

令和 2 年 7 月 12 日現在

機関番号：84602

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18520

研究課題名（和文）破壊された建造物・消滅した遺跡の写真の利用による3次元画像化に関わる研究

研究課題名（英文）Study on Reconstruction of Historical Monuments and Archaeological Sites Using 3D Images from Photographs

研究代表者

西藤 清秀（Saito, Kiyohide）

奈良県立橿原考古学研究所・その他部局等・特別職非常勤職員

研究者番号：80250372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ISISに爆破されたシリア・パルミラ遺跡ベル神殿を爆破前の2010年に計測した3次元画像に写真を合成して文様等仔細に表現した3次元画像を再現した。また1970年代の宅地開発等で消えた石光山古墳群や学校建設によって消滅した小山田古墳を1948年に米軍によって撮影された空中写真を使い破壊前の姿に3次元画像として再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在消滅した文化財を破壊される前の姿に再現した本研究の学術的・社会的意義は非常に高い。ISISに爆破されたパルミラのベル神殿を2010年大まかに3次元計測し、その画像に一般的な写真を貼り付け、画像細部の鮮明化を行った。これにより学術的には今はない神殿の寸法や文様について検証でき、今後この神殿の復元に応える資料を提供できる社会的意義は大きい。また1948年の米軍撮影の写真を用いた石光山古墳群や小山田古墳の破壊前の画像は、古墳の立地を墳丘だけでなく、周辺地形を含めた視点に立てるといふ学術的意義に加え、現在その地に住む住民や、学ぶ生徒にとって破壊前の地理的・歴史的環境を目にする社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This study focused on reconstruction of cultural heritages disappeared by a conflict, development and natural disaster etc. with 3D images using past photographs. The conflicts and natural disasters caused enormous distraction of important cultural heritage, also development in the high economic growth of the Showa(1970's) such as opening up land for housing and putting in place the infrastructure. In this study three 3D images were produced. The first image was a 3D image created in combination with 3D scanning image in 2010 by the Nara Archaeological Mission to Palmyra and general photos by tourists of Temple of Bel, Palmyra, Syria that was blasted by ISIS. The second image was a 3D image of a cluster of Sekouzan burial mounded tombs before destruction by development of housing in 1970's with aerial photos by the US military in 1948. The third image was a 3D image of Koyamada burial mounded tomb before the construction of a school on the mound.

研究分野：西アジア考古学

キーワード：3次元画像 破壊された文化財の再現 ベル神殿 米軍空中写真 石光山古墳群 小山田古墳 写真合成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昨今、世界では紛争、自然災害、開発によって多くの文化財や記念物が消え去っている。特に中東では ISIS によりシリア・パルミラ遺跡やイラク・ハトラ遺跡などの人類史上貴重な建造物が爆破・破壊される事態が起こっている。また、世界各地での地震や火山の噴火、異常気象がもたらす大雨などの自然災害は、多くの文化財や記念物の破壊を引き起こしている。さらに、社会発展の名のもとでニュータウン建設を含む過去の土地造成や社会インフラ整備などの大規模開発によっても多くの遺跡が消滅している。

文化財や記念物は、歴史上、その地に根ざした象徴的なシンボルとして時間を越えて受け継がれてきたが、上記要因によって一瞬のうちに消し去られ、人類に大きな精神的ダメージを負わせ、再興、再建できない文化財・記念物は数多く存在している。

2. 研究の目的

本研究は、紛争、自然災害、開発によって消え去った文化財や記念物を過去や現状の画像を合成し、それらを 3 次元的画像として再現することである。失われた人々の拠り所である文化財を取り戻すとともに遺跡の周辺環境の復元を含んだ新たな研究素材を提供することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は、写真測量法(Photogrammetry)の手法を用いて 2 種類の画像を基本として破壊された遺跡を 3 次元画像に再現した。

