

ペルー共和国・マチュピチュ遺跡の石造遺構の 保存に関する調査研究

「太陽の神殿」の劣化と保存修復に関する調査と現地実験

西浦忠輝* 伊藤淳志*** 西形達明**** 藤田晴啓**** 小野勇***** 森井順之*****
沢田正昭***** フェルナンド・アステテ***** ピエダット・チャンピ*****

Study on Conservation of Remaining Structure in Machu Picchu Site, Peru:

Investigation and Experimental Study for the Conservation of the
“Temple of the Sun”

Tadateru NISHIURA* Atsushi ITO*** Tatsuaki NISHIGATA**** Haruhiro FUJITA**** Isamu ONO*****
Masayuki MORII***** Masaaki SAWADA***** Fernando Astete***** Piedat Champi*****

1 研究開始の背景

マチュピチュ (Machu Picchu) 遺跡はペルーのウルバンバ谷に沿う高い山の尾根 (標高約2400m) に位置する、よく遺されたインカ帝国 (15世紀中頃) の遺跡である (Fig. 1)。山裾からはその存在を確認できず、「空中都市」とも呼ばれる。1911年にアメリカの歴史学者ハイラム・ビンガムによって発見され、発掘調査が行われてその全貌を現し、現在はペルー政府文化省によって保護、管理されている。遺跡には3mずつ上がる段々畑が40段あり、3000段の階段でつながっている。遺跡の面積は約13km²で、約200の石造建造物遺構がある。熱帯山岳樹林帯の中央にあり、植物は多様性に富んでいる。その特色ゆえに1983年にユネスコの世界遺産 (複合遺産) に登録された。いまだに多くの謎に包まれた遺跡でもあり、2007年に新・世界の七不思議の一つに選ばれている。

遺跡の劣化と保存に関しては、山頂上部に建設されたという特異性から、遺跡地域全体の地質学的、

土木工学的調査を中心に行われている。特に地すべり対策については、京都大学防災研究所の研究グループ (代表: 佐々恭二教授) が本格的な調査を行っている (2002~2005インカの世界遺産マチュピチュ都市遺跡の地滑り危険度調査)。また、筑波技術大学の藤澤正視教授は1990年からリマの天野博物館と協力して、遺構の構造力学的調査を行っている。なお、文化人類学分野では国立民族学博物館・関雄二教授、山形大学・坂井正人助教授らの研究がよく知ら



Fig. 1 マチュピチュ遺跡全景

* 関西大学国際文化財・文化研究センター (Center for the Global Study of Cultural Heritage and Culture, Japan)

** 関西大学環境都市工学部 (Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Japan)

*** 関西大学名誉教授 (Emeritus Professor, Kansai University, Japan)

**** 新潟国際情報大学 (Niigata University of International and Information Studies, Japan)

***** 国士舘大学 (Kokushikan University)

***** 東京文化財研究所 (Tokyo National Research Institute of Cultural Properties)

***** 東北芸術工科大学 (Tohoku University of Art and Design)

***** ペルー文化省マチュピチュ遺跡保護管理事務所 (Peruvian Ministry of Culture Peru)

れている。

花崗岩からなる個々の石造建造物遺構の具体的な保存、修復対策については、現地保護管理事務所による応急的対策が適宜行われているものの、本格的な調査、研究、事業はまだ行われていなかった。そこで、石造建造物遺構の劣化状態と具体的な保存、修復、整備対策について、日本の技術を十分に活かした調査、研究を行い、マチュピチュ遺跡の保護に貢献すべく、ペルー政府文化省クスコ地域支部ならびにマチュピチュ遺跡保護管理事務所と協議し、全面的な連携の下に、遺構の具体的な保存修復技法についての調査研究を開始することとした (Fig. 2)。

2 研究の目的

本プロジェクトは、日本の国内における研究成果と日本が行ってきた世界の石造文化遺産の保存修復国際共同研究の成果を、南米ペルーの世界遺産・マチュピチュ遺跡に応用してその保護に役立てんとするもので、もって世界の文化遺産の保護技術の発展に資することを目的とするものである。特にマチュピチュ遺跡の石造建造物遺構の保存、修復を行うために必要な調査、研究を、ペルー政府文化庁との共同研究として行うところに意義がある。

前述のように、マチュピチュ遺跡の保存、修復については地域全体の地質学的、土木工学的な研究が中心で、個々の建造物遺構についての具体的な保存対策についての研究はほとんど行われていない。

