

機関番号：32616

研究種目：基盤研究(A) (海外)

研究期間：2007～2010

課題番号：19251001

研究課題名 (和文) アンコール遺跡・バイヨン寺院浮き彫りの保存方法の研究

研究課題名 (英文) STUDY ON CONSERVATION METHODS FOR THE BAS RELIEFS
IN BAYON TEMPLE, ANGKOR

研究代表者

沢田正昭 (SAWADA MASAAKI)

国士舘大学・21世紀アジア学部・教授

研究者番号：20000490

研究成果の概要 (和文)：バイヨン寺院のレリーフの劣化は、亜熱帯地域独特の年間を通じた高温多湿の過酷な環境にあつて劣化が進行している。本研究では、劣化現象を解明し、バイヨンに特化した保存材料の開発をめざした。劣化要因のひとつは、回廊浮き彫りの背後にある基壇内部からしみ出す雨水であることを突き止め、その工学的対策を図ると共に、浮き彫りを構成する砂岩に対して珪酸エステルを基盤にした強化剤等の開発を行った。

研究成果の概要 (英文)：THIS STUDY AIMED TO ASCERTAIN DETERIORATION PHENOMENON, AS WELL AS TO DEVELOP THE CONSERVATION MATERIAL, SPECIALIZED FOR BAYON TEMPLE. THIS STUDY FOUND OUT THAT ONE OF THE DETERIORATION FACTORS IS RAINWATER BLEEDING FROM THE EARTHEN PLATFORM INSIDE THE REAR OF THE BAS-RELIEF. FOR THIS OUTCOME, AN ENGINEERED COUNTERMEASURE HAD BEEN IMPROVED, IN ADDITION TO THE DEVELOPMENT OF TOUGHENING MATERIALS, WHICH IS BASED ON SILICATE ESTER FOR THE SANDSTONE OF THE BAS-RELIEF.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2008年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2009年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
年度			
総計	33,300,000	9,990,000	43,290,000

研究分野：文化財科学

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：カンボジア、バイヨン、鉱物劣化、着生微生物、保存科学

1. 研究開始当初の背景

今日までに行われてきた石材劣化と保存方法に関する研究は一般的な劣化のメカニズムについて解明したものである。また、これ

まで取り組んできた保存方法は、基本的には構造部材を対象としたものであり、バイヨン寺院の浮き彫りのように繊細な装飾部材の保存には必ずしも適したものではない。よっ

て、ここに内回廊の浮き彫りに焦点を当てた保存研究が強く求められた。

2. 研究の目的

- (1) 多種の記録方法の特性を活かした、多様な用途や必要性に応じた記録を試みる。
- (2) 水分の挙動や分布を解明し、それぞれの劣化原因との関係を突き止め、劣化を抑制し、回避するための工学的手法を検討する。
- (3) 基本的な劣化石材への処置は、石材表面の着生物の除去、脆弱化した石材の強化、強化後の石材の吸水防止処置、そして石材接着、擬石補填、目地充填などである。ここでは、バイオン内回廊に特化した保存材料の開発および施工技術に関する研究を行う。

3. 研究の方法

- (1) 石材表面の色情報、劣化分布の実態記録。こうした記録をもとに、屋根の有無や背面の床面高さなどの構造上の差違に基づく微気象の多様性と劣化状況の関係、バイオフィームと流水の関係、石材表面の「真の色」のスペクトル分布の解析結果に基づく着生物の同定分析
- (2) 水分の挙動、浮き彫り表面の流水分析、浮き彫り壁体背後の発掘調査、劣化因子となる微生物の研究、析出塩類の分析
- (3) 保存材料の開発および施工技術に関する研究を行うため、脆弱化した石材の保存方法の研究、構造的な破損部分の修復方法の研究、そして遮水方法の研究を行う。

4. 研究成果

バイオン寺院の外回廊のレリーフでは表面が藻類等に覆われている場所が多く見受けられる。内回廊では、特に中央部の基壇が高くなった場所ではレリーフの劣化が進行しており、ほとんど消滅している箇所もある。このような状況から、内回廊におけるレリーフの

