

平成 21 年 4 月 22 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17403001
 研究課題名（和文） 東南アジアにおける石造文化財の石材並びに石材劣化に関する研究
 研究課題名（英文） Study on stones and their deterioration of the masonry cultural heritages in Southeast Asia.
 研究代表者
 内田 悦生（UCHIDA, Etsuo）
 早稲田大学・理工学術院・教授
 研究者番号：40185020

研究成果の概要：

本研究では、主として、カンボジアのアンコール遺跡および同時代にクメール人によって建造されたタイおよびラオスのクメール遺跡の石材に加えて、インドネシアの中部ジャワ遺跡の石材に関する岩石学的調査を行なった。

アンコール遺跡に関しては、灰色～黄褐色砂岩の帯磁率を基に石切り場の変遷や遺跡の建造時期・順序の推定が行なえるようになった。中部ジャワ遺跡に関しては石材の特徴の時代変化を明らかにするとともに石材供給地を明らかにすることができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	7,000,000	0	7,000,000
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
総計	13,300,000	1,260,000	14,560,000

研究分野：総合領域（岩石・鉱物・鉱床学）

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：文化財、石材、劣化、東南アジア、アンコール遺跡、クメール遺跡、中部ジャワ遺跡

1. 研究開始当初の背景

平成6年以来、日本国政府アンコール遺跡救済チームのメンバーとしてカンボジアのアンコール遺跡の石材と石材劣化に関する調査・研究を行なうとともに、平成14年度～16年度の科学研究費基盤研究B（海外）の交付を受けてタイのクメール遺跡の石材とその供給地に関する調査を行なってきた。これらの研究結果を踏まえ、まだ調査を行なっ

ていないカンボジア、タイおよびラオスのクメール遺跡の調査を行なうとともに、アンコール遺跡およびクメール遺跡をより良く理解する上で調査対象を東南アジアの石造文化財（レンガ造も含む）に広げ、東南アジア全般における石造文化財の石材および石材劣化に関する比較調査を行なう必要性が生じてきた。

2. 研究の目的

本研究では、カンボジアのアンコール遺跡に加え、カンボジア、タイ、ラオスのクメール遺跡およびインドネシアの中部ジャワ遺跡の石材を記載するとともにその供給源を明らかにすることを目的とした。また、アンコール遺跡を中心に石材の劣化機構を明らかにし、保存方法を確立することも本研究の目的とした。詳細な目的は下記の通りである。

(1)アンコール遺跡に共通して用いられている灰色～黄褐色砂岩の帯磁率を基に、遺跡の建造時期および順序を明確にする。

(2)アンコール遺跡の砂岩材の劣化機構を明らかにする。特に、バイヨン内回廊のレリーフの保存対策に有効な対策を確立する。

(3)アンコール・ワットに使用されている顔料を明らかにする。

(4)アンコール地域以外に存在するカンボジア、タイおよびラオスのクメール遺跡の石材とその供給源を明らかにする。

(5)インドネシアの中部ジャワ遺跡に使用されている石材の特徴の時代変化を明らかにするとともに石材の供給地を明らかにする。

3. 研究の方法

上記目的の各項目に対応させて、その研究方法について述べる。

(1)携帯型帯磁率計を用いてアンコール遺跡の各遺跡の主要箇所において 50 個の灰色～黄褐色砂岩材に対して帯磁率を測定し、平均値を求め、その値から各遺跡の各建造物の建造順序の推定を行うとともに、遺跡の建造時期に関する考察を行なう。この際、既に確立されている石材の特徴に関する時代変化も考慮に入れて考察を行なう。

(2)石材の劣化パターンを明らかにするとともに、劣化試料を採取し、顕微鏡下における薄片観察、蛍光 X 線分析装置や X 線マイクロアナライザーを用いた化学組成分析を行い、劣化機構を解明する。

特に、バイヨンの内回廊のレリーフでは劣化が顕著となっており、その保存が急務であるためバイヨン内回廊における劣化調査を行なう。劣化においては水が重要な役割を果たすため、幾つかの観測地点において含水率の年変動を明らかにするとともに、劣化の程度を明確にするためデジタル顕微鏡による観察や表面吸水試験を実施する。