本研究では、特に「太陽の神殿」遺構を対象にした詳細な調査を行い、具体的な保存、修復対策、すなわち構造補強方法、石材の強化保存処置、石積み目地の補修、地衣類の除去等を策定し、さらに現地

実験施工を行って、実際的な施工マニュアルを作成するものである。これらの問題について本格的な国際共同研究として行う初めての例であり、その点から、特色ある独創的な研究とすることができる (Fig. 3,4)。

3 研究の方法

本調査研究プロジェクトでは、マチュピチュ遺跡の石造建造物遺構の劣化原因、過程を明らかにし、その具体的な保存、修復対策を策定すべく、実際の処置実験を通じた研究を行った。遺跡に遺された多くの遺構について調査したが、特に「太陽の神殿」についての詳細な調査を行った。「太陽の神殿」は最も重要な建造物遺構の一つであるが、同時に石材 (花崗岩) の劣化が最も大きな遺構である。その原因は、雷が落ちたためとも、発掘調査時に灌木、樹木を遺構の内側で燃やしたためとも言われているが、いずれにしろ火熱によるものである。花崗岩は、その鉱物組成から熱に弱く、亀裂が多数入った状態となっているのである。また、発掘された時点で、石積みの目地がずれて隙間ができており、崩れやすい状態にある。さらに、近年になって地衣類の繁殖が増大し、変色等外観上の問題が生じている。この「太陽の神殿」について、その具体的な保存、修復対策を策定し、具体的な施工マニュアルを作成すべく研究を行った。

4 研究成果

4.1 太陽の神殿

「太陽の神殿」は、数ある遺構の中でも最も重要なものの一つで、天然岩の上に建てられた見事な石組技術は、マチュピチュ遺跡で随一といわれる。陵墓の上が神殿となっており、東を向いたふたつの窓があって、ひとつの窓は冬至に、もうひとつの窓は夏至に太陽の光が差し込むようになっている。

しかし、「太陽の神殿」は、マチュピチュ遺跡で唯一、火熱が原因と思われる顕著な石材 (花崗岩) の劣化が見られる遺構である。切断があり、亀裂が多数入った状態となっている。花崗岩は、その鉱物組成から火熱に弱い。さらに、他の多くの遺構と同様に、石組の目地がずれて隙間ができており、崩れやすい状態にあり、また、近年になって地衣類の繁殖が増大し、変色等外観上の問題が生じている。



Fig. 2 主要プロジェクトメンバー



Fig. 3 太陽の神殿（遠景）



Fig. 4 太陽の神殿（近景）

(1) 火熱の原因

火熱の原因については二説ある。一つは、発掘調査時に生い茂っていた灌木、樹木を切り払い、これらを神殿の内側で燃やしたため、その火熱で石材が劣化したというものである。確かに、この遺構は高い位置にあり、石積み壁で円形に囲まれていて、物を燃やすには格好の場所である。ここで物を燃やしたというのは地元で実際に伝聞されていることでもある。ただ、樹木燃焼火熱であればかなりの煤（黒い炭素）が石壁に付着するはずであるが、石材表面がそれほど黒くなっていない。

有力なのは落雷説で、マチュピチュ遺跡が放棄された後に、神殿に設置されていた青銅製の大きな鏡に雷が落ちたとするものである。鏡があったとされる場所の劣化が顕著であり、またその部分には鏡を固定するための石の加工痕跡が遺されているのが根拠である。ただし、落雷の原因となったとされる青銅製の大型の鏡は類例を含めて遺されていない。筆者らの調査結果は落雷説を支持している。

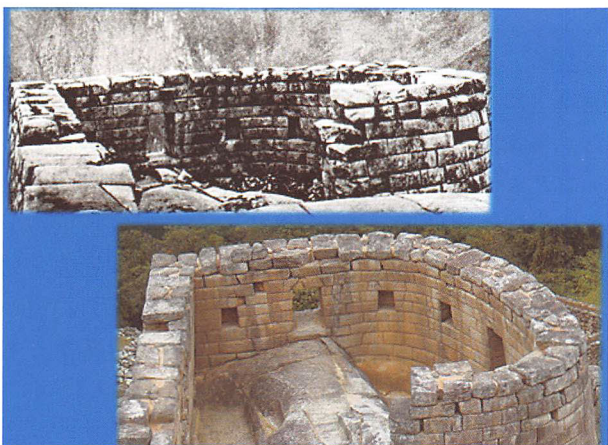


Fig. 5 劣化状態の確認（上:1915年発掘直後、下:2013年）

(2) 残存状態

この遺構が、発掘以降に積み直し等の整備が行われたかについては、記録上は定かでないが、発掘直後の記録写真を見る限りにおいては、発掘直後と現状はほとんど変わっていないことから、当時の状態がそのままに残されていると判断される (Fig. 5, 6)。