保存対策は喫緊の課題である。

(1) 回廊の浮き彫りについて、レーザーレンジセンサーをクレーンに乗せて繰り返し測定を行い、これら回廊の浮き彫りを3次元モデル化を行った。通常、レーザーレンジセンサーは、1回の計測では部分的な形状しか得られない。そこで、壁全体の測定のため、多数回の計測を行い、得られた部分データをつなぎ合わせることによって、浮き彫り全体の3次元モデルを取得する。3次元モデルの切断面からは、浮き彫りの劣化状態を詳細に調べることが可能であり、修復の際の大きな手掛かりになる。

(2) シアノバクテリアという着生生物の増減を調べる目的から、この着生生物に特有の色素であるフィコシアニンに注目し、この色素の吸収スペクトルの変化を比較した。図1のグラフにこれの増減の結果を示す。フィコシアニンとスペクトルの関係でいえば、フィコシアニンの増加によって色が変化（赤→ピンク→黒）することがわかる。

デジタルデータは、単にビジュアルなコンテンツ制作の素材にとどまらず、保存、修復、解析などの基礎データとして活用できることがわかった。

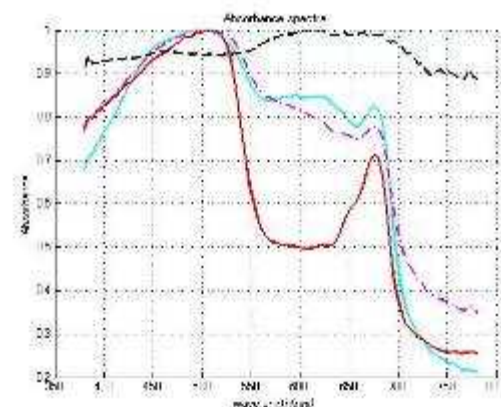


図1、各領域の吸収スペクトル

(およそ530～670nmの部分でフィコシアニンの吸収がみられる)

(3)塩類風化を引き起こす元となる水は基壇内部に由来するものであり、その起源は基壇上面に降った雨水である。この水に溶出した砂岩起源のカルシウム分やシリカ分が水の蒸発にともなって方解石や非晶質シリカとして石材表面近くで析出することがわかった。

今回の含水率測定結果からは、基壇が高く、背後に基壇を有する浮き彫りの箇所では、年間を通して含水率が高く、かつ、年変化が小さくなっていることが明らかになった。レリーフの保存対策として、背後からの水の遮断が必要不可欠である。

(4)石材風化の要因のひとつである酸性化は、地衣類、菌類、細菌などの微生物が代謝の過程で放出する有機酸や無機酸が加わることで著しく促進される。また、風化によって石材に形成された小孔に微生物が侵入し増殖すると、その閉ざされた空間でさらに独自の環境が形成され、劣化の進行を加速させる可能性がある。さらに、メラニンなどの色素を生成する*Cladosporium* 属や*Alternaria* 属などの菌類は、生育に伴い色素を沈着するので、熱帯地域では熱吸収率の変化による石材への効果は大きくなる。バイヨン寺院では、高湿度、強い日差し、寺院内に生息するコウモリの糞に由来する栄養分の供給など、さまざまな条件が加わることで回廊壁面の砂岩上の浅浮き彫り表面には、多彩な着生微生物（バイオフィーム）の生育が観察された。

(5)石材表面の黒褐色や紫色を呈するバイオフィームの表面を覆うように、白色の菌類が生育している場所がしばしば観察されていた。このような部分を詳細に観察すると、白色菌のコロニーには小型の昆虫の生育も見られ、独特の生態系が形成されており、更に時間の経過と共に菌糸が集まり束のようになるが、その際に周辺のバイオフィームを巻き込み剥がし取るような現象が見受けられた(図2)。



