

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：34302

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05631・19K20837

研究課題名（和文）地震多発国メキシコにおけるピラミッドの耐久性：建築資材の強度分析と内部構造の検証

研究課題名（英文）Earthquakes and the Durability of Pyramids in Ancient Mexico: Examining the Strength of Construction Materials and Techniques

研究代表者

ロペス フリエタ（Lopez, Julieta）

京都外国語大学・京都外国語大学ラテンアメリカ研究所・客員研究員

研究者番号：80830067

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：現在までアドベに関する研究は、素材自体ではなく加工方法や形状の違いに研究の主眼が置かれていた。しかし、今回の科学分析により、少なくとも3グループに分けることができた。これらは強度や耐久性によっても同様にグループ化できると考えられる。さらに、今日までレンガの製造は、植民地時代以降と考えられてきたが、紀元後100年ごろトラランカレカで開始されていた。これは研究史上初めての報告である。一方、ピラミッドに壁画を描きやすくするため、外装の技術も発展していたことが分かった。この上、建築設計や建築材の改良は、ポポカテペトル火山の大噴火と関連し、建築におけるイノベーションが起こっていたことが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在まで建築資材に関する研究は、これらを基に建造されたピラミッドの耐震性や耐久性を考慮してこなかった。本課題研究により、古代人はアドベの強度や外壁への塗装の効果を考慮し改良を行っていたことが判明した。本課題研究で提示した方法論やデータは、今後この方面の研究の指標になると考えられる。一方、この改良は、火山による噴火と大きく関連していたという具体的な仮説を提示するに至った。これは、研究開始時に提示していた「建築資材や設計の改良はイデオロギーに関連する」との考えを補強するため、重要な知見を提供できたと考える。

研究成果の概要（英文）：Until now, the previous studies about adobes had not focused on their chemical composition but on the difference in production and shape. However, the analysis of this project has allowed us to divide into at least three groups: it is considered that these can be similarly grouped according to strength and durability. Moreover, until today the bricks thought to be manufactured from the colonial era, it began in Tlalancateca around 100 AD. This is the first report in the Mesoamerican studies. On the other hand, it was found that the coating technics were also developed to make it easier to draw murals on the pyramid. In addition, it was revealed that improvements in architectural design and building materials were associated with the eruption of the Popocatepetl volcano, leading to architectural innovation.

研究分野：考古科学

キーワード：メソアメリカ 世界観 ピラミッド 耐震性 耐久性 トランカレカ 考古科学分析 建築資材

1. 研究開始当初の背景

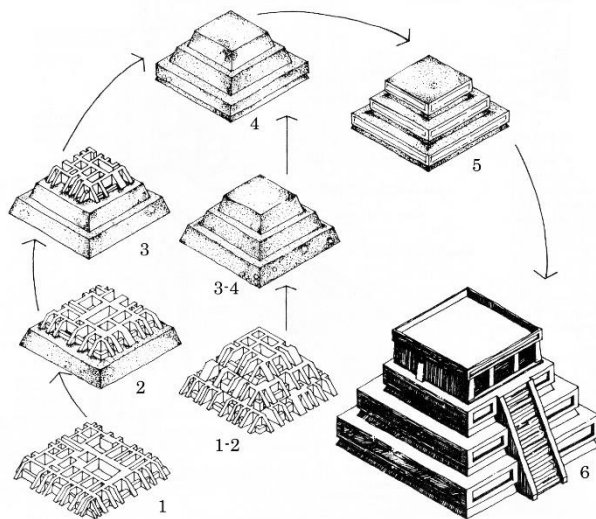


図1 部屋状補強土壁工法を用いたピラミッド建設の一例（Morelos 1993 より転載）



図2 トラランカレカ遺跡で検出された部屋状補強土壁工法（南東から撮影）

に利用した特別な舞台であり、宮殿や住居とは異なり人々は住まず、建造物への耐久・耐震構造設計は重要ではなかったであろうという先入観にあると考えられる。しかし、研究代表者はピラミッド型モニュメント建造物への耐久・耐震構造設計は非常に重要であったと捉えている。それは、古代人にとって、安全上の問題点からではなく、イデオロギーの観点から考察する必要があると考えるからである。

