

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 6 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2011～2015

課題番号：23401001

研究課題名(和文) 岩石学的アプローチによるアンコール遺跡を代表とした東南アジアの石造文化財の解明

研究課題名(英文) Petrological approach to elucidation of masonry cultural heritages in Southeast Asia represented by the Angkor monuments.

研究代表者

内田 悦生 (Etsuo, Uchida)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40185020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,600,000円

研究成果の概要(和文)：アンコール遺跡、サンボールプレイクック遺跡、コーケル遺跡およびプレアヴィヘア遺跡に使用されている砂岩およびレンガ材の化学組成、帯磁率、大きさ等の特徴に基づき、遺跡の建造順序の推定を行った。また、アンコール遺跡で多用されている砂岩材を供給した100箇所以上の石切り場を発見するとともに、その運搬経路を明らかにした。さらに、遺跡建造時に使用された鉄の材料である鉄鉱石の供給源に関する調査を行った。クメール遺跡の建築材表面では黒色化が認められ、多くは藍藻類の付着によるものであるが、これとは異なった黒色化が認められる。非破壊調査の結果、マンガン酸化物の沈着による黒色化が存在することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Based on the chemical compositions, magnetic susceptibility, and size and other characteristics of the stone blocks and bricks used in the Angkor monument, the Sambor Prei Kuk monument, the Koh Ker monument and the Preah Vihear monument, we deduced the construction sequence. We found more than 100 quarries of the gray to yellowish brown sandstone used in the Angkor monument, and elucidated the transportation route of the sandstone blocks. In addition, we conducted the investigation of provenance of iron ores which were raw materials of iron used in the construction of the monuments. The surfaces of construction materials have blackened in the Khmer monuments. Most of this discoloring is caused by blue-green algae, but other black areas on the surface of construction materials are frequently observed. A non-destructive investigation revealed that this blackening was caused by manganese oxide precipitates.

研究分野：文化財科学、岩石・鉱物・鉱床学

 キーワード：石造文化財 遺跡 石材 アンコール遺跡 サンボール・プレイ・クック遺跡 コー・ケル遺跡 プレア・ヴィヘア
 遺跡 石材 石材劣化 レンガ

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、1994 年以来、日本国政府アンコール遺跡救済チームの団員としてアンコール遺跡に使用されている建築材の研究を行い、岩石学的な立場からアンコール遺跡の建造にまつわる謎の解明を行うとともに、石材の劣化機構の解明を行ってきた。

本研究の開始前には、主としてアンコール遺跡を対象として研究を行ってきたが、アンコール時代には、アンコール遺跡以外にも多くの遺跡が建造されている。本研究では、主としてカンボジア国内の主要なクメール遺跡であるコー・ケル遺跡、大プレア・カーン遺跡、プレア・ヴィヘア遺跡および前アンコール時代のサンボール・プレイ・クック遺跡を対象として、その石材の化学組成や帯磁率等の特徴に基づき、建造順序の推定を行うとともに、遺跡保存のための基礎的研究を行った。

2. 研究の目的

本研究では、主として次の 7 項目をその目的とした。

- (1) アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩の石切り場調査
- (2) アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩の運搬経路の解明
- (3) プレア・ヴィヘア遺跡に使用されている砂岩材に基づく建造順序の推定
- (4) サンボール・プレイ・クック遺跡に使用されているレンガ材に基づく建造順序の推定
- (5) コー・ケル遺跡に使用されているラテライト材およびレンガ材に基づく建造順序の推定
- (6) マンガン酸化物の沈着による石材表面の黒色化に関する原因の究明
- (7) アンコール期における鉄の供給源の解明

