

# アンコール・ワットを構成する砂岩 およびラテライトの風化環境と風化プロセス

藁谷 哲也\*

## Weathering Environment and Weathering Processes on Angkor Wat Building Stones

Tetsuya WARAGAI\*

### Abstract

Weathering environment at two study sites of Angkor Wat were analysed together with mineralogical and physico-chemical behaviour of building stones of sandstone and laterite. In order to store the set of data of air temperature and relative humidity at intervals of 30 minutes, two data loggers were installed at Elephant gate (Site 1) and West causeway (Site 2), between 5 September 2000 and 10 September 2001. The results show that Site 1 had more severe temperature and humidity changes ( $-5^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ ,  $24\%/30\text{ min}$  in maximum) than Site 2 ( $-4^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ ,  $19\%/30\text{ min}$ ). In addition, Site 1 had a high frequency of wetting and drying cycles (73 cycles) compared to Site 2 (6 cycles). These measurements argue that wet-dry alternation and salt efflorescence are major in exfoliation on sandstone surfaces at Elephant gate. The laterite composed of goethite, hematite, quartz and kaolinite has no swelling clay minerals. However, the laterite has small tensile strength (1.2 MPa) than the sandstone (3.5 MPa), as well as low durability for wet-dry repetition. It is recognized that slaking of the laterite due to fluctuation in water level at the moat has caused subsidence of West causeway.

**Key words:** *weathering environment, weathering processes, sandstone, laterite, Angkor Wat.*

### 1. はじめに

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遺跡は寺院、祠堂、大伽藍などからなる古代カンボジア王国の旧都ヤショダラプラおよびその周辺の遺跡（石澤, 1995）で構成される。この遺跡群は、1992年に世界遺跡条約リストに登録され、世界遺産に指定された。アンコール遺跡のなかでも、スールヤヴァルマン2世によって12世紀に建造されたアンコール・ワットは、クメール人の世界観を具現化した宗教遺跡である。

---

2004年11月30日受付, 2005年2月18日改稿, 2005年3月24日受理

\* 日本大学・文理学部・地理学教室

\* Department of Geography, Nihon University, 3-25-40 Sakurajyosui Setagaya Tokyo 156-8550, Japan

これは東西 1,025 m, 南北 820 m の周壁をもち、幅 190 m の環濠によって囲まれる大規模なもので、建築には遺跡周辺から産出した砂岩やラテライト、あるいはレンガなどがおもに使用された。しかし、遺跡は 13 世紀末ころに放棄され、アンリ・ムオによって 1860 年に発見されるまでの間、モンスーン林の密林に覆われていた。また、その後のクメール・ルージュによる政治的不安定も加わって、遺跡の自然的・人為的劣化や破壊が急激に進行した。このため、遺跡の発見当初はフランス極東学院が中心となって、内戦終結後は UNESCO がこれに代わって保存・修復事業を進めてきた。一方、アンコール遺跡に対するわが国の保存・修復事業は、1980 年以降始まり、当初は上智大学アンコール遺跡国際調査団によって、その後おもに日本国政府アンコール遺跡救済チームや文化庁なども加わって進められてきている（例えば、Ishizawa and Kono, 1986；日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003；文化庁・奈良国立文化財研究所, 1997）。

アンコール・ワットのような石造遺跡の自然進行的な破壊は、遺跡の立地する気候環境と建設に利用された岩石固有の理化学的性質とが結びついて生じていると考えられる。このため、遺跡の保存・修復には遺跡の立地環境や岩石の風化特性などに関する分析が重要視される（例えば、関ほか, 1987 a, b；松倉, 1996；Oguchi and Matsukura, 2000；朽津ほか, 2003）。アンコール遺跡では、古くから遺跡の風化状況について報告がなされ、主要な石材ブロックである砂岩の理化学的分析に基づいた岩石風化の研究が進められてきた（例えば、Saurin, 1954；Delvert, 1961）。また、岩石の生物化学的風化に注目した Pochon et al. (1960) による研究も行われてきた。最近では、例えば主要石材の砂岩およびラテライトに対する岩石学的研究（内田ほか, 1995, 1996, 2000, 2002；内田・塩谷, 1997；内田・前田, 1998, 1999；内田・安藤, 2001；Uchida et al., 1998, 1999 a, b；岩崎ほか, 2002；内田・須田, 2003）や地質工学的研究（盛合, 1995, 1997）に加えて、藻類・地衣類（新井, 1994, 1995；新井・山岸, 1996, 1997, 1998；So, et al., 2002）、微生物（片山ほか, 2002, 2003）、コウモリ類（吉行ほか, 2002）の活動による岩石劣化や風化との関連性に着目した研究なども多数進められてきている。しかし、これらの研究では、気象観測データが利用されることはほとんどなく、個々の岩石ブロックが置かれた現場の環境に対する詳細な分析は十分とはいえない。広い範囲に展開するアンコール・ワットでは、岩石ブロックの風化環境は均質ではなく、むしろ多様である。このため、風化環境を場所にかかわらず均質なものとして扱うことは困難で、岩石ブロックの位置する個々の環境について検討することが必要となる。そこで本研究では、岩石ブロックの置かれた環境を現場で測定して、現地の風化環境を詳細に分析することにした。また、岩石ブロックの鉱物組成や理化学的性質を調べ、その風化がどのような風化プロセスと結びついているかについて考察した。

## 2. 研究対象地域の自然環境と遺跡の劣化状況に関する概要

アンコール・ワットは、標高 100 ~ 500 m のプノン・クレーン丘陵とその南部に広がる標高 1 ~ 10 m のトンレ・サップ湖（水深 1 ~ 9 m）との間の標高 20 m 前後の平野部に位置する (Fig. 1). プノン・クレーン丘陵は、丘頂部が平坦で小起伏のいわゆるメサ状の丘陵地で、おもに灰白色、黄白色ないしは桃色を呈するジュラ紀~白亜紀の砂岩や細礫質砂岩などで構成される。これら砂岩の構成鉱物は石英、長石、雲母を主体とし、緑泥石やカオリナイトなどの粘土鉱物を含む (盛合, 1995; Uchida, et al., 1998).

プノン・クレーン丘陵の縁からトンレ・サップ湖岸までは、約 40 km の距離があり、平野部の平均勾配はおよそ 2 % と緩い。アンコール・ワットは緩扇状地に立地し、最表層部に小礫を交えた砂層からなる (春山, 2000)。平野部の深部地質についての情報は多くはないが、大まかには、表層からおよそ 90 m まではおもに粘土質細砂または砂質粘土、これ以下は固結度の高い基盤岩 (岩崎・福田, 1996) と考えられている。一方、およそ 5 m 程度までの表層部については、ラテライト性赤色土層からなるという報告 (岩崎ほか, 1995 a; 盛合, 1995) もある。このラテライト性赤色土層は、多孔質の鉄集積層であるラテライトの風化によって生成されたもので、石英、カオリン、針鉄鉱および赤鉄鉱から構成される (盛合, 1995)。これは湿っているときは軟らかいが、乾燥すると非可逆的に固化するという特徴を持つ。

遺跡周辺の気候環境は、Boulbet (1979) によると、年平均気温 27.3 °C、年間降水量 1,513 mm (1963 ~ 1971 年) の熱帯モンスーン気候下に置かれ、雨季 (5 ~ 10 月) と乾

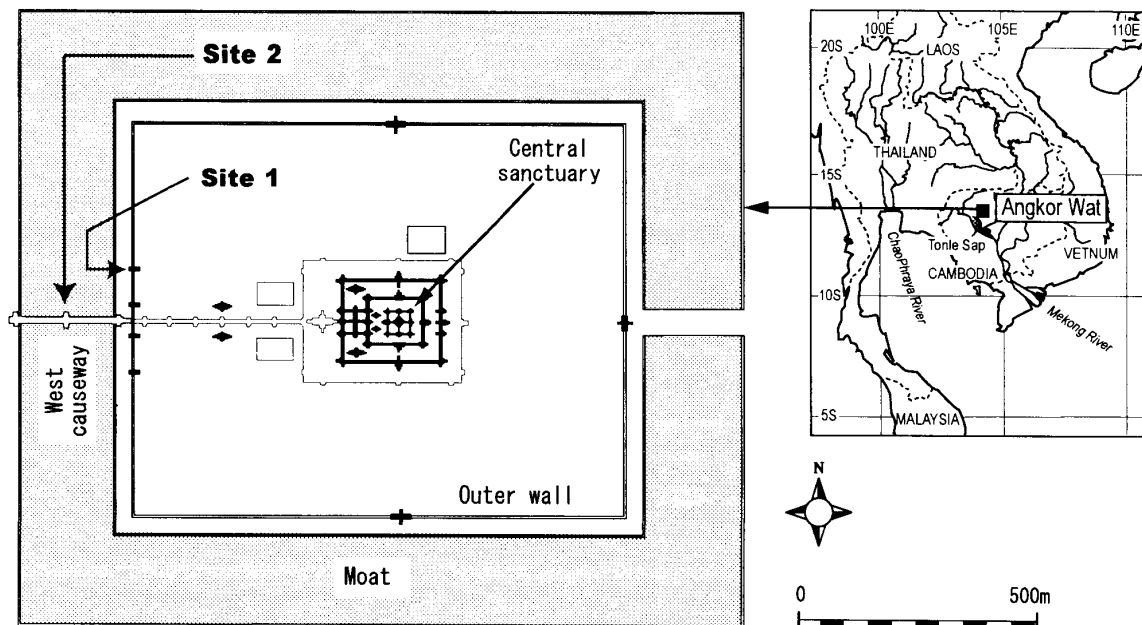


Fig. 1. Study sites for the air temperature and relative humidity measurement on a plan of Angkor Wat (after Glaize, 1998).

