

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18500785
 研究課題名（和文） アンコール・ワットに見られる砂岩ブロックの風化特性と風化プロセスに関する研究
 研究課題名（英文） Weathering behaviours and processes of the sandstone block in Angkor Wat, Cambodia
 研究代表者
 藁谷 哲也（WARAGAI TETSUYA）
 日本大学・文理学部・教授
 研究者番号：30201271

研究成果の概要：本課題では、アンコール・ワットを構成する砂岩の自然劣化の仕組みを解明して、遺跡の保存・修復事業に貢献することを目的に研究を進めた。その結果、砂岩は主に乾湿風化、加水分解、塩類風化などで劣化し、これら風化の抑制が遺跡の保全に重要であることがわかった。とくに砂岩の強度は、降雨による吸水によって最大 1/2 に低下することから、高水分環境で風化は進行しやすい。また、アンコール遺跡の風化速度は、1000 年あたり 11～94mm で進んだことがわかった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年	1,700,000	0	1,700,000
2007 年	500,000	150,000	650,000
2008 年	600,000	180,000	780,000
総計	2,800,000	330,000	3,130,000

研究分野：地形学

科研費の分科・細目：地理学・地形

キーワード：(1) 世界遺産 (2) 岩石風化 (3) 砂岩 (4) スレーキング (5) アンコール遺跡 (6) 風化速度 (7) 環境モニタリング (8) 風化係数

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究対象としたアンコール・ワットは、UNESCO 世界遺産に指定されている「アンコール」の代表的寺院である。この「アンコール」を構成する多くの遺跡は、いずれも自然的、人為的な要因から強度の劣化が進行している。このため、その管理はカンボジア政府の機関である the Authority for the Protection and Management of Angkor and the Region of Siem Reap (APSARA) によって行われている。また、わが国をはじめ各国による国際的な保存・修復事業が展開されている。そのような中、筆者は 2000 年 9 月から 2001 年 9 月まで、APSARA の許可を得て 2 台の測定機器をアンコール・ワット内に設置して、微気象条件の測定を行

うとともに、石材（砂岩・ラテライト）の風化過程を研究してきた。2004 年 8 月以降は、第 1 回廊の 4 箇所新たにデータロガーを設置し、とくに砂岩からなる柱の風化にかかわる微気象観測を続けた。本課題では、このような微気象観測および機器の設置場所、設置方法、設置承認機関等に関する過去の十分な実績を背景に研究に着手することができた。

このような研究背景の中、遺跡の建築に用いられた石材と同質と推定される石材を試料として、その応用地質学的な分析を始めた。また現地では、第 1 回廊における柱の風化にかかわる水分状態や劣化の程度を表す弾性波速度についても、測定を実施していた。しかし、これらについては、解析に十分な量のデ

ータを得るまでには至っていなかった。このため、データの蓄積がさらに必要であると考えていた。

(2) 世界遺産である「アンコール」を構成する石材の分析では、非破壊測定により様々なデータの取得を行う必要がある。そこでこれまでは、非破壊でおもに石材表面の温度分布を測定するための放射温度計や石材の強度推定を行う弾性波試験機を利用して進めた。しかし、風化過程の分析に重要な水分測定については、未実施であった。一方、剥離片などの崩落物質については、レーザー顕微鏡による石材表面部の立体的な風化状態観察やXRD・XRF・EPMAなどによる鉱物学および化学的分析を進めていた。これらのため、遺跡を構成する石材の主な物性値や化学的性質などについては、ある程度の基礎的データが得られており、直ちに当該課題に取り組むことができた。

2. 研究の目的

カンボジア北西部、トンレサップ湖の北に位置するアンコール・ワットは、クメール人の世界観を具現化した世界最大級の宗教遺跡である。この遺跡は、「アンコール」の代表的寺院として1992年に世界遺産条約リストに登録された。遺跡の建築には、おもに周辺から産出された砂岩やラテライトなどが使用された。しかし、遺跡が13世紀末頃に放棄されて以降、激しい風化や人為的破壊に曝されてきた。このため、現在ではUNESCO主導で保



図1 第1回廊の砂岩柱の劣化状態(2005年3月)
右手は強度に劣化した砂岩柱、左手は基部にノッチ状のへこみを伴う砂岩柱。

存・修復事業が進められている。

アンコール・ワットを構成する石材の風化プロセスについてみると、風化は遺跡の立地

する気候環境と石材固有の物理的・化学的性質とが良く対応していることがわかる。アンコール・ワットには3つの回廊があるが、これら回廊のなかでも最も美術的・歴史的価値の高いとされるのは、レリーフを擁する第1回廊である。ここでは、回廊を支える200本以上の砂岩柱で著しい劣化が認められる(図1)。このような柱の劣化は、とくに南と東に向く回廊に集中しているようである。砂岩柱の劣化が、さらに進行すれば、回廊全体の崩壊につながる懸念されるが、劣化原因の調査・研究やそれを阻止するための方策は、十分にとられていないのが現状である。

