

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26300008

研究課題名(和文)カンボジア・アンコール砂岩の風化プロセスに関わるクリープ変形と風化環境の研究

研究課題名(英文) A study of creep deformation and environment related to weathering processes of the sandstone composing 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) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、アンコール遺跡からアンコール・ワット、バンテアイ・クデイ、およびタ・プローム寺院を選定し、寺院を構成する砂岩材のクリープ変形と風化環境を有限要素解析や高密度の熱環境分析をもとに明らかにした。その結果、砂岩柱の基部に見られる凹みの形成には、従来から指摘されていた風化プロセスに加え、構造物の自重による応力集中が関与していることが判明した。また、寺院は日射による蓄熱のため高温化、乾燥化が進み、砂岩材に対する風化インパクトの増大が生じていることが推察された。アンコール遺跡保全のためには、日射を和らげる緑地の緩衝効果を見直すことが必要である。

研究成果の概要(英文)：Creep deformation and weathering environment of sandstone blocks composing Angkor temples such as Angkor Wat, Banteay Kdei, and Ta Prohm were analyzed based on a finite-element analysis and densely thermal environmental analyses. As the result, we found that the formation of hollows developed on sandstone columns is caused by stress concentration due to dead load of the building, in addition to previously reported weathering processes. Furthermore, weathering impacts for sandstone blocks may increase, because of progressing of heating and desiccation derived from heat storage due to direct insolation. For the sake of preservation of Angkor temples it is important to reconsider thermal buffer effect of green tract of land mitigating the insolation.

研究分野：地形学

キーワード：地形学 岩石風化 建築材料 熱環境 地盤工学 世界遺産 樹木伐採

1. 研究開始当初の背景

地形学において、地形の侵食速度や地形物質の風化速度を求めることは重要な課題である。とくにこれらの速度は、将来の地形変化を予測するために必要不可欠といえる。このため、計測手法の開発を含め、これら速度に関する数多くの研究がこれまでに行われてきた。しかし侵食地形を扱う場合、初期の地形(原地形)は残されておらず、また、それがいつ誕生したのか不明であることも多い。加えて、地形の発達期間が長期におよぶ場合、現在に至るまでの環境変化は多様である。したがって、それぞれの環境下でどのような地形プロセスが主体的に働き、地形や地形物質に対して風化・侵食を進めてきたのかを説明することも難しい。ところが建築年代の明らかな石造の構造物を利用すると、そこに発達する地形の侵食速度や材料の風化速度を推定できる場合がある。例えば Takahashi *et al.* (1994)による砂岩からなる橋脚のくぼみの発達速度に関する研究では、砂岩の風化・侵食速度が求められ、くぼみの発達にかかわる方位依存性の重要性が指摘された。

本研究が対象とするカンボジア・アンコール遺跡(寺院)も、おもに砂岩ブロックで作られ、建築年代が比較的明らかになっている石造構造物のひとつである。このため、砂岩ブロックの風化・侵食量の測定を通じて、それらの速度が推定されてきた (André, 2006; Waragai *et al.*, 2013b)。しかし、これまでの藁谷らによる予察的風化研究によると、砂岩ブロックに比較的普遍的にみられる凹み(写真1)の形成には、乾湿風化・塩類風化に加え、上載荷重によるクリープ変形の影響が推測されている。これまでに、砂岩ブロックの風化プロセスとこのような構造力学的現象とを組み合わせた視点は、ほとんど報告されておらず検証が必要である。

構造物の上載荷重に由来するクリープ変形は、温度依存性のあることが指摘されている。このため砂岩ブロックのクリープ変形を



図1 アンコール・ワット寺院の砂岩柱(内柱)に発達する風化による凹み。

分析するには、寺院建築以降の気候環境(風化環境)の変化についても併せて検討する必要がある。すなわち、植物化石等の分析に基づいた古環境の推定結果や現在の気候環境データの入手が必要である。しかしながら、とくに気候環境データについては、1970年代のカンボジアにおける内戦による影響から、気象観測が継続されておらず、気候統計も十分整備されていない。いっぽう、アンコール遺跡が19世紀後半に発見された際、石造寺院の多くは厚い植生に覆われ、崩壊状態にあったとされるが、その後これら寺院の保存・修復の過程で樹木伐採が進められてきた。植生は、熱帯気候に置かれた石造寺院の急激な温度上昇や蒸発量の増加を抑制し、水分変化に由来した石材の風化を妨げる働きを持つと推察される。したがって19世紀以降の樹木伐採は、砂岩ブロックの風化環境を変化させてしまったと考えることができるが、これについても検証が必要である。すなわち、寺院を構成する砂岩ブロックの風化環境を明らかにすることは、クリープ変形の温度依存性を検討するだけでなく、樹木伐採のような環境変化が石材の風化に与える影響についての知見を得るという点で、文化財保存にも貢献すると期待される。