(3)デジタル顕微鏡を用いて顔料の観察を行うとともに、携帯型蛍光 X 線分析装置を用いて顔料の同定を行なう。また、剥離し、採取可能な顔料がある場合には試料採取を行い、顔料の断面試料を作製し、顕微鏡等で観察を行うとともに、微小部 X 線回折装置および X 線マイクロアナライザーを用いて顔料の同定を行なう。

(4)アンコール地域以外に存在するカンボジア、タイおよびラオスのクメール遺跡において、遺跡に使用されている石材の記載を行なうとともに、落下石材片の採取を行い、石材の顕微鏡観察および化学組成分析を実施し、石材の記載・分類を行なう。また、遺跡の周辺地域に分布している岩石の調査を行い、石材供給源を推定する上で必要な基礎データの取得を行なう。

(5)インドネシア、中部ジャワ遺跡の各遺跡において石材の特徴を記載し、帯磁率の測定を行うとともに、落下材の採取を行ない、顕微鏡観察を行うとともに化学組成分析を実施する。それとともに、石材供給源である可能性のある周辺火山や河川において岩石の帯磁率測定および試料採取を行ない、採取した試料に対して顕微鏡観察および化学組成分析を行う。

4. 研究成果

以下に、上記研究目的および方法の各項目に対応させてその成果を記述する。

(1)アンコール遺跡の主要建造物に対して砂岩材の詳細な帯磁率測定を実施し、次のことが明らかとなった。

砂岩材の帯磁率変化に基づき、アンコール時代を 11 のステージに分けることができた。以前の研究からアンコール時代において 7 つの石切り場が存在したことが明らかとなっているが、その 7 つの石切り場は、それぞれステージ a、および b に対応する。ステージ (プリア・コー期) に対応する遺跡の砂岩材は $1.1 \sim 2.3 \times 10^{-3}$ SI 単位の帯磁率を示す。ステージ (バケン期) の砂岩では時間とともに帯磁率が小さくなる傾向を示し、初期では 10×10^{-3} SI 単位の帯磁率を、末期では 1.0×10^{-3} SI 単位の帯磁率を示す。ステージ (遷移期) の砂岩は $2.3 \sim 3.0 \times 10^{-3}$ SI 単位のやや高い帯磁率を示す。ステージ a (プレ・ループ〜クレーン〜パプーオン期) では $1.1 \sim 2.4 \times 10^{-3}$ SI 単位の低い帯磁率を示す。ステージ b はアンコール・ワット期前期に対応し、ステージ a とステージ (アンコール・ワット期主要期) における砂岩の帯磁率 $2.8 \sim 4.3 \times 10^{-3}$ SI 単

位の中間の帯磁率を示す。ステージ a-c(バイオン期前期)の砂岩はステージ dの砂岩より若干低い帯磁率 $2.5 \sim 2.9 \times 10^{-3}$ SI単位を示す。d期はステージ a-cと次のステージ(バイオン期主要期)の帯磁率 $0.7 \sim 1.4 \times 10^{-3}$ SI単位の間の帯磁率を示す。それ以降、砂岩の帯磁率は増加し、ステージ a(バイオン期後期)で $1.2 \sim 2.1 \times 10^{-3}$ SI単位、ステージ b(バイオン期末期)で $1.9 \sim 3.1 \times 10^{-3}$ SI単位の帯磁率を示す。これらの帯磁率変化を基に、アンコール遺跡主要遺跡における建造順序の推定を行った。

(2)アンコール遺跡における塩類風化には次の3種類が認められる。

- (a)コウモリの排泄物による塩類風化
- (b)方解石析出による塩類風化
- (c)タフォニ(蜂の巣状風化)