そこで本研究では、第1回廊の微気象環境と石材の風化特性とをもとに、第1回廊で発生している砂岩柱の劣化過程を解明する。このため、第1回廊において、データロガーを用いた温度・湿度の長期測定(4年間)を行って風化環境を詳しく検討する。同時に、第1回廊の砂岩柱を対象に、非接触による温度と水分の測定及び弾性波試験機を利用した強度推定を行い、風化環境と石材の劣化状態との関係を分析する。ところで、アンコール・ワットを含むアンコール遺跡では、建築年代の判明しているものが多い。そこで砂岩ブロックの風化状態と建築年との関係から、砂岩の風化速度を推定することを試みる。砂岩ブロックの風化速度を明らかにすることは、遺跡の保存事業で用いられる石材の耐用年数を考える上でも意義のあるものと考えられる。

3. 研究の方法

(1) アンコール・ワットにおける調査では、おもに気温・湿度測定用データロガーの設置とデータ回収、および第1回廊の柱・壁面を対象としたシュミットハンマ反発値測定、放射温度・弾性波速度・水分(赤外線による)などの原位置データの取得(乾季と雨季の年2回)を行った。とくに研究対象地は、雨季と乾季が交替する熱帯モンスーン気候下にあるため、それぞれの時期における原位置データを取得した。なお、測定に使用した機材のキャリブレーションは、国内で行った。また、アンコール・ワットでは、風化に伴って崩落物質(剥離片)が認められることもある。この場合、崩落物質の採取を行って各種の分析に利用した。

(2) 国内における分析は、現地で得られた微気象および計測データの整理と試料の分析を行った。とくに試料については、これまでに

採石場から採取した岩塊試料や崩落物質などを利用して物性値や化学組成分析、および含水比と水分値とのキャリブレーションカーブを求めた。

(3) アンコール遺跡を対象とした風化調査では、アンコール・ワットを含めて23遺跡を対象として、風化による剥離位置と深さの測定、砂岩ブロック表面のシュミットハンマ反発値および水分の測定を実施した。

(4) これら現地調査や試料の採取に際しては、すべての遺跡が世界遺産であることから、上智大学アジア文化研究所（石澤良昭教授）を介してAPSARAに対する調査申請を行い、許可を受けて進めた。申請に際して、調査手法の検討や遺跡内に長期にわたって設置されるデータロガーの管理については、これまでアンコール・ワットにおける保存修復事業の長年にわたる実績がある日本大学理工学部（片桐正夫教授）や上智大学アジア文化研究所（三輪悟研究員）と事前協議した。

4. 研究成果

(1) 砂岩からなるアンコール・ワット第1回廊では、表面部の浮き上がりや剥離など自然劣化が進んでいる。その原因のひとつに、砂岩柱の熱風化が指摘されていた。しかし砂岩柱に対して、これまで温度分析は行われておらず、熱風化の影響について定量的に検討されてこなかった。そこで本研究では、放射温度計による測定結果をもとに、砂岩ブロックに対する熱風化環境を検討した。放射温度測定は、北・南・東・西に向く回廊から4箇所（GNE, GSE, GEN, GWN）、またポルチコから北・南・東・西に向く砂岩柱（PNE, PSE, PEN, PWS）を選定して行った。測定は、気温と相対湿度測定とともに2005年8月25日の午前（07:59~10:07）と午後（15:56~17:15）の2回に分けて実施した。

これらの結果、直達日射を受ける砂岩柱表面は約51℃まで上昇し、気温より16℃以上も高くなることがわかった。従来、野外測定や野外実験などによる砂岩の表面温度は54.0℃程度まで上昇することが報告されている。このため、この砂岩柱の表面温度は、従来の報告と大きく変わらない。一方、最高・最低温度の差を、砂岩柱表面の日較差（ ΔT ）として、測定時間で除して温度勾配（ D ）を求めた。その結果、GENでは ΔT : 15~18℃、 D : 1.7~2.1℃h⁻¹、PWSで ΔT : 13~16.9℃、 D : 1.9~2.5℃h⁻¹となった。熱衝撃破砕実

験によれば、加熱速度が2℃min⁻¹を超え、最大温度が350℃を超える条件で深成岩類の表面にクラックが形成され、永久ひずみが残ったという。この実験結果を考慮すると、測定された温度勾配は、熱衝撃破砕に結びつくほど大きいものではないといえることができる。すなわち、アンコール・ワットの第1回廊では、日射を受ける砂岩柱表面部は高温となるが、温度勾配は小さく、日射による破砕効果は大きくないと考えられる。