季（11月～4月）が繰り返されている。とくに雨季の降雨日数は多く、1979～1997年にかけて、6～10月の平均降雨日数は毎月20日以上（ラオ、2001）であった。このため、トンレ・サップ湖における水位変動は大きく、湖水域は乾季におよそ3,000 km<sup>2</sup>であるが、雨季には10,000 km<sup>2</sup>にまで拡大する（春山、2000；Okawara and Tsukawaki, 2002）。モンスーンに由来するこのような季節性に加えて、日周期性の降雨も当該地域の特徴である（及川、2002）。すなわち、直達日射による上昇気流の発生が、午後になると驟雨をもたらしている。

アンコール・ワットは、高さ62 mの中央祠堂を3つの回廊が取り囲み、さらにこれらを周壁と環濠が囲むように配置される（Fig. 1）。参道は、アンコール・ワットの正面にあたる西側（西参道）から環濠と周壁を貫いて中央祠堂へ向かって東西にのびる。遺跡は、おもに砂岩とラテライトを建築石材とする石積み建築である（片桐、2001）。これら岩石ブロックの表面部では、剥離、粒状崩壊、塩化物の析出、生物化学的風化、黒色変色などが認められ、さまざまなタイプの風化が進行しているようである。これら劣化部分では、すでに修復工事を受けた箇所もあるが、大部分は修復されずに放置されている。とくに中央祠堂から離れた周壁や塔門では、レリーフのような美術的装飾がほとんど施されていないこともあり、修復は進んでいない（Fig. 2-a）。周壁はおもにラテライトブロックで、また塔門は砂岩ブロックで建設されている。とくに砂岩からなる塔門の内側では、表面部の剥離や塩化物の析出などが認められる。一方、環濠の堰堤や環濠に架かる西参道の橋梁部（Fig. 1）では、砂岩敷石の不同沈下が顕著である（Fig. 3-a）。すでに西参道の南半分は、フランスによる修復工事が完了しているが、北半分では表面を構成する個々の砂岩ブロックが分離して大きく起伏している。このため、参道の北半分では、上智大学アンコール遺跡国際調査団を中心に保存・修復工事が進められている。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 気温・湿度測定

アンコール・ワットは熱帯モンスーン気候下に位置するため、岩石ブロックの風化は、基本的には乾季と雨季の季節的な交替に由来するであろう。しかし、岩石の置かれた位置によって風化環境はだいぶ異なっていると考えられる。とくに、季節的な乾燥－湿潤の交替に加えて、環濠の水位変化を被る西参道の橋梁部とそれを被らない場所とでは、風化環境は異なる。そこで、本研究では異なる風化環境にある周壁の北西に位置する象の門（Site 1）と西参道（Site 2）を対象として（Fig. 1）、気温と湿度（相対湿度）の変化を測定することとした。

気温（℃）と湿度（%）の測定は、データロガー（Onset Computer 製、HOBO H08-032-08）を用いて2000年9月5日12時～2001年9月10日14時までの約1年間、30分間隔で行った。Site 1では、象の門の内側（東側の門の上部、地上から高さおよそ5 m）

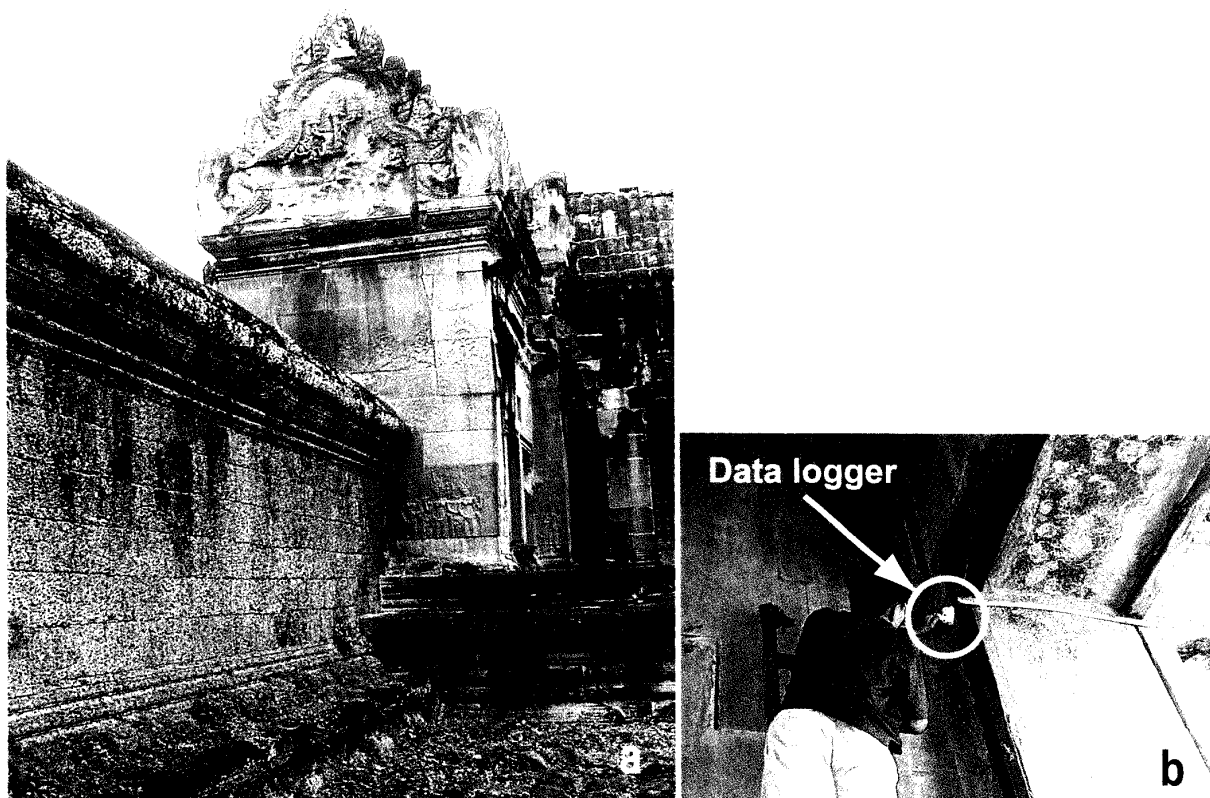


Fig. 2. a: Elephant gate made of sandstone blocks and outer wall made of laterite blocks, b: Data logger installation at Elephant gate (Site 1).

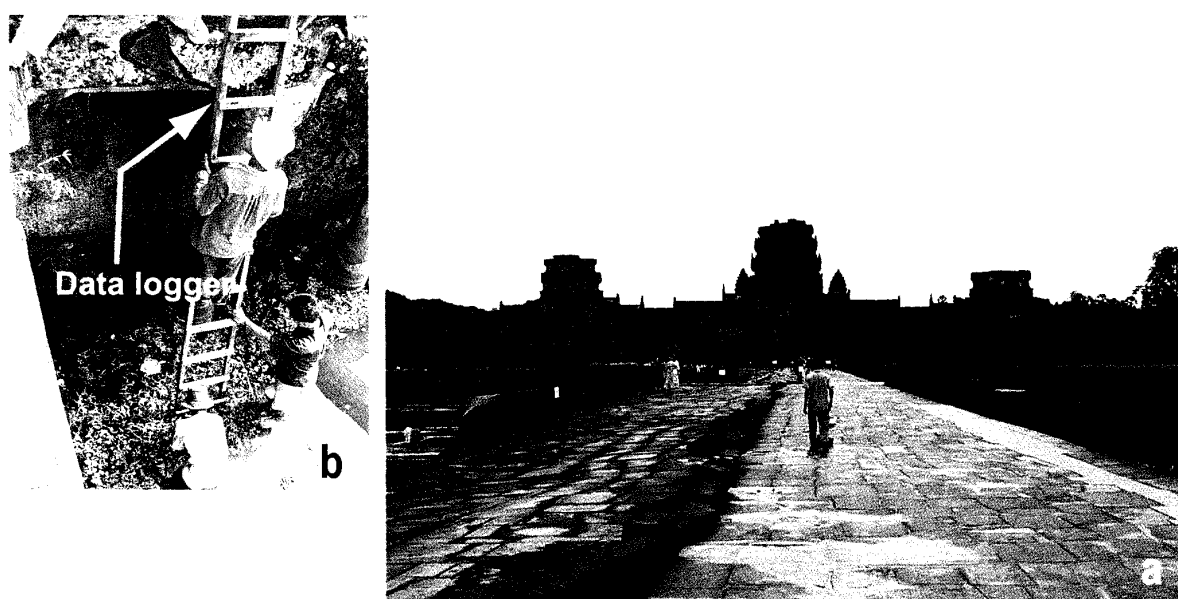


Fig. 3. a: West causeway with subsidence of northern half, b: Data logger installation at West causeway (Site 2).