(3) 劣化状態

1) 北側開口部における顕著な劣化

神殿石積みの内側で石材の劣化が多くみられるが、特に北側の開口部周辺での劣化が顕著である。この開口部に青銅製の鏡が設置されていたと考えられている。石材が激しく割断、欠損している。また石材が移動しており、構造的にきわめて不安定となっている。本格的な補修、補強処置が必要である (Fig. 7)。

2) 石積壁湾曲部内側の表層剥離、亀裂

石積壁湾曲部内側の全面にわたって表層の亀裂と剥離がある。この劣化形態は花崗岩が高熱を受けた場合に生じる現象と一致する (Fig. 8)。

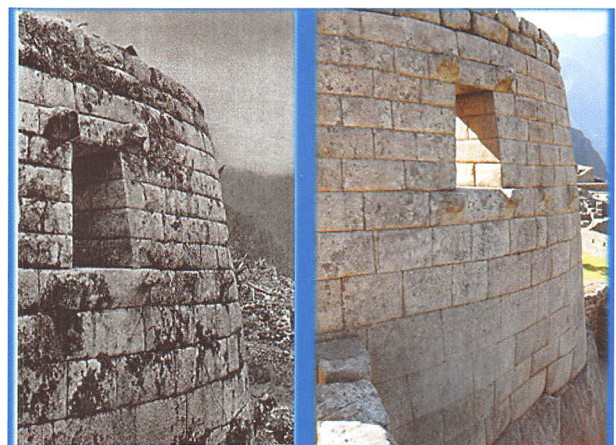


Fig. 6 劣化状態の確認（左:1915年発掘直後、右:2013年）



Fig. 7 北側開口部の著しい劣化



Fig. 8 表層部の亀裂と剥離



Fig. 9 石積壁端部における欠損



Fig. 10 石材接触面の隙間の拡大

3) 積壁端部における欠損

石積壁の端部では亀裂の発生が原因と思われる石材角部の欠損が顕著にみられる (Fig. 9)。

4) 石材接触面での隙間の形成

インカの高度な石工技術によって密着して積まれていたはずの石材が、何らかの衝撃あるいは地震によって主に横方向にずれ、接ぎ目が拡大して、縦の隙間が形成されている。この隙間は発掘時にはすでに存在し、その後特に拡大している状況ではない。大きな隙間は幅5 cmにも及ぶが、そのような箇所にはペルーの修復技術者による特殊粘土混合物による充填処置が施されている (Fig. 10)。

5) 天然岩基壇の割裂

黄金の像が置かれていたといわれる神殿内中心部の天然岩基壇には、数本の割裂がある。この割裂は岩を縦断しており、上部は裂離していることを確認した。現在は割裂面の空隙に特殊粘土混合物を充填して、形を保っている状態である (Fig. 11)。

6) 石材表面層の劣化

石材の表面層の粒状・粉状化現象はそれほど見られないが、石積壁外側で石材への地衣類の着生があり、変色（灰色化）の原因となっている。この現象は近年増進している (Fig. 12)。

4.2 保存修復方策

(1) 基本方策

石積を解体して積み直すのか、現状のまま固定するのかが、最大の基本的問題である。それぞれに長所、短所があるが、前述のように、この遺構は発見当時の状態を維持していると判断されることから、現状固定を基本方策としている。

もとより、世界遺産であるマチュピチュ遺跡の保存修復については、ユネスコならびに所有者（ペルー政府）の意向、世界の専門家、学識経験者の意見等々を総合的に検討して、決定すべきであり、種々の検討、協議を重ねているが、現状固定を基本とすることで、ほぼ集約されている。



Fig. 11 自然岩基盤の割裂



Fig. 12 石材表面への地衣類の着生

(2) 具体的方策

1) 石積部分の劣化石の強化、修復、補強

まずは、割断、表層剥離、亀裂等の劣化した石材の強化、修復、補強処置を行わなくてはならない。技術的には問題なく処置できる。ただし、解体せずに石積のままの状態で行うとなると、かなりの工夫と長い工期が要求される。

