

スコータイ遺跡におけるレンガ造大仏の劣化に関する研究

正会員 ○吉田有里*1 同 銚井修一*2 同 小椋大輔*3

4.環境工学—9.湿気

保存環境, スコータイ遺跡, 含水率, 生物被害, 熱水分移動

1. 序論

1.1 研究の背景

東南アジアには数多くの石造・レンガ造の遺跡が存在する。世界文化遺産に指定されているものも多いこの地域の遺跡は、高温多湿な屋外環境にさらされている場合が多く、物理的要因や生物的要因により劣化している。

本報では既報¹⁾に引き続き、スコータイ遺跡のスリチュム寺院内の大仏を研究対象とする。この大仏では藻などの繁茂が見られる。この水分源としてはその時々降雨や結露など外部からの水分だけでなく、それ以前に侵入し内部に存在する水分の影響も考慮する必要がある。また、大仏台座や本堂の壁では塩の析出が顕著に表れている。これにはレンガ構造物内からの水分移動と蒸発が関係している。現在大仏本体に目立った塩類風化は見られないが、表面の一部に茶色の変色が見られる。これも同様の現象によるものと推測される。本報では、大仏内部の熱と水分移動に関する解析モデルを作成し、内部の水分の移動・蓄積の解析および蒸発量の算定を行い、変色との関係を明らかにするとともに今後の劣化を予測する。実態に近い状況を再現するため三次元のシミュレーションを行い、今後の遺跡保存のための基礎資料を得ることを目的とする。

2. スコータイの地域特性と寺院周辺の概要

2.1 スコータイの位置と気候

スコータイ遺跡はタイ北部に位置する。熱帯モンスーン気候に属し、一年は雨期（5月～10月）と乾期（11月～4月）に大きく分けられ高温多湿な環境である。スリチュム寺院はスコータイ遺跡の城壁外、北側に位置する。スリチュム寺院本堂の内部及び屋上において、日射量・降水量の測定

を2004年から行っている。年間の日射量と降水量を図1, 2に示す。日射量は東京の1.5倍程度である。降雨は雨季に集中し、乾季にはほとんど降水はない。本堂は、23m 四方、高さ14.5m、壁の厚さは約3mで、大仏の顔正面に幅2mの縦長の開口を有するレンガ造建造物である。現在、本堂には屋根がなく、直接雨や日射がさし込む。大仏はこの本堂の内部いっぱいに鎮座している。

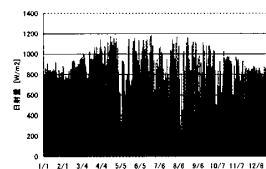


図1 年間の日射量

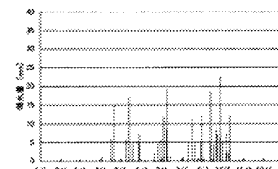


図2 年間の積算降水量

3. 大仏表面の水分が藻類繁茂に与える影響

3.1 藻類の成長モデル²⁾

宮内²⁾は、大仏の繁茂は、雨の当たり方と流出挙動に応じた水分供給と保持および周辺の微気象条件を考慮した藻類の成長モデルを作成した。生物の成長速度に影響を及ぼす環境要因は、日射量、温度、水分量とし、それぞれ影響度を定義した。大仏内部への降水の浸透はなく、表面断湿としている。降水時には表面に水膜が形成され、水膜の厚さが最大保持厚さ（部位によって異なる）を超えた分は流出するとする。

3.2 藻類成長モデルの析結果と繁茂状況の比較

この藻類の成長モデルを用いて、大仏表面における藻類の繁茂状況を再現している。解析対象部位として、藻類の繁茂度合いの異なる部位を6点選択した。頭頂部、右腹部、左手について、9年間のN（成長度合い）の計算結果を図3に、額、右胸下、左脚についての結果を図4に示す。また、撮影された大仏写真から、藻の濃淡を0～1の値で相対的に表した数値をグラフ中に示している。