に西に向けてデータロガーを取り付けた (Fig. 2-b). また, Site 2 では, 橋梁中央に位置する橋床下部にデータロガーを北向きに設置した (Fig. 3-b). 設置時における水面からの高さはおよそ 4 m である. データロガーは, このようになずれも自然通風下に設置し, 直接日射や降雨に曝されることはない.

### 3.2. 遺跡を構成する岩石の鉱物組成・理化学特性および風化特性の測定

#### 3.2.1. 試料

おもに遺跡を構成する砂岩とラテライトは, それぞれ異なった鉱物組成, 理化学特性や風化抵抗性を有していると考えられる. このため, これら岩石の組成や特性および乾燥-湿潤の繰り返しに対する耐久性 (スレーキング特性) などを調べることは重要である. しかし, 世界遺産に登録されているアンコール・ワットでは, 分析用試料を遺跡そのものから取り出すことは困難である. その一方で, 建築に使用された砂岩はプノン・クレーン丘陵南東部から, またラテライトは遺跡周辺からそれぞれ採取されたと考えられているが, いずれも採石地は特定されていない (Meng et al., 1997). このため, 岩石ブロックの組成や特性を調べるための試料として, 遺跡を構成する砂岩と類似する砂岩をシェムリアップ市内の石材店から購入した. この砂岩 (桃色砂岩と呼称する) は, 硬質でおもに細粒な石英粒からなり, 淡い桃色を呈する. また, アンコール・ワットの北東およそ 3 km に位置するタ・プロムにおいて, 遺跡の壁面から崩落したと思われる砂岩の小岩片 (灰色砂岩) を試料として用いた. タ・プロムはジャヤヴァルマン 7 世によって 1186 年に創建された遺跡で, おもにアンコール・ワットと同様の灰色砂岩からなる. このため, アンコール・ワットを構成する砂岩の組成や特性を推定するのに有効であると考えた. ラテライトについては, 現在, 西参道の補修に利用されているラテライトと同じものを分析に用いた. これは暗赤褐色を呈し, 直径 1 cm 程度の球状小穴を多数持つ多孔質の構造を有する.

#### 3.2.2. 鉱物組成・理化学特性の測定

試料の物理的性質を調べるため, 対象としたすべての試料について見かけ比重 ( $\rho_{app}$ ), 乾燥密度 ( $\rho_d$ , g/cm<sup>3</sup>), 空隙率 ( $n$ , %) を測定した. これらの測定には, 試料の含水飽和質量と含水飽和状態の水中質量を測定して求めた. また, 試料の力学的性質は, 点載荷式圧裂引張試験機 (丸東製作所製, CG-22) による引張強度 ( $St$ , MPa) を測定して調べた. 測定は, 桃色砂岩とラテライトについて, これらを砕いて 8 cm × 7 cm × 5 cm 程度の大きさの塊状供試体 3 ~ 5 個を作製し, 110 °C で 24 時間炉乾燥させた後, 試験して平均値を求めた. なお, 灰色砂岩は小岩片であるため, 引張強度を測定できなかった.

鉱物組成はすべての試料を対象に, 全岩試料と粘土試料 (無処理およびエングリコール処理) について, X 線回折装置 (リガク製, デスクトップ X 線回折装置 MiniFlex) により分析 (電圧 30 kV, 電流 15 mA, Cu-X 線管) した. 粘土試料は, 試料をアルミナ乳鉢で軽く粉碎した後, 精製水を加えて超音波洗浄器を用いて分散した. そしてトールビーカー内で約 8 時間放置した後, 遠心分離器を用いて粘土分を回収し, スライドガラス上に展開・乾固したもの (無処理試料) を使用した. また, エチレンジグリコール (EG) 処理試料

は、無処理試料の測定後、EG (HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH) を数滴たらし、同試薬の水蒸気 (60 °C) に 30 分間放置したものを分析した。

化学組成は、すべての試料について蛍光 X 線分析 (XRF) 装置 (Philips 製, PW 2400) により調べた。分析には、はじめに 20 g (炉乾燥質量) を秤量した試料を乳鉢で粉碎した後、恒温乾燥炉で乾燥させ、およそ 0.7 g の分析用試料を分取した。この分析用試料を融剤 (無水四ホウ酸リチウム) と混合させ、白金ルツボを使ってビードサンプラーで測定用ガラスビードを作成し、東京大学地震研究所の XRF 装置にかけた。

### 3.2.3. スレーキング特性の測定

試料のスレーキング特性を調べるため、Matsukura and Yatsu (1982) の実験方法を参考に、次のような手順で実験を進め、実験終了後に試料の残留率 ( $W_r$ , %) を (1) 式で求めた。試料の大きさの関係から、対象とした試料は、桃色砂岩とラテライトである。

$$W_r = \left[ 1 - \frac{W_0 - W_n}{W_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $W_0$ : 実験開始前の供試体の乾燥質量、 $W_n$ :  $n$  サイクル時の供試体の乾燥質量である。

- i) 直径 7 cm 程度の塊状に砕いた供試体を各試料から 3 つずつ取り出し、蒸留水を満たしたビーカーに 9 時間水浸する。
- ii) 水浸後、供試体をビーカーから取り出し、プログラム式恒温乾燥炉に移して 48 時間乾燥させる。乾燥条件は、温度上昇・低下による供試体の物理的破壊を避けるため、室温から 10 時間かけて 40 °C まで加熱し、これを 28 時間維持したのち、室温まで 10 時間かけて減熱した。
- iii) 供試体を完全に乾燥させるため、乾燥炉から供試体を取り出し、乾燥剤を入れた真空デシケータに移して 15 時間放置した。
- iv) デシケータから供試体を取り出し、4.75 mm のふるいを用いて崩落物質と残留物質 (供試体) とを選別してそれぞれの質量を測定する。
- v) 残留物質について、以上のサイクルを 12 サイクル繰り返す。

## 4. 結 果

### 4.1. 気温・相対湿度の変化

測定地点における気温と湿度の変化を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。Fig. 4-a に示すように、Site 1 の最高、最低気温はそれぞれ約 37 °C、22 °C となり、測定期間に対する絶対年較差は 15 °C であった。また、最高、最低湿度は、それぞれ 98 %、35 % を記録し、比較的大きい絶対年較差 (65 %) となった。Fig. 4 には、測定値の大まかな推移をみるため、30 日移動平均値の変化も表されている。これによると、気温は 5 月におよそ 32 °C で最高のピークを

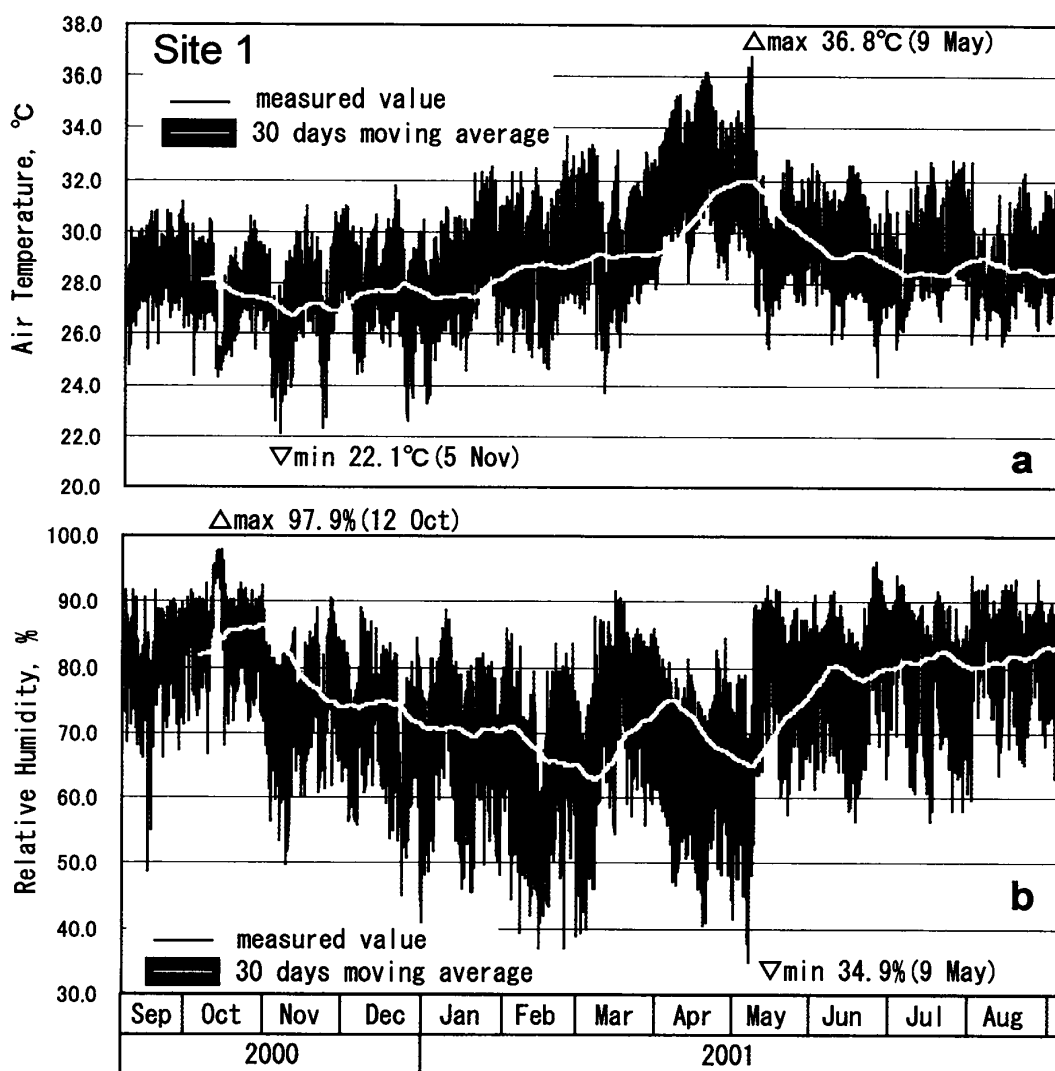


Fig. 4. Air temperature and relative humidity fluctuations with moving average of 30 days at Site 1.