(2) アンコール・ワット第1回廊における砂岩柱の劣化は、砂岩の材料学的性質と含水状態の変動に起因していると推測される。そこで、砂岩供試体の引張強度と含水比との関係を実験的に分析するとともに、回廊に設置したデータロガーの記録から気温・湿度変動を解析した。その結果、赤外線による水分値と含水比の関係を次式で表すことができた。

$$w_0 = 21.59X$$

ここで、 w_0 は供試体表面の含水比、赤外水分計で求めた X は吸光度である。

さらに、吸光度と砂岩の引張強度（ S_t ）との関係は次式で表すことができた。

$$S_t = 7.78 e^{-2.80X}$$

また、含水飽和状態の砂岩の引張強度は、乾燥状態にあるそれのおよそ1/2であることが明らかにされた。一方、風化の進んだ砂岩柱では、層理の発達強度低下に寄与しているものの、未風化の砂岩供試体を用いた試験結果から、層理の向きが強度に与える影響はほとんどないこともわかった。これらは、砂岩柱の降雨に伴う含水比増加や風化による層理開口幅の増大が、劣化の進行に強く関わることを示すものである。

第1回廊のデータロガーは、向きの異なる回廊の4箇所に設置され、気温と相対湿度を1時間間隔で記録している。調査期間におけるデータを回収して解析したところ、平均気温は北向き回廊が南、西、東向き回廊より1℃程度低いことがわかった。また、相対湿度は、北向き回廊が南、東、西向き回廊よりおよそ5%以上高いことがわかった。データロガーの設置環境は、いずれの回廊もほぼ同じであることから、これら測定結果は、回廊の向きによる違いを反映していると見なすことができる。とくに北向き回廊は、相対的に直達日射の影響が小さいため、他の向きの回廊より気温は上昇せず、回廊を構成する砂岩ブロックからの蒸発量も小さい。現地調査では、北向

き回廊のビーム上に、回廊の天井部から剥落した砂岩片が確認されることがある。このため、北向き回廊で高湿環境が継続しやすいことが、回廊上部の風化の原因となっていると推察された。

(3) 1992年に世界遺産登録されたアンコールは100以上の寺院からなる。多くの遺跡は砂岩、ラテライト、煉瓦などからなり、9～12世紀にかけて建築された。このうち、砂岩は長い期間にわたって建築石材として用いられた。しかし砂岩で作られた柱、窓枠、偽窓枠の基部では、剥離が認められ、凹みを見つけることができる。そこで、アンコール・ワットを含め、おおむね建築年代が判明している23遺跡を対象に、砂岩ブロックに見られる凹みの深さ(剥離深度)とシュミットハンマによる反発値を測定し、砂岩の剥離速度と岩石の強度との関係を調べた。

剥離深度は、柱に残された碑文やレリーフなど、オリジナルと考えられる平面からの深さをノギスで測定した。また、シュミットハンマ反発値は、2種類の反発値を求めた。すなわち、凹みを対象に、1地点を連続打撃して求めた反発値(Rf)と、凹み表面を多数打撃して求めた反発値(Rd)である。そして、 Rf を新鮮な砂岩の硬さ、 Rd を風化した砂岩表面の硬さと考え、これらをもとに風化係数($Wc = (Rf - Rd) / Rf$)を計算した。

これらの結果、砂岩の最大剥離深度は9～104mmとなり、遺跡の経過年数をもとに剥離速度を計算すると11～94mm/kaとなった。また、最大剥離深度は、経過年数の大きい遺跡の砂岩ほど大きく、風化係数に比例することがわかった。剥離は乾湿風化、加水分解、塩類風化などによると考えられるため、それら風化作用の抑制が遺跡の保全に重要であることが指摘される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 藁谷哲也, 石造文化遺産に対する近年の風化研究の動向, 地理誌叢, 50巻1号, p. 20-29, (2008), 査読有
- ② 藁谷哲也・片桐正夫・三輪 悟・山内竜司・池田 誠・佐々木洋一・猿田智子・紺野善崇・野路浩幸, 赤外線水分計を利用した砂岩の含水比と引張強度の測定に関する実験的研究—アンコール・ワットを構成する砂

岩を例に一, 地理誌叢, 49巻1号, p. 58-65, (2007), 査読有

- ③ 藁谷哲也, アンコール・ワットにおける砂岩柱の劣化に与える岩石表面温度の効果, 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」, 42号, p. 33-44, (2007), 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① Waragai, T. and M. Hara, Weathering rates of Angkor monuments, Cambodia. 7th International Conference on Geomorphology (2009) Melbourne
- ② 原正剛・藁谷哲也, アンコール遺跡群を構成する砂岩部ロックの風化速度—遺跡建築年代と剥離深度の関係から—。日本大学地理学会, (2008) 要旨集, p. 17.
- ③ 藁谷哲也, 放射温度からみたアンコール・ワット第1回廊における砂岩柱の熱風化環境。日本地理学会発表要旨集(2007) No. 71, p. 215
- ④ 藁谷哲也・山内竜司・佐々木洋一, アンコール・ワット第一回廊における風化環境のモニタリング。日本地形学連合, (2006) 地形, 27巻3号, p. 384.

[図書] (計1件)

- ① 藁谷哲也, 古今書院, 仕事が見える地理学 日本大学地理学科80周年記念会編 (2008) 所収, 「石を蝕む風化」 p. 14-22.

[その他]

ホームページ等

<http://www.k4.dion.ne.jp/~chsgoa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藁谷 哲也 (WARAGAI TETSUYA)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号: 30201271

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし