

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22401005

研究課題名(和文)カンボジア・アンコール遺跡における石材の風化量の定量化とその寿命に関する研究

研究課題名(英文) Weathering rate quantification and lifetime of the building stones used in Angkor monuments, 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,400,000円、(間接経費) 2,220,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、亜熱帯環境に位置するアンコール遺跡の石材の風化量や寿命が風化環境とともに調べられた。研究対象は7～12世紀につくられた遺跡で、原位置における石材の風化量や物性値の測定、および風化試験を実施した。また、アンコール・ワット境内で総合気象観測を実施するとともに、祠堂内に温・湿度ロガーを設置して石材の風化環境を測定した。29遺跡・35箇所の風化量を測定したところ、砂岩部材の風化速度は0.7～9.2mm/100年であった。石材の風化は、初期にわずかな物性・化学組成変化と藻類被覆が生じ、やがて風化量に強い方位依存性が現れるようになる。石材の寿命には、乾湿変化の大きさと頻度が係わっている。

研究成果の概要(英文)：Weathering rates and lifetime of building stones along with weathering environment were analysed at Angkor monuments located in sub-tropical environment. In the monuments which were constructed in 7-12th century, weathering rates and physicochemical properties of the building stones were measured in the original position accompanied by rock weathering tests. In addition, weathering environment was measured using data loggers installed in the sanctuary of Angkor Wat temple with meteorological observation. As a result, the weathering rates of 35 points of 29 monuments were 0.7 - 9.2 mm/100 yr. Weathering of the building stones starts with slight physicochemical property change and algae covering in the early stage, then weathering rates reveal strong directional dependence. Lifetime of the building stones is concerned with volume and frequency of wet-dry change.

研究分野：人文学D

科研費の分科・細目：地理学

キーワード：地形学 世界遺産 岩石風化 建築石材 アンコール遺跡 劣化 気象観測ステーション

1. 研究開始当初の背景

熱帯気候環境下では、一般に化学的風化の進行が物理的風化より顕著であるとされる。しかし、人工建造物の風化量をもとにした石材や岩盤の風化速度に関する既往研究では、その対象が冷温帯や乾燥気候環境を中心に行われてきた。このため熱帯気候下において、岩石がどの程度の速度で風化しているかについて、われわれは十分な情報を持っていない。本研究で対象とするアンコール遺跡は、熱帯モンスーン気候下に立地している。このため、この遺跡を構成する石材の風化速度が算定されれば、熱帯気候下における岩石風化の速度に関する定量的な情報を得ることができると期待される。またアンコール遺跡では、現在、わが国をはじめフランス・ドイツ・中国・インドなど多くの国々が、保存・修復支援事業を進めている。したがって、本課題の解明は、このような遺跡の保存・修復に対して応用地形学的な支援を果たすことができると考えられる。

2. 研究の目的

カンボジア北西部に位置するアンコール遺跡は、9～15世紀に繁栄したアンコール王国の石造建築物群である。遺跡は貴重な文化遺産として1992年にUNESCO世界遺産に指定された。しかし、古い遺跡では建設後1,000年以上が経過し、内戦に伴う人為的破壊も加わり亜熱帯気候下で極度の自然劣化が進んでいる。このためカンボジアでは、現在、遺跡の保存・修復事業が進められている。しかしこれらの事業では、遺跡に使われている砂岩・ラテライト・煉瓦などの石材の積み直しや交換などが中心で、石材の経年劣化プロセスや交換された石材の寿命については、あまり考慮されていないようである。石材は人為的破壊を除けば、乾湿風化・塩類風化・ルートウェッジングなどの風化作用による表層剥離や崩壊、亀裂の拡大などで劣化が進んでいる(写真1)。このため本研究では、石材の風化速度を石材の原位置における基本物性と合わせて多くの遺跡から求め、石材の風化速度を物性値から定量化する。また、石材供試体を用いた風化の加速試験(室内)



写真1 偽扉下部の風化凹み

と屋外暴露試験を計画し、保存・修復に用いる石材の寿命を推定する。加えて、気象観測ステーションや温・湿度ロガーを代表的な遺跡に設置して石材の風化環境を捉える、ことなどを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、アンコール遺跡を構成する石材の風化量と寿命を解明するため、遺跡の風化環境の観測、石材の風化量と物性の測定、および供試体による風化試験などを実施した。研究期間中は、インターネットで調査の経過や結果などを公開することを試みた。