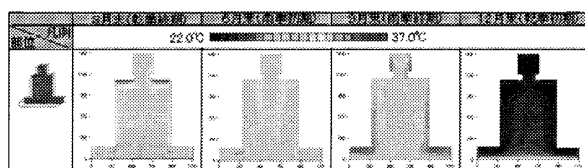


図6 大仏内部の温度分布:年変動

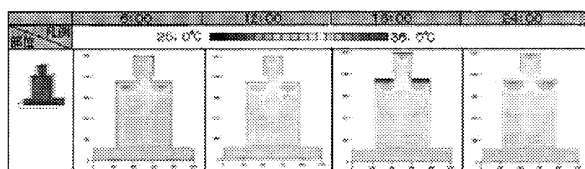


図7 大仏内部の温度分布:日変動

5.3 大仏内部の含水率の年変動と降雨の影響

図8に、3ヵ月ごとの含水率分布を、図9に降雨前、降雨直後、降雨3日後、9日後の含水率分布の結果を示す。含水率分布の年変動については、3月末(乾季終期)には胴体内部が最も低く0.15%を示し、6月末(雨季初め)から上昇し、9月末(雨季終期)に最も高くなり0.25%を示す。12月末(乾季初め)には、頭・肩・膝の水分は下方に浸透し、胴体内部は低くなっている。頭・肩・膝では年間を通して含水率が他の部位より高くなっている。また、3章において藻類繁茂には表面以外からの供給がある可能性が示唆されたが、脚部表面層の含水率は9月には飽和に達しており、大仏内部からの水分供給の可能性が考えられる。さらに、降雨前後の含水率分布の結果をみると、降雨時は、頭・肩・脚の水平面の含水率が高くなるが、その後蒸発し、9日後には降雨前とほぼ変わらない含水率分布となっている。

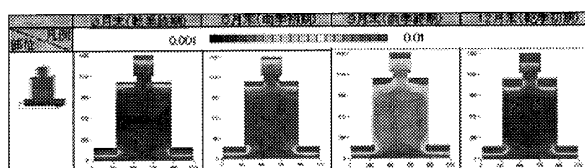


図8 大仏内部の含水率分布の年変動

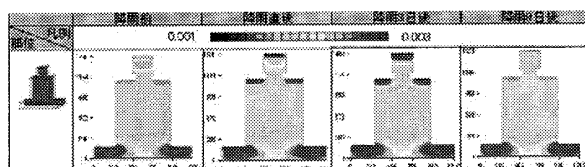


図9 降水前後の含水率分布の変動

6. 表面の変色と水分との関係および劣化予測

大仏周辺では、塩類風化が見られる。これは石造物内部の塩類が、乾燥期には水分の蒸発によっ

て表面に移動することで起こる⁴⁾。大仏表面では目立った塩類風化は生じていないが、膝部分は茶色く変色している部分が見られる。その原因については不明であり、ここでは、この変色が塩類風化と同様に内部からの水分の蒸発に関係があるか、その可能性について検討する。

6.1 大仏表面の変色と水分蒸発との関係

大仏の右膝部分を取り上げ、表面の性状が類似した領域に分類した(図10)。それぞれの特徴を以下に示す。Ⅰ) 藻が生え黒緑色をしている。降雨が直接当たる場所である。Ⅱ) 見た目に際立った特徴はない。降雨が直接当たらない鉛直に近い場所である。Ⅲ) Ⅱと同様に降雨が直接当たらない場所であるが、茶色い変色が観察される。Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの特徴を有する部位の水分蒸発量を算定するため、5章で使用したモデルの膝の部分の形状をより実態に近づけた。それぞれのブロックに記号と番号を付したものを図11に示す。降雨や日射は上面(水平面)に当たる。各ブロックの矢印方向の日積算蒸発量を算定する。ⅠにはA-3を、ⅡにはB-3を、ⅢにはE-1を対応する代表のブロックとした。

図12に各部位(A-3, B-3, E-1)の年間の日積算蒸発量を示す。A-3では雨季に水分の蒸発が多い。降雨の蒸発によるものと考えられる。蒸発する水分の一部は藻類への水分供給となり、藻類が雨季に成長し、乾季に仮死状態となることに対応している。B-3, E-1では、年間の蒸発量が非常に少なく、藻類繁茂には不十分かもしれない。A-3, B-3では乾季に蒸発はほぼ0だが、茶色の変色がみられるE-1では、乾季の間も水分蒸発が継続している。雨季に侵入した水分は内部に蓄積され、年間を通して脚の下部から蒸発し、その際、内部のレンガの成分が表面に移動した可能性が考えられる。

6.2 水分蒸発に関連する劣化予測

本節では、大仏全体について、膝部分と同様の現象が見られる部位を特定し、変色や塩類風化が起こりうる場所を推定する。側面に凹凸を付け、実際に近い形状のモデルを作成した(図13左・中央)。側面のブロックの矢印方向の蒸発量が類似し

たものをⅠ～Ⅵに分類し、色分けした(図13・右)。Ⅳ～Ⅵから一つずつブロックを選び、年間の日積算蒸発量を図14に示す。Ⅰ、Ⅱ、ⅢはA-3、B-3、E-1と蒸発の状況が類似しているため、ここでは説明は割愛する。