迎えたが、その他の月では28℃前後となって安定していたことがわかる (Fig. 4-a). 湿度では、10月に90%のピークが現れて3月(60%)まで低下したが、4~5月の短期間に60~80%の湿度変化が現れ、それ以降80%となった (Fig. 4-b).

Site 2では最高、最低気温は、それぞれ約36℃、22℃を記録し、絶対年較差は14℃であった (Fig. 5-a). また、湿度は最大、最小値がそれぞれ100%、41%を記録した. 気温と湿度の測定値をSite 1のそれらと比較すると、Site 2では、とくに湿度が高く、年間の変動幅は小さいといえることができる. 気温の移動平均 (Fig. 5-a) は、Site 1と同様に5月におよそ32℃のピークが現れたが、これを除くと気温の年変化は小さく、28℃前後ではほぼ一定していた. また、湿度における移動平均値は、10月~3月にかけて90%~70%へ低下したのち、4月に80%の小さいピークをつくり、6月以降85%台で推移した (Fig. 5-b).

このように2つの測定地点は、ともに亜熱帯環境にあることから、5月に気温のピーク



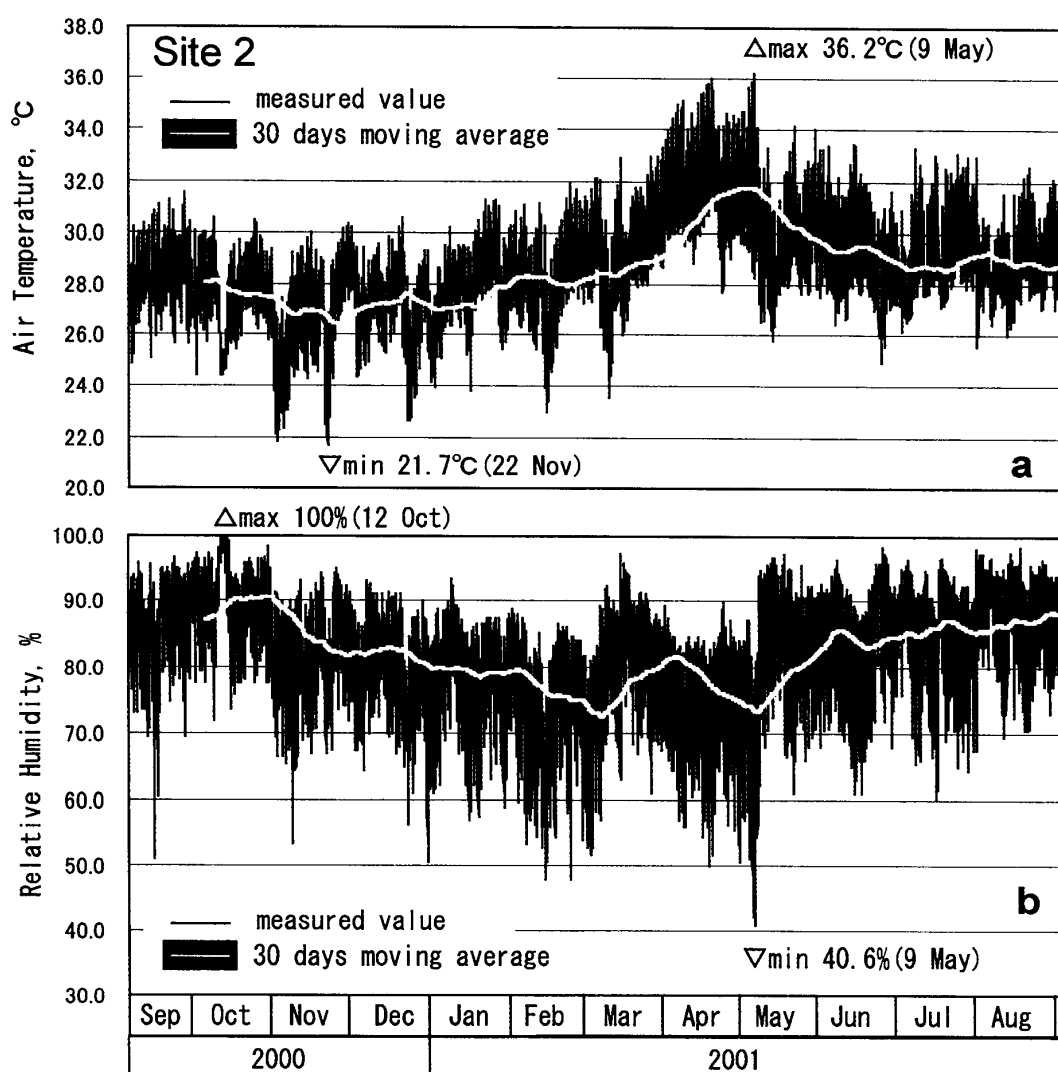


Fig. 5. Air temperature and relative humidity fluctuations with moving average of 30 days at Site 2.

が現れるものの年間を通じて気温はほぼ安定している。しかし、湿度は乾季とされる10月から4月の間にも10ポイント程度の変化が生じ、気温に比べて単純でないことが明らかとなった。

#### 4.2. 鉱物組成・理化学特性およびスレーキング特性

Table 1 に試料のおもな物理・力学的性質を示す。桃色砂岩試料の空隙率は約12%と小さく、引張強度は3.5 MPa と大きい。灰色砂岩では、桃色砂岩より大きい空隙率(16%)が測定された。一方、ラテライト試料では、比重が3.28 と極めて大きいものの、空隙率は23%と多孔質であることがわかる。また、ラテライトの引張強度は、桃色砂岩のそれより小さく1.2 MPa であった。これらから、空隙率が小さく、引張強度の大きい桃色砂岩が、もっとも緻密で硬いということが出来る。

X線回折装置による鉱物組成の分析結果は、Table 2 に示される。桃色砂岩と灰色砂岩は

おもに石英からなり，灰色砂岩には斜長石も含まれる．一方，ラテライト試料はおもに針鉄鉱からなり，石英や赤鉄鉱も含まれることがわかった．粘土分を対象とした試料（未処理試料）の分析では，桃色砂岩とラテライトからカオリナイト，灰色砂岩から斜緑泥石とイライトが同定された．EG 処理の結果，これら粘土鉱物の底面反射角の変化は認められず，膨潤特性は確認できなかった．

XRF 装置による化学組成の分析結果を，Table 3 に示す．分析値の合計が 100 % とならないのは，おもにイグニッションロスによるものと思われる．桃色砂岩は  $\text{SiO}_2$  がおよそ 80 % を占め珪質であるということが出来る．また， $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9.8%) と  $\text{FeO}$  (1.9%) を除けば，他の化学成分は 1 % に満たない．これに対して，灰色砂岩は  $\text{SiO}_2$  (70.2%) を除くすべての成分 (Table 3) が桃色砂岩より高い．とくに  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  などが高く (1.8~3.1%) 示された．桃色砂岩と灰色砂岩における  $\text{SiO}_2$  の比較から，桃色砂岩は灰色砂岩に比べて風化のあまり進んでいない (西山・松倉, 2001) 砂岩であると考えられる．一方，ラテライトは， $\text{FeO}$  がおよそ 50 %， $\text{SiO}_2$  がおよそ 30 % を占め，Fe を主成分としている．

スレーキング実験の結果は，Fig. 6 に示される．桃色砂岩ではいずれも重量損失はほとんどなく，スレーキングによる分解は認められなかった．これに対して，ラテライトでは

Table 1. Some physical and mechanical properties of rock samples.

Rock sample	Sampling point	Formation	Geologic age	Specific gravity	Dry density $\text{g/cm}^3$	Porosity %	Tensile strength MPa
Pink sandstone	quarry	Upper Indosinias formation	Cretaceous-Palaeocene	2.63	2.32	11.5	3.5
Grey sandstone	Ta Prohm	Upper Indosinias formation	Cretaceous-Palaeocene	2.69	2.26	16.2	—
Laterite	quarry	—	Tertiary	3.28	2.53	22.6	1.2

Table 2. Mineral composition of rock samples identified by X-ray diffraction analysis.

	Quartz	Albite	Muscovite	Goethite	Hematite	Kaolinite	Clinochlore	Illite
Pink sandstone	◎		△			◎		
Grey sandstone	◎	○					◎	○
Laterite	○			◎	○	◎		

Table 3. Chemical composition (%) of rock samples.