第 1 は、2015 年の夏に ISIS に爆破されたパルミラのベル神殿の再現である。2010 年、シリア古物博物館総局の依頼によりベル神殿境内のシリア調査発掘区の 3 次元計測を行ったが、調査区に計測の主力を置き、ベル神殿本体は、調査区との位置関係だけを念頭に計測したため、神殿の計測は概略的だった。しかし、神殿が爆破されたことによって我々が計測したデータが、世界で唯一無比のものとなった。この簡易的に計測した 3 次元画像の未計測箇所マッチングする 2 次元画像を補填し、画像表面精度を高め、3 次元画像を仕上げれば、今後の神殿の復元、再建、さらに神殿研究の一助となると考えている。

第 2 は、2009 年アジア航測(株)と共同で日本において初めて古墳の測量に航空レーザー計測(赤色立体地図)を導入し、その後、2014 年には日本屈指の山城である高取城を航空レーザー計測し、赤色立体地図化した。この画像に 1887 年頃に撮影された高取城内の 3 枚の写真から建物や石垣を切り取り合成した。これを契機として戦後の宅地化や社会インフラ整備によって破壊され、一部消滅した奈良県御所市石光山古墳群を 1948 年に米軍によって撮影された消滅する前の古墳群域の複数枚の空中写真を重ね合わせ、失われた古墳群の 3 次元画像化を図った。この復元は、1948 年当時の古墳群の立地や地理的環境を理解するのにも役立った。また同じ方法を用いて最近、発掘調査で新たに発見された日本最大級の方墳として話題となった奈良県高市郡明日香村小山田古墳の 3 次元画像による再現を行った。

4. 研究成果

a. パルミラ・ベル神殿

紀元後 32 年建造のベル神殿が ISIS によって爆破されたことは、世界的に大きな損失である。現在、シリアにおいても、ベル神殿の今後の対応の目処は全く立っていない。1990 年以来、シリア・パルミラ遺跡において調査研究を遂行してきた中で、調査地の 3 次元計測を 2004 年から 2010 年まで実施し、ベル神殿に関しては、シリア古物博物館総局の依頼により調査区とベル神殿の関係を示すことの必要性から、ベル神殿境内地のシリア調査区の簡易的な 3 次元計測を FARO 3 次元スキャナーで実施した。しかし、その神殿が 2015 年 ISIS によって爆破され、破壊されてしまった。そのため、我々が計測した簡易的な 3 次元計測データは、世界で現存する唯一無比のものになってしまった。この時点で、この簡易的に計測した 3 次元画像の未計測箇所の補填と精度を高めることによってベル神殿復元もしくは再建、さらに神殿研究の一助としたいと考えるに至った。

昨今では 2 次元画像の 3 次元画像化は、無料ソフトウェアを含め多くのソフトウェアで画像の作成が行われているが、それらソフトウェアで同一被写体を 3 次元化し、それぞれを比較すると全く一致しないのが現状である。それでは文化財等の復元目的は達成できないため、精度の高い画像の入手と新たなマッチングの手法が非常に重要となる。このような手法は、考古学や文化財関係では全く実施されておらず、2018 年より実際に計測を行った研究協力者と手法を模索した。一般的に被写体がオーバーラップした 2 次元画像を複数枚組み合わせることにより 3 次元画像の再生が可能と言われるが、画像精度が低い場合にはマッチングできないことがわかっている。また、細部だけの 3 次元化は歪みも少ないが、ベル神殿のような大規模な建造物をマッチングによって組み上げていくことは非常に難しい。最近、NHK や TBS が世界遺産関連の番組制作に際してベル神殿を撮影した映像がハイビジョンカメラで撮影されたことが判明し、画像の提供受け、マッチングを行ったが、上手くマッチングができた画像はなかった。また古代オリエント博物館、ワルシャワ大学考古学研究所、ドイツ考古学研究所、フランス考古学研究所などが所有する写真の提供を受け、マッチングを行ったが、やはり上手くいかなかった。結局、マッチングに使用できた画像は、Web 上からフリーで入手できた主に観光客等が撮影した画像だった。こ

これらの画像から神殿外壁・内壁表面のテクスチャーを緻密にし(図1)、さらに神殿入口に設置されていた梁石の表面を飾っているレリーフを仔細に再現できた(図2)。

2019年8月、爆破された神殿の遺存する基壇や入口の門のうち瓦礫の堆積から免れた箇所を写真測量法(Photogrammetry)の手法を用いて丁寧にシリア古物博物館総局の職員によって撮影してもらい、入手する機会を得た。そして、それらの画像のマッチングを行い、基壇の一部や門柱表面のテクスチャー解像度を高めることができた(図3)。しかし、今回の研究で出来上がった画像は、なお未完成であるが、これ以上に神殿の3次元画像の欠落部位の補填や神殿表面の解像度を高めることは非常に困難であることも、今回の研究でわかった。この研究成果は、今後のベル神殿の復興や再建に役立てもらうためにシリア古物博物館総局に譲渡した。



図1 3次元計測後に写真を合成した3次元画像



図2 梁のレリーフの解像度を上げた画像



図3 門柱の表面テクスチャーの解像度を上げた画像

b. 米軍空中写真からの破壊された古墳・古墳群の3次元画像化

第二次世界大戦直後の1946～1948年、米軍は戦後の日本を統治するために鉄道沿線と主要な平野を対象として縮尺約1/10,000、また同時に全国を縮尺約1/40,000で空中写真を撮影していた。現在、それらの空中写真は国土地理院が保管し、一般公開されている。本研究では、米軍が1947年・1948年に撮影した空中写真を活用し、昭和の高度成長期の宅地開発や道路・鉄道建設等による社会インフラ整備によって消失した古墳・古墳群の消失前の姿を3次元画像化して、消失する前の古墳・古墳群とその周辺地形を含めた新たな古墳群像を提供することを考えた。その例として奈良県御所市西松本古墳群、石光山古墳群、さらに、近年、発掘調査によって新たに発見された日本最大級の方墳である明日香村小山田古墳を取り上げた。

米軍が撮影した空中写真は、高さや位置情報を計測するために、予め複数の写真が重なり合うように撮影を行っている。従来は、三角測量手法により、空中写真と地上座標を技術者が観測し、撮影時のカメラ位置や姿勢を計算で求め、対象物の位置や形状を地形図として再現するが、本研究では最新の写真測量技術であるSfM(Structure from Motion)技術を利用し、画像化された空中写真を複数枚用いて、画像のテクスチャーから自動的に撮影位置と撮影対象物の3次元形状を推定した。そして、得られた空中写真画像間の幾何学的位置をもとに同一地点を画像マッチングによって抽出し、3次元点群データを生成した。次にその点群からワイヤーフレームモデルを構築した後、空中写真画像を投影してマッピングし、3次元モデルデータとして可視化した。

1. 西松本古墳群

奈良盆地の南西部、御所市西松本(現在:元町)に葛城山から派生する東西に延びる2丘陵が独立丘陵的に存在し、北の丘陵には石光山古墳群、南の丘陵には10基ほどの西松本古墳群が営まれていた。西松本古墳群は、1947年(昭和22年)秋以後、食糧増産を目的とした開墾が著しく、同年12月に開墾によって破壊される前に奈良県史跡名勝天然記念物調査委員会が、3基の古墳を発掘した。この発掘の結果は、昭和34年の報告書に記載されている(日色1959)。しかし、仔細な古墳の位置図は極めて小さく(図1)、写真の掲載もないことから、3基の古墳の立地状況は明確ではなく、他にも古墳が存在したと思われるが、その位置は全く不明である。さらに古墳の調査後、1963年(昭和38年)に丘陵東半部が削平され、1967年(昭和42年)には丘陵全体が更地化され、住宅地となり、全ての古墳が消滅した。

このような古墳群を視覚化し再現するため、報告書の古墳の位置図・記述と米軍の1948年撮影の空中写真から3次元化した画像を比較検討し、調査された3基の古墳の位置を検証した。報告書の古墳の位置を1948年の米軍空中写真の3次元画像に書き込み、丘陵上の古墳の立地環境が復元できた(図5)。また、3次元画像として再現した丘陵上には他に墳丘を有する古墳の存在も見ることができた。



図4 報告書記載の西松本の3基の古墳位置図
(の北側の丘陵が石光山古墳群)