(a)の塩類風化は、石こうや各種リン酸塩鉱物の析出によるものであり、遺跡に棲みついているコウモリの排泄物中に含有されているイオウおよびリンが析出塩類の起源である。このことはイオウおよびストロンチウム同位体によって明らかにされた。この塩類風化は建物内部の屋根、壁面、柱下部において顕著であり、アンコール・ワット、プノン・クロムおよびバイオンにおいてこのタイプの劣化が顕著に見られる。(b)の塩類風化は、主として基壇表面や屋根材内側に見られる。この風化では砂岩中を浸透してきた雨水に砂岩中のカルシウム分が溶出し、その水が岩石表面で蒸発する際にカルシウム分が方解石(炭酸カルシウム)として析出する。この方解石の析出によって砂岩材表面が膨張し剥離が生じる。(c)のタフォニの原因は明確ではないが、一般的に塩類析出によると言われている。タフォニはバイオン外回廊の柱材に見られ、日射しの強い南側で特に顕著になっており、日射しがこの塩類風化に関係していることが推測される。

アンコール・ワットのレリーフやバイオンの外回廊のレリーフでは塩類析出による石材劣化はそれほど顕著ではないが、バイオン内回廊のレリーフでは、塩類析出による劣化が顕著になっている。外回廊のレリーフでは表面が藍藻類に覆われ黒くなっている場所があるが、全体的にレリーフそのものの劣化は顕著でない。それに対して、内回廊では、特に中央部の基壇が高くなった箇所劣化が著しく進行しており、場所によってはレリーフがほとんど消滅している。

このような内回廊と外回廊におけるレリーフの劣化度の違いは、内回廊と外回廊の置かれた状況の違いによってもたらされていると考えられる。まず、大きな違いは屋根の存在である。外回廊では完全に屋根が崩落しているのに対し、内回廊ではおよそ半分の箇

所で屋根が残存している。特に、レリーフの傷みが激しい基壇の高くなった中央部では、全ての場所で屋根が残っている。基壇の低くなった各面の両側では、屋根のある部分とない部分とがあるが、屋根のある部分での劣化は、基壇の高くなった中央部ほどは激しくはないが、屋根の無い部分と比べて劣化が進んでいる。このように屋根の有無が劣化状況に影響を与えているように思われる。屋根が及ぼす影響としては、雨のかけ方や光のあたり方の違いが考えられる。しかしながら、内回廊の基壇の低くなった箇所における劣化は、中央部の基壇の高くなった箇所の劣化と比べてそれほど顕著ではない。このことから、さらに重要な劣化の原因があると思われる。

内回廊中央部の基壇の高くなったところでは、床から1.5mくらいの高さまでの壁面の後側は、裏側にある回廊の基壇となっている。タ・ケオがその典型例であるが、一般的に基壇表面では塩類風化、特に方解石の析出に伴う塩類風化が顕著になっており、このことがレリーフの劣化に結びついていることが考えられる。このような塩類風化は、水がかかりにくく、塩類が洗い流されず集積しやすいところで顕著であることから、屋根で覆われている中央部は、塩類風化にとって好条件となっている。実際にレリーフの劣化した場所では、方解石の濃集による剥離やシリカ分の表面析出が見られ、塩類風化が劣化の重要な原因となっていることを示している。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、その起源は基壇上部に降った雨水である。一部の雨水が基壇内に浸み込み、この水が基壇内部から徐々に基壇表面の砂岩材に浸み出し、この水に溶けていたカルシウム分やシリカ分が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によって石材表面の劣化を引き起こされる。そこで、バイオン内回廊における水の動きを調べ、レリーフの劣化との関係を明らかにすることを目的として、内回廊における含水率の年変化を調べた。測定にはケツト科学研究所製のコンクリート・モルタル水分計HI-500を用いた。バイオン内回廊の64箇所において測定を行った。測定箇所としては、誘電率に基づく装置に対する制約から、できるだけ表面が平らな場所を選んで測定を行った。測定では、装置の向きを変えながら測定し、得られた最大値をその場における含水率とした。測定は、2007年12月から2009年2月までの1年2ヶ月間、毎月1回ずつ行なった。測定の結果、次のことが明らかとなった