2. 研究の目的

アンコール遺跡の砂岩ブロックで作られた柱、偽扉、壁などでは、しばしばそれらの基部に凹みが発達している。この凹みの形成は、上述したように毛細管現象に由来した乾湿風化や塩類風化に加え、クリープ変形がかかわっていると推測される。しかし、既往研究では構造物の積載荷重に由来するクリープ変形を、凹みの形成に結び付けるものはほとんどない。また、熱帯環境に置かれている砂岩ブロックの風化プロセスは、クリープ変形の温度依存性や遺跡の保存・修復事業で進められてきた樹木伐採に伴う風化環境の変化にも影響を受けていると考えられる。

そこで本研究では、石造寺院の砂岩ブロックに与えるクリープ変形の効果を明らかにする。また、観測密度の高い気象観測をもとに、砂岩ブロックを取り巻く風化環境を明らかにする。そしてこれらクリープ変形と風化環境の分析を通じて、新たに砂岩ブロックの風化プロセスを解明する。

研究対象としたのは、アンコール遺跡の中から植生の被覆状態が異なるアンコール・ワット(以下AW)、バンテアイ・クデイ(BK)、タ・プロム(TP)寺院など3つの石造寺院である。これら寺院の緑地の被覆率は、小さいものから順にAW<BK<TPとなる。

3. 研究の方法

(1) クリープ変形の解析方法

クリープ変形の研究対象寺院として、砂岩柱基部の凹みが顕著なAWを選定した。この砂岩柱は、AWの中央祠堂のもっとも外側に

位置する第1回廊を支える柱で、外柱と内柱からなる。

研究ははじめに、第1回廊における温・湿度環境を把握するため、東西南北に向く回廊の柱上部にそれぞれデータロガーを設置し、4日間の温・湿度測定を実施した。次に、もっとも柱の劣化が進行している東回廊において、柱・EN12の上部に石材試料を設置して、内部の温・湿度を3日間にわたって測定した。この試料は、AWに使われている砂岩と同等のものを5cm×5cm×5cmの立方体に整形し、表面から17mm、22mm、26mmの深度まで穴をあけ温湿度センサー(Sensirion社製、SHT75)を埋め込んだものである。さらにこの試料には、外部の温・湿度を測定するためのセンサーも取り付けられた。

第1回廊における断面図を作成するため、回廊の一部を写真撮影して3次元モデルを作成した(Agisoft PhotoScan Professional)。天井部の厚さを考慮するため、アウトラインにおいても3次元モデルを作成し、それぞれをつなぎ合わせた。その後画像トレースして断面図を作成した。この断面図をもとに、有限要素解析をCOMSOL5.1により行った。計算に用いた入力値はヤング率20GPa、ポアソン比0.3、密度2.7g/cm³である。

(2) 風化環境の測定方法

Waragai *et al.* (2013a) は、2010年12月以降、AWに気象ステーション(AMOS)を設置して、気象データを継続的に取得している。そこで、本研究の基準気象データとして、AMOSの気象データを用いた。また、研究対象寺院の風化環境は、データロガーを用いた温・湿度測定から調べた。具体的には、各寺院の境内に温・湿度を4分間隔で計測するデータロガー(HOBO社製、UX100)をおよそ40基設置し、2014年9月7日~13日にかけて測定を実施した。データロガーは放射除けシェルターの中に設置し、その設置高は地上からおよそ1.5mである。なおAWでは、中央祠堂を囲む高さの異なる第1~第3回廊の10地点にもデータロガーを設置して、高密度の温・湿度測定を行った。

いっぽう、石材の表面温度を計測するため、サーモグラフィ(NEC三栄社製、TH9100)を用いて、随時砂岩ブロックからなる建造物の表面温度を測定した。加えて、研究対象とした3寺院を含むアンコール遺跡の分布域を対象にリモートセンシング(RS)による地表面温度分布解析を行った。解析には2015年に取得されたETM画像を用い、ArcGIS(ESRIジャパン社製)を利用した。