3. 研究の方法

上記の 7 項目の目的に対し、下記のような方法を用いて研究を行った。

- (1) アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩の石切り場調査： iPad mini を用いて Google Earth と GPS をリンクさせながら、クレン山南東山麓においてバイクを用いて調査を行った。発見された各石切り場において、位置の記録、写真撮影、帯磁率測定、石材の厚さ測定を行った。
- (2) アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩の運搬経路の解明： Google Earth を用いて運河のような人工的な水路を見つけ、現地踏査を行った。
- (3) プレア・ヴィヘア遺跡に使用されている砂岩材に基づく建造順序の推定： 遺跡に用いられている砂岩材に対し、帯磁率測定、携

帯型 XRF による化学組成分析、石材サイズ測定、破風等の建築様式の調査を行った。これらの結果に基づき、建造順序の推定を行った。また、遺跡周辺部において石切り場の調査も行った。

(4) サンボール・プレイ・クック遺跡に使用されているレンガ材に基づく建造順序の推定： レンガ材に対し、帯磁率測定、携帯型 XRF による化学組成分析、厚さ測定を行い、これらの結果に基づき、建造順序の推定を行った。

(5) コー・ケル遺跡に使用されているラテライト材およびレンガ材に基づく建造順序の推定： ラテライト材およびレンガ材に対し、帯磁率測定、携帯型 XRF による化学組成分析および厚さ測定を行い、これらの結果に基づき建造順序の推定を行った。

(6) マンガン酸化物の沈着による石材表面の黒色化に関する原因の究明： アンコール遺跡およびコー・ケル遺跡においてマンガン酸化物によると思われる黒色化部分の分布および産状を調べるとともに、携帯型 XRF による化学組成分析を行った。また、黒色化が生じている石材からサンプルを採取し、そのサンプルに対して、X 線マイクロアナライザーによる化学組成分析、X 線回折装置による沈着物質の同定、電界放出型走査電子顕微鏡による観察を行った。これらに加え、マンガン酸化物の還元剤による除去に関する予察的実験を行った。

(7) アンコール期における鉄の供給源の解明： 大プレア・カーン遺跡、プノン・デック周辺、アンコール遺跡等において製鉄時に発生するスラグの採取を行った。また、スラグとともに鉄鉱石が伴われることがあり、このような鉄鉱石の採取も行った。これに加え、古くから鉄の供給源と考えられているプノン・デックの鉄鉱山において鉄鉱石の採取を行った。採取した鉄スラグおよび鉄鉱石の研磨片を作製し、反射偏光顕微鏡による構成鉱物の同定を行うとともに、X 線マイクロアナライザーによる鉱物化学組成分析を行った。さらに、鉄スラグから発見された炭の破片に対し、放射性炭素年代側を実施した。

4. 研究成果

上記の 7 項目に対する研究成果は下記の通りである。

- (1) アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩の石切り場調査： Google Earth の画像からクレン山南東山麓に東西 2km の長さをもつ直線状の構造が認められた。現地調査を行ったところ、これは高さ数 m の土手であることが分かった。これがアンコール遺跡に石材を運ぶために使用された運搬

路ではないかとの仮定の下、周辺地域において石切り場調査を行った。

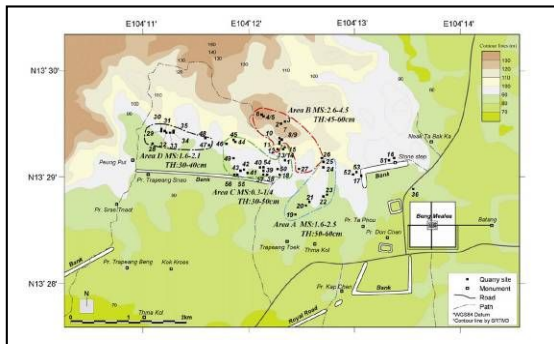


図1 アンコール時代の砂岩材石切り場の分布

その結果、今までに116箇所の石切り場を発見することができた。また、石切り場の砂岩の帯磁率と石材の大きさから、それぞれの石切り場が使用された時代の推定を行い、上述の土手の東端から逆「の」の字型に時代とともに移動したことが推測された。



