

# ペルー、マチュピチュ遺跡の保存修復〔Ⅱ〕 —「太陽の神殿」の保存修復に関する調査と試験施工—

西浦 忠輝 \* 海老澤 孝雄 \*\* 伊藤 淳志 \*\*\* 藤田 晴啓 \*\*\*\* 沢田 正昭 \*\*\*\*\*  
フェルナンド・アステータ \*\*\*\*\* カルロス・カノー \*\*\*\*\*

Conservation of Machu-Picchu Archaeological Site [II]:  
Investigation and Experimental Restoration Works of “*Temple of the Sun*”

Tadateru NISHIURA\*, Takao EBISAWA\*\*, Atsushi ITO\*\*\*, Haruhiro FUJITA\*\*\*\*,  
Masaaki SAWADA\*\*\*\*\*, Fernando ASTETE\*\*\*\*\* and Carlos CANO\*\*\*\*\*

## [Abstract]

The Machu-Picchu archaeological site, called the “Ancient Capital in the Sky,” is one of the most important and famous world heritage sites. It was the special place of the Inca Empire in the fifteenth century and is located on a high ridge in Peru. There are about 200 remaining structures built of stones (granite) in the 13 km<sup>2</sup> site. Systematic conservation measures for the structures have not been conducted, except for emergency measures by the regional office. Thus, the authors have started a project for the conservation of the remaining structure with the cooperation of the Ministry of Culture in Peru, especially for the preservation and restoration of “*Temple of the Sun*,” which is one of the most important structures in the site. There are three conservation problems related to the *Temple of the Sun*. One problem is that the stones of the structure have cracks caused by the high temperature of the fire used for burning the cut trees at the site while excavating. Another problem is that the structure became unstable because some of the joint parts among the stones have been opened since the excavation. The other one problem is that the color of the structure

---

\* 国土舘大学イラク古代文化研究所

(Institute for Cultural Studies of Ancient Iraq, Kokushikan University, Japan)

\*\* 文化財保存修復家 (Restorer for Cultural Heritage)

\*\*\* 関西大学環境都市工学部

(Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Japan)

\*\*\*\* 新潟国際情報大学情報文化学部

(Niigata University of International and Information Studies, Japan)

\*\*\*\*\* 国土舘大学 21 世紀アジア学部 (School of Asia 21, Kokushikan University, Japan)

\*\*\*\*\* ペルー国文化庁マチュピチュ保護管理事務所

(Office for Conservation and Administration of Machu-Picchu Region, Ministry of Culture, Peru)

\*\*\*\*\* クスコ芸術大学 (CUSCO University of Art, Peru)

has changed recently because of the lichens growing on the surface of the stones.

The main activities of this project as to the treatment of stones are as follows:

- Injection of epoxy resin under pressure into the cracks of the stones.
- Consolidation of the fragile parts of the stones by impregnation with silicone resin and acrylic resin.
- Setting the detached parts of the stones back to their original places by mortising and gluing these parts with epoxy resin.
- Filling the open spaces among the stones with a mixture of clay and lime.
- Killing and eliminating the lichens on the stones using a special chemical.
- Making the stone structure waterproof by impregnation with hydrophobic silicone resin.

The investigation and experimental restoration work, conducted in the summer of 2012, is reported in this paper.

#### [ 要旨 ]

マチュピチュ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 2400 m）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。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庁によって保護、管理されている。遺跡には 3 m 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 13km<sup>2</sup> 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。

マチュピチュ遺跡で最も重要なもののひとつである「太陽の神殿」遺構は、数ある石積建造物遺構の中でも石材（花崗岩）の劣化が特に顕著である。その原因は、発掘調査時に、生い茂っていた灌木、樹木を切り払い、遺構の内側で燃やしたので、その火熱で石材が劣化したためとされている。花崗岩は、その鉱物組成から火熱に弱く、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。現地の人的、技術的体制ではこれらの問題を解決することは困難であるのが現状である。