著しく劣化した石材については、やむを得ず、部分的に取り外しての強化、修復処置が必要で、新材との取り替えもあり得る。

2) 石積部分のキャッピング（雨水対策）

構造体全体の安定化のためには、上部からの雨水の侵入を防ぐことが基本である。そのためには上部に防水層を形成すること（キャッピング）が最も有効である。キャッピング材料としてはセメントが最も効果的かつ簡易であるが、不可逆性、すなわち後に取り除くことが困難であること、外観が遺構にマッチしないこと、可溶性塩類を含んでいて、新たな劣化の原因になり得ることなどから、適当ではない。そこで、上記の問題をクリアーするキャッピング材料として粘土が考えられる。この場合、粘土は極めて良質であることが求められ、また耐久性、耐水性を上げるために石灰、撥水剤等を併用することも場合によっては必要となろう。マチュピチュ遺跡では、現地技術者により調整された、耐久性に優れた特殊な粘土が亀裂部、欠損部、隙間の充填に用いられている。一般的に花崗岩の山からとれる粘土は良質であることが知られており、基本的に、マチュピチュ遺跡で伝統的に用いられているこの粘土を応用することとする。

3) 石積の隙間の開いた目地の充填

石積の変形により、石と石の間（目地）が開いた状態になっている部分があり、その幅は最大で5cmに達するものもある。この空隙には、前述の通り、粘土が充填されており、現在のところ安定している。これらの隙間のある目地については、空隙の内部に強度、耐久性の優れた不可逆性の有機系樹脂を充填して安定させ、空隙の外より部分は上記の粘土で充填化粧して外観を整える方法が、ペルー側から提案されている。技術的には問題ないが、基本修理原則（修理哲学）に照らして、若干の問題があり、慎重に検討中である。

4) 天然岩基壇石の保存修復

天然の岩からなる基壇石には大きな割れ目が入っており、上部は実質的に断裂していることが確認された。ただ、破断面の空隙への粘土の充填と、破断石の自重によって、現状、形は維持されている。しかしながら、破断面でずれが生じており、今後の劣化の進行を考えると、充填物除去（一時的には解体される形となる）してから、正確な位置に再接合する必要がある。この作業を行うためには、重機を用いた、狭い空間での慎重な作業をこなせる技術者の参画が求められる。破断部は損傷していて、密着接着はできず、充填接着することになるが、この技術も併せて求められる。

5) 地衣類の除去と表面層の強化、防水

石材自体の凝集力の低下はそれほどでもないのに、岩石表面層の樹脂（シリコン樹脂）含浸強化処置は必要不可欠ではないが、撥水性付与も含めた予防的保存処置として行うかはどうかについては、依然、検討事項である。

湾曲石積み壁外側における地衣類の着生について

は、地衣類除去剤（コレトレール®）の効果が確認されており、この除去剤の応用を基本としている。除去剤により、地衣類は死滅して自然に剥がれ落ちるが、それには1年程度を要する。この後をどうするか、すなわち強化撥水処置を施して地衣の再着生の防止を図るか、あるいはそのままの自然な状態を維持するかについても、重要な検討事項である。

以上は Protective Treatment をどう位置づけるかという基本的な問題に関わる。

4.3 環境調査

マチュピチュ遺跡の「見張り小屋」から「インカ橋」に向かう途中の山腹に、気象観測ステーションが設置されており、温度、湿度、雨量、風向、風速、日照量等の計測が継続して行われている (Fig. 13)。

ここ数年のデータからの解析結果と、筆者らが現地滞在中に測定した「太陽の神殿」内における気象環境データの解析結果を以下に示す。

(1) 気象ステーションデータの解析

1998年9月から2013年8月までの月ごとの値から解析を行った。Fig. 14は観測期間中の月最高気温・月最低気温の変化をグラフ化したものである。この地域では、雨期が11月から3月まで、乾期が5月から8月までということだが、雨期に気温差が小さく、乾期に大きくなる傾向があることが確認された。Fig. 15は月平均相対湿度の変化であるが、Fig. 14と同様、雨期・乾期に応じた変化が見られるとともに、ほぼ80%以上と比較的高湿度であることが確認された。

Fig. 16は、各月の合計降水量について観測期間中の平均値を示したものである。観測地点の年間降水量は約2,150 mmと比較的多く、その約70%が雨期に集中することが確認できた。このように、遺跡周辺は比較的高湿度であることが明らかとなったが、これは遺跡が山に囲まれていること、周辺植生の影