基壇が低く屋根の無いところを比較してみると含水率は明らかに北面東側(東側には屋根有り)で高く、北面西側、西面北側、西面南側、東面南側で低くなっている。これは

日射しの関係で、北面東側で日当たりが悪く、岩石中の水分が蒸発し難いが、南側、西側および東側では日当たりがよく、雨が降ってもすぐに蒸発することを示している。また、基壇が低く屋根のあるところでは場所による含水率の違いが大きくなっており、屋根部からの雨水の漏れの有無や日当たりの良し悪し等により異なることを示している。基壇の低いところでは、全体的に降水量に連動した含水率の変化を示す傾向が見られ、6月頃と10月頃にピークを示している。

基壇が高くなっているところでは全般的に含水率は高いが、背後に基壇のある下部と基壇の無い上部とでは異なった含水率の年変化を示している。背後に基壇のある下部では相対的に含水率が高く、年変化があまり見られない。それに対し、背後に基壇の存在しない上部では、相対的に含水率が低く、降水量に連動して含水率が変化する傾向を示している。

基壇が高く、背後に基壇を有する箇所では、レリーフの劣化が顕著であり、その表面に方解石や非晶質シリカが析出していることから塩類風化が劣化の原因であると思われる。今回の含水率測定結果からは、このような場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となった。このことは、基壇内部にしみ込んだ雨水が徐々に基壇表面の砂岩材に移動することにより年間を通じて含水率が高く保たれていることを示している。このような水が石材表面から大気中に蒸発し、その過程で水に溶けていたカルシウム分やシリカ分が方解石や非晶質シリカとなって石材表面に析出することによりレリーフの劣化を引き起こしている。それゆえ、レリーフの劣化防止対策として、背後にある基壇からの水の供給を遮断する必要があると考えられる。

(3) アンコール・ワットの十字回廊の多くの柱や壁面には、赤、オレンジやピンク色等を呈した顔料が見られる。また、柱上部にある横架材の下面や天井部の小壁にも白色と赤色の顔料が一面に塗布されている。これらの顔料に対して携帯型蛍光X線分析装置を用いて現地で化学組成分析を行なうとともに、剥離している顔料を採取し、X線マイクロアナライザーおよび微小部X線回折装置を用いて顔料の同定を行なった。その結果、次のことが明らかとなった

柱の顔料は多層構造を成している。すなわち、表面から第1層(白色、見かけはピンク色): シュウ酸カルシウム + 塩化鉛 + リン酸カルシウム + 石こう + 硫酸鉛、第2層(赤色): 赤鉄鉱 + シュウ酸カルシウム + 塩化鉛 + リン酸カルシウム + 石こう + 硫酸鉛、第3層(白色): 塩化鉛 + シュウ酸カルシウム +

鉛白、第4層(オレンジ色): 鉛丹、第5層(白色): 塩化鉛 + シュウ酸カルシウムとなっていることが明らかとなった。

また、北側の壁面では、第1層(淡いオレンジ色): リン酸カルシウム + シュウ酸カルシウム + 若干の赤鉄鉱、第2層(黒色): PbO_2 + 塩化鉛 + リン酸カルシウム、第3層(白色): 鉛白 + 若干の塩化鉛、第4層(オレンジ色): 鉛丹 + リン酸カルシウム + 石こう + 塩化鉛、第5層(白色): シュウ酸カルシウム + 石こう + 炭酸カルシウム + 若干のリン酸カルシウムとなっていることが明らかとなった。

(4) アンコール遺跡では、石英質の赤色砂岩が用いられているバンテアイ・スレイを除いて灰色～黄褐色砂岩が共通に用いられている。この灰色～黄褐色砂岩は、カンボジア国内の北部に位置する主要遺跡であるベン・メリア、バンテアイ・チュマル、コー・ケルおよびコンボン・スヴァイのプリア・カーンでも使用されている。しかしながら、カンボジア国内の他の主要遺跡であるバタンバン周辺のワット・エク、プノン・バナ、プラサート・バセツ、ワット・スネンと、プノン・ベンの南部に位置するプノン・チソールおよびトンレ・パティのタ・プロームでは灰色～黄褐色砂岩ではなく、主として石英質砂岩が使用されている。また、タイ東部のコラート高原には多くのクメール遺跡が存在するが、ここでも灰色～黄褐色砂岩は全く使用されず、石英質砂岩および石質砂岩が使用されている。他方、コラート高原の東側の低地に位置するラオスのワット・プーでは灰色～黄褐色砂岩が使用されている。