そこで、「太陽の神殿」石造遺構の保存、修復、整備を、ペルー国政府文化庁の要請と協力のもと、ペルー国政府文化庁の担当官、ならびに関係専門家と共同で事業を開始した。

その概要は以下のとおりである。

- ・ 石材の亀裂への合成樹脂の圧入、脆弱化した部分への合成樹脂の含浸、脱離部の金属ホゾ併用による合成樹脂による接合、隙間のあいた目地への粘土と石灰の混合物の充填による強化固定、薬剤による地衣類の殺除処理。
- ・ 環境整備面からの保護対策（観光客立ち入り制限範囲、見学ルートの設定、禁止事項の明示等）についての、多方面からの検討、考察。

本稿では、2012 年夏に行った調査、研究結果のうち、特に石の保存修復、処置について報告する。

## 1 はじめに

世界遺産『マチュピチュ遺跡』は、ペルーのウルバンバ谷に沿う高い山の尾根（標高 2057m）に位置するインカ帝国（15世紀中頃）の遺跡である。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、発掘調査が行われた。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 3 m 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 13km<sup>2</sup> で、約 200 の石造建造物遺構がある。1983年にユネスコの世界遺産（複合遺産）に登録された。

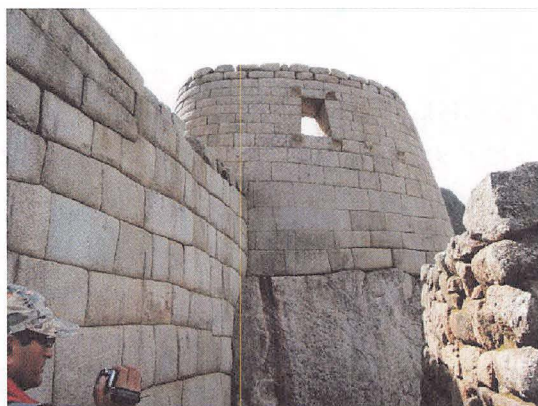


遺跡は、山頂上部にあるという特異性から、地質学的、土木工学的調査を中心に行われている。しかしながら、花崗岩からなる個々の石造遺構の具体的な保存、修復対策については、本格的な調査、研究、事業はまだ行われていない。そこで、石造遺構の劣化状態と具体的な保存、修復、整備対策について、日本の技術を活かした保護への協力を行うべく、ペルー国政府文化省クスコ地域支部ならびにマチュピチュ遺跡保護管理事務所の全面的な協力の下に、特に「太陽の神殿」の具体的な保存修復技法についての調査、研究ならびに現地施工実験を開始した。

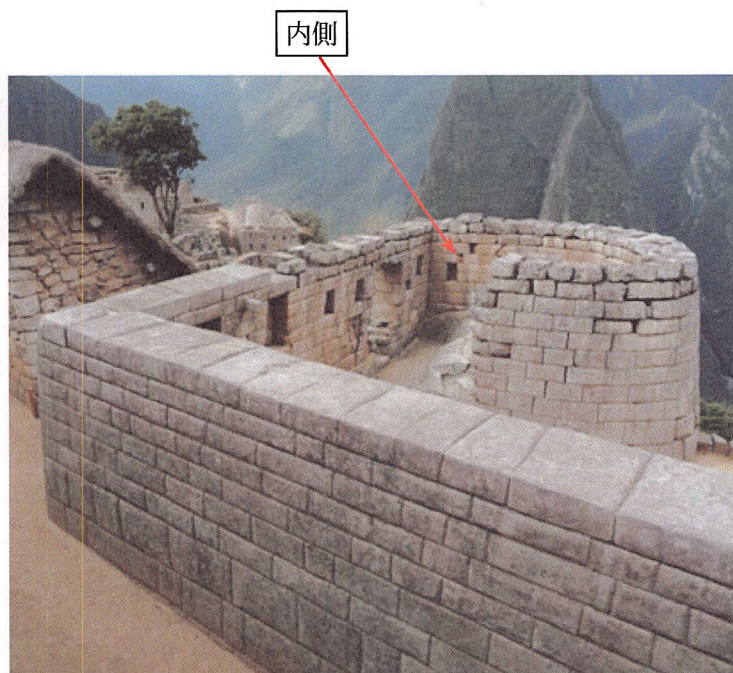
「太陽の神殿」は、数ある遺構の中でも最も重要なもので、自然石の上に建てられた見事な石積み技術は、マチュピチュ遺跡で随一といわれる。陵墓の上が神殿となっており、見上げると東を向いたふたつの窓がある。ひとつの窓は冬至に、もうひとつの窓は夏至に太陽の光が差し込むようになっている。