風化環境の観測は、気象観測ステーションによる総合気象観測と遺跡内部・周囲における微気象観測を実施した。総合気象観測は、アンコール・ワット(図1)境内に観測ステーションを特設して2010年12月から始めた。また微気象観測は、おもにアンコール・ワットの回廊部に設置したデータロガーによる温・湿度観測と気温移動観測を実施した。これらデータの回収は、乾季と雨季に繰り返し行った。

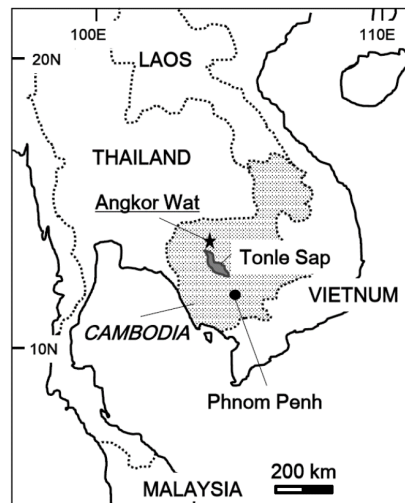


図1 研究対象地の位置

石材の風化量と物性測定は、遺跡を構成する主要石材である砂岩を対象に行った。対象としたのは、主にカンボジア西部に立地する29遺跡である。これら遺跡の風化量は柱、窓枠、ドア枠などの基部に一般的に発達する凹みの深さを測定して求めた。一方、このような建築部材に発達する凹みには、方位依存性のあることが推測された。そこで、アンコール・ワットにつくられた東西南北の回廊の砂岩柱を対象に、凹み深さを測定した。これら凹み深さの測定地点では、砂岩ブロックの原位置物性としてシュミットハンマー・エコチップ反発値、赤外水分、放射温度の測定や携帯型XRFによる化学組成を分析した。

ところで、凹みの形成には、砂岩ブロックによる雨水の吸収と乾燥化が関与している。そこで、雨水の化学組成や野外における砂岩柱の水分実験、および砂岩試料の溶出実験な



写真2 アンコール・ワットの AMOS

ども実施した。

供試体による風化試験は、砂岩やラテライトなど7種類の岩石供試体を作成して2011年雨季以降、暴露試験、埋設試験などを行った。同時に、実験室内では環境試験機を利用して、同種の岩石供試体による風化加速試験も実施した。これら供試体の風化状態は重量、エコーチップ反発値、帯磁率、超音波伝播速度、色彩値などを測定するとともに、顕微鏡観察を行って調べた。

4. 研究成果

(1) 風化環境

アンコール遺跡は熱帯モンスーン気候下にあり、おおむね3～10月の雨季と11～2月の乾季に分けられる。乾季の降水はほとんどないが、雨季には夜間に日周期性の驟雨が局所的に発生している。砂岩・ラテライト・煉瓦を主体とするアンコール遺跡の構成石材は、このような気候環境に伴って年周期および日周期の乾燥-湿潤の繰り返しを引き起こし、風化していると考えられる。しかし、カンボジア国内における気象観測地点は限定的で、地上気象観測データの共有はほとんどはかれていない。そこで本研究では、遺跡を構成する石材の風化に係わる基本的な気象データを、独自に取得することを計画した。そして APSARA (Authority for the Protection and Management of Angkor and the Region of Siem Reap) の許可を得て、アンコール・ワット境内に総合気象観測ステーション(以下、AMOS)を設置した(写真2)。

AMOSは2010年12月22日から、気温・

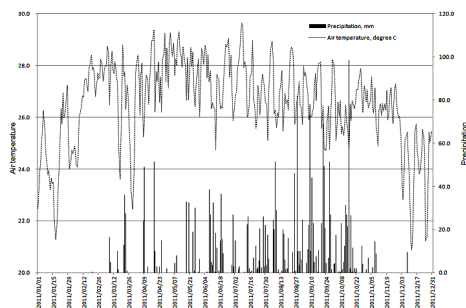


図2 AMOSにおける2011年の気温と降水量

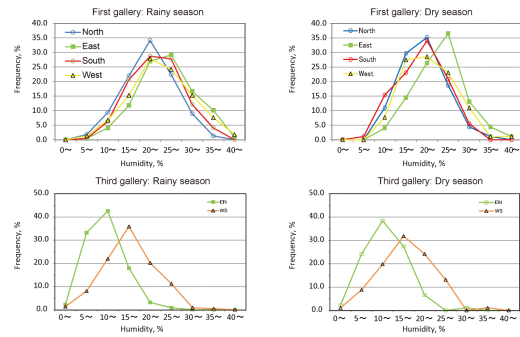


図3 湿度の日較差の頻度分布

相対湿度・降水量・風向・風速・日射量の6項目を10分間隔で測定・記録している。2011年の気象データ(2011年1～12月)の解析から、現地の気温は15.3～36.1と年較差が大きく、年間降水日数139日、降水量2,065mmであることがわかった(図2)。