	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	others	Total
Pink sandstone	83.4	0.5	9.8	1.9	0.0	0.2	0.1	0.1	0.9	0.0	0.2	97.1
Grey sandstone	70.2	0.6	12.2	3.8	0.1	1.8	2.1	3.1	2.1	0.1	0.1	96.2
Laterite	26.3	0.6	15.3	45.5	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	88.5

残留率 ( $W_r$ ) が 85 ~ 90 % に低下し、水浸と乾燥を繰り返すスレーキングによって 10 ~ 15 % 分解した。ラテライト供試体における残留率変化は、9 サイクルまでは徐々に進行したが、それ以降で急に低下した。これらのことは、スレーキングに対する抵抗性は桃色砂岩に大きく、ラテライトに小さいことを示している。

## 5. 考察とまとめ

### 5.1. 測定地点の風化環境

岩石にとって、気温と湿度の短時間における急激な変化（温度・湿度勾配）は重要な風化要因のひとつである（Waragai, 1998, 1999）。アンコール遺跡周辺では、これまでいくつかの気象データが公表されてきており（例えば、Boulbet, 1979; 岩崎ほか, 1995 b; ラオ, 2001）、本研究による気温や湿度変化の結果はそれらと基本的に同様の傾向を示した。しかし本研究では、これまで測定されてこなかった時間間隔（30 分間隔）で気温と湿度の変化を実測したので、比較的短時間におけるこれらの変化をとらえることができる。また、アンコール・ワットは乾季・雨季の交替する気候環境に置かれていることから、乾湿交替の実態からも測定地点の風化環境を分析する必要がある。そこで以下では、温度・湿度勾配と乾湿交替を中心に測定地点の風化環境を考察する。

温度・湿度勾配は、30 分間隔で測定した気温と相対湿度の差分をそれぞれ求め、時系列

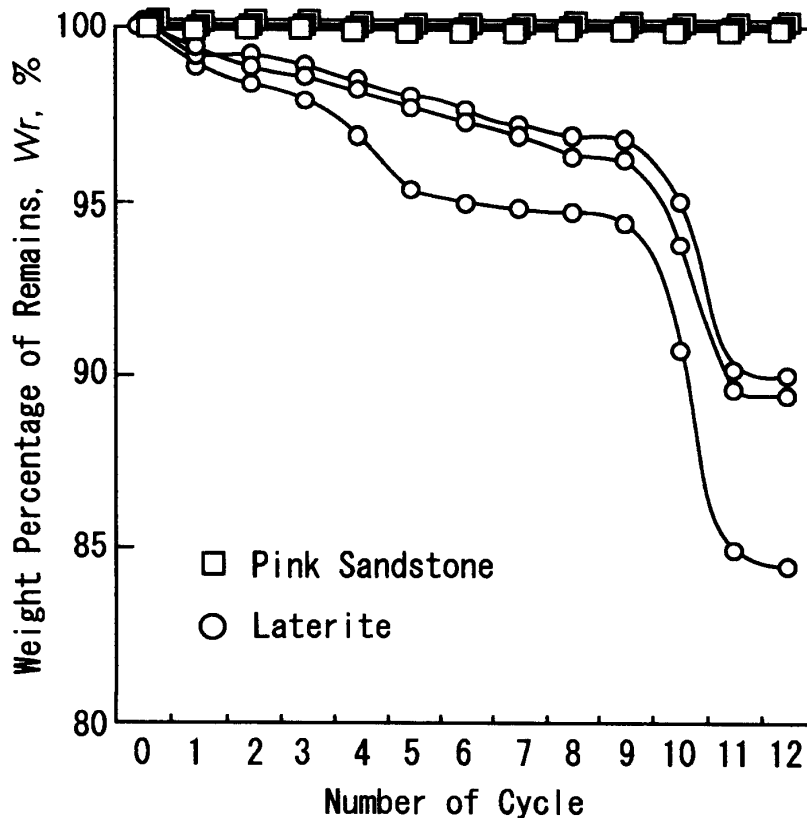


Fig. 6. Changes of weight percentage of rock specimens by the slaking experiment.

変化として Fig. 7 に示す。Fig. 7-a のように、Site 1 では、3～9 月にかけて大きい温度勾配が出現した。勾配は最高  $1.7^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  (気温上昇)、最低  $-4.9^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  (気温低下) を記録した。また、比較的大きい変化と考えられる  $1.0^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  以上の頻度は 22 度数、 $-2.0^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  未満のそれは 51 度数であった。このため、Site 1 における気温の変化は上昇より低下に著しいことがわかる。一方、Site 2 では (Fig. 7-c)、最高  $1.2^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ 、最低  $-4.0^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  の温度勾配をそれぞれ記録したが、いずれも Site 1 より小さい。また Site 2 では、 $1.0^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  以上の頻度が 7 度数、 $-2.0^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$  未満のそれが 40 度数を数え、これらの頻度も Site 1 に比べて低い。これらから、Site 1 では 3～9 月にかけて、比較的大きい気温低下が頻繁に生じる環境にあることが明らかとなった。

Site 1 の湿度勾配は、最大  $24\%/30\text{ min}$ 、最低  $-17\%/30\text{ min}$  をそれぞれ記録した (Fig. 7-b)。また、 $10\%/30\text{ min}$  以上の頻度は 70 度数、 $-10\%/30\text{ min}$  未満のそれは 13 度数を数え、とくに湿度上昇がその低下よりも頻繁である。一方、Site 2 では最大・最低の湿度勾配はともに  $\pm 19\%/30\text{ min}$  であった (Fig. 7-d)。Site 2 における最低の湿度勾配は Site 1 よりやや大きいものの、湿度勾配の絶対較差は、Site 1 が大きい。また、Site 2

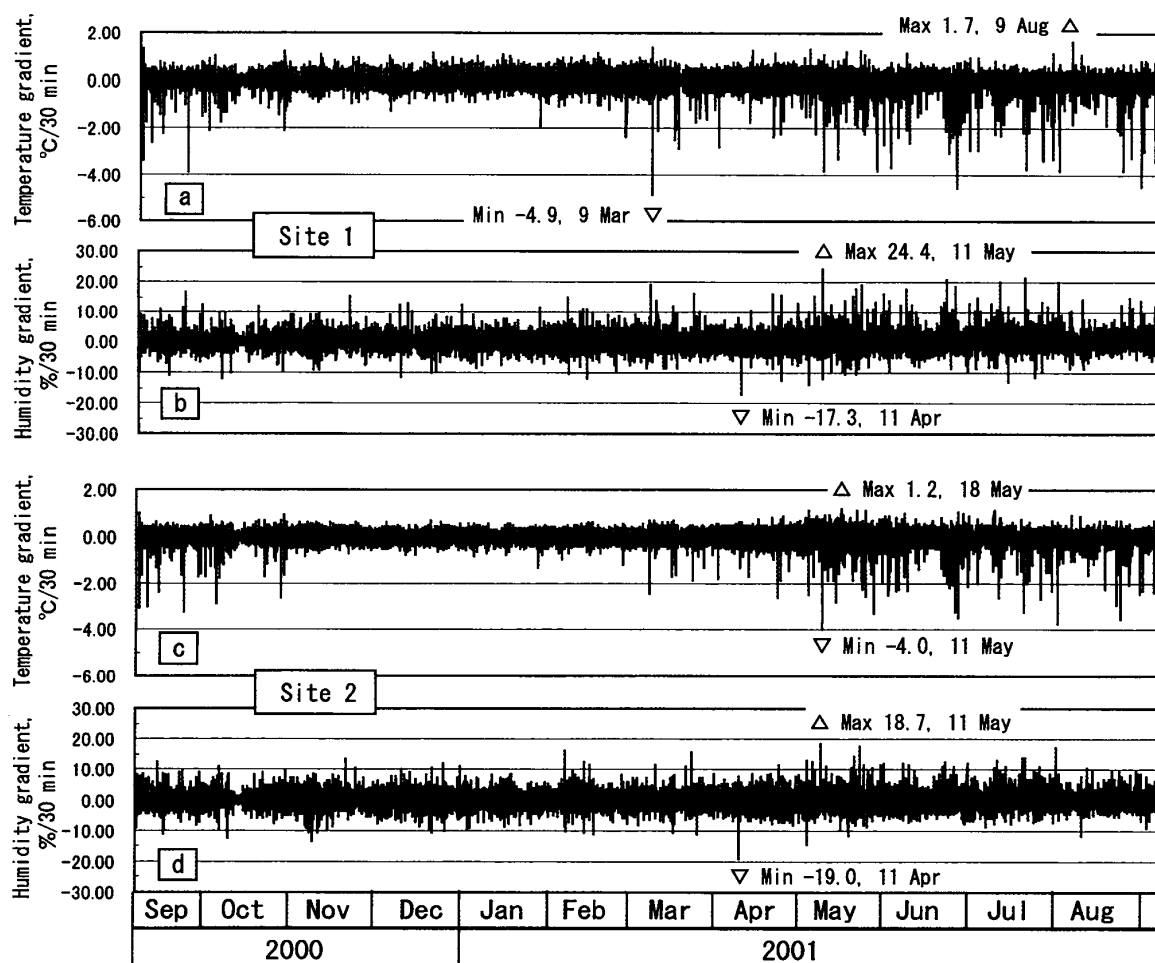


Fig. 7. Changes of gradients of temperature and humidity.