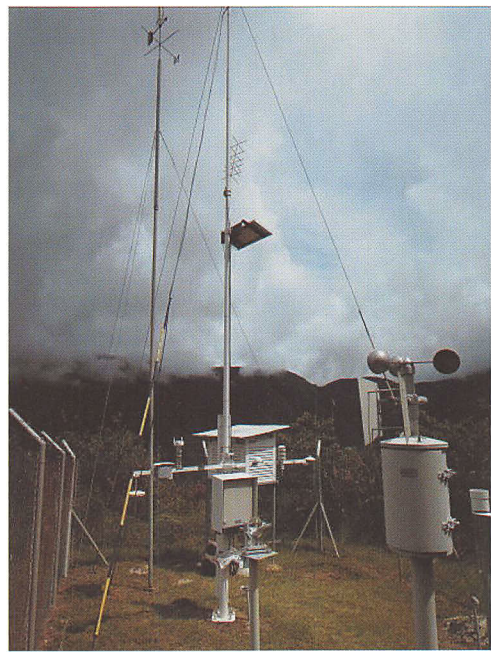


Fig. 13 気象観測ステーション

響などが理由であると考えられる。また、雨期には多いときで月間降水量が300 mmを超えることが珍しくないが、遺跡やバッファゾーンの斜面崩壊などのリスクがあることが再確認された。

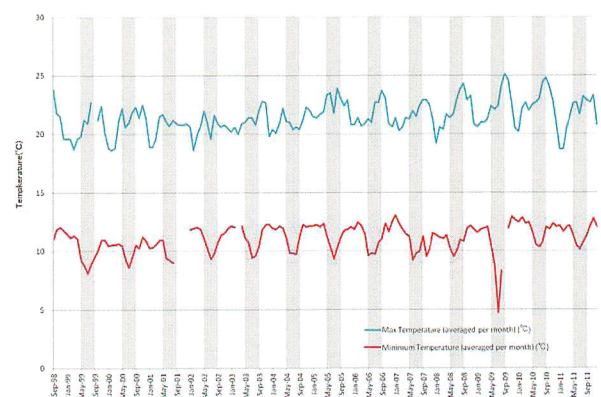


Fig. 14 月の最高気温、最低気温の推移

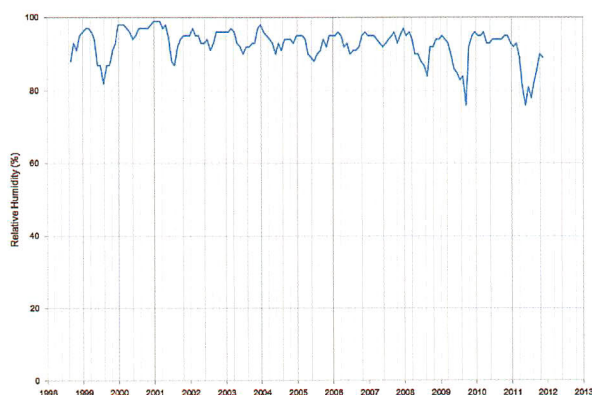


Fig. 15 月平均相対湿度の推移

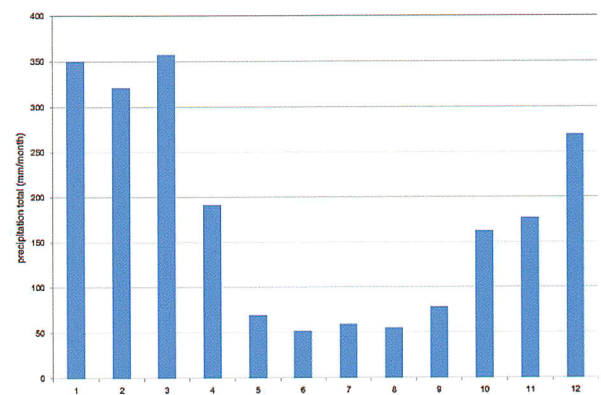


Fig. 16 月毎の降水量

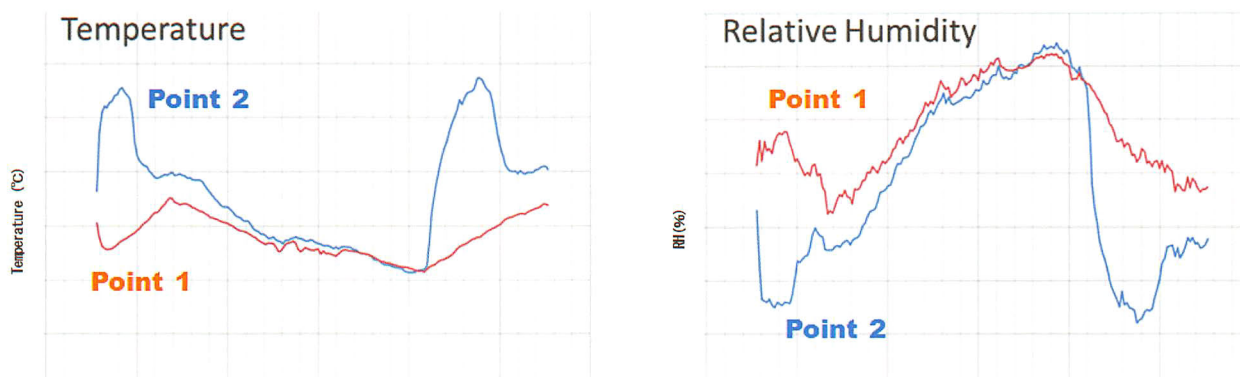


Fig. 17 「太陽の神殿」内の気温と相対湿度

(2) 「太陽の神殿」内部の微気象の解析

2013年8月に太陽の神殿内で精密な温湿度計測を行った。Fig. 17は直射日光による温度上昇と湿度の変化を確かめるため、太陽の神殿内の2か所で、8月12日の昼から13日の昼まで24時間測定を行った結果である。太陽の神殿周辺は植生など日射を遮るものがないため、直射日光が側壁にあたっているときは30℃以上まで気温が上昇すること、また日射のない夜間については、翌朝まで徐々に気温が低下してゆくこと、日没時は両地点で3℃程度の差があったものが、6時間かけて同じ値へと漸近してゆくことが確認できた。また、相対湿度についても同様の結果が得られた。

4.4 計測、測量調査

「太陽の神殿の」現状（保存修復前の状態）を正確に計測、記録するために、トータルステーションによる三次元計測を行った。測量に先立ち、マチュピチュ遺跡に設置されている測量基準点を踏査し、利用可能な基準点から測量対象地点近傍に測点を増設した。

この測点から「太陽の神殿」の周辺部を含めた電子平板測量を実施し、地形図を作成した。地形図の測量は、三次元データで記載されており、写真測量とスキャニングを行うための測点も記録されている。

石組の劣化や亀裂の状態を把握することを目的に、写真測量による3D画像の作成を行った。Fig. 18に結果の一部を示す。外壁の隙間が広がっている部分の3D化を行ったもので、平面写真のように表現されているがパソコン画面に3D表示された状態のスクリーンコピーである。3D表現を行うことによって石組の大きさや隙間の量が測定でき全体の移動量も算出することが可能である。「太陽の神殿」の外周は、ひび割れや剥離もなく良好な状態であるが、内側はひび割れがかなり進行している石材もあることが確認できた。

模型の作製と変形の進行状況を把握するためにトータルステーションの3Dスキャナー機能を用いてスキャンを行った。スキャニングは、鉛直と水平の測定ピッチ角度を設定し実施するが、外側の測定は足場が無く遺構の下方から行うために均等な測定分