図2 アンコール時代の石切り場の写真

(2) アンコール遺跡で多用されている灰色～黄褐色砂岩の運搬経路の解明： アンコール地域における Google Earth の画像から、クレン山南東麓からアンコール地域に続く運河のようなものを捉えることができた。そこで、この情報を基に現地調査を行った。

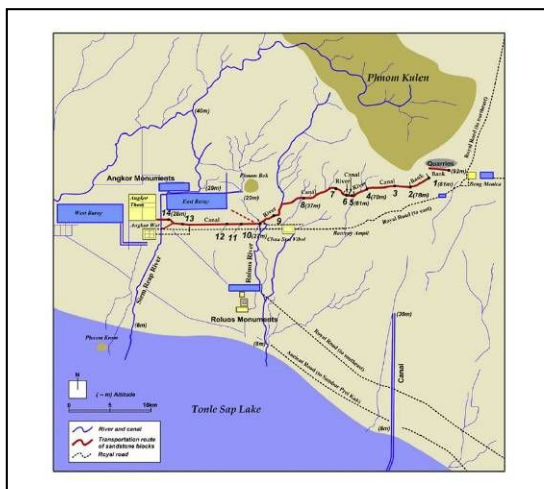


図3 クレン山南東麓からアンコール地域に続く、アンコール時代の石材運搬用の運河

その結果、多くの場所において人工的な土手を伴い、自然のものではなく、人工的な運河であることが判明した。この運河の総延長は32km程度であり、幅は20m程度である。この運河は、アンコール遺跡ばかりではなく、アンコール遺跡の南東にあるロリュオス遺跡にもロリュオス川を経由することによって容易に石材を供給することができる。今までに考えられていたクレン山南東麓から南下して大規模な運河とトンレサップ湖を経由する経路と比べて、圧倒的に運搬距離も小さいことから、今回発見した運河がアンコール時代における石材運搬のために用いられていると考えられる。

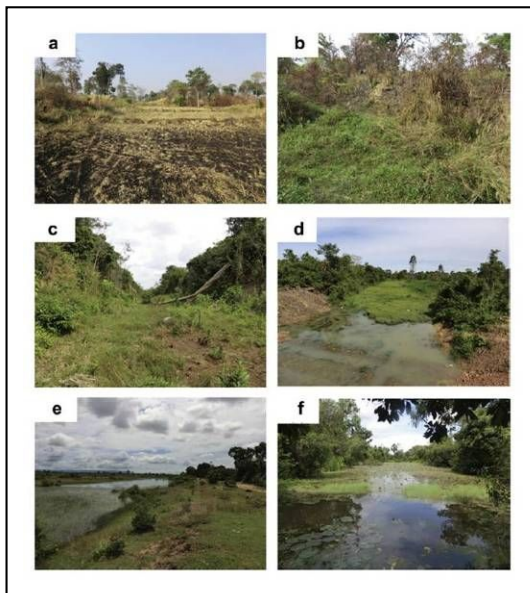


図4 アンコール時代の砂岩材運搬用の運河

(3) プレア・ヴィヘア遺跡に使用されている砂岩材に基づく建造順序の推定： タイとの国境沿いにあるプレア・ヴィヘア遺跡では、アンコール遺跡とは異なった石英質砂岩が用いられている。この石英質砂岩の帯磁率、携帯型 XRF によって求められた化学組成、並びに破風の形状等を基に建造物の建造順序の推定を行った。

プレア・ヴィヘア遺跡において最初に建造されたと推定される建物は西側の宮殿と呼ばれている建物の南側の部分(N2)であり、用いられている砂岩材は、他の建物の砂岩材と比べて小さく、また、その帯磁率も他の建物の砂岩と比べて明らかに小さくなっている。他方、最後に建てられたと推定される建物は、中央祠堂(B)付近の建物や経蔵であり、大きな石材が使用されていることが一つの特徴である。

破風の先端の形は時代とともに変化し、先端が渦巻状を呈し、一材でできたもの、先端が渦巻状を呈し、二材でできたもの、そして、先端が多頭ナーガとなっているものへと変化している。