における 10 %/30 min 以上の頻度は 42 度数, -10 %/30 min 未満のそれは 15 度数であり, 湿度上昇の頻度も Site 1 がより高い。これらから, Site 1 では年間を通じて湿度上昇の変化が大きく, 頻繁であることが明らかである。

気温と湿度の測定を行った 2 地点における測定値のばらつきをみるため, 測定項目ごとに相関関係を調べた結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8-a に示すように, 気温では測定地点間のばらつきはほとんど認められない。これに対して湿度は, Fig. 8-b の回帰直線が示すように, Site 2 の湿度が Site 1 に比べて 10 ポイント程度大きい。これらは, 測定地点による差は気温の場合ほとんど現れないが, 湿度では場所による差異が生じていることを意味している。

そこで, 湿度の測定結果をもとに, 測定地点における乾湿の繰り返しサイクル数 (乾湿サイクル数) を算定する。これは任意の湿度を基準 (基準湿度,  $Ch$ ) として, 測定した湿度の基準湿度未満への低下と基準湿度以上の上昇とを 1 サイクルとして算定するものである。基準湿度として, 70 %, 60 %, 50 % の 3 つを代表値に選んだが,  $Ch$  60 % の乾湿サイクル数は,  $Ch$  が 70 % と 50 % の中間的なサイクル数 (Site 1 ; 177 サイクル, Site 2 ; 77 サイクル) となった。またその変化も,  $Ch$  70 % と  $Ch$  50 % に同様であった。このため, 70 % と 50 % を基準湿度としたときの乾湿サイクル数の変化で, 両地点における乾湿パターンを代表させることができると考えた。乾湿サイクル数の変化を Fig. 9 に示す。

$Ch$  70 % における乾湿サイクル数は, Site 1 (合計 315 サイクル) が Site 2 (410 サイクル) に比べて少ないものの, 両地点で大きい違いは認められない (Fig. 9)。しかし,  $Ch$  50 % では, Site 1 におけるサイクル数は合計 73 サイクルを示し, Site 2 の 6 サイクルに比較して 10 倍以上多くなっている。とくに Site 1 では, 1 ~ 3 月上旬および 4 ~ 5 月上旬にかけての乾季に乾湿サイクル数が多いことが明らかである。

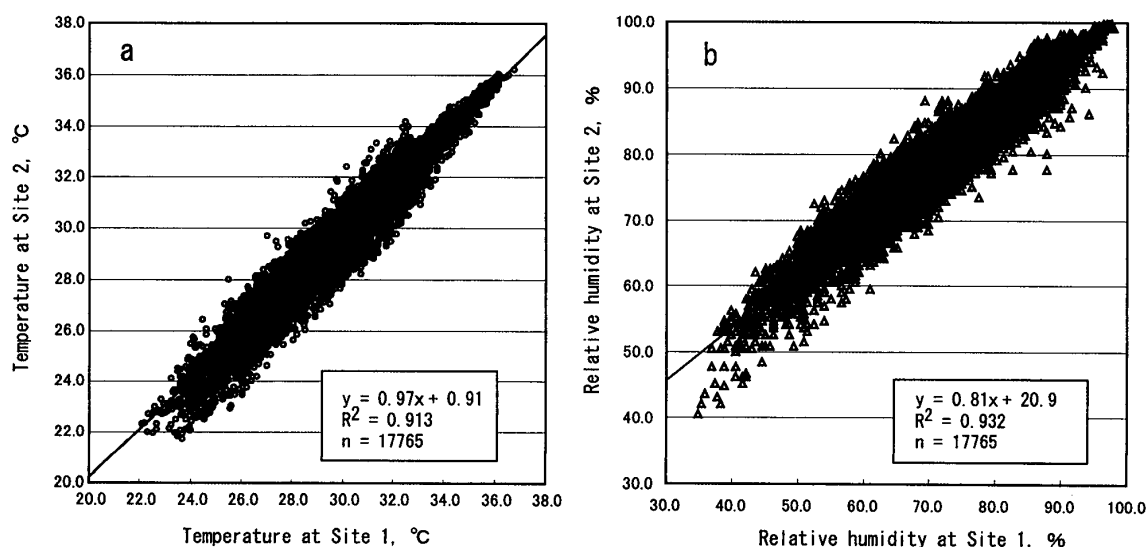


Fig. 8. Relationships between temperature at measurement sites (a), and humidity (b) at measurement sites.

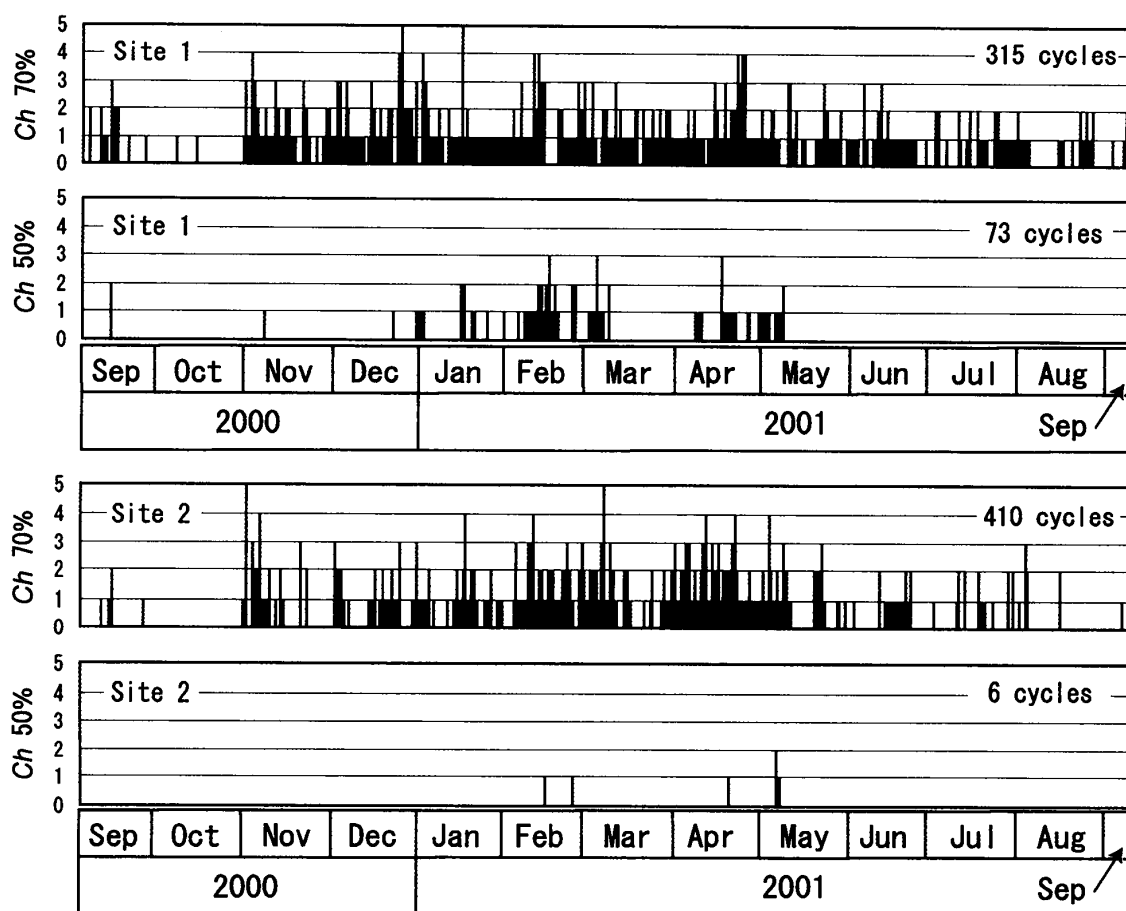


Fig. 9. Changes of wet-dry repetition cycles at measurement sites.  $Ch < 50\%$ : number of cycles for the standard humidity below 50%,  $Ch < 70\%$ : number of cycles for the standard humidity below 70%.