基本的に使用されている砂岩材は周辺地質によって決定されている。

コラート高原の地層は中生代の三畳紀から白亜紀の堆積岩より構成される。クメール遺跡と関係する地層に限定して述べると、下からファイ・ヒン・ラート層、プー・クラドゥン層、プラ・ヴィハーン層、サオ・クワ層、プ・ファン層、コー・クルワット層、マハ・サラカム層となっている。ファイ・ヒン・ラート層は硬砂岩からなり、この砂岩はアンコール遺跡のタ・ケオの祠堂に用いられている。その上にあるプー・クラドゥン層はアンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩を産する。プー・クラドゥン層はコラート高原の下部層を構成していることから、コラート高原上のクメール遺跡にはこれらの灰色～黄褐色砂岩は使用されていない。プー・クラドゥン層は、コラート高原の周辺部からカンボジア北東部、ラオス南部、ヴェトナム中南部にかけての低地に広く分布している。アンコール遺跡の北東40kmのところには、クレン山の下部には、灰色～黄褐色砂岩を

産出するプー・クラドゥン層がほぼ水平に横たわっている。クレン山の南東部の裾野でその露出が確認され、多くのアンコール時代の石切り場跡が残されている。

このプー・クラドゥン層の上には、石英質砂岩であるプラ・ヴィハーン層、サオ・クワ層、プ・ファン層が乗っている。クレン山を構成する地層のほとんどはこれらの石英質砂岩層である。クレン山の西側近くに位置するバンテアイ・スレイの赤色砂岩はサオ・クワ層起源である。プラ・ヴィハーン層の石英質砂岩は黄褐色を、サオ・クワ層の石英質砂岩は赤色を、プ・ファン層の石英質砂岩は白色を呈することが多い。コラート高原の周辺部は主としてこれらの地層によって構成されている。コラート高原の中心部では、これらの石英質砂岩とは異なって岩石片を多く伴う細粒の石質砂岩からなるコー・クルワット層およびマハ・サラカム層が分布し、最も内側を占めるマハ・サラカム層は沖積層によって覆われているためその露頭はきわめて稀である。コラート高原上のクメール遺跡は、基本的にこれら石英質砂岩および石質砂岩より構成されている。石英質砂岩が用いられている遺跡としては、ムアン・タム、パノム・ルン、スドック・コーク・トム、タ・ムアン・トム、ナライ・ジェン・ウェン、プラ・ヴィヘア等が挙げられる。また、後者の石質砂岩が用いられている遺跡としては、ピマイ、パノム・ワン、ムアン・ケーク、カンペン・ヤイ等がある。前者の遺跡群はコラート高原の周辺部に、後者の遺跡群はコラート高原の中心側にあり、使用されている砂岩が周辺地質に支配されていることが分かる。

カンボジアのバタンバン周辺およびプノン・ペン南に位置する遺跡では主として石英質砂岩が使用されており、これらの周辺部には灰色～黄褐色砂岩が分布しておらず、バタンバンの南側、かつ、プノン・ペンの西側、すなわち、カンボジアの南西部には、コラート高原やクレン山と同じような岩石から構成されるカルダモン山脈が存在している。このことから、これらの遺跡の石英質砂岩はこのカルダモン山脈から供給されたものと推定される。また、プノン・バノンには石質砂岩も使われており、これらの砂岩もカルダモン山脈に由来するのではないかと思われる。

(5) 中部ジャワ遺跡を構成する石材の特徴の時代変化および石材供給源を明らかにすることを目的としてディエン地域、ゴドン・ソング地域、ポロブドゥール地域およびプランバナ地域に存在する計 28 の遺跡に対して岩石学的調査を行った。

石材の特徴(厚さ、組積法、帯磁率、構成鉱物、全岩化学組成)に基づき調査した遺跡

は時代順に次の 7 グループに分類された。

: アルジュナ、セマール(前期ディエン)
: スリキャンディ、スンパドラ、ダラヴァティ、ガトゥカッチャ、ピマ(後期ディエン)
: ゴドン・ソンググループ(ゴドン・ソング)

