

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18404013
 研究課題名（和文） 東南アジアにおけるレンガ造遺跡の生物被害予測と建築環境工学的保存手法に関する研究
 研究課題名（英文） Prediction of biological damage on brick monuments in Southeast Asia and conservation measures based on building environmental engineering
 研究代表者
 銚井 修一（HOKOI SHUICHI）
 京都大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：80111938

研究成果の概要（和文）：東南アジアでは、多くの石造・レンガ造文化遺産が植物および微生物による被害を受けている。本研究では、遺物に及ぼす藻類の影響を検討し、藻類の成長予測モデルの提案を目的とした。具体的には、スコータイ（タイ国）の大仏を対象として、藻類の成長に及ぼす環境の影響について検討を行った。藻類の成長予測には藻自身の含水率を予測することが重要であることを明らかにするとともに、環境条件を考慮した藻類の成長モデルを提案し、その妥当性を検証した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	40,500,000	17,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：レンガ造遺跡、東南アジア、生物被害、保存、建築環境工学、屋根設置

1. 研究開始当初の背景

本研究は、東南アジア諸国に数多く存在するレンガ（石）造遺跡を対象として、その保存について検討しようとするものである。特に世界文化遺産の一つとして知られているタイ・スコータイ遺跡のスリチュム寺院とその中に安置されている大仏を主たる検討対象としている。現状では大仏は雨、日射に晒され、屋根の無いこの寺院内は藻類が生育するのに格好の環境となっている。今後、更に状態は悪化し、再度の保存修復作業を必要とする事態に陥ることが懸念される。無蓋の寺院内部は湿度が非常に高く、寺院内外の温湿度環境

の変化により苔や藻類の繁殖の危険性は非常に高い状況にあるといえる。本寺院に屋根を架け、寺院内部の温湿度・日射環境を適切に制御することにより、苔の繁殖を防ぎ、特別な修復作業、薬品処理を可能な限り控えることができると期待された。その可能性を検討するためには、屋根架構による寺院及び大仏の熱・水分環境の変化を予測することが必要と考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、スリチュム寺院の大仏の表面における藻類の繁茂状況と環境条件との対

応関係を定量的に明らかにし、藻類の成長モデルを作成することで繁茂状況の経年変化予測を行い、大仏の保存対策として考えられる建築的手法の評価を行うことを最終的な目的とした。具体的には、以下の項目について検討を行った。

- (1) 現地・スコータイの温湿度、気流分布、大仏および周囲の壁体の含水状態を測定・調査により把握する。
- (2) 寺院壁体・大仏構成材料の水分特性に関する物性値を測定する。
- (3) 寺院内部の気流分布、温湿度と大仏の含水状態を予測するシミュレーションモデルを開発する。
- (4) 藻類の成長モデルを組み込んだ温熱環境・生態統合モデルを作成する。
- (5) 屋根架構の効果と影響を予測する。

3. 研究の方法

以下の調査、測定および解析を行った。

(1) 気象要素の観測・記録

本堂の内部および外部における気象条件を明らかにするために、寺院周辺の温湿度、寺院屋上では小型日射計により日射量を、さらに気象観測システムを設置し、温湿度と日射量に加えて雨量、風速・風向等を測定する。

(2) 生物の繁茂状況の観察と記録

藻類が繁茂しやすい環境条件を明らかにするために、大仏表面における繁茂状況の特徴を観察し、写真により記録する。更に、画像処理を行い、繁茂のレベルを分類・判別する。

(3) 微気象条件を考慮した藻類成長モデル

微気象と藻類繁茂状況との関係を考慮して、藻類の成長モデルを作成する。藻類の繁茂には生育媒体（大仏）表面の水分量が大きく影響するため、降雨・日射・温湿度などを考慮して、その含水状態を同時に予測した。

(4) 材料の水分物性の計測

水分移動を理解し解析するための基礎データである多孔質材料の水分移動物性を測定する。また、藻類自身も多孔質材料とみなし、その平衡含水率の測定も行う。

(5) 大仏表面における藻類繁茂状況の再現

藻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する。

(6) 藻類の成長予測と遺跡に及ぼす影響評価

屋根を架けることで大仏周辺の微気象が変化した場合の藻類の繁茂状況を予測・推定する。降雨量や日射量など現状の環境条件を変化させたときの長期間のシミュレーションを行い、藻類の成長を予測し、屋根架構の評価を行う。

4. 研究成果

(1) スリチュム寺院周辺の微気象調査

屋外環境下にある遺跡は、外界気象の影響

を大きく受けている。遺跡周辺の温湿度、日射量などの外界気象要素は、遺跡での生物繁茂と環境条件との関連性を明らかにするための基礎となるものである。

① 年間の温湿度と日射量

本堂の内部および外部における温度、相対湿度、絶対湿度を比較すると、温度と相対湿度の日較差は年間を通して外部の方が大きい。9月から11月の外部の相対湿度の月平均値は85%以上であり、高湿である。ただ、絶対湿度は内部と外部で差がほとんどなく、年間を通して同じように変動している。

日射量についてみると、日積算値は12月から1月は15[MJ/m²day]程度であるが、3月から4月には20~25[MJ/m²day]と大きくなる。5月~7月は太陽高度が年間で最も高くなるが、この期間は雨季にあたるため、日積算量の日変動が激しい。

② 乾季(3月)の温湿度測定結果例(図1)

温度の日変動が最も大きい日(3月17日)には、最高が38.4℃、最低が23.4℃となった。その日は寺院内部においても最高気温は34℃に達している。相対湿度は、外部においては30%~90%、内部においては40%~80%の範囲で変動している。

③ 雨季(9月)の温湿度測定結果例(図2)

温湿度ともに3月と比べて日変動が小さく、内部における温度は26℃~30℃の範囲である。湿度は期間を通して高湿であり、内部・外部ともに相対湿度はほぼ80%以上を示している。

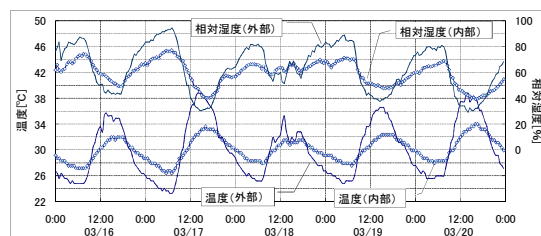


図1 乾季の温湿度(2005/03/16-21)

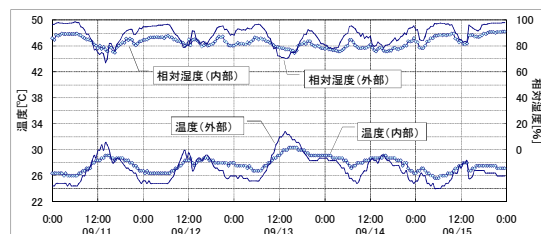


図2 雨季の温湿度(2005/09/11-15)

(2) 大仏での藻類繁茂状況

大仏の表面では藻類の繁茂が顕著であり、その状況を、環境条件がほぼ同じと考えられる3つの部位A, B, Cに分類した(図3)。それぞれの部位の特徴は以下ようになる。