図2. 菌糸が周辺の着生微生物を剥し取る糸状菌の脱色の作用を推定

これらの試料からは*Aspergillus*

allahabadii あるいは*Botryosphaeria* 属に近縁な菌株が分離され、バイオフィーム上に生育する白色菌は複数種いることが判明した。これらの菌類あるいはその細胞由来の物質を用いたバイオフィームの除去の可能性も視野に入れ、分離菌株の性状を今後さらに調べることで、バイオフィーム除去に利用が可能かどうか検討したいと考えている。

(6)強化剤の耐候試験にはアンコール地域から産出した砂岩を円柱状(直径約45mmX長さ約100mm)に加工した約160点の供試体を使用した。リストアップした各種の強化剤や撥水剤を投与した供試体はバイヨン寺院の境内において曝露試験を実施した。



図3. 保存処理した試供体の曝露台

2008年から2010年にかけて曝露した試供体の吸水率を測定し、保存材料の耐候性をは

かる目安とした。その結果、強化剤のみを投与した試供体は、未処理の試供体よりも1%程度吸水率が小さくなった。強化剤に加えてさらに撥水剤処理を施した試供体の含水率は0.5%~1.2%を示しており、なお撥水効果を持続していることをうかがい知ることができる。また、現地においては硬さ試験器を用いた測定を行ない、保存材料の耐候性に関する評価法とした。吸水率、表面硬度の他、一軸圧縮強度、超音波伝播速度などの測定も行い、総合的に耐候性を評価した。また、超音波伝播速度の測定および破壊を伴う一軸圧縮強度試験を実施した。この試験では、ポリマー成分をやや多く含む強化剤で処理した試供体の方が圧縮強度は高い値を示した。撥水剤による処理だけの試供体では未処理のものと同様な変化はなかった。また、超音波伝播速度と圧縮強度の測定値の間には良好な相関関係がみられた。圧縮強度試験は試供体を破壊することから、超音波(S波)を用いた伝播速度を計測することにより非破壊で圧縮強度を換算できる可能性を示唆した。

(7)欠損部や割れ目を補填する修復材料として、変性エポキシ樹脂と砂岩粉末による擬岩の物性試験、耐候試験を実施した。さらに、擬岩の試験体に撥水剤(Silicate 3#)とアクリルシリコンを塗布することによって耐候性が倍加することがわかってきた。砂岩を用いた3年間の曝露試験により、耐候性の優れた強化材料や撥水剤を絞り込むことができた。

また、気象観測によって、バイヨン寺院の浮き彫りのある回廊の年間の気候変動の特徴を明らかにし、各回廊で相違を見いだすことができた。たとえば、雨季・乾季の境となる5月頃から結露しやすい環境になることがわかっており、湿気に弱い保存材料を扱う修理施工の時期を設定する際に配慮すべき重要事項となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 27 件)

下田一太・佐藤桂・溝口明則・中川武、
プラサート・トムを計画軸としたチョック・ガルギャーの寺院配置-カンボジア、
コー・ケー遺跡群の建築史的再考察(その2)-、日本建築学会計画系論文集、有、
NO.657、2010、2709-2718

E. Uchida, K. Ito, N. Shimizu, Provenance of the sandstone used in the construction of the Khmer monuments in Thailand., *Archaeometry*, 有、
52、2010、550-574

X.S. Li, T. Sato, Y. Oiwa, A. Kusumi, J-D. Gu, and Y. Katayama, Oxidation of elemental sulfur by *Fusarium solani* strain THIF01 harboring endobacterium *Bradyrhizobium* sp., *Microbial Ecology*, 有、60、2010、96-104

W. Lan, H. Li, W-D Wang, Y. Katayama, and J-D Gu, Microbial community analysis of fresh and old microbial biofilms on Bayon temple sandstone of Angkor Thom, Cambodia., *Microbial Ecology*, 有、60、2010、105-115

森本哲郎, Roby T Tan, 川上玲, 池内克史、層状表面におけるスパイダーモデルを用いた複雑反射の要素分解、映像情報メディア学会誌、有、Vol.64 No.4、2010、603-610