メキシコ中央高原の各遺跡に存在するモニュメント建造物は、天上界・地上界・地下界を繋ぐ「聖なる山」のレプリカとして機能しており、この崩落は社会秩序の崩壊に至ると考えられていた。さらに、モニュメント建造物は特定の周期ごとに古い時代の建造物を覆い（建造物の死）、新たに増築された（建造物の再生）。これは、経済基盤の発展により達成可能であったと解釈されてきたが、原動力にはモニュメント建造物の死によって獲得される、新たな活力を伴った再生が、人間社会の安寧を約束するという思想と密接に関連している（López y López 2009）。

本研究は、ピラミッド型モニュメント建造物に使用された建築資材や内部構造への分析が、古代社会の経済的・政治的な側面のみを理解するデータとなるのではなく、イデオロギーの一端を解明するものではないかという学術的「問い」から出発した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ピラミッド型モニュメント建造物に利用されたアドベや土壁の成分組成を理解し、建造物の設計には耐久性ならびに耐震性という側面が考慮されていたことを検証することにあった。現在までメキシコ中央高原におけるピラミッド型建造物の巨大化は、政治・経済発展に支えられた大量の労働力と建築材の獲得が要因となり、達成可能になったとの考えが主流であった。しかし、この解釈は一般論であり、学術的に考察され導き出されたものであるとは言い難い。研究代表者は、建築資材の耐久性を求めた技術開発や、これを基に構成された内部構造の設計改良という試行錯誤の結果であるとの仮説を立て研究を実施した。

古代メソアメリカ文明のピラミッド型モニュメント建造物に関する研究は、複雑化社会への発展を理解する上で、非常に重要であると認識されている。そのため、様々な観点から分析が行われている。特に、機能や帰属時期の推測、建築様式の特徴と変化、建築資材の同定、必要労働力の推定、建築作業過程の復元についての研究が盛んである。これに加え、メキシコ中央高原では、巨大建造物の盛り土にアドベ（日干しレンガ）を利用する事例が多いため、この形状や大きさの規格化が専門集団の登場や中央集権化の過程を示すデータとして扱われている。また、内部構造についての研究では、主にアドベで部屋状の壁を築き、その内部を火山岩や土砂で埋める工法が採用されていたと理解されている（図1・2）。さらに、近年の考古科学分析の発展により、各建築資材がどの地域から運ばれて来たのかの研究も実施されている（e.g., Daneels 2015）。

一方で、建造物の耐久性評価に関する研究は進んでいない。確かに、基壇部を徐々に建造する部屋状補強土壁工法により、構造物の固定荷重を分散させ、耐震性を確保していると考えられているが（Villalobos 2010）、アドベを始めとする建築資材やこれらを基に設計された建造物の耐久性・耐震性に焦点を当てた研究は現在まで実施されてこなかった。

この背景の根本には、我々研究者に古代人が耐久性や耐震性を考慮してピラミッド型モニュメント建造物を設計していたという考えが希薄である点にある。その理由は、モニュメント建造物は、ある特定の為政者が儀礼を行う際