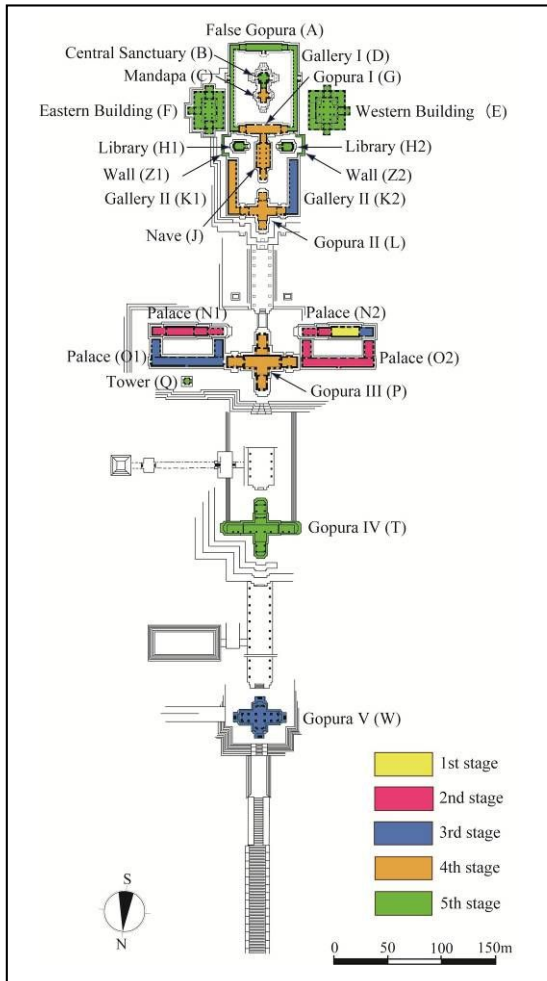


図5 石材から推定されるプレア・ヴィヘア遺跡の建造順序

(4) サンボール・プレイ・クック遺跡に使用されているレンガ材に基づく建造順序の推定： サンボール・プレイ・クック遺跡の東部地区にある N 群、S 群、C 群およびその周辺に分布するレンガ造の建造物のレンガ材に対する携帯型 XRF による化学組成分析結果および厚さ等に基づき建造順序の推定を行った。その結果、サンボール・プレイ・クック遺跡の建造物は、Rb-厚さ図および Ti-厚さ図を用いて5グループに分けられ、レンガの厚さが時代とともに薄くなることが判明した。

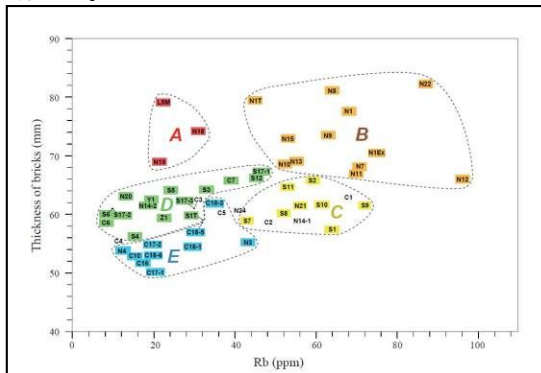


図6 レンガの厚さと Rb 含有量に基づくサンボール・プレイ・クック遺跡のレンガ造建造物のグループ化

(5) コー・ケル遺跡に使用されているラテライト材およびレンガ材に基づく建造順序の推定： コー・ケル遺跡には、砂岩、ラテライトおよびレンガが使用されている。砂岩に関しては、化学組成および帯磁率等において建造物による違いは全く見られないが、ラテライトに関しては帯磁率および Sr 含有量において明確な違いが認められた。これらのデータを基に建造物の建造順序の推定を行った。その結果、5つのグループが判別され、建物の配置を参考にして建造順序の推定を行った。また、レンガ材についても、帯磁率および化学組成 (Fe, Ti, Rb, Zr, Y) において違いが認められ、これらのデータを用いてクラスター分析を行い、5つのグループに分けることができた。ラテライトに基づいて推定された建造順序との対応関係を明らかにし、ラテライトおよびレンガに基づくコー・ケル遺跡の建造順序の推定を行った。

Temple	Construction materials	Sanctuary		Middle enclosure		Outer enclosure		Other buildings					
		Stage	MS*	Stage	MS*	Stage	MS*	Buildings	MS*	Buildings	MS*		
Pr. Thom	laterite												
Pr. Damrei	laterite												
Pr. Chantrea	laterite												
Pr. Knachup	laterite												
Pr. Kaham	laterite												
Pr. Chen	laterite												
Pr. Neung Khnum	laterite												
Pr. D	laterite												
Pr. G	laterite												
Pr. Trapeang Roset	laterite												
Pr. Khnum	laterite												
Pr. Bak	laterite												
Pr. Bantay Pr. Chan	laterite												
Pr. Chrup	laterite												
Pr. Pran	laterite												

図7 ラテライトおよびレンガの化学組成と帯磁率に基づくコー・ケル遺跡の建造順序の推定

(6) マンガン酸化物の沈着による石材表面の黒色化に関する原因の究明： アンコール遺跡のみならず、クメール遺跡の建築材 (砂岩、ラテライト、レンガ) の表面が黒くなる現象が認められるが、ほとんどは藍藻類の付着によるものである。しかしながら、藍藻類の付着によらない黒色化が認められる。携帯型 XRF による分析の結果、黒色部にはマンガンが濃集していることが明らかになった。このようなマンガン酸化物による黒色化は広くクメール遺跡において見られる現象であるが、特にラテライトにおいて顕著である傾向が認められる。その中でもコー・ケル遺跡の

ラテライト造建造物ではマンガン酸化物による黒色化が顕著である。このような黒色化は建物の外壁のみならず内壁にも認められる。携帯型 XRF 分析によると黒色部は主としてマンガンから成るが、その他に微量の Ni、V、Zn、Y、K、Cl、S、Pb および Cr が含まれている。X 線回折分析では、多くの黒色物質は非晶質であるが、birnessite や todorokite が検出されることがある。また、電界放出型走査電子顕微鏡観察では、多くの場合、100–200 nm の大きさの六角板状を呈することが多いが、桿状の形を呈するものも見られることから、マンガンの沈着においてバクテリアが関与した可能性が考えられる。

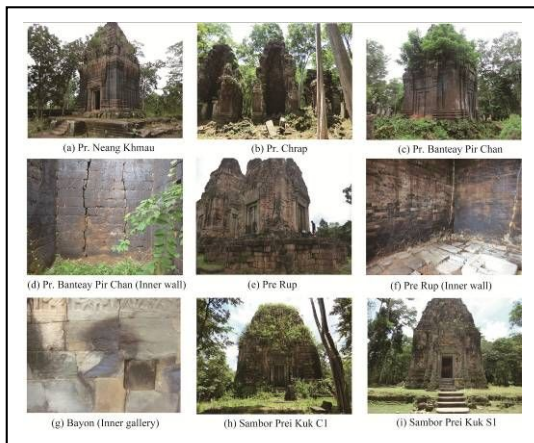


図 8 クメール遺跡の建築材表面に見られるマンガン酸化物の沈着

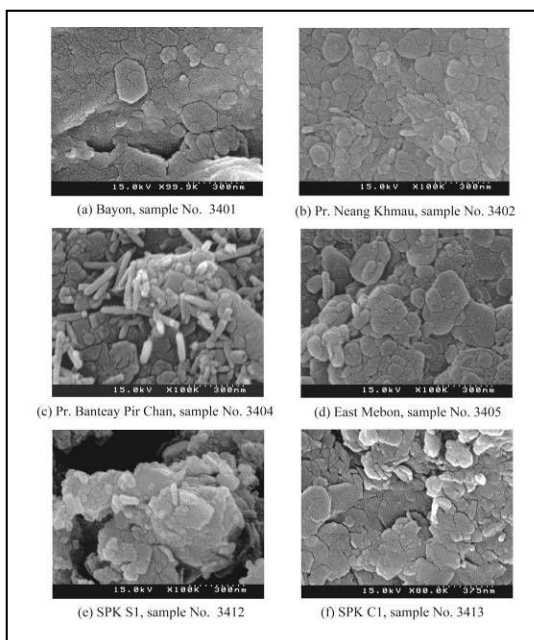


図 9 電界放出型走査電子顕微鏡による建築材表面に沈着したマンガン酸化物の様子

このようなマンガン酸化物の沈着による汚れを落とすために、還元剤が有効であると考えられたため、シュウ酸水溶液を用いた予防的な洗浄実験を行った結果、数時間でほぼ

取り除くことができることが判明した。

(7) アンコール期における鉄の供給源の解明： コンポン・スヴァイのプレア・カーン（大プレア・カーン）やアンコール遺跡において製鉄の際に発生する鉄スラグが多く発見されているとともに、鉄スラグに伴って鉄の原料となる鉄鉱石が見つっている。本研究では、これらの場所等において鉄スラグおよび鉄鉱石を採取し、X 線マイクロアナライザーを用いて構成鉱物に対する化学組成分析を行い、鉄スラグおよび鉄鉱石の化学組成における地域差を明らかにした。また、古くから鉄鉱石の供給地として知られているプノン・デック（鉄の山の意味）にて鉄鉱石の採取および化学組成分析を実施し、鉄スラグに伴われる鉄鉱石の化学組成との比較を行った。鉄スラグの採取は、大プレア・カーン（15 箇所）、プノン・デック周辺地域（5 箇所）、スヴァイ・ダムナック（大プレア・カーンとプノン・デックの間）、アンコール遺跡（バイヨンおよびプラサート・スープラの発掘現場）の計 23 箇所において行った。

鉄スラグは、主として鉄かんらん石とウスタイトより構成される。この他に、磁鉄鉱あるいは金属鉄を伴うことがあるが、磁鉄鉱と金属鉄は共存しない。鉄スラグに伴われる鉄鉱石は、磁鉄鉱と赤鉄鉱からなり、赤鉄鉱が磁鉄鉱を置き換える様子が見られ、赤鉄鉱は二次生成物であると考えられる。

X 線マイクロアナライザーによる鉱物化学組成分析結果から次のことが明らかになった。

鉄かんらん石 (Fe_2SiO_4): 鉄かんらん石に固溶する Mn および Mg 含有量に基づき次の 3 グループに分類される：Mn も Mg もほとんど固溶しないグループ、Mn および Mg を多く固溶するグループ、Mn を多く固溶するが、Mg をほとんど固溶しないグループ。グループから の範囲を示すものも若干認められる。グループ は大プレア・カーンとバイヨンにのみ、グループ は大プレア・カーンにのみ認められる。

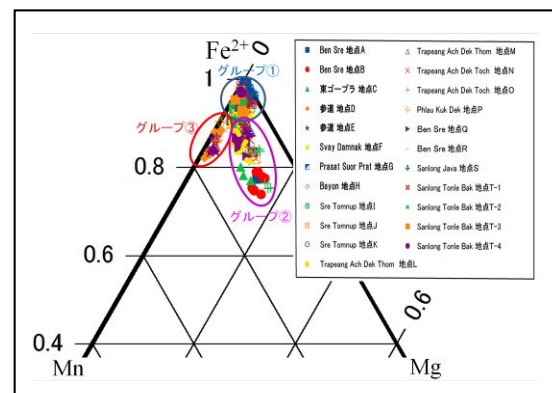


図 10 クメール遺跡から発見された鉄スラグを構成する鉄かんらん石の化学組成に基づく 3 つのグループ

ウスタイト (FeO): Mn をほとんど含まないグループと Mn を若干含むグループとに分けられる。前者は、鉄かんらん石の化学組成に基づくグループ に対応し、後者はグループ および に対応する。

