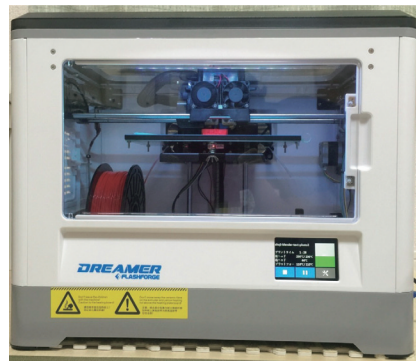
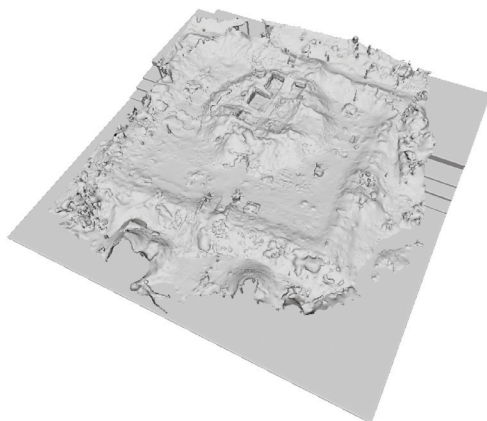


図8 利用した3Dプリンタ



(a)



(b)

図9 3Dプリンタの印刷結果

IV. おわりに

本稿では、モンゴル国にある17世紀の寺院跡Sardgiin khiidのデジタルアーカイブを行った結果について述べた。3次元レーザ計測装置では、計測に時間がかかるが、精度の高いデータを得ることができる。しかしながら、地上から計測したデータであるため、上部のレーザが届かない場所では欠落している。そのため、3次元レーザ計測装置から得られたデータに、空撮から得られたデータで補完することで、欠落がない計測データを得ることを検討する必要がある。

さらに、デジタルアーカイブの利活用の1つとして、3Dプリンタに印刷する方法について述べた。3Dプリンタを利用することで、寺院跡の構造情報を視覚的に提示することが可能となった。

今後は、デジタルアーカイブ方式のさらなる検討と、アーカイブデータを様々な形で活用していき、デジタルアーカイブした成果をインタラクティブな形式で公開や教育教材への開発を行っていく。さらに、モンゴル国の遺跡のデジタルアーカイブを可能な限り継続して行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS若手研究（B）25870970「時系列幾何情報を用いた大規模遺跡の3次元計測とデジタルアーカイブへの応用」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 正司哲朗、A.エンフトル、「モンゴル国における大型城郭都市のデジタルアーカイブ2012」、2012年調査報告書、奈良大学総合研究所・モンゴル科学アカデミー考古学研究所、2013.
- 2) 正司哲朗、A.エンフトル、「モンゴル国における大型城郭都市のデジタルアーカイブ2013」、2013年調査報告書、奈良大学総合研究所・モンゴル科学アカデミー考古学研究所、2014.
- 3) 正司哲朗、A.エンフトル、「モンゴル国における大型城郭都市のデジタルアーカイブ2014」、2014年調査報告書、奈良大学総合研究所・モンゴル科学アカデミー考古学研究所、2015.
- 4) 正司哲朗、A.エンフトル、「ヘルレンバルスホト1の仏塔デジタルアーカイブと応用」、日本モンゴル学会紀要、第46号、pp.49-60、2016.
- 5) 護雅夫、岡田英弘（編）、「中央ユーラシアの世界」、pp.378-379、山川出版社、1996年.
- 6) 小松久男（編）、「中央ユーラシア史」、p.258、山川出版社、2000年.
- 7) 宮脇淳子、「モンゴルの歴史 遊牧民の誕生からモンゴル国まで」、p.200、刀水書房、2004年.
- 8) Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva C. and Taubin G. , “The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction, ” *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5 ,No. 4, pp. 349～359,1999.
- 9) Michael Kazhdan, Matthew Bolitho , and Hugues Hoppe, “Poisson surface reconstruction, ” *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing* , pp.61-70,2006 .

Summary

Many important ruins still remain in Mongolia. However, not many of them have been restored or protected yet. Therefore, in order to preserve the ruins, there is an urgent need to digitize them because they are at risk of being lost. The purpose of the investigation is to digitize these ruins. This paper describes the result of digitizing Sardgiin khiid in Mongolia, which was a temple built by Zanabazar in the 17th century, using two methods. One is to measure the temple using a 3D scanning device, and the other is to measure the temple using sequential images acquired from a drone, which is a small unmanned aircraft with a camera. The method of using the 3D scanning device has very high accuracy, while it takes a good amount of time to measure. Meanwhile, the method of using the drone is less accurate than the 3D scanning device, while it takes hardly any time. As a result, the structure of Sardgiin khiid was clarified by digitizing it. Then, in order to show the result clearly, Sardgiin khiid was printed using a 3D printer.

【Key words】 3D Laser measurement, Image measurement, Drone, Zanabazar, 3D printer