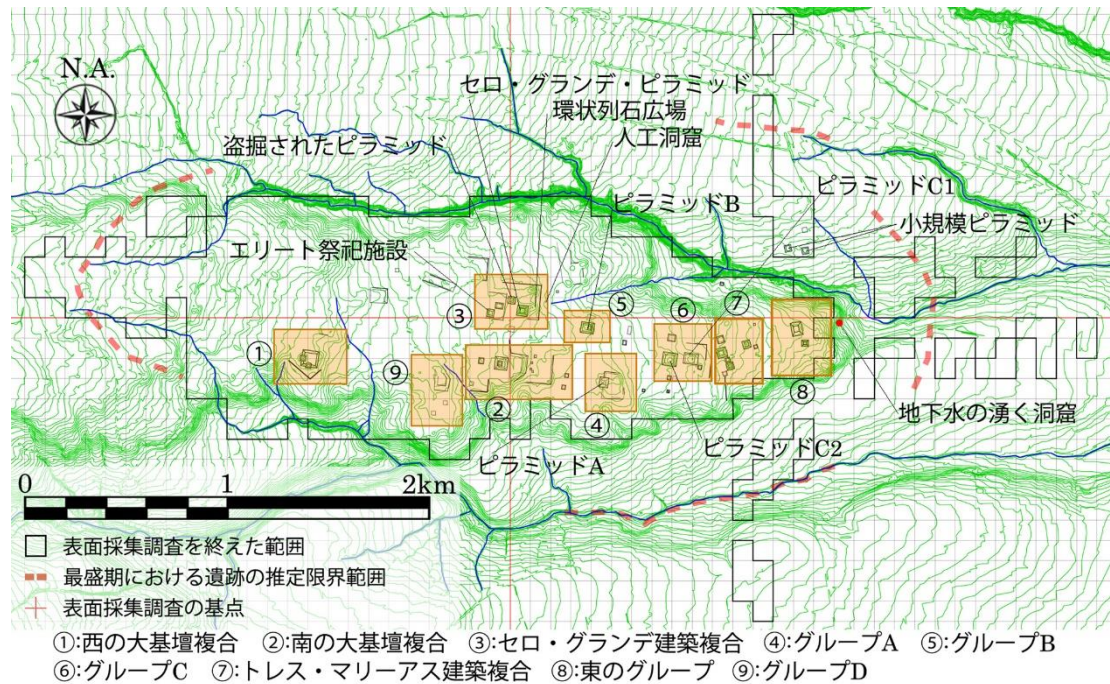


図3 トラランカレカ遺跡の平面図と各建築複合の名称

3. 研究の方法

本研究の目的達成に向け、以下のように4段階の調査を行った。

- (1) 2018年9月～2019年6月（遺物の分析）：メキシコ合衆国プエブラ州に位置するトラランカレカ遺跡（前800年～後300年；図3）から出土したアドベと土壁（合計34点）の肉眼分析、ならびに科学分析をメキシコ国立自治大学（UNAM）の物理学研究所（IF）で行った。これらの遺物は、村上達也氏（テュレーン大学）と嘉幡茂氏（京都外国語大学）とを共同団長とする「トラランカレカ考古学プロジェクト（2012年～2020年現在）」によって回収されたものである。科学分析では、実体顕微鏡分析、X線回析（XRD）、蛍光X線（XRF）、走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）、フーリエ変換赤外分光光度計・全反射測定法（FTIR-ATR）を基に、アドベや土壁の組成を詳細に把握した。これらはデータベース化し、建築資材がどこから搬入されたものであるのか、さらに通時的にアドベや土壁の粘土の組成変化を理解するために利用する。
- (2) 2019年7・8月（土層観察とトレンチ発掘調査）：トラランカレカ遺跡の「グループD」の「大基壇D（約150m×約80×約20m）」で土層観察とトレンチ発掘調査を行った（図4）。目的は、部屋状補強土壁の単位や、建築資材の通時的変化を理解することにあった。
- (3) (2)から回収されたアドベや土壁を肉眼分析し、ここから5点選びIFで熱重量分析（TGA）を実施した。当初、この分析の実施予定はなかったが以下の理由により実行することにした。当遺跡で出土したアドベには、(1)の分析結果（組成の相違性）から、少なくとも3グループに分けられることが分かったが、さらに、日干しではなく、焼成された可能性のある「アドベ」を発見したためである。
- (4) 上記の分析から得られたデータの総合解釈。