以上のように、Site 1ではSite 2に比べて大きい気温低下と湿度上昇が頻繁に発生する環境に置かれていることがわかる。また、乾湿交替の頻度も高い。これは、象の門が東西に開口部を有する建築構造のため、日周期で発生する驟雨による気温低下と湿度上昇をおよそ年間を通じて、直接被ることに由来している。驟雨発生時に観察したところ、象の門は驟雨に伴って発生した風の通路となっており、急激な気温低下が生じていることを推測させた。一方、象の門の上部は開口部がないため風が抜けず、驟雨によって生じた湿気は上部に滞留し、湿度上昇を招いていると思われる。アンコール・ワットの砂岩ブロックを対象に、雨季（1999年1月）と乾季（2000年3月）の含水状態を水分計によって測定した内田ほか（2000）によると、含水率は雨季・乾季ともに建物の内壁で高く、とくに西塔門中央塔内壁では約14%であった。また、この場所における乾季の含水率は約12%で、乾季にわずかに低くなる傾向が認められている。本研究では岩石そのものの含水状態を測定していないが、とくに湿度の変化は岩石に含まれる水分状態を変化させる要因のひとつになっていると考えられる。一方、Site 2では、気温・湿度変化はSite 1に比べて小さかった。また、乾湿交替のサイクルは、とくに少なく示された。これは西参道を取り巻く環濠

の水塊の存在に起因している，と思われる．すなわち，水塊は熱容量が大きいいため，気温の急激な上昇を妨げる働きを持つと推測される．また，水塊からの水分の蒸発が，年間を通じて湿度変化を小さく抑えていると考えることができる．

## 5.2. 風化環境と風化プロセス

研究対象とした西参道は，水の張られた環濠の上に造られている．この環濠の水位は，雨季と乾季に大きく異なっているが，環濠の水位変化に関する実測データはない．しかし，アンコール・ワットから約 3 km 離れたプラサット・スープラにおける 2000 年 6 月から 2002 年 9 月にかけての池の水位測定によると (Soeur, 2002)，水位は 10 月下旬に最高，6 月下旬に最低となり，およそ 1～2 m の季節変化をしているという．西参道は，建築材料として表面に砂岩，擁壁にラテライト，内部に砂が利用されている (片桐ほか，2001)．このため，1 m 以上もの水位変化を受ける擁壁下部のラテライトブロックでは，湿度変化 (Figs. 7 and 9) に加えて，季節的な水位変化に連動した吸水－乾燥が周期的に繰り返されることとなる．

Fig. 6に示したように，桃色砂岩とラテライトのスレーキング特性は大きく異なっていた．桃色砂岩は重量損失がほとんどなく，スレーキングに対する抵抗性は極めて強いと考えられる．これに対してラテライトは，実験初期からスレーキングが始まり，その抵抗性は桃色砂岩に比べて小さい．このことは，岩石が吸水－乾燥を繰り返し被る条件のもとでは，砂岩よりラテライトのほうが早く劣化することを示している．

スレーキングは，一般に岩石に含まれる鉱物の性質 (とくに膨潤性粘土鉱物の有無やその含有量) や固結程度などの内部要因と，含水量の変化や上載圧などの外部要因に左右される (小島・斉藤，1984)．鉱物組成の分析によれば (Table 2)，粘土鉱物として，桃色砂岩と灰色砂岩はカオリナイト，斜緑泥石およびイライト，ラテライトはカオリナイトを含有することがわかっている．これらの粘土鉱物は，アンコール遺跡を構成する砂岩とラテライトに含まれるそれら (Uchida, et al., 1998, 1999 a, b) とほとんど変わらない．これら粘土鉱物のなかで，緑泥石には膨潤特性を持つ種類のあることがわかっている (例えば，Rich and Bonnet, 1975; Bain and Russel, 1981)．しかし，EG 処理の結果，灰色砂岩に含まれる斜緑泥石に膨潤特性は認められなかった．また，スレーキング実験に用いたラテライト試料には，直径 1 cm の孔隙が多数存在し，粘土鉱物の膨潤に伴うひずみを吸収してしまう可能性がある．このため，これら粘土鉱物が岩石の吸水膨張－乾燥収縮に寄与する程度は大きくないと思われる．

一方，乾燥土内部の間隙中の内部空気圧は，水の浸入に伴って高められ，これが分解に結びつくことは森 (1978) によって指摘されている．また，高橋 (1976) は，水の吸着による微小空隙の拡大と乾燥脱水による空隙の縮小に起因した岩石の膨張－収縮の可能性を指摘している．本研究では，吸水膨張に伴う空隙の水圧やひずみの変化を実測していない．しかし，ラテライトブロックの引張強度は，桃色砂岩のそれに比べて約 1/3 と小さい (Table 1)．砂岩の強度がラテライトのそれより小さいという傾向は，アンコール遺跡で

使用されているこれら石材の弾性波速度が砂岩では1.9~3.2 km/s, ラテライトでは1~1.6 km/s であることから一般的のようである (Uchida, et al., 1999 b; 岩崎, 2000; 松村, 2000). このため同じ条件下では, 内部空隙圧やひずみの増大が, 桃色砂岩よりラテライトブロックにとって, 岩石の分解に有効であると推測される. したがって, 西参道や環濠の縁などで見られる砂岩敷石の不同沈下は, このようなラテライトのスレーキングがかかわっているとみなすことができる. 一方, 西参道における崩壊の原因として, 平山 (2001) は水蝕劣化に加え, 擁壁内部に詰められた砂の流出や擁壁に働く応力状態の変化などがかわっていると推察している. 平山 (2001) の水蝕劣化とは, 常時水に接している擁壁下部のラテライトの劣化を指しているが, この劣化の原因こそスレーキングであると指摘することができる. 砂岩敷石の不同沈下はさまざまな要因の複合によるものと考えられるが, 水位変化を受けるラテライトからなる擁壁下部の劣化が目立つ (片桐ほか, 2001) ことから, ラテライトのスレーキングによる劣化が注目される.

象の門における観察によると, その内側ではとくに表面部の剥離や塩化物の析出を認めることができた. 藻類・地衣類および微生物による風化 (例えば, 新井, 1994, 1995; 新井・山岸, 1996, 1997, 1998; 片山ほか, 2002, 2003; So, et al., 2002) を除けば, 一般にこのような現象は, 岩石の表面部で乾湿の繰り返しによる風化 (乾湿風化) や塩類風化が生じていることを推測させる. 気温と相対湿度の測定結果も, 象の門の内側において, 乾湿風化や塩類風化の条件が整っていることを示していた. 本研究では, 析出物を採取・分析していないが, アンコール・ワットの風化した砂岩ブロック表面部で Gypsum や磷酸塩鉱物 (Brushite, Newberyite, Whitlockite, Taranakite) などの存在が確認されている (Uchida, et al., 1999 b). Uchida, et al. (1999 b) では, これらの塩類の生成にコウモリ類の糞がかかわっているとしているが, 否定的な見方もある (吉行ほか, 2002). いずれにしろ, とくに Gypsum は, ほとんどの剥離面で認められており, 湿度上昇や雨水による塩類の水和作用および乾燥化に伴う結晶化などによる応力の発生が, 砂岩ブロックの風化に重要な役割を果たしていると考えられる.

以上のように, 西参道ではスレーキングによるラテライトの劣化が砂岩敷石の不同沈下と結びついていることが明らかとなった. また, 遺跡を構成する砂岩の風化には, 乾湿の繰り返し環境からみれば乾湿風化や塩類風化がかかわることが推察された. しかし, スレーキング実験に使用した桃色砂岩は, 化学分析結果からも明らかのように, 未風化の新鮮な試料である. このため, 風化を受けた遺跡の砂岩のスレーキング特性が本実験の結果と異なる可能性 (松村, 2000) は否定できない. したがって, 今後, 岩石ブロックのスレーキング特性については, 建築に実際に使用された岩石を試料とした分析が必要であろう. とくに, アンコール・ワットには乾湿の繰り返し環境からみて, 象の門と類似の風化環境を持つ場所が数多く存在すると思われる. このため, より具体的な風化プロセスの解明が, 遺跡の修復と保存に貢献するものと期待される.



## 謝 辞

遺跡におけるデータロガーの設置に際し、日本大学理工学部建築学科の片桐正夫教授からご助言をいただくとともに便宜をはかっていただいた。また、国連ボランティアとして活動していた三輪 悟氏（現、アンコール・ワット西参道修復工事事務所長）には、データロガーの設置作業、管理などについてご協力をいただいた。岩石の XRF 分析に際しては、日本大学文理学部地球システム科学科の荒牧重雄前教授および安井真也助手（現、専任講師）のご協力をいただくとともに、東京大学地震研究所の装置を利用させていただいた。以上の方々に、ここに記して感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は、日本大学総長指定の総合研究（第Ⅴ期）「21世紀の地球と人間の安全保障—環境と資源の安全保障プロジェクト—（代表者、高田邦道教授）」、および日本大学文理学部ハイテクリサーチ事業（代表者、島方洗一教授）による研究費を使用した。

## 引用文献

- 新井英夫（1994）アンコール遺跡における生物劣化とその防除に関する研究（第1報）劣化要因の生物学的調査と防除法の検討：文化財の虫菌害，28号，3-15.
- 新井英夫（1995）第6章保存科学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム，「アンコール遺跡調査報告書1995」，375-385.
- 新井英夫・山岸高旺（1996）第6章保存科学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム，「アンコール遺跡調査報告書1996」，392-409.
- 新井英夫・山岸高旺（1997）アンコール遺跡における生物風化とその防除に関する研究（第2報）防藻・防地衣剤の検討：文化財の虫菌害，34号，5-14.
- 新井英夫・山岸高旺（1998）第8章保存科学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム，「アンコール遺跡調査報告書1998」，383-393.
- Bain, D.C. and Russell, J.D. (1981) Swelling minerals in a basalt and its weathering products from Morvern, Scotland: II. Swelling chlorite: *Clay Minerals*, 16, 203-212.
- Boulbet, J. (1979) *Le Phnom Kulen et sa région: carte et commentaire*: École Française d'Extrême-Orient, Paris, 136 p.
- 文化庁伝統文化課・奈良国立文化財研究所（1997）「アンコール文化遺産保護共同研究報告書」：文化庁伝統文化課・奈良国立文化財研究所，336 p.
- Delvert, J. (1961) Recherches sur l'érosion des grés des monuments d'Angkor: *Bulletin de l'École Française d'Extrême-Orient*, 51 (2), 453-534.
- Glaize, M. (1998) *THE MONUMENTS OF THE ANGKOR GROUP*: A translation from the 4th French edition by Tremmel, N. (1963): *A Guide of the Angkor Monuments*, <http://www.theangkorguide.com>.
- 春山成子（2000）アンコールワットの水利構造物の立地条件にかかわる一地形学的考察：早稲田大学教育学部学術研究（地理学・歴史学・社会科学編），(48)，15-24.
- 平山善吉（2001）アンコール・ワットの力学：片桐正夫編「アンコール遺跡の建築学」，277-308，連合出版.
- 石澤良昭（1995）密林に花咲いたアンコール文明—カンボジア内戦下のアンコール遺跡調査手帳—：石澤良昭編「文化遺産の保存と環境」，14-25，朝倉書店.
- Ishizawa, Y. and Kono, Y. eds (1986) *Cultural Heritage in Asia* (1): Study and preservation of historic cities of Southeast Asia: *Japan Times*, 168 p.
- 岩崎好規（2000）ラテライトブロックのP波速度の測定結果：日本国政府アンコール遺跡救済チーム，「アンコール遺跡調査報告書2000」，247-248.
- 岩崎好規・福田光治（1996）第4章地盤・地質・環境学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム，「ア