しかし、「太陽の神殿」は最も重要な遺構の一つであると同時に、石材（花崗岩）の劣化が最も大きな遺構である。その原因は、発掘調査時に、生い茂っていた灌木、樹木を切り払い、遺構の内側で燃やしたため、その火熱で石材が劣化したとされている。花崗岩は、その鉱物組成から火熱に弱く、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。





## 2 太陽の神殿の損傷状態



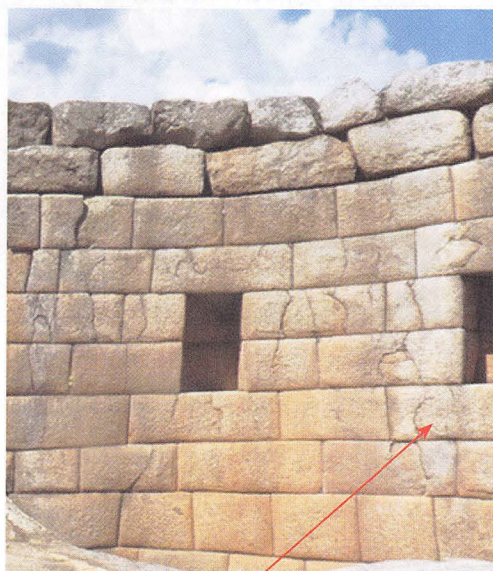
太陽の神殿内側の個々の石に起きている損傷状態は、おおむね下記に分類される。

- ①表面の剥離（表層剥離）
- ②亀裂
- ③欠損
- ④表層の劣化
- ⑤割断剥離

個々の石に起きている損傷は以上のとおりだが、これらを現状のままで修復するには大きな問題がある。問題については、後述するとして、まず、個々の石について、損傷と修復方法の概説をする。修復材料は、数種の合成樹脂が主体となるが、いずれもオリジナル材（石）を変質させないものでなくてはならない。

### 3 修復方法について

#### 3.1 石表面の剥離（表層剥離）



表層剥離

石表面が薄く母体から剥離している。  
この内側には、1～3 mm程度の空隙が  
潜在している。  
目視では一見わかりにくいですが、打音で容  
易に確認できる。  
放置しておけば、剥離部分は、崩落する。

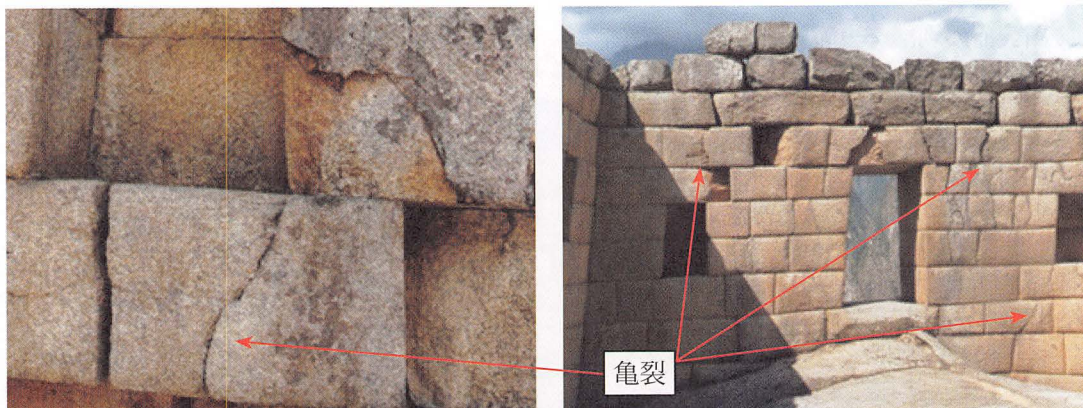


#### 修復方法

空隙内部に、エポキシ樹脂（液状低粘度、ゼリー状中粘度など）を注入し、母体に接合し一体化させる。空隙内部への注入は、浮き末端の亀裂（僅かな隙間がある）から注入するが、中には空隙部の表面に細い穴（径5 mm）を開けて、そこから注入する事もある。剥離部分が薄いので、ホゾ（ステンレスボルトなど）の挿入等による強化は行わない。