4. 研究成果

(1) 砂岩柱のクリープ変形

第1回廊における方位別の温・湿度測定の結果、温・湿度の変動は東回廊で大きいことがわかった。また、EN12上部に設置した試料の温度と湿度(水蒸気量に換算)の測定結

果を図2に示す。試料内部の温度は深さ26mmまで外気温とほぼ変わらず、位相差も小さい(図2)ことがわかる。このことは、試料に対する外気温の影響が少なくとも深さ26mmかそれ以深まで及んでいることを示すと考えられる。いっぽう水蒸気量については、深さ17mm、22mm、26mmともに類似した変化パターンを示し、試料外側の水蒸気量とは対応していないようである。すなわち、水蒸気量の影響は、深さ17mmより浅い表面部に限定されると考えられる。

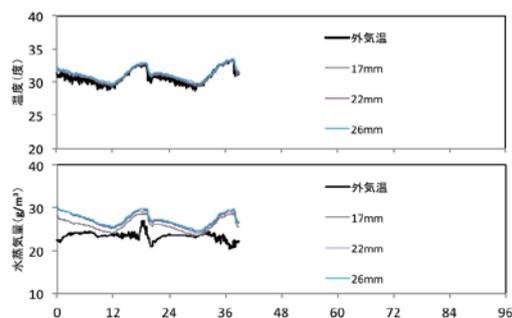


図2 第1回廊・柱(EN12)に設置した石材試料内部の深度別気温と水蒸気量。

有限要素解析の結果の一例は、図3に示される。変位分布図を見ると、内柱は回廊の外側(左側)に曲げられており、その基部には内側に引張応力が、外側に圧縮応力が作用している。原位置で内柱の基部を詳細に観察すると、その内側には水平方向の亀裂が認められる。このような亀裂の原因は、解析結果を考慮すると引張応力から説明できる。

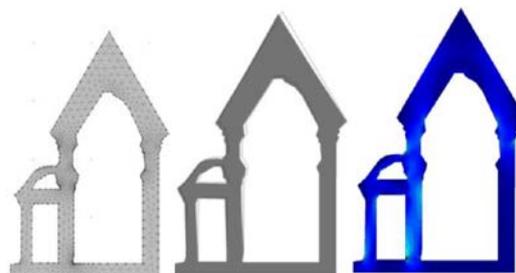


図3 有限要素解析の結果. 左からメッシュ図, 変位(10倍強調), 応力を表示。

(2) 風化環境

各寺院における温度測定の結果を日最低・最高気温を示す時刻別、土地被覆別にまとめたものを表1に示す。ここで土地被覆は、各寺院の中心に位置する中央祠堂(CS)、周囲の樹林帯(GT)、オープンスペース(OS)に区分し、それぞれの時刻における最高気温の概略値を示した。

表1のように、6:00におけるCSの気温はGTやOSより高く、とくに祠堂の周囲に樹林帯を持たないAWではCSとGTとの差が4℃に達している。この時刻におけるAWの気温分布は図4に示される。図4が示すよう

に高温域は CS に現れ、気温は周囲の OS や GT に向かって低下していることがわかる。

表 1 各寺院における最高気温の概略値

	6:00	14:00 or 15:00*
AW	GT24 < OS25 < CS28	CS29 < GT30 < OS32*
BK	GT25 < OS25 < CS26	GT30 < OS32 < CS33
TP	GT24 < OS25 < CS25	GT28 < CS30 < OS31

14:00 または 15:00 の気温では、AW を除く寺院で GT の気温は最低となり、とくに緑地被覆率の高い TP で 28°C と最も低い気温が測定された (表 1)。AW における CS の測定値には、高さの異なる回廊の気温が含まれていることから、15:00 における CS の気温は GT より低く示されたと考えられる。

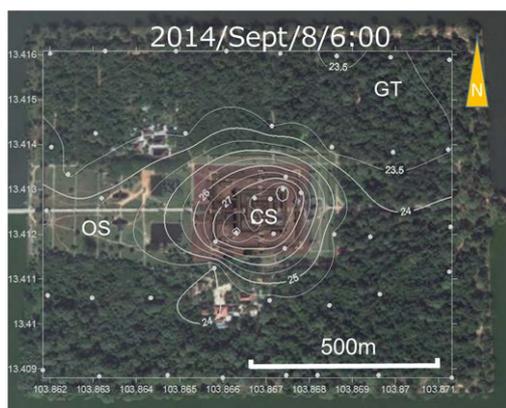


図 4 アンコール・ワット寺院の気温分布。等温線間隔は 0.5°C。

このように土地被覆別に気温を比較すると、CS や OS では直達日射が遮られないため、GT より気温の高い高温域 (ホットスポット) を形成する (図 5)。そしてこのホットスポットは、日没後の 18:00 頃に出現し、翌朝 6:00 頃に消滅することがわかった。