Takatoshi ARAKAWA, Yoshiaki KAWANO, Yoko KATAYAMA、他4名、Structural basis for catalytic activation of thiocyanate hydrolase involving metal-ligated cysteine modification., *Journal of the American Chemical Society*, 有、131、2009、14838-14843

森本哲郎, 池内克史、Normalized Cut法を用いた分光情報に基づく色復元、映像情報メディア学会誌、有、Vol.62, No.9、2008、1453-1460

阪野貴彦, 池内克史、位置合せによる移動型レンジセンサのための形状補正、電子情報通信学会論文誌、有、D II, J91-D, 8、2008、2089-2098

Uchida, E., Cunin, O., Shimoda, I., 他2名、AMS radiocarbon dating of wood samples from the Angkor monuments,

CambodiaRadiocarbon, 有、第50巻
第3号、2008、437-445

Xianshu Li, Hideo Arai, Ichita Shimoda, 他2名、Enumeration of

sulfur-oxidizing microorganisms on deteriorating stone of the Angkor monuments, Cambodia, Microbes and Environments, 有、Vol. 23, No. 4., 2008、293-298

Rei Kawakami, Jun Takamatsu, Katsushi Ikeuchi, Color Constancy from Blackbody Illumination, Optical Society of America (JOSA), 有、Vol. 24, No. 7, 2007、1886-1893

内田悦生、アンコール遺跡の石材と非破壊調査、物理探査、有、第60巻第3号、2007、223-234

[学会発表] (計 50 件)

「Sawada Masaaki, Study on the Conservation of Bas-Relief at the Inner Gallery of Bayon Temple in Cambodia, The International Symposium on 2010 Great Baekje World Festival, 2010年10月、Lotte Buyeo Resort, Buyeo, Korea
沢田正昭、浮き彫り保存の総合計画、バイヨン寺院浮き彫り保存の研究会、2011年1月、早稲田大学西早稲田キャンパス 55館S棟

沢田正昭、文化遺産の保存哲学と高分子材料、日本接着剤学会 第48回年次大会、2010年6月25日、関西大学

Takeshi Nakagawa, Problem and Possibility in Asian Countries between Cultural Preservation and Sustainable Development, Proceedings of the 8th International Symposium on Architecture Interchanges in Asia, 2010年9月20日、Saixiang Hotel, Tianjin, China

内田悦生、田久保豊、豊内謙太郎、他2名、アンコール・ワット十字回廊に見られる顔料の研究、日本文化財科学会、2010年6月26日、関西大学

片山葉子、石造文化財の微生物被害-アンコール遺跡(カンボジア)の場合、日本菌学会・日本防菌防黴学会合同シンポジウム 文化財の微生物汚染、2010年11月27日、東京医科歯科大学

森本哲郎、朽津信明、池内克史、パノラマ・マルチスペクトルカメラを用いた古墳壁画の文様検出、日本文化財科学会第27回大会、2010年6月26日、関西大学
Rei Kawakami, Katsushi Ikeuchi, Estimating Optical Properties of Layered Surfaces Using the Spider Model, The 6th International Workshop on Robust Computer Vision, December 29~30, 2010, Gwangju, Korea

Shimoda Ichita, Study on the Conservation Method of Bas-reliefs at Inner

Gallery of Bayon, International Coordinating Committee for the Safeguarding and Development of the Historic Site of Angkor, 2010

年6月2-3日、Siem Reap, Cambodia

松井敏也、保存修復科学研究、バイヨン寺院浮き彫り保存の研究会、2011年1月8日、早稲田大学西早稲田キャンパス55館S棟

内田悦生・下田一太・田久保豊、他1名、アンコール遺跡バイヨン内回廊における砂岩材含水率の年変化、日本文化財科学会、2009年7月11日、名古屋大学
千葉麻由子、中川 武、バイヨン寺院内回廊バス・レリーフの保存に関する研究、日本建築学会、2009年8月26日、東北工業大学

沢田正昭、松井敏也、JSA、アンコール遺跡・バイヨン寺院浮き彫りの保存科学的研究、東アジア文化遺産保存学会、2009年10月16日、China, Beijing, 故宫博物院、