### 3.2 亀裂



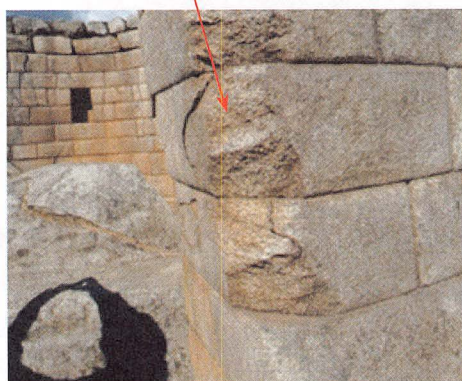
亀裂が多数発生しているが、組石の荷重よりも、何らかのムーブメントによる偏荷重で発生したものと推定される。

#### 修復方法

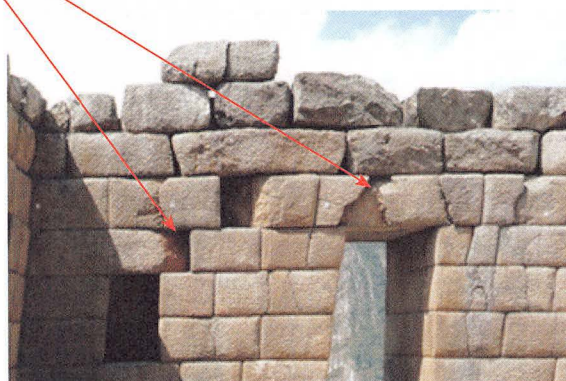
亀裂内部にエポキシ樹脂を注入し、分断化されている石を接合し一体化させる。亀裂幅、亀裂深度によって、注入方法、注入樹脂のタイプを選定する。亀裂の存在は、石組構造体としては表層剥離より遥かに危険で、「亀裂の拡幅→個石の損壊・崩落→石組全体の崩壊」に直接つながるものである。

### 3.3 欠損

角部に多くみられる（写真①）が、石組のバランスにさほど影響はない箇所は、特に充填成型はしない。ただ、明らかに崩壊の危険性が高い欠損部（写真②）もあるので、そこでは接着、擬石充填・成型の処置が必要となる。



写真①



写真② 矢印欠損部

### 3.4 表層劣化

著しい粉状化、細粒化などは殆どなく、劣化進行の緊急性はない。ただ西開口部の割断石は、他の部分より進行している。今後、劣化の急激な進行も危惧されるので、予防としてシリケート系強化材の塗布含浸は有効であろう。塗布量は、少量（500g/m<sup>2</sup>程度）が良い。

### 3.5 割断剥離

10～30mm前後の厚みで、割断剥離し、母材から大きく剥離している。特に大きな割断剥離が起きているのは、下記写真③で、赤線で囲まれた部分は太陽の神殿の石組の中でも崩壊の危険が最も高い所である。



写真③ 仮称西開口部

大きな割断剥離、亀裂、欠損は、接着（ホゾ挿入併用）、注入、成型などで補強は出来るが、現状、石組みのまま修復を行うには問題がある。

## 4 修復の問題点

個々の石に起きている損傷を、現状石組のまま修復するには、下記の二つの問題点が挙げられる。

### 1) 個々の石の法量（大きさ）が変わる

個々の石は、亀裂、剥離（浮き）、断裂などによって、隙間が生じ、その分だけ法量は大きくなっている。修復は、発生している隙間に、合成樹脂を充填する事が基本となるので、この状態で修復すると、隙間は樹脂で満たされ、接着固化するので、その分だけ石は大きくなる結果となる。表層剥離などは、1mm程度の大きさですむが、亀裂、割断には、5mm、10mmになる隙間があるので、このまま修復すれば、石の外寸を大きく変える事になる。隙間を合成樹脂で、一旦固定すると、再び元の法量に戻す事は、石を削る（破壊）以外、不可能である。一方、修復前に隙間を押しつけて、石の外寸を元に戻すのは、石組の構造から不可能である。

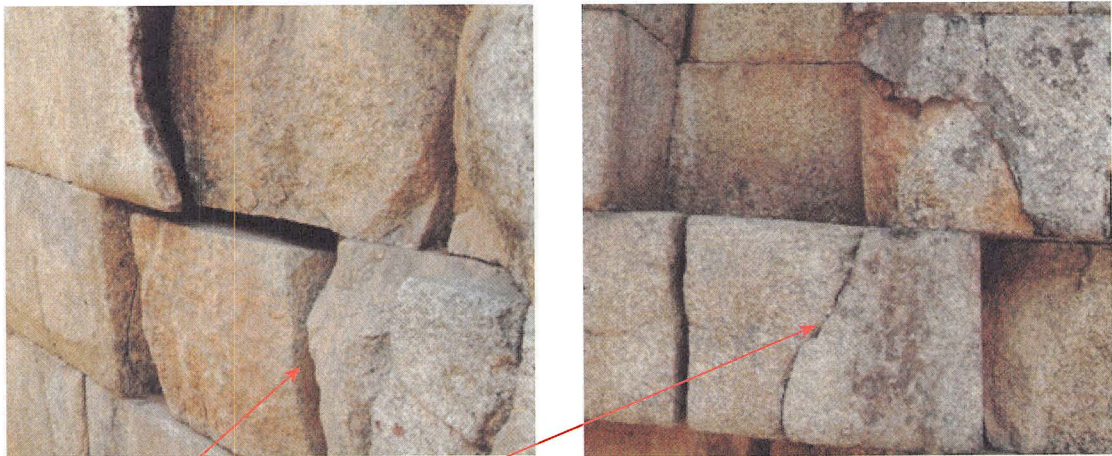


## 2) 隣の石と接着してしまう

樹脂注入処置では、隙間（亀裂や割断）の奥深くまで注入する事が肝要で、そうしなければ、強度の復元は出来ない。隙間の奥深くまで完全に充填するには、樹脂が漏れ出てこないように、まず隙間の表面を塞いで（シール）おこなうてはならない。

ところが、隙間の奥部は、手が届かなかったり見えなかつたりで、シールする事は出来ない。そうすると注入材はそこから漏れ出して、隣の石との目地間に流れ込む。流れ込んだ樹脂は、隣の石を強固に接着し、一体化してしまう事になる。

注入材の漏れ出しを防止しながら、分離、割断している石を強固に接着させる事は不可能である。オリジナルの石組は、石どうしの面で密着しているだけで、接着はしていない。密着の精度の高さがインカの偉大な技術なのだが、そこを接着させてしまう事は、インカのオリジナル性を消すことになる。以上の修復方法では、オリジナル性を大きく損なう事は明らかなので、別途、方法を考察・検討する必要がある。



現状では、これらの隙間を押し付けて、元に戻す事は出来ない。この中に接着剤を注入して分離している部材を接着一体化すると、石の外寸が大きくなってしまふ。

隙間の奥部から、注入材が漏れ出して、隣の石を接着させる。2石が1石になってしまう。

## 3) 根本的な修復についての検討

まず、石組を1個1個解体し、地上に下ろした上で、損傷を修復する。

解体して地上に下ろせば、前項で指摘したような、隙間を元に戻しながらの修復ができるので、オリジナル性を復元しながら、修復ができる。また表面から見えなかつたり、手が届かなかった損傷部分も修復できるので、より確実に強固な修復ができる事になる。

修復した石を、元の位置に積み上げて行く事になるが、太陽神殿の石組には、現在、以下に述べる歪みがあるので、これらの歪みを修整しながら積み上げて行けば、構造的不安定さを解消したオリジナルにほぼ近い強固な構造体に復元できよう。



### 5.1 太陽の神殿の石組構造の歪み

- ①目地の隙間拡大箇所が多数ある
- ②石組の水平方向の不揃い（段差） 1～3段目に多い
- ③セリ出し（列から外側にハミ出ている） 内側石の他に、外側の石にもある