いっぽうサーモグラフィーによる測定結果は、砂岩ブロック表面が極めて高温状態にあることを示す。一例を挙げれば、AW における東回廊の屋根部の表面温度は、9:00 に最

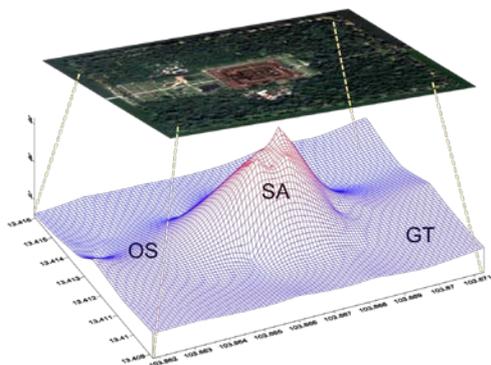


図 5 アンコール・ワット寺院に出現したホットスポット (2014 年 9 月 8 日, 6:00)。

高 50°C (気温 31°C) に達した。また、西回廊における屋根部の温度は 15:43 に最高 57°C (気温 35°C) まで上昇した。このような屋根部の高温化は、とくに西日による影響が大きく、回廊内の気温よりおよそ 20°C も高くなっている。

RS 画像解析から求めた地表面放射温度の解析結果によると、AW は 34°C、TP と BK は 28°C 前後であった。これらの放射温度は、現地における測定結果とは必ずしも対応しない。しかし温度差は、地表面の被覆状態を反映していると考えられる。すなわち、OS に囲まれて緑地被覆率が低い AW は、他の寺院より高温化していることが明らかである。

(3) クリープ変形に与える風化環境の影響

藁谷・比企 (2013) の AW 第 1 回廊の内柱の凹み深さの測定結果によると、深さは内柱の外側で大きく、かつ東回廊で大きいことがわかっている。これは凹み深さが、日射による温・湿度変化に依存していることを示す。しかし、ほぼすべての内柱に凹みが形成されているにもかかわらず、日射の影響がより大きい外柱に凹みは見られない。すなわち、この柱の置かれた構造上の条件による凹み深さの違いの原因は、同じ温・湿度変動の条件下に岩石が置かれた場合、圧縮応力の集中が作用することで風化の進行が大幅に早まったためと考えることができる。内柱外側の風化が顕著となるメカニズムとして、柱表面近くで水平方向に剥離を起こすような引張応力 (鉛直方向の圧縮応力) が作用し、さらに表層 1 cm 程度までの水蒸気の繰り返し浸透により、亀裂伸展速度が加速させられたことによるものと考えられる。

砂岩柱など砂岩ブロックの風化環境は、寺院における緑地の被覆率によって異なっている。これは緑地が、構造物や地表面に対して直達日射の影響を妨げる遮蔽効果を持つためである。研究対象とした寺院では、AW < BK < TP の順で緑地の被覆率が低下するが、これを反映して各寺院の最高気温は異なっていた。しかし、砂岩ブロックで作られた中央祠堂では、昼間に日射を浴びて 40~50°C の高温状態となり、この熱は夜間でも保持される。すなわち、夜間から早朝にかけても石造の中央祠堂は周辺の GT や OS より高温状態を維持し、ホットスポットを形成している。祠堂における高温状態の持続は、砂岩ブロックの乾燥化を招くが、雨季には石材は頻繁に降雨により湿潤化する。すなわち、砂岩ブロックは激しい乾湿変動の繰り返しに曝されている。砂岩ブロックは、おもに水分変動に由来する乾湿風化や塩類風化などに起因することから、水分変動が大きくなることはこれら風化プロセスのインパクトを高めるものと理解することができる。植生被覆の程度が高い TP では、AW のような大きい気温差が明瞭ではなく、風化による砂岩ブロック基部の凹みも明瞭ではない。これは、植生被覆

による日射の遮蔽効果が乾湿変動幅を小さく抑えているためと推測される。このことは、石造文化財の保存という観点からすると、寺院周辺の樹木伐採は、石材の風化を加速させる条件を提供していることになる。