磁鉄鉱 (Fe₃O₄): 鉄スラグに伴って産出する鉄鉱石中の磁鉄鉱の化学組成は、Mn も Mg もほとんど固溶しないグループと Mn および Mg を多く固溶するグループとに分けられる。鉄かんらん石の化学組成に基づくグループ は前者に、グループ は後者に対応するが、グループ は Mg も Mn もほとんど含まず、前者に対応する。ブノン・デックの鉄鉱石中の磁鉄鉱は、Mn も Mg もほとんど固溶せず、グループ に対応する。

上記の鉄スラグおよび鉄鉱石を構成する鉱物の化学組成から、鉄鉱石の供給源として少なくとも3箇所があったことが推定される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

(1) Uchida E., Tsuda, K., Shimoda I., Construction sequence of the Koh Ker monuments in Cambodia deduced from the chemical composition and magnetic susceptibility of its laterites. *Heritage Science*, 2014, 2, p.1-11. doi:10.1186/2050-7445-2-10、査読有。

(2) 下田一太, クメール建築の砂岩採石技法に関する考察. *日本建築学会計画系論文集* 2014, 79, p.2543-2551、査読有。

(3) Uchida E., Sato K., Cunin O., Toyouchi K., A reconsideration on the construction period of the cruciform terraces and the elevated causeways in the Angkor monuments, based on the magnetic susceptibility of the sandstone blocks. *Archaeometry*, 2013, 55, p.1034-1047. doi:10.1111/j.1475-4754.2012.00717.x、査読有。

(4) Uchida E., Shimoda I., Shimoda M., Consideration of the construction period of the Khmer temples along the east royal road to Preah Khan of Kompong Svay and the provenance of sandstone blocks based on their magnetic susceptibility. *Archaeological Discovery*, 2013, 1, p.37 - 48. doi.org/10.4236/ad.2013.12004、査読有。

(5) Uchida E., Shimoda I., Quarries and transportation routes of Angkor monument sandstone blocks. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40, p.1158 -1164. doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.036、査読有。

(6) Uchida E., Takubo Y., Toyouchi K., Miyata J., Study on the pigments in the cruciform gallery of Angkor Wat, Cambodia. *Archaeometry*, 2012, 54, p.549-564. doi:10.1111/j.1475-4754.2011.00634.x、査読有。

(7) Uchida E., Shimoda I., Takubo Y., Toyouchi K., Moisture content measurement and surface water absorption test in the inner galley of Bayon for the conservation of the bas-relief. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39, p.1420-1435. doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.009、査読有。

〔学会発表〕(計 4 件)

(1) 内田悦生・渡辺亮太・大澤里美、カンボジア・クメール遺跡の石材表面におけるマンガニ酸化物の沈着、日本文化財科学会 2015 年 07 月 11 日 東京学芸大学

(2) 内田悦生・溝口明則・佐藤広野・下田一太・渡辺亮太、砂岩材の特徴に基づくプレア・ヴィヘア遺跡の建造順序の推定、日本文化財科学会 2014 年 07 月 05 日、奈良教育大学

(3) 内田悦生・下田一太・下田麻里子、大ブレア・カーンに続く王道沿いのクメール寺院の建造年代と石材供給地 - 帯磁率に基づく考察、日本文化財科学会 2013 年 07 月 06 日、弘前大学

(4) 内田悦生・下田一太、アンコール遺跡に使用されている砂岩材の石切り場と運搬経路、日本文化財科学会 2012 年 6 月 23 日、京都大学

(5) 内田悦生・佐藤桂・オリヴィエ=クニン・豊内謙太郎、砂岩材の帯磁率および特徴に基づくアンコール遺跡の円柱を伴うテラスおよび空中参道の建造時期に関する考察、日本文化財科学会 2011 年 6 月 11 日、筑波大学

〔図書〕(計 1 件)

(1) 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、254p.

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

下田一太 (SHIMODA Ichita) 筑波大学・芸術系・助教

研究者番号: 40386719