: グヌン・ウキール(初期ポロブドゥール・プランバナ)

: ルンブン、ブブラ、セウ、サリ、カラサン、パウオン、ムンドウ、ポロブドゥール、サンピサリ、パニユニボ(前期ポロブドゥール・プランバナ)

: ヌガウエン、プラオサン・ロル、ロク・ジョンラン、サジワン、パロン(後期ポロブドゥール・プランバナ)

: クラトン・ラト・ボコ、イジョー(末期ポロブドゥール・プランバナ)

グループを除き、石材の厚さは時代とともに厚くなる傾向が認められた。

また、帯磁率と化学組成から各遺跡における石材の供給地に関して、各遺跡の存在する火山、あるいは、近接する火山から供給されたことが明らかになった。ポロブドゥール遺跡群に関しては、従来、近くの河川から石材が供給されたと考えられていたが、帯磁率、化学組成および孔隙率から判断して河川ではなく、ムラピ山から直接供給されたことが明らかになった。

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 5 件)

(1) Uchida, Cunin, Shimoda, Takubo, Nakagawa (2008): AMS radiocarbon dating of wood from the Angkor monuments, Cambodia. Radiocarbon, 50,437-445 (査読有)

(2) Uchida, Cunin, Suda, Ueno, Nakagawa (2007): Consideration on the construction process and the sandstone quarries during Angkor period based on the magnetic susceptibility. J. Archaeological Science, 34, 924-935(査読有)

(3) 内田悦生 (2007): アンコール遺跡の石材と非破壊調査・物理探査, 60, 223-234(査読有)

(4) Hosono, Uchida, Suda, Ueno, Nakagawa (2006): Salt weathering of sandstone at the Angkor monuments, Cambodia: identification of the origins of salts using sulfur and strontium isotopes. J.

Archaeological Science, 33, 1541-1551(査読有)

(5)Uchida, Suda, Ueno, Shimoda, Nakagawa (2005): Estimation of the construction period of Prasat Suor Prat in the Angkor monuments, Cambodia, based on the characteristics of its stone materials and the radio active carbon age of charcoal fragments. J. Archaeological Science, 32, 1339-1345(査読有)

〔学会発表〕(計 8 件)

(1) 内田悦生 アンコール遺跡(カンボディア)の木材に対する¹⁴C年代測定、日本文化財科学会、2008年6月14日、鹿児島国際大学

(2) 山本信夫 カンボジア、バイヨン寺院南経蔵中央坑における出土金属製品と組成分析、日本文化財科学会、2008年6月14日、鹿児島国際大学

(3) 内田悦生 インドネシア、中部ジャワ遺跡に使用されている石材の特徴、日本文化財科学会、2007年、6月2日、奈良教育大学

(4) 内田悦生 携帯型蛍光X線分析装置のアンコール遺跡への応用 - ラテライトの分類とバイヨン寺院内回廊の石材劣化 -、日本文化財科学会、2007年6月2日、奈良教育大学

(5) 内田悦生 タイおよびラオスに分布するクメール遺跡の砂岩材供給源、日本文化財科学会、2006年6月18日、東京学芸大学

(6) 内田悦生 砂岩の帯磁率から推定されるアンコール遺跡の建造過程 (その2) プラ・コー期からアンコール・ワット期 日本文化財科学会、2006年6月18日、東京学芸大学

(7) 内田悦生 石材の特徴および木炭の放射性炭素年代測定に基づくアンコール遺跡プラサート・スーラの建造年代の推定、日本文化財科学会、2005年7月9日、北海道大学

(8) 細野高啓 カンボジアのアンコール遺跡における砂岩材の塩類風化プロセス：硫黄・ストロンチウム同位体を用いた塩類起源物質の推定、日本文化財科学会、2005年7月9日、北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者
なし
(3) 連携研究者

中野 孝教 (NAKANO TAKANORI)
総合地球環境学研究所・研究部・教授
研究者番号：20155782

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