AMOSにおける気象データの代表性を検討するため、シェムリアップ空港の気候値と2011年の観測結果を比較した。その結果、AMOSでは気温の年較差が10程度と空港より約5低く、年間降水量は約500mmも多い。これは、AMOSのデータが樹林地を伴うアンコール・ワットの気象環境を正確に反映しているものと推察された。

石材で構成される寺院の構造物とその周囲の空地・緑地とでは、温度環境は異なっている。この温度環境の差異は、建築石材の風化に影響を与えていると推測される。そこで、アンコール・ワットの第一回廊、第二回廊、および第三回廊に温・湿度ロガーを計10基設置し(2011年8月22日)、微気象観測をおこなった。また、祠堂の周囲に広がる空地・緑地では、乾季(2011年3月7日10:00, 14:00)と雨季(2012年8月23日10:00, 14:00)に気温移動観測を実施した。

これらの結果、第一回廊の気温は西回廊で高く、北回廊で低いことがわかった。また、湿度の日較差は東回廊で大きく、北回廊で小さい。すなわち雨季・乾季ともに、東回廊では全体の約1/4が湿度日較差30%以上であるのに対して、北回廊ではそれは全体の1/10以下しかない(図3)。一方、境内における

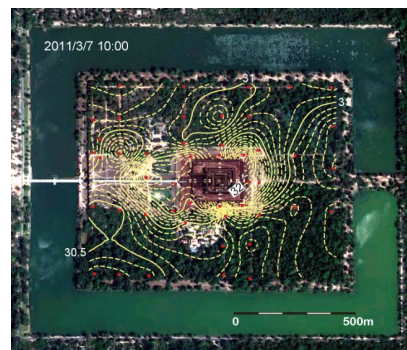


図4 境内の気温分布

気温移動観測結果によると、祠堂周囲の気温は、建築物周辺の樹林地より約1 以上高い(図4)。これは、砂岩ブロックの高温・乾燥化が生じ、遺跡が厳しい風化環境に曝されていることを示す。

(2) アンコール遺跡を構成する砂岩の風化量と強度

風化量の測定対象とした29 遺跡は、アンコール・ワットやバイヨンなどおもにシェムリアップ州に位置する。また、州都のシェムリアップから約150km 離れたプリア・ビヒアやサンボール・プレイクックなども、対象遺跡に含まれる。これら遺跡の建築年代は、建築様式や碑文解読などをもとにした研究によって、AD618 年~1186 年につくられたことがわかっている。遺跡に用いられた砂岩は、灰色~黄褐色砂岩、緑灰色硬砂岩などで、力学的強度に差異はあるが、鉱物組成や化学組成などについては大きい差異の無いことが判明している。

研究対象遺跡を構成する柱、窓枠、ドア枠などの砂岩部材の基部には、凹みの発達が一般に認められる(写真1)。凹みの形成には、乾湿風化や雨水と砂岩との反応による塩類(石膏、カルサイト、リン酸塩鉱物など)の析出が係わっている。凹み表面では剥離が認められ、ところによって厚さ約5 mm までの剥離片を直下に伴っている。そこで、剥離による風化量を求めるため、これら砂岩部材の基部で凹み深さ(D)を測定した。測定箇所は29 遺跡で35 箇所となった。この深さは、凹みの最深部周辺と碑文やレリーフが彫られたオリジナル面との距離をノギスで数回測定して求めた。

ところで、建築部材の強度は、劣化に対するもっとも重要な指標のひとつである。そこで、風化量を測定した35 箇所を対象に、L型シュミットハンマーを用いて部材表面に

おける強度(反発強度)を測定した。この反発強度は、凹みを対象に、最深部の1 箇所を繰り返し打撃して求めた反発強度(R_f)と表面のあちこちを打撃した反発強度(R_d)の2種類について測定した。