片山葉子、砂岩表面の着生微生物、シンポジウム「アンコール遺跡を守る」、2009

年11月21日、国士舘大学

関田真奈、加藤広海、片山葉子、アブラナ科植物の器官別 COS 放出ならびにそれらを分解する土壌微生物、第25回日本微生物生態学会、2009年11月21-23日、広島大学

沢田正昭、バイヨン寺院浮き彫りの修造、シンポジウム「アンコール遺跡を守る」、2009年11月21日、国士舘大学

中川武、日本政府アンコール遺跡救済チームの活動、日韓文化財科学国際シンポジウム、2010年3月27日、韓国・国立現代美術館

内田悦生、アンコール遺跡の岩石学-砂岩一、日韓文化財科学国際シンポジウム、2010年3月27日、韓国・国立現代美術館

Masaaki SAWADA, JASA-Takeshi NAKAGAWA, Scientific Study on the Conservation and Restoration of Bas-relief in the Inner Gallery of Bayon, Angkor Site in Cambodia, Proceedings of International Symposium, Conservation of Ancient Sites 2008 & ISRM-Sponsored Regional

Symposium、2008年9月21-25日、
中国・敦煌研究院

- ⑳ 大藏苑子,川上玲,池内克史、全周画像を用いた屋外拡散反射物体の表面反射率の推定、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2008)」、2008年7月31日、
軽井沢プリンスホテル
- ㉑ Rei Kawakami, Katsushi Ikeuchi、Color estimation from a single surface color、The 4th International Joint Workshop of KAIST RCV Lab. & Univ. of Tokyo Ikeuchi Lab. on Robust Vision Technology、2009年1月10日、Jeju, Korea
- ㉒ Ji-Dong Gu, Wensheng Lan, and Yoko Katayama、Molecular analysis of fresh and old microbial biofilms on Angkor Wat sandstone、14th International Biodeterioration and Biodegradation Symposium、2008年10月6-11日、Messina, Italy
- ㉓ SAWADA Masaaki, JSA、Research Plan on the Conservation Method of Bas-Relief at Inner Gallery of Bayon、International Symposium on Conservation of Cultural Heritage in East Asia、2007.11.1.、The National Museum of Korea、Korea、Seoul

[図書] (計 6件)

沢田正昭、池内克史、内田悦生、片山葉子、中川武、松井敏也、下田一太、他3名、(株)クパプロ、アンコール遺跡・バイヨン寺院浮き彫りの保存方法の研究、2011、141

内田悦生、下田一太、早稲田大学出版、石が語るアンコール遺跡 - 岩石学からみた世界遺産、2011、254

片山葉子 (分担執筆)、朝倉書店、環境毒性学、2010、252

Nakagawa Takeshi, Tuchiya Takeshi, Shimoda Ichita、UNESCO/Japanese Funds-in-Trust for the Preservation of World Cultural Heritage、Report on the Conservation and Restoration Work of the Northern Library inside the Outermost Enclosure of Angkor Wat、2010、293

池内克史、大石岳史、東京大学出版会、3次元デジタルアーカイブ、2010、272

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

沢田 正昭 (SAWADA MASA AKI)
国士舘大学・21世紀アジア学部・教授
研究者番号：2000049

(2)研究分担者

内田 悦生(UCHIDA ETSUO)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：40185020

片山 葉子(KATAYAMA YOKO)
東京農工大学・共生科学技術研究院・教授
研究者番号：90165415

中川 武(NAKAGAWA TAKESHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：30063770

池内 克史(IKEUCHI KATSUSHI)
東京大学情報学環・教授
研究者番号：30282601

下田 一太(SHIMODA ICHITA)
早稲田大学・理工学術院・講師
研究者番号：40386719

松井 敏也(MATSUI TOSHIYA)
筑波大学・人間総合科学研究科・准教授
研究者番号：60306074(H20-H22)

研究協力者

松井 敏也(MATSUI TOSHIYA)
筑波大学・人間総合科学研究科・准教授
研究者番号：60306074 (H19)