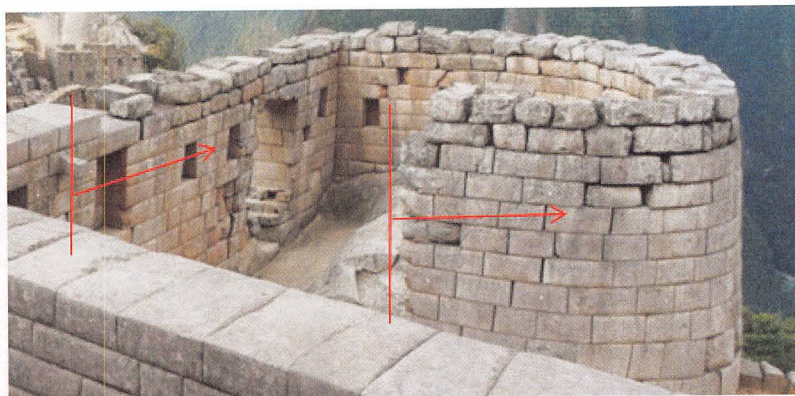
上から2、3段目には、内、外にセリ出しがあり、横並びが直線的ではない



## 5.2 解体しないで現状で出来る修復処置

接着剤の流出に注意すれば、表層剥離の接着と表層の含浸強化作業は可能である。

解体・積み直しは、下の範囲とする（写真参照）が、作業は大掛りとなり、様々な問題も考えられる。



問題点：

- 1) 費用の増大
- 2) 長い工期
- 3) 施工中の観光客対策
- 4) 作業（者）の安全対策
- 5) 両国の施工体制（技術者、ワーカーなどの確保）

この他にも、解体過程で構造的にどのような問題が起きるか、基礎部の安定度は、様々な問題点があるが、一方では「インカの技術」についての新しい発見が得られる可能性もあろう。

## 6 試験施工

- |                     |             |
|---------------------|-------------|
| 1) 亀裂注入             | 石切り場で試行     |
| 2) 地衣類除去剤（コレトレール）塗布 | 石切り場で試行     |
| 3) 神殿基壇切断部材の接合      |             |
| 4) 含浸強化剤の浸透試験       | 石切り場の小転石で試行 |

- 1) 亀裂注入 細い亀裂内部にも注入ができる事を知ってもらうために、幅 0.6mm の亀裂を選定

亀裂表面シール 注入材が漏れ出てくるのを防ぐために、亀裂表面を、CZ252\* でシール

\* エチレン酢酸ビニル共重合体樹脂系アマルジョン型接着剤

亀裂に近い幅で塗布し、表面は同質石粉、石粒による、擬岩処理を施した。

注入口設置 電源、電動ドリルがないので、穴開けで注入口を設ける事ができなかったため、亀裂表面の一部をシールしないで置き、そこを注入口とした。



注入 エポキシ樹脂（ゼリー状タイプ ボンド E-207）の注射器での注入を試みたが、亀裂内部（亀裂表層近く）の土、植物類の除去が不十分であったため、注入失敗。カッターナイフで、再度、内部の詰り物を切削除去し、亀裂空隙を目視確認して約 100cc 注入した。  
\* 今回は、注射器による注入のみとしたが、手動注入器で注入すれば、さらに奥深く、効率よい注入が可能である。

## 2) 地衣類除去剤塗布

石切り場、自然石の東西南北面に、それぞれ1か所ずつ（約 0.1m<sup>2</sup> 程度）塗布。  
その他、赤色地衣の着生箇所にも塗布。塗布量はそれぞれ 50 g（1 m<sup>2</sup> 換算 約 500g）