(4) 残された課題

本研究では砂岩ブロックのクリープ変形と風化環境の分析のために、3つの寺院を選定して分析を進めた。とくに、風化環境については測定密度の高い気象観測に基づいたデータを得て、樹木伐採による風化環境の差異を指摘することができた。しかし、これは対象遺跡における近年の風化環境を明らかにしたにすぎない。すなわち、これら寺院が建築された12世紀以降現在までの気候環境の変化については不明である。今回の研究では、この環境変遷を明らかにするための調査を進めたが、いまだ明確な結果を得ていない。このため、今後寺院建築以降の環境変遷を分析して、石材の風化プロセス、クリープ変形に与える温度効果などについて検討する必要がある。

なおRS解析の結果から、アンコール遺跡保護地区の樹林地面積は、1989年から2015年にかけて増加していることが判明した。これは遺跡とその周囲がUNESCOのアンコール保護地域に指定され、樹木伐採が規制されているためであると考えられる。樹林地面積の増加は砂岩ブロックの乾燥化を遅らせ、風化を抑制すると考えられるが、本研究が示したように寺院や砂岩材の高温化が判明している。このため、今後樹林地の規模、構成樹種、および寺院への被覆程度などについてさらに詳細な分析を進め、風化環境の変化に伴う砂岩の風化速度の変化に注意を払う必要があると考えられる。

<参考文献>

- ① André, M.F. 2006: Sandstone weathering rates at the Angkor temples (Cambodia). Proceedings of the International Conference on Heritage, Weathering and Conservation, eds. R. Fort *et al.*, 165–175.
- ② Takahashi, K. *et al.* 1994: Erosion rates of sandstone used for a masonry bridge pier in the coastal spray zone: in Robinson, D.A. and Williams, R.B.G. eds., *Rock Weathering and Landform Evolution*, 175–192, Wiley & Sons.
- ③ 藁谷哲也・比企祐介 (2013) 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年秋季大会, 東北学院大学, 9月14日
- ④ Waragai, T. *et al.*, 2013a: 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 Nature Sciences, Nihon University, 48, 35–48.

- ⑤ Waragai, T. *et al.* 2013b: The formation of hollow of sandstone pillar and heated Angkor Wat temple, Cambodia. 8th IAG International Conference on Geomorphology, Paris.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① 藁谷哲也 (2017) 石造物を利用した岩石の風化速度に関する研究動向. 地学雑誌, 査読有, 126巻4号, 印刷中.
- ② 羽田麻美・藁谷哲也 (2017) 熱帯環境下(カンボジア, アンコール・ワット寺院)における炭酸塩岩タブレットの溶食特性. 地学雑誌, 査読有, 126巻3号, 印刷中.
- ③ Waragai, T. (2016) The effect of rock strength on weathering rates of sandstone used for Angkor temples in Cambodia. *Engineering Geology*, 査読有, 207, 24–35. (doi:10.1016/j.enggeo.2016.04.006).
- ④ 羽田麻美・藁谷哲也 (2015) カンボジアの熱帯環境に暴露した岩石の初期風化と微生物侵入による影響. 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」, 査読有, 50号, 9–24.
- ⑤ 藁谷哲也 (2015) カンボジア・アンコール遺跡一扇状地に造られた遺跡の立地環境と石材の風化—黒部川扇状地研究所紀要, 査読無, 40号, 31–38.
- ⑥ 比企祐介・藁谷哲也 (2014) アンコール・ワットの第一回廊を構成する砂岩柱基部の水分変化と凹み深さの関係. 地理誌叢, 査読有, 56巻1号, 25–37.

[学会発表] (計15件)

- ① Waragai, T., Changes in weathering environment due to clearance of trees in the Angkor temples, Cambodia. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017・5・21, Makuhari Messe (Chiba).
- ② Waragai, T., Hot spot formations in the Angkor temples. 27th Technical Session and 23rd Plenary Session of the ICC-Angkor (International Co-ordinating Committee for the Safeguarding and Development of the Historic Site of Angkor), 2017・1・24, Siem Reap (Cambodia).
- ③ 神戸音々・佐藤万理映・竹村貴人・藁谷哲也・大野博之・稲垣秀輝, アンコール・ワット第一回廊砂岩の風化による損傷—応力集中と乾湿繰り返しの相互作用からのアプローチ. 平成28年度日本応用地質学会研究発表会, 2016・10・26, 日立システムズホール仙台(宮城県・仙台市).