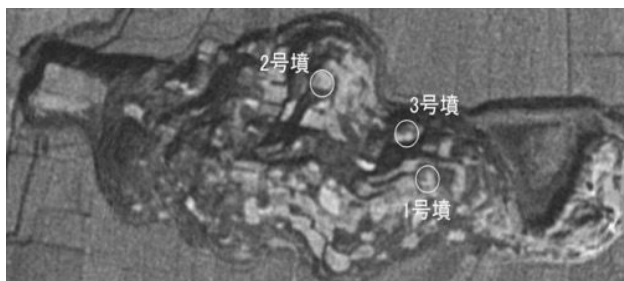


図5 3次元画像化した米軍空中写真上に認識される1947年に調査の3基の古墳

II. 石光山古墳群

石光山古墳群は、西松本古墳群の丘陵の北側の丘陵に存在する100基余りからなる古墳群である。1972年(昭和47年)と1974年の2次にわたって大規模な住宅開発に伴う発掘調査が実施された(奈良県立橿原考古学研究所編1976)。1974年以降、丘陵西側半分が住宅化され、現在、多くの古墳が存在した面影はない(図6)。本研究で1948年の米軍空中写真を3次元画像にしたところ、消滅した古墳1基1基の位置を明確に確認できた(図7)。さらに現存する古墳群東半部の航空レーザー計測を行い、その箇所を赤色立体地図化を図り、米軍撮影空中写真を3次元化した画像に被せ、石光山古墳群全体の3次元画像を作成した(図8)。これにより、古墳群内の古墳1基1基を3次的に見ることができ、古墳の群構成が視覚的に理解しやすくなった。

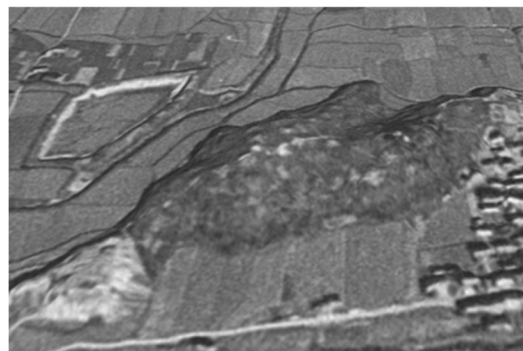


図6 現況の石光山古墳群(中央樹相部が古墳群東半部) 図7 1948年撮影空中写真を3次元画像化した石光山古墳群
Google Earthより

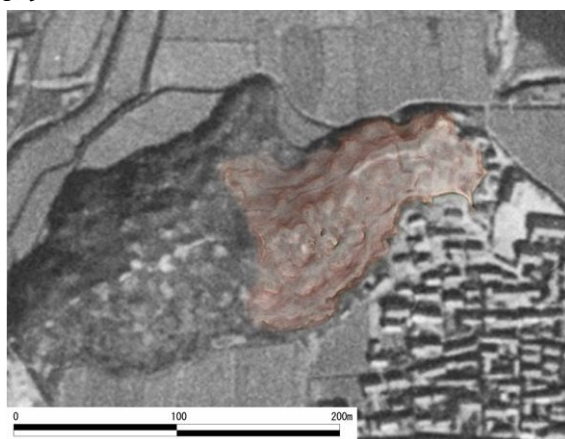


図8 3次元化した1948年米軍撮影空中写真に2020年計測した赤色立体地図をオーバーラップした石光山古墳群画像

III. 明日香村小山田古墳

小山田古墳は、2016年学校教室棟改築事業に伴う調査により発見された新たな飛鳥時代の古墳であり、一辺70mを超える方墳である(奈良県立橿原考古学研究所2015)。それ以後継続的にこの古墳の埋葬施設や墳丘に関する情報入手のために調査が行われ、石室の存在は明らかとなったが、墳丘に関する情報はあまり得られていない。この古墳が立地する場所は、早くから削平され、1966年に奈良県立明日香養護学校が建設されることになり、さらなる削平が加えられ、古墳の存在は発掘調査まで全く知られていなかった(図9)。本研究ではこの古墳の墳丘の遺存