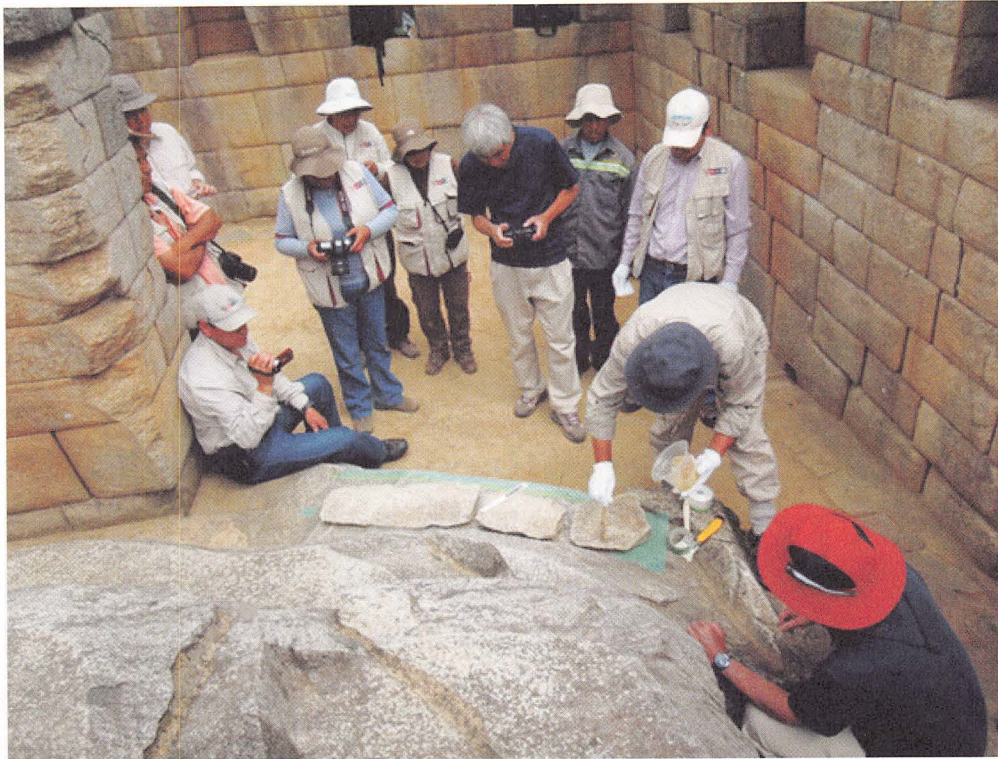
## 3) 神殿基壇の割断部材（3塊）の接着

洗浄 基壇部、割断部材の接合面を水でクリーニング（付着土砂、着生地衣類の除去）  
接着 割断部材の断面にエポキシ樹脂（ボンド E-208 グリース状）を塗布し、母体側に接着。木槌で叩きながら圧着をした後、いったん引きはがす。母体側に、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。再度圧着後、再び引きはがす。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。

\* 接合面に摩耗や欠損があると、割断部材と母体側の、完全な密着ができない。  
両面を接着剤で完全に密着させるには、以上の作業が不可欠となる。

接合線処理 基壇側と割断部材の接合線（接着させた断面）には、表層に僅な空隙が生じているので、その部分に、擬岩材\*を充填して、空隙を埋め、オリジナル材に近い一体化を図る。

\* 擬岩材:CZ252（エチレン酢ビ）と現地花崗岩の、細粒、粉末を混ぜたもの。  
通常、これに消石灰を若干混合する。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る。



#### 4) 含浸強化剤浸透試験

石切り場の小転石で、太陽の神殿の劣化と同じ程度の石を採取し、ハケ塗、スポイト点滴などで、シリケート系浸透強化材（ワッカー OH100）の浸透試験を行った。

この花崗岩は緻密で、劣化程度も小さいので、浸透は少量であった。

太陽神殿全体の石組では、西開口部付近がやや劣化がみられる程度なので、含浸量は  $500\text{g}/\text{m}^2$  程度で充分であろう。

#### 7 おわりに

国土舘大学を中心に、関西大学ならびにその他の研究者、技術者で構成されている「マチュピチュ遺跡保存修復プロジェクト」は2年間の準備期間を経て、2012年度より本格的な調査、研究、保存修復事業を開始した。本年度はここに報告した事業のほかに、「太陽の神殿」の三次元測量調査、構造診断、環境計測等を行っている。来年度以降はさらなる成果が得られるものと考えている。

事業予算としては、国土舘大学・西浦忠輝を代表とする文科省科学研究費補助金を中心に、関西大学・文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業ならびに（公財）住友財団・海外文化財維持修復事業助成金によっている。今後とも、関係機関、関係各位のご協力を切にお願いするものである。

前述のように、本研究の一部は、「文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成20年度～平成24年度）」によって行われた。