これら測定の結果、凹み深さの測定値の内、上位3 点の平均値を最大凹み深(D_{max} , mm)として算出すると、 D_{max} は、8~100mm の範囲をとる。また、 D_{max} は遺跡建築後の経過年数(t , yr)がより大きい遺跡ほど深い傾向がおおむね認められた。一方、各遺跡の建築年代から現在(2010 年)までの経過年数をもとに、100 年あたりの砂岩部材の劣化速度を計算すると0.7~9.2mm であることが明らかとなった。一方、 R_f は39.5~58.9、 R_d は19.7~46.4 をそれぞれ示し、砂岩表面の強度は内部のそれより低下している。これらから、遺跡を構成する砂岩ブロックの風化量は、経過年数に比例し、反発強度に反比例することが明らかとなった。

(3) アンコール・ワットにおける砂岩柱の風化量と風化環境

砂岩ブロックの風化量は、主に石材の設置方位に由来する風化環境にも依存していると推定される。そこで、アンコール・ワットの第一回廊に設置される砂岩柱(内柱)を事例に、凹み深さ(風化量)と原位置物性値(エコーチップ反発値、赤外水分、放射温度)を測定した(図5)。

その結果、風化量は内柱の日陰面で浅く、日向面(最大約67mm)で深いことがわかった(図6)。また、日陰面は日向面に比べて反発強度が低く、含水比が高いのに対して、日向面は乾燥して強度が高いことも明らかとなった。一方、柱の凹み深さは回廊の向きによっても異なり、東回廊で深く、北回廊で浅い。さらに温度測定によると、回廊部の気温はその周囲の緑地内気温より約2 高く、サーモレーサーによる砂岩表面温度と比較して約10 以上も高い状態にある。

第一回廊では、日中、直達日射の影響を受けて柱の高温化、乾燥化が進行する。一方、おもに雨季や夜間に発生する驟雨は、柱の吸湿や吸水による湿潤化をもたらしている。このため、乾燥 湿潤の繰り返し頻度と水分変化の大きさは、日射を直接受ける日向面で大きく、日陰面で小さい。回廊砂岩柱で実施した散水実験の結果によると、日射を受けて高温化する柱の表面が、その背面より乾燥速度は早く、約2 ポイント大きい水分変化を生じたことがわかっている。回廊の東側では、とくに夜間は柱の温度は低下して湿潤状態にあるが、朝日を浴びて早朝に乾燥化が進む。北回廊は日射の影響を受けにくく、温・湿度観測の結果から他の向きの回廊より高湿環境にあることが明らかとなっている。このため、東回廊で風化量が大きいのは、このような風化環境を反映したものと考えられる。