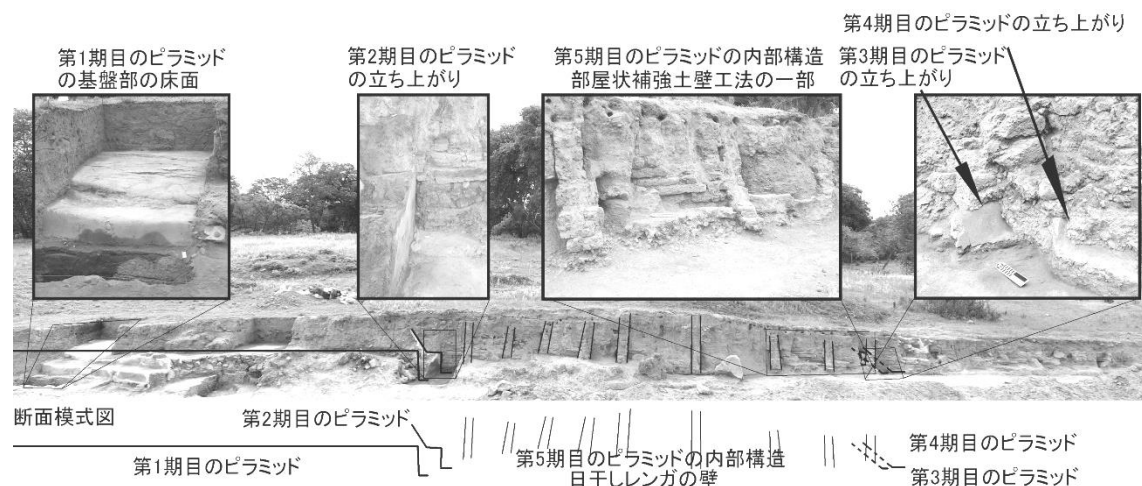


図4 「大基壇D」の土層観察によって確認された建築過程

4. 研究成果

本課題研究からの成果を4点挙げる事ができる。

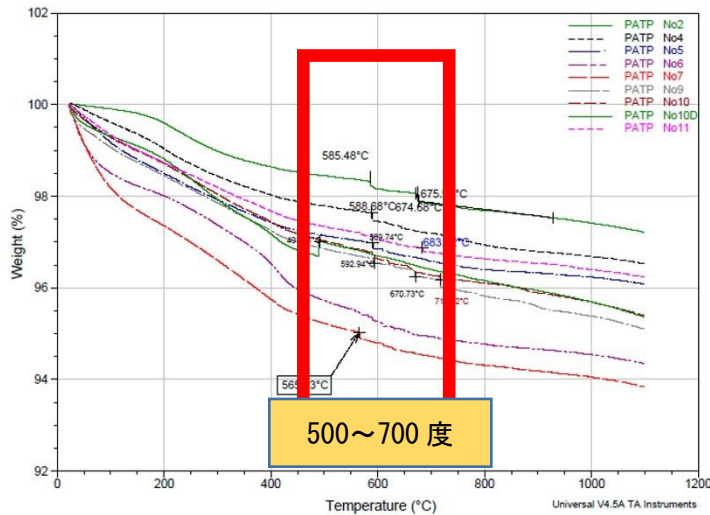


図5 TGAによるデータ解析結果

設置され、弱いアドベはそれ以外の場所から検出される傾向にあるからである。今後の課題として、コンテキストが明確である多くのサンプル調査を実施し、さらに、コンシステンシー限界の測定などの科学分析を行う必要がある。

- (2) レンガの登場：現在まで、レンガは植民地時代（後 1521 年以降）に製造され始めると考えられてきた。今回の熱重量分析によって、トラランカレカ遺跡で出土するアドベは、500 度から 700 度の間で焼成されたものであったことが判明した（図 5）。この発見は、メソアメリカ文明研究においてはじめての事例であり極めて重要である。サンプル数が 5 点であったため、建造物のどの地点で集中的に利用されたのか、焼成が必要であった理由などについて判明していないが、建築資材に関連する研究テーマに大きな貢献をもたらすと考えられる。さらに、このレンガの登場は、紀元後約 100 年に開始されることが、C14 年代測定法の結果から判明した。これに関して(4)で詳述する。
- (3) 土壁の加工過程と素材：「3 研究の方法」の(1)で行った分析により、ピラミッドの外壁は、少なくとも組成の異なる二層の粘土によって加工されていたことが判明した（図 6 の 2 と 3）。さらに、図 6 の 1 には、珪藻が多く含まれていたことも分かった（図 7）。現在まで、土壁の製作過程に注目した研究はなく、研究対象は壁面の壁面に向かっていった。今回の発見により、次のことが理解できた。トラランカレカ遺跡では、のちの古典期（後 200~600 年）では一般的となる漆喰の使用は限られていた。漆喰は主にピラミッドの外壁に使用され、壁面を描きやすくするキャンバスとして利用されたと考えられる。メキシコ中央高原では漆喰を製造するには石灰岩を獲得し、燃焼させる必要があったため、非常に貴重な資源であった。先行社会であるトラランカレカでは、大規模に製造できる社会段階になかったと思われる。このため、ピラミッドに壁面を描くには、別の方法が採用されていたと推測できる。その方法として、より細かな粒子で外壁表面を造り、その後キャンバスとして利用できる珪藻を含んだ粘土層で塗装（上塗り）を完了させたと考えられる。



図6 ピラミッドの外壁に利用された土壁（1：磨かれた外面；2：水鍛され粒子が細かな粘土；3：粗い粘土）

(1) アドベの種類の違い：現在までのアドベに関する研究は、これが手捏ねあるいは鋳型で作られたものであるのか、アドベの大きさは規格化されているのかなど、素材ではなく加工方法や形状の違いに研究の主眼が置かれていた。それは、これらのデータから社会の発展過程や集権化を考察する研究が一般的であったことによる。今回の科学分析により、少なくとも3つのグループに分けることができた。恐らくこれらは強度や耐久度によっても同様にグループ化できると考えられる。それは、アドベが置かれていたコンテキストを考慮した結果、より強度の高いと考えられるアドベは、建造物の固定荷重がかかる箇所に