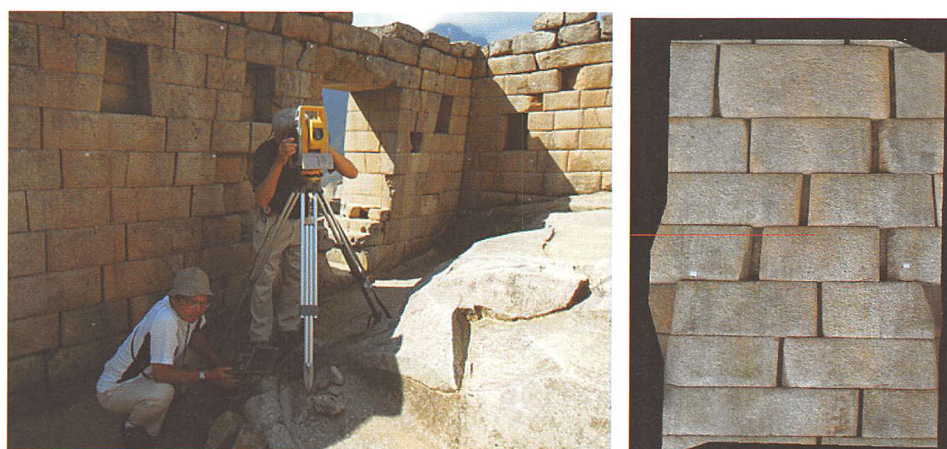


Fig. 18 トータルステーションによる3次元計測と石積壁の3次元画像

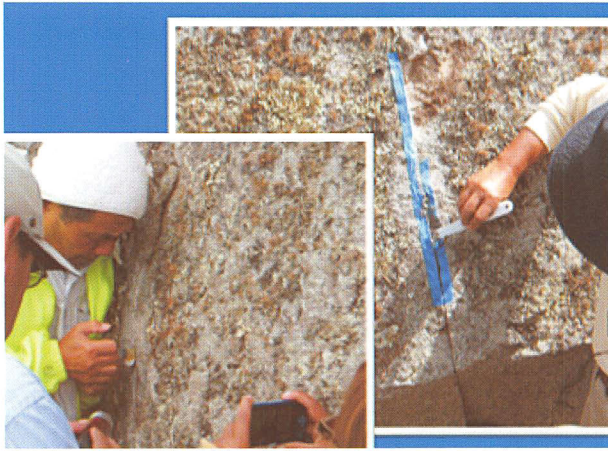


Fig. 19 亀裂への樹脂注入試験



Fig. 20 地衣類除去剤の応用実験

布ではない。視覚的に把握しやすいよう模型を作成することを試みた。模型は、3D スキャニングにより得られたデータを元にコンピュータ上でポリゴンを作成し、紫外線硬化樹脂を使用し、3D 成型機により作成した。

4.5 現場処置実験

(1) 亀裂への樹脂注入

敷地内の天然石で、幅0.6mmの亀裂への樹脂注入の実験を行った。樹脂の漏れを防ぐために、エチレン酢酸ビニル共重合体樹脂系エマルジョン型接着剤(酢ビ)を亀裂に近い幅で塗布し、表面は同質石粉、石粒による、擬石処理を施した後、エポキシ樹脂(ボンドE-207ゼリー状タイプ)を注射器で約100cc注入した(Fig. 19)。

(2) 地衣類除去剤塗布

遺跡内の地衣類の着生が顕著な天然石で、東西南北4面のそれぞれ1か所(0.1m²程度)に地衣類除去剤(コレトレール®)を塗布した(約500g/m²)(Fig. 20)。1年経過段階で顕著な効果が見られた。その後

も、ほぼその状態を維持しているが、僅かながら地衣類の再着生が見られ始めている。

(3) 神殿基壇石の割断小片の再接合(修復)

天然の岩からなる神殿基壇の正面端部で、60cmほどの長さで脱落があり、脱落石片が残されていた(一部欠失)。これらの石片の再接合と欠失部の擬石による充填仕上げを試験的に行った。

その仕様は以下に示すとおりであるが、技術的には特に問題なく処置することができた(Fig. 21)。

- 1) 接合面を水洗し、付着土砂、着生地衣類を除去した。
- 2) 割断部材の接合面にエポキシ樹脂(ボンドE-208 グリース状)を塗布し、基壇に木槌で叩きながら圧着をした後、いったん引きはがし、基壇側に接着剤が万遍なく付着しているかを確認。付着してない部分があれば、そこに追加塗布した。
- 3) 再度圧着後、再び引きはがし、全面に接着剤の付着を確認し、圧着して完全硬化まで放置した。
- 4) 基壇側と割断部材の接合線には、表層に僅な空



Fig. 21 基壇石の割断小片の再接合





Fig. 22 インティワタナ（日時計）

隙が生じているので、擬石（エチレン酢ビと現地花崗岩の細粒、粉末を混ぜたもの）を充填した。この際、消石灰を若干混合した。これによって硬化の促進と、より自然な石に近い品質が得られた。

4.6 関連調査

「太陽の神殿」とならんでマチュピチュ遺跡を代表する重要な遺構である「インティワタナ（日時計）」についても保存修復調査をペルー側から要請された。インティワタナは遺跡の最高地点にある高さ1.8mの石造物で、日時計であったと推定されているが確定的ではない（Fig. 22）。歴史的にきわめて重要な記念物であることはいうまでもないが、パワースポットとして観光客でにぎわう人気スポットでもある。石の下部を横切るように幅1～2cmの割れ目が走り、斜めにも幅2～3mmの亀裂が走っている。