状況を確認するため 1947 年と 1948 年撮影の米軍空中写真を 3 次元画像化した。3 次元画像化することによって小山田古墳の墳丘を含めた周辺環境をより鮮明に再現できた(図 10)。さらに、2016 年以降の発掘調査で得られた墳丘を巡る濠や石室の座標数値情報を座標数値を入れた 3 次元化した画像に重ね合わせて墳丘規模を推定すると一辺約 76m となった。



図 9 現況の小山田古墳(赤丸内)(Google earth より)

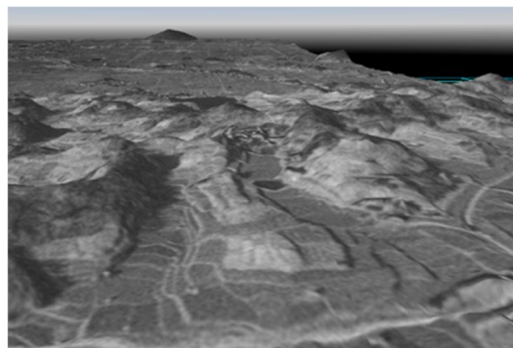


図 10 3次元画像化した1948年米軍撮影の小山田古墳(中央やや下)の空中写真

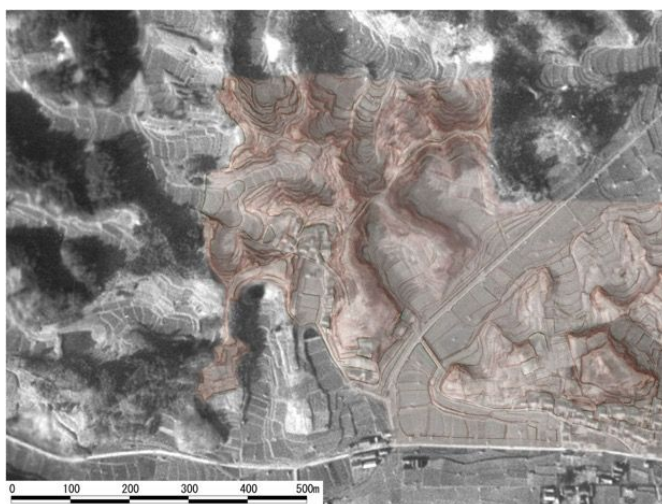


図 11 3次元化した1948年米軍撮影空中写真に2020年計測した赤色立体地図をオーバーラップした小山田古墳画像

c. まとめ

本研究は、紛争、自然災害、開発によって消え去った文化財や記念物を過去や現状の画像を合成し、それらを 3 次元的画像として再現することであり、失われた人々の拠り所である文化財を取り戻すとともに遺跡の周辺環境の復元を含んだ新たな研究素材を提供することを目的とした。その目的達成のために写真測量法(Photogrammetry)の手法を用いて 2 種類の画像を基本として破壊された遺跡を 3 次元画像に再現した。

第 1 点は、2010 年に FARO 3 次元スキャナーによって簡略的な 3 次元計測していたシリア・パルミラ遺跡のベル神殿が、2015 年 ISIS によって爆破されたため、計測した画像の欠損部の補填と画像表面の解像度アップを図った。そのためにさまざまな大学、組織に依頼し、過去の写真や動画を入手し、画像のマッチングを行った結果、画像精度が異なるために、それほど多くマッチングできる画像を入手できなかった。しかし、Web サイトの利用により一部欠損箇所の補填や壁表面や文様の解像度を上げることができ、当初の 3 次元画像に比べ、爆破前の質感を得ることができた。

第 2 点は、昭和の高度成長期、全国で宅地開発や道路・鉄道建設等による社会インフラ整備が盛んに行われ、多くの古墳・古墳群が消失した。その姿は二度と見ることはできないと考えられていたが、第二次世界大戦後、1940 年代後半に、米軍によって日本の各地で空中写真が撮影され、その中には消失する前の古墳・古墳群の姿が明瞭に映し出されていた。そしてその写真を活用し 3 次元画像化した結果、消失する前の古墳・古墳群とその周辺地形の新たな姿を再現することができた。今後、3 次元化した画像に座標等の数値データを与え、個々の古墳の規模を明確化することによって、消失した古墳や古墳群を再考する材料となると考えている。