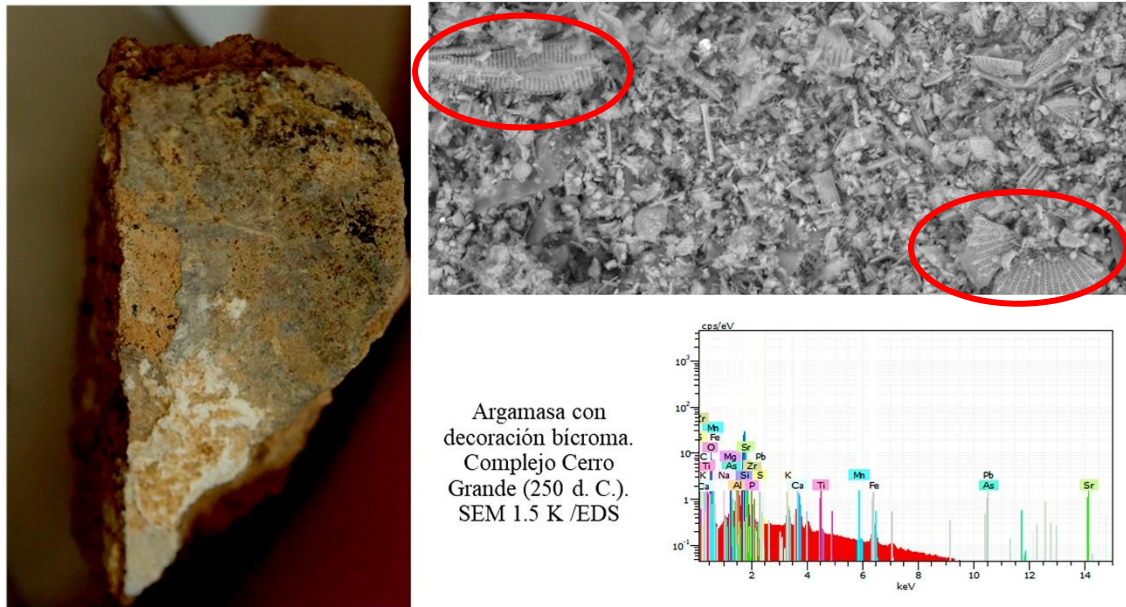


図7 珪藻が確認された土壁の表面

- (4) ピラミッドに認められる建築技術の変遷と火山の噴火：「大基壇 D」で行った土層観察とトレンチ発掘調査から、大きな成果を得ることができた。この大基壇は2019年2月に農耕地として利用するため重機によって南北に半裁された。この断面の精査によって、第5期目のピラミッドの内部構造には、大規模に部屋状補強土壁工法が利用されていたことが判明した(図4参照)。この他、断面観察から、第5期目のピラミッドは、第3・4期目のピラミッドの盛り土を基礎として再利用せず、意図的に破壊してアドベの壁を配置していた(後100年頃)。研究代表者は、この部屋状補強土壁工法の大規模な導入とアドベの品質改良(レンガの登場)から、内部構造の設計と実践に革新的な変化があったと考えている。

トラランカレカ社会は、ポポカテペトル火山の大噴火後(後70年)、社会再編の主要拠点として発展する。この革新的な技術は、古参住民と被災民や社会の再編に伴って移住してきた人々の知識や技術の融合の結果、開発されたのではないかと推測している。さらに、この原動力には神々の怒りを鎮める課題があり、これを克服するために、最新のテクノロジー(部屋状補強土壁工法の導入とアドベの品質改良)を用いて耐震性を備えたピラミッド建造の開発が急がれたのではないかと明確な仮説の提示を示すことができた。

建築資材や設計の改良はイデオロギーに関連するとの考えから研究を開始した。その際、改良を行う理由やその時期そしてイデオロギーとの関連など不明な点が多かった。本課題研究を通して、建築におけるイノベーションと考えられる時期が、火山の大噴火と呼応し、また、それが当時の世界観と大きく関連していると指摘することができた。今後は、より多くのサンプルを分析し、体系的にこの仮説を実証していく。