- ④ 梶山貴弘・藁谷哲也，リモートセンシングによる 1989～2015 年のカンボジア・アンコール遺跡周辺における樹林地の減少. 日本地形学連合 2016 年秋季大会, 2016・10・8, 明治大学 (東京都・千代田区).
- ⑤ Song, W., Waragai, T., Oguchi, C.T., Biological weathering on the first gallery wall of Angkor Wat temple, Cambodia, The 33rd International Geographical Congress, 2016・8・21, Beijing (China).
- ⑥ 宋 苑瑞・藁谷哲也・小口千明, アンコールワット寺院第一回廊の硬度測定とシアノバクテリアの表面被覆プロセス. 文化財保存修復学会第 38 回大会, 2016・6・25, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県・平塚市).
- ⑦ 宋 苑瑞・藁谷哲也・小口千明, カンボジア王国アンコールワット寺院・第一回廊の生物風化に関する一考察. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016・5・23, 幕張メッセ (千葉県・千葉市).
- ⑧ 藁谷哲也・梶山貴弘, カンボジア・シェムリアップ周辺における近年の土地被覆変化. 日本地理学会 2016 年春季学術大会, 2016・3・21, 早稲田大学 (東京都・新宿区).
- ⑨ 林 実花・藁谷哲也, 乾湿繰り返しによるアンコール・ワット西参道におけるラテライト石材の風化. 日本地理学会 2016 年春季学術大会, 2016・3・21, 早稲田大学 (東京都・新宿区).
- ⑩ 羽田麻美・藁谷哲也, 野外風化実験からみた熱帯気候下の岩種別風化特性. 日本地理学会 2015 年秋季学術大会, 2015・9・18, 愛媛大学 (愛媛県・松山市).
- ⑪ Waragai, T., Decrease in the function of thermal buffer attributable to tree cutting at Angkor monuments. International Geographical Union (IGU) Regional Conference, 2015・8・21, Lomonosov Moscow State University (Russia).
- ⑫ 藁谷哲也・比企祐介, アンコール遺跡における乾季と雨季の熱環境. 日本地理学会 2015 年春季学術大会, 2015・3・28, 日本大学 (東京都・世田谷区), 日本地理学会発表要旨集 87 号, 105.
- ⑬ 藁谷哲也, アンコール遺跡を構成する砂岩ブロックの風化に与える熱環境の影響. 日本地理学会 2014 年秋季学術大会, 2014・9・20, 富山大学 (富山県・富山市), 日本地理学会発表要旨集 86 号, 143.
- ⑭ 藁谷哲也, カンボジア・アンコール遺跡一扇状地に造られた遺跡の立地環境と石材の風化一. 黒部川扇状地研究所 夏季研究例会, 2014・8・17, 富山県入善町役場うるおい館 (富山県・入善町).
- ⑮ Waragai, T., Thermal environment and

sandstone weathering at Angkor Wat. International Coordinating Committee for the Safeguarding and Development of the Historic Site of Angkor; 23rd Technical Committee, 2014・6・4, Siem Reap (Cambodia).

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 藁谷哲也, 公益財団法人平和中島財団, カンボジア・アンコール遺跡における樹木伐採が石材の風化に与える影響に関する研究. 研究成果報告書, (2015) 37-40.
- ② Waragai, T., Research activities of thermal environmental investigation at Ta Prohm Temple in 2014, Graduate School of Science and Engineering, Nihon University, Tokyo, (2014) 8pages.

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) 連携研究者

江口 誠一 (EGUCHI, Seiichi)
日本大学・文理学部・准教授
研究者番号 : 00301789

竹村 貴人 (TAKEMURA, Takato)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号 : 30359591

羽田 麻美 (HADA, Asami)
日本大学・商学部・准教授
研究者番号 : 70508746

(3) 研究協力者

石澤 良明 (ISHIZAWA, Yoshiaki)
三輪 悟 (MIWA, Satoru)
宋 苑瑞 (SONG, Wonsuh)
梶山 貴弘 (KAJIYAMA, Takahiro)
比企 祐介 (HIKI, Yusuke)
前田 拓志 (MAEDA, Takushi)
林 実花 (HAYASHI, Mika)
神戸 音々 (KAMBE, Nene)
佐藤 万理映 (SATO, Marie)
LOA, Mao
BORAVY, Norng