参考文献

- 日色四郎 1959 「御所市西松本の古墳」『奈良県史跡名勝天然記念物調査抄報 第 11 輯』pp.1-8 奈良県教育委員会
 奈良県立橿原考古学研究所編 1976 『葛城・石光山古墳群』奈良県史跡名勝天然記念物調査報告第 31 冊、奈良県教育委員会。
 奈良県立橿原考古学研究所 2015 『小山田遺跡第 5・6 次調査 現地説明会資料』

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|------------------|
| 1. 著者名 西藤清秀・久保学 | 4. 巻 35 |
| 2. 論文標題 1940年代の米軍空中写真の3次元化による古墳・古墳群 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 第35回日本文化財科学会 | 6. 最初と最後の頁 21 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Saito, Kiyohide | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 The Future of Palmyrene cultural Heritage | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings & Report of the Conference "Saving the Syrian Cultural Heritage for the Next Generation: Palmyra, A Message from Nara" July 11- 14, 2017 | 6. 最初と最後の頁 85-89 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 西藤清秀 | 4. 巻 141 |
| 2. 論文標題 シリア・パルミラの現状と復興に向けた取り組み | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 季刊考古学 | 6. 最初と最後の頁 87-90 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 西藤清秀 | 4. 巻 140 |
| 2. 論文標題 3次元航空レーザー測量とその成果 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 季刊考古学 | 6. 最初と最後の頁 54-57 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 西藤清秀 | 4. 巻 140 |
| 2. 論文標題 パルミラでの3次元計測プロジェクト | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 季刊考古学 | 6. 最初と最後の頁 86-88 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|------------------|
| 1. 著者名 Saito, Kiyohide | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 The Future of Palmyrene Cultural Heritage | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Saving the Syrian Cultural Heritage for the Next Generation : Palmyra, Program and Abstract | 6. 最初と最後の頁 70 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 西藤清秀 | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 パルミラ遺跡の将来 | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 公開シンポジウム最新科学による西アジア文化遺産の調査と保護 | 6. 最初と最後の頁 17-23 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kiyohide Saito |
| 2. 発表標題 Japanese archaeological works in the past and for the future in Palmyra |
| 3. 学会等名 International Conference of Lausanne on Palmyra, University of Lausanne |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 西藤清秀・久保学 |
| 2. 発表標題 1940年代の米軍空中写真の3次元化による古墳・古墳群 |
| 3. 学会等名 第35回日本文化財科学会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 西藤清秀 |
| 2. 発表標題 バルミラ遺跡の将来 |
| 3. 学会等名 日本西アジア考古学会公開シンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Saito, Kiyohide |
| 2. 発表標題 The Future of Palmyrene Cultural Heritage |
| 3. 学会等名 The Silk Road Friendship Project 2017: Saving the Syrian Cull Heritage for the Next Generation |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Saito, Kiyohide |
| 2. 発表標題 3D Laser Scanning-Some Specimens at Palmyra, Syria |
| 3. 学会等名 Workshop: Preparing the manuals for the protection of Syrian cultural heritage |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Saito Kiyohide and Takumi Sugiyama (ed.) | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 Taiyodo Co. Ltd. | 5. 総ページ数 221 |
| 3. 書名 Proceedings & Report of the Conference "Saving the Syrian Cultural Heritage for the Next Generation: Palmyra, A Message from Nara" July 11-14, 2017 | |

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 西藤清秀、安倍雅史、間舎裕生（編） | 4. 発行年 2017年 |
| 2. 出版社 雄山閣 | 5. 総ページ数 202 |
| 3. 書名 世界遺産パルミラ 破壊の現場から | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|------------------------------|-----------------------|---------------|
| 研究協力者 | 妻鳥 奨 (Mendori ShouId) | | ベル神殿の3次元化画像化 |
| 研究協力者 | 久保 学 (Kubo Manabu) | | 米軍空中写真の3次元画像化 |