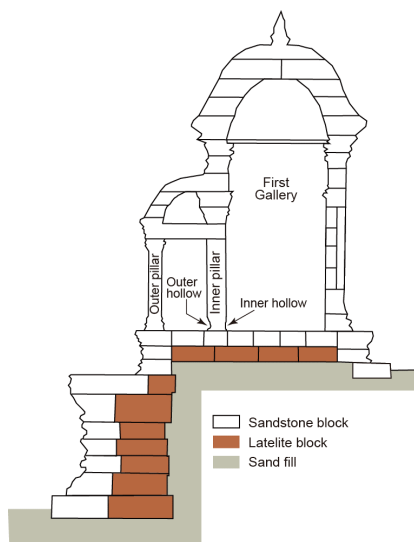


図5 第一回廊の構造と内柱の位置

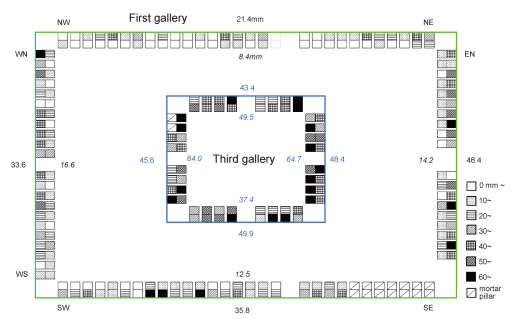


図6 アンコール・ワットにおける砂岩柱の凹み深さ

(4) 砂岩・ラテライトの風化試験

野外や実験室内で石材の風化速度を調べるため、アンコール遺跡を構成する石材やその他の岩種を使った以下の石材風化試験を実施した。

暴露試験：この試験は砂岩、ラテライトなど7種類(14供試体)の岩石の整形供試体をAMOS内の露場で暴露させて、2011年8月24日から開始した。測定は雨季と乾季に現地での風化状況を反復測定してきた。すなわち、およそ6ヶ月ごとに暴露試料を回収し、室内で自然乾燥させた供試体の重量、エコーチップ反発値、帯磁率、超音波伝播速度、色彩値などを測定し、顕微鏡観察を行ってきた。その結果、2012年3~8月にかけて、超音波伝播速度は砂岩で平均11.5%、ラテライトで平均8.8%それぞれ低下した。また、帯磁率でも砂岩で平均3.0%、ラテライトで平均5.9%の低下が認められた。そして、2014年3月までに砂岩供試体の表面には、藻類の着生が顕著となった。これらは供試体における風化の初期段階を示すものであると考えられる。

埋設試験：ディスク上に整形した砂岩とラテライト供試体を2012年3月18日に露場で a) 空中に吊るして暴露状態に置くとともに、b) 地表から約30cmの地中に埋設して風化試験を実施した。これら供試体は、設置29ヶ月後に重量と化学組成を分析した。その結果、砂岩の埋設試料の重量は暴露試料のその約3倍減少していた。また、この埋設試料のCaO量は約64%減少した。遺跡で利用される砂岩は、約2.7%のCaOを含んでいる。このため、埋設した砂岩供試体では、酸化した土壌中の雰囲気下で風化が加速されたと推察される。

石灰岩の暴露試験：ディスク状に整形した石灰岩供試体を2011年8月24日から a) 樹林下と b) 露場とに設置、暴露させて、主要物性や顕微鏡観察を雨季と乾季に繰り返し測定した。その結果、供試体の溶食率は、露場の試料で大きく、約0.12~0.28%/yrの重量減少率を示した。これは、樹林下より露場のほうが直接降雨の影響を受けるためであろう。すなわち樹林下の供試体は、供試体への直接的な降雨が樹冠によって妨げられるが、露場に設置した供試体ではこのような妨げはない。このため、降雨に曝される期間の長い露場で重量がもっとも減少した。

室内風化加速試験：室内では環境試験機を用い、暴露試験と同様の7岩種を用いた閉鎖系の風化加速試験を開始(2011年12月26日)した。この試験における供試体の測定項目は、重量測定とレーザー顕微鏡による表面観察である。環境試験機に設定したプログラムは、現地の温・湿度環境をもとに、これを強化させた。すなわち、庫内を気温10・相対湿度95%を3時間保持した後、気温70・相対湿度30%を3時間継続が1サイクルとなるものである。2014年4月23日時点までに2067サイクルが完了したが、砂岩・ラテライト供試体ともに大きい物性変化は生じていない。しかし、レーザー顕微鏡での観察によると、砂岩表面の空隙には粒状の結晶が析出した。この結晶の成長は認められないが、開放系の試験であれば結晶成長の可能性が推測される。なお、遺跡を構成する砂岩柱のような部材は、実際には積載荷重を受けている。このため、砂岩ブロックの風化には、積載荷重を考慮する必要のあることが課題として残された。

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)

比企祐介・藁谷哲也、アンコール・ワットの第一回廊を構成する砂岩柱基部に発達する凹み深さと水分変化に関する野外実験, 地理誌叢, 査読有, 56巻1号, 2014, 印刷中

Waragai, T., W. Morishima, and A.

Hada, Angkor Wat meteorological observation station (AMOS):

Installation of monitoring system and preliminary results of observation at Angkor Wat temple, Cambodia, *Proceedings of the Institute of Natural Sciences, Nihon University*, 査読有, No. 48, 2013, pp.35-48

森島 濟・羽田麻美・藁谷哲也、アンコール・ワット遺跡敷地内の微気候に関する予察的研究, 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」, 査読有, 48号, 2013, pp.49-54

Waragai, T and M. Hara, The correlation between the water content and brightness of rock surfaces.

Transactions, Japanese Geomorphological Union, 査読有, Vol. 32, 2011, pp.317-326

原 正剛・藁谷哲也、カンボジア・アンコール遺跡に見られる砂岩ブロックの風化形態と剥離深度, 地理誌叢, 査読有, 51巻2号, 2010, pp.30-37

[学会発表](計13件)

Song W., Oguchi C.T., Waragai T.