<引用文献>

- ① Daneels, Annick 2015 Los sistemas constructivos de tierra en el México prehispánico. *SIACOT* 15: 1-13.
- ② López A., Alfredo, y L. López Luján 2009 *Monte Sagrado. Templo Mayor*. UNAM, México, D. F.
- ③ Morelos G., Noel 1993 *Proceso de Producción de Espacios y Estructuras en Teotihuacán*. INAH, México, D. F.
- ④ Villalobos, Alejandro 2010 Las pirámides: Procesos de edificación. *Arqueología Mexicana* XVII (101): 56-63.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 嘉幡茂, ロベス J. フリエタ M., 荒木昂大, 村上達也	4. 巻 22
2. 論文標題 水の神と火の神 - 割って入った神の出現による社会の変化 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 古代アメリカ	6. 最初と最後の頁 33-44
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 有
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 Lopez Juarez, Julieta M., y Tatsuya Murakami	4. 巻 -
2. 論文標題 Las relaciones de poder vistas a traves de los materiales lapidarios de piedra verde y pizarra de Teotihuacan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Teopancazco como centro de barrio multietnico de Teotihuacan. Los sectores funcionales y el intercambio a larga distancia	6. 最初と最後の頁 469-496
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 有
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 Murakami, Tatsuya, Shigeru Kabata, Julieta M. Lopez J., and Paige Phillips	4. 巻 43
2. 論文標題 A Multi-Method Approach to Reconstructing Occupational History and Activity Areas: A Case Study at the Formative Site of Tlalancaleca, Central Mexico	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Field Archaeology	6. 最初と最後の頁 634-654
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 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Lopez Juarez, Julieta M., Shigeru Kabata, y Tatsuya Murakami	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 La arquitectura de Tlalancaleca, Puebla. Definiendo la tradicion constructiva del Formativo en el centro de Mexico	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 La Arquitectura Mesoamericana de Tierra	6. 最初と最後の頁 -
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 有
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8件（うち招待講演 3件／うち国際学会 5件）

1．発表者名 嘉幡茂，フリエタ・ロベス，村上達也
2．発表標題 なぜピラミッドは倒壊しないのか：観念の変容による技術革新の誕生
3．学会等名 古代アメリカ学会 第24回研究大会
4．発表年 2019年

1．発表者名 Tastuya Murakami, Diego Matadamas Gomora, Shigeru Kabata, Julieta Lopez Juarez
2．発表標題 Early Urbanism and Intermediate-Scale Social Interaction in Formative Central Mexico: Ritual Practice and Socio-Spatial Organization at Tlalancaleca, Puebla
3．学会等名 Society for American Archaeology (国際学会)
4．発表年 2019年

1．発表者名 Julieta Lopez Juarez
2．発表標題 Analisis y caracterizacion de la arquitectura de tierra de Tlalancaleca, Puebla
3．学会等名 VII Simposio Latinoamericano de Fisica y Química en Arqueología, Arte y Conservacion del Patrimonio Cultural (招待講演) (国際学会)
4．発表年 2019年

1．発表者名 Julieta Lopez Juarez
2．発表標題 La arquitectura de Tlalancaleca, Puebla. Definiendo la tradicion constructiva del Formativo en el centro de Mexico
3．学会等名 Coloquio de Doctorado en Estudios Mesoamericanos, UNAM (招待講演)
4．発表年 2019年

1. 発表者名 Lopez Juarez, Julieta M., y Shigeru Kabata
2. 発表標題 La tecnologia arquitectonica y su materializacion en Tlalancaleca, Puebla
3. 学会等名 56th Congreso Internacional de Americanistas (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嘉幡茂 ロベス・フリエタ
2. 発表標題 なぜ古代人はピラミッドを造ったか：メキシコ中央高原における都市の盛衰
3. 学会等名 南山大学シンポジウム「遺跡に見る在来知 -モニュメント、自然環境、インターアクション」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Murakami, Tatsuya, Shigeru Kabata, and Julieta Lopez
2. 発表標題 Changing Urban Networks in Formative Central Mexico: A View from Tlalancaleca, Puebla
3. 学会等名 83rd Society for American Archaeology Annual Meeting. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lopez, Julieta, Shigeru Kabata, Tatsuya Murakami, and Manuel Ramirez
2. 発表標題 Monumental Architecture in Central Mexico during the Terminal Formative: New
3. 学会等名 83rd Society for American Archaeology Annual Meeting. (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----