我々の調査では、当面の危険性はないと判断したが、今後の良好な維持のための方策を種々の観点から検討している（Fig. 23）。

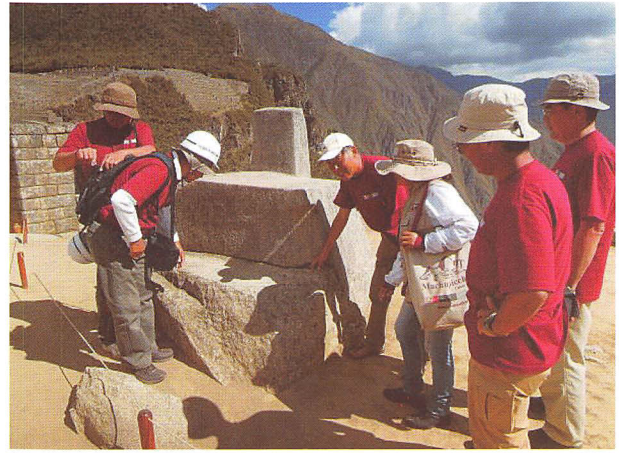


Fig. 23 割れ目の状態観察

4.7 公開シンポジウム

本調査研究の成果を踏まえて、マチュピチュ遺跡の保護の現状と対策について紹介する公開シンポジウムを、2014年3月に新潟で、2015年2月に東京で、同3月に大阪で開催した（Fig. 24～26）。

ペルーから共同研究者のチャンピ、グラデイス両氏を招聘して講演をお願いした。本シンポジウムの内容については、ホームページを参照されたい。



Fig. 24 シンポジウムの様子（2014年3月、新潟）



Fig. 25 シンポジウムの様子（2015年2月、東京）



Fig. 26 シンポジウムの様子（2015年3月、大阪）

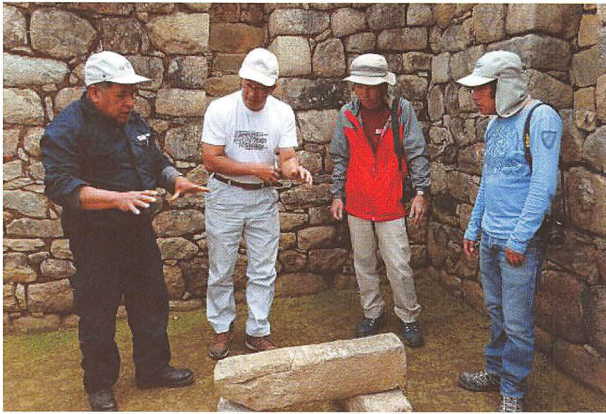


Fig. 27 技術移転を目的とした現地研修の様子

5 技術移転

マチュピチュ遺跡保護管理事務所所属の保存修復技術者（主任クラス）2名と関連の職員に対して、破損した石材の修復技術、具体的には合成樹脂接着剤による割損石材の接着技術を現地で実地指導することによって習得させた。この場合、単に技術を教えるだけでなく、なぜそのようにするのかわかりやすく説明し、理論と実践の両面から十分な説明と質疑応答を通して、十分に理解させるべく丁寧な指導を行った。

指導項目は下記の通りであるが、その技術内容は、4.5（3）で述べたものとはほぼ同じである。

- ・接合面のクリーニング
- ・接着剤の調整
- ・仮接合と密着度の確認
- ・本接合
- ・養生

彼らは熱心に学習し、現地研修としてはきわめて有効であった（Fig. 27）。

6 おわりに

本調査研究事業は文科省科学研究費補助金（基盤研究B [海外]：課題番号24404001 研究代表者・西浦忠輝）を中心に、関西大学国際文化財・文化研究センター研究費（文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業）、（公財）朝日新聞文化財団・文化財保護助成、（公財）住友財団・海外文化財維持修復事業助成に拠った。

本調査研究成果を活かして、実際の保存修復事業を行うべく、検討中である。

「マチュピチュ遺跡保存修復プロジェクト」に対するご支援に深く感謝申し上げますとともに、今後とも広くご支援を賜りたく、お願いするものである。

参考ホームページ

マチュピチュ遺跡保存修復プロジェクト

<http://gbs.nuis.jp/machu-picchu/>