(2014.5.1) Chemical analysis of black crust on the Angkor sandstone at the Bayon temple, Cambodia, European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna, Austria

羽田麻美・藁谷哲也 (2013.11.23)カンボジア・アンコールワット遺跡における野外風化実験 石灰岩タブレットの事例, 日本大学地理学会秋季学術大会, 日本大学, 地理誌叢, 55 巻 2 号, 2014, pp.56-57

比企祐介・羽田麻美・藁谷哲也 (2013.11.23)アンコール・ワット第一回廊を構成する砂岩柱の水分変化に関する野外実験, 日本大学地理学会秋季学術大会, 日本大学, 地理誌叢, 55 巻 2 号, 2014, pp.56

藁谷哲也・比企祐介 (2013.9.14) アンコール・ワットにおける砂岩柱基部のへこみの形成環境と遺跡保存, 日本地形学連合 2013 年度秋季大会, 東北学院大学, 地形, 35 巻, 2014, pp.51-52

Waragai, T., Y. Hiki, A. Hada and W. Morishima (2013.8.31) The formation of hollow of sandstone pillar and heated Angkor Wat temple, Cambodia. 8th IAG International Conference on Geomorphology, Paris

比企祐介・羽田麻美・藁谷哲也 (2012.9.22) アンコール・ワットの第一回廊を構成する砂岩柱基部にみられる凹みの深さの分布と風化環境, 日本地形学連合 2012 年度秋季大会, 大阪教育大学, 地形, 34 巻, 2013, pp.89

藁谷哲也・比企祐介, 原 正剛, 羽田麻美 (2012.6.30) カンボジア・アンコール遺跡における砂岩からなる建築部材の劣化速度, 文化財保存修復学会, 日本大学, 第 34 回大会研究発表要旨集, pp.22-23

Waragai, T. (2012.6.6) Meteorological monitoring systems in the Angkor Wat temple. International co-ordinating committee for the safeguarding and development of the historic site of Angkor, UNESCO, Cambodia.

比企祐介・松田辰・羽田麻美・藁谷哲也 (2012.3.28) アンコール・ワットの第一回廊を構成する砂岩柱の強度と風化条件, 2012 年日本地理学会春季学術大会, 日本大学, 日本地理学会発表要旨集, No.81, pp.232

藁谷哲也・森島 済・羽田麻美 (2011.11.20) アンコール・ワット寺院の気象観測ステーションから得られた気象要素の変化と石材の劣化に与える影響, 平成 23 年度日本大学地理学会秋季学術大会, 日本大学, 発表要旨集, pp.17-18

比企祐介・松田辰・羽田麻美・藁谷哲也 (2011.11.20) アンコール・ワット第一回廊を構成する砂岩柱の強度分布, 平成 23 年度日本大学地理学会秋季学術大会, 日本大学, 発表要旨集, pp.17

松田辰・比企祐介・羽田麻美・藁谷哲也 (2011.11.20) アンコール遺跡群における植物根茎の破壊作用の評価 - タ・プローム寺院における樹木分布について -, 平成 23 年度日本大学地理学会秋季学術大会, 日本大学, 発表要旨集, pp.17

藁谷哲也 (2010.8.18) カンボジア・アンコール遺跡を構成する砂岩ブロックの風化プロセスと風化速度, 沖縄地理学会, 琉球大学

[その他]

ホームページ

<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: 3 0 2 0 1 2 7 1

(2) 連携研究者

森島 済 (MORISHIMA, Wataru)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号: 1 0 2 3 9 6 5 0
竹村 貴人 (TAKEMURA, Takato)
日本大学・文理学部・准教授
研究者番号: 3 0 3 5 9 5 9 1
羽田 麻美 (HADA, Asami)
日本大学・文理学部・助教
研究者番号: 7 0 5 0 8 7 4 6

(3) 研究協力者

石澤 良明 (上智大学・アジア文化研究所)
片桐 正夫 (日本大学・名誉教授, 故人)
三輪 悟 (上智大学・アジア文化研究所)
梶山 貴弘 (日本大学・博士後期)
原 正剛 (日本大学・博士前期)
比企 祐介 (日本大学・博士前期)
松田 辰 (日本大学・博士前期)
前田 拓志 (日本大学・博士前期)
ロス・ボラット (アンコール地域・遺跡保存行政機構総裁)
マオ・ロア (アンコール地域・遺跡保存行政機構)
ギアム・モニー (アンコール地域・遺跡保存行政機構)