- ンコール遺跡調査報告書 1996], 294-347.
- 岩崎好規・福田光治・下田一太 (2002): アンコールワット北経蔵身舎柱の風化: 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2002」, 275-285.
- 岩崎好規・福田光治・佃 栄吉 (1995 b) 第4章地盤・地質・環境学: 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 1995」, 192-311.
- 岩崎好規・福田光治・佃 栄吉・中川 武・藤木良明 (1995 a) カンボディア王国アンコール遺跡の修復にかかる地盤工学的問題について-第4次日本国政府アンコール遺跡救済調査団 (1994) 成果から-: 遺跡の土質工学的保存技術に関する研究委員会編「遺跡の保存技術に関するシンポジウム発表論文集」, 91-98, 土質工学会.
- 片桐正夫編 (2001) 「アンコール遺跡の建築学」: 連合出版, 350 p.
- 片桐正夫・崔 炳夏・三輪 悟 (2001) アンコール・ワット西参道を解剖する: 片桐正夫編「アンコール遺跡の建築学」, 309-322, 連合出版.
- 片山葉子・小熊健二・倉石 衍 (2002) 保存科学調査 (2) 微生物学的調査: 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2002」, 311-317.
- 片山葉子・下田一太・新井英夫 (2003) 保存科学調査 (2) 微生物学的調査: 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2003」, 173-181.
- 小島圭二・斉藤保祐 (1984) 軟岩の膨潤・スレーキング特性 (その1) -簡易試験による評価-: 応用地質, **25**, 10-22.
- 朽津信明・高 東亮・秋山純子・森井順之 (2003) 鎌倉のやぐらに見る凝灰質砂岩の風化とそれに与える温度・湿度の影響: 地形, **24**, 169-181.
- ラオ・キム・リアン (2001) 自然環境から見たアンコール遺跡: 片桐正夫編「アンコール遺跡の建築学」, 93-112, 連合出版.
- 松倉公憲 (1996) 岩石・石材における風化作用とその速度: 土と基礎, **44** (9), 59-64.
- Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1982) Wet-dry slaking of Tertiary shale and tuff: Transactions, Japanese Geomorphological Union, **3**, 25-39.
- 松村吉康 (2000) 共振法による石材の診断: 盛合禧夫編「アンコール遺跡の地質学」, 143-155, 連合出版.
- Meng, S., Toch, S., Teng, M. and Phrum, P. (1997) *GEOLOGIC SOURCE OF ANGKOR- Report on preliminary study-*: Department of Geology and Mines of Cambodia, 165 p., (unpublished).
- 盛合禧夫 (1995) アンコール遺跡の大地: 石澤良昭編「文化遺産の保存と環境」, 121-135, 朝倉書店.
- 盛合禧夫 (1997) バンテアイ=クディの地盤地質と試錐調査: 文化庁伝統文化課・奈良国立文化財研究所, 「アンコール文化遺産保護共同研究報告書」, 36-52.
- 森 麟 (1978) スレーキング: 土と基礎, **26** (5), 29-30.
- 日本国政府アンコール遺跡救済チーム (1995-2003) 「アンコール遺跡調査報告書」: 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 411 p. (1995), 477 p. (1996), 355 p. (1997), 539 p. (1998), 351 p. (1999), 316 p. (2000), 401 p. (2001), 548 p. (2002), 385 p. (2003).
- 西山賢一・松倉公憲 (2001) 四万十帯砂岩の風化: 色彩および鉱物化学的性質の変化: 地形, **22**, 23-42.
- Oguchi, C. T. and Matsukura, Y. (2000) Spatial distribution of salt efflorescence on brick walls in the Shimoren Kiln, central Japan: Annual Report of the Institute of Geoscience, the University of Tsukuba, (26), 25-29.
- 及川浩吉訳 (2002) 「カンボジアの農民: 自然・社会・文化」: 風響社, 837 p. Delvert, J. (1961) *Le paysan Cambodgien*.
- Okawara, M. and Tsukawaki, S. (2002) Composition and provenance of clay minerals in the northern part of Lake Tonle Sap, Cambodia: Journal of Geography, **111**, 341-359.
- Pochon, J., Tardieux, P., Lajudie, J., Charpentier, M., Delvert, J., Triau, R. and Brédillet, M. (1960) Dégénération des temples d'Angkor et processus biologiques: Annales de l'Institut Pasteur, **98**, 457-461.
- Rich, C. I. and Bonnet, J. A. (1975) Swelling chlorite in a soil of the Dominican Republic: Clays and Clay minerals, **23**, 97-102.
- Saurin, E. (1954) Quelques remarques sur les grés d'Angkor: Bulletin de l'École Française

- d'Extrême-Orient, **46** (2), 619-634.
- 関陽太郎・酒井 均 (1987 a) 千葉県館山市船形磨崖仏十一面観音像の劣化と水・岩石相互作用：岩石鉱物鉱床学会誌, **82**, 230-238.
- 関陽太郎・平野富雄・渡辺邦夫 (1987 b) 福島県小高町薬師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用：岩石鉱物鉱床学会誌, **82**, 269-279.
- So, S.・Cheam, P.・東條由紀・下田一太・山岸高旺・山野勝次・柏谷博之・今井信廣・三宅靖宏・居原史典・表 雄一・新井英夫 (2002) 保存科学調査 (1) 保存対策：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2002」, 297-309.
- Soeur, S. (2002) Report on water level of the both ponds in Sour Prat site: 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2002」, 373-378.
- 高橋健一 (1976) 波蝕棚における差別侵蝕—とくに日南海岸青島の波蝕棚について—：中央大学理工学部紀要, **19**, 253-316.
- 内田悦生・安藤大介 (2001) 2000 年度岩石学調査：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2001」, 195-214.
- 内田悦生・前田則行 (1998) 第 7 章岩石学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 1998」, 360-379.
- 内田悦生・前田則行 (1999) 第 7 章岩石学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 1999」, 228-269.
- 内田悦生・塩谷雄高 (1997) 第 5 章岩石学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 1997」, 218-251.
- 内田悦生・須田千幸 (2003) 2002 年度岩石学調査：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2003」, 151-160.
- 内田悦生・安藤大介・前田則行 (2000) 1999 年度岩石学調査：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2000」, 181-199.
- Uchida, E., Maeda, N. and Nakagawa T. (1999 a) The laterites of the Angkor monuments, Cambodia —The grouping of the monuments on the basis of the laterites—: *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **94**, 162-175.
- 内田悦生・小河善則・平井希欧 (1995) 第 5 章岩石学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 1995」, 312-371.
- Uchida, E., Ogawa, Y. and Nakagawa, T. (1998) The stone materials of the Angkor monuments, Cambodia —The magnetic susceptibility and the orientation of the bedding plane of the sandstone—: *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **93**, 411-426.
- 内田悦生・小河善則・津曲浩史 (1996) 第 5 章岩石学：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 1996」, 348-390.
- 内田悦生・下田一太・須田千幸 (2002) アンコール遺跡に見られる砂岩材の劣化：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2002」, 177-196.
- Uchida, E., Ogawa, Y., Maeda, N. and Nakagawa, T. (1999 b) Deterioration of stone materials in the Angkor monuments, Cambodia: *Engineering Geology*, **55**, 101-112.
- Waragai, T. (1998) Effects of rock surface temperature on exfoliation, rock varnish, and lichens on a boulder in the Hunza Valley, Karakoram Mountains Pakistan: *Arctic and Alpine Research*, **30** (2), 184-192.
- Waragai, T. (1999) Weathering processes on rock surfaces in the Hunza Valley, Karakoram, North Pakistan: *Zeitschrift für Geomorphologie N. F., Supplement Bd.*, **119**, 119-136.
- 吉行瑞子・向山 満・原田正史・斎藤 久 (2002) 保存科学調査 (3) アンコール・ワット遺跡の Koumori 類調査—移住のための Koumori 類生態調査—：日本国政府アンコール遺跡救済チーム, 「アンコール遺跡調査報告書 2002」, 319-327.