ⅣではⅠと蒸発の仕方が類似しているが、Ⅳの方が蒸発量が多い。Ⅴは年間を通して水分の出入りが少なく1kg/dayに満たないため、Ⅴにあたる部位では劣化は小さいと予測される。Ⅵでは年間を通して継続的な蒸発が見られ、蒸発量が多い。従って、Ⅵにおいても、蒸発に関連する劣化が予測される。

乾季に継続的に蒸発が見られる部位である、Ⅲ・Ⅵに該当する頭部の頬下、脇、下腹部では、実際に茶色い変色が観察される(図15)。このことから、レンガの成分が表面に現れてきた可能性は高いと考えられる。

7. 結論

本研究では、スリチュム寺院の大仏を対象として、その内部における温度・含水率を算出するモデルを作成した。このモデルを用いて、大仏内部における水分の移動・蓄積の状況とともに、年間の蒸発量と大仏表面における変色部分との関係の可能性を示した。これらの結果は、今後の遺跡保存のための基礎資料として有効に利用できると考えられる。

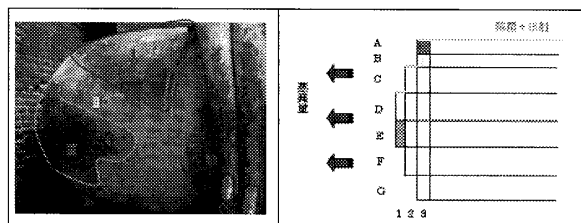


図10 右膝の劣化の分類 図11 右膝部の解析モデル

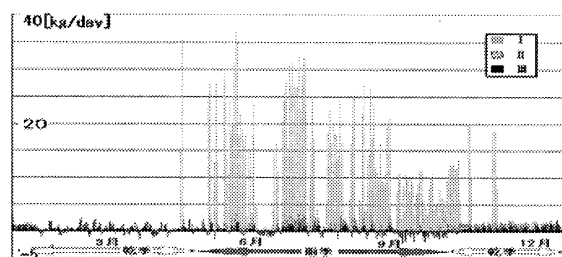


図12 A-3, B-3, E-1の年間の日積算蒸発量[kg/day]

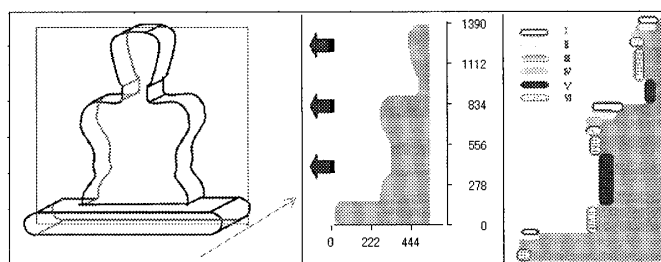


図13 解析モデル(全体図, 立面図)と蒸発量の分類

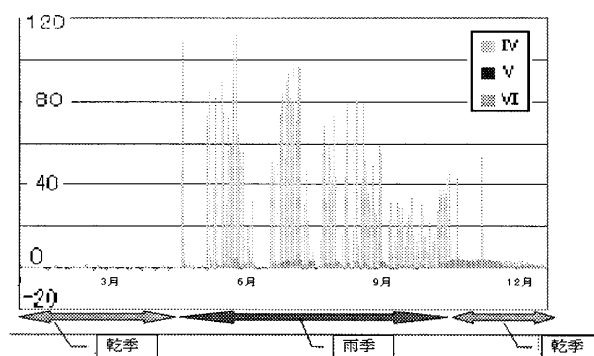


図14 Ⅳ, Ⅴ, Ⅵの年間の日積算蒸発量[kg/day]



図15 頭部の頬下、脇、下腹部における変色

参考文献

- 1) 吉田ら：レンガ造大仏内における水分移動, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 2010
- 2) 宮内真紀子：高温多湿気候下における遺跡への生物による影響の予測に関する研究, 修士論文, 2007
- 3) 銚井・池田・新田：エース建築環境工学Ⅱ, 朝倉書店, 2002.
- 4) 東京国立文化財研究所編：石造文化財の保存と修復 昭和52～59年度特別研究報告書, 1985.

*1 京都大学大学院 修士課程
*2 京都大学大学院 教授・工博
*3 京都大学大学院 准教授・工博

Graduate student, Graduate School of Engineering, Kyoto University
Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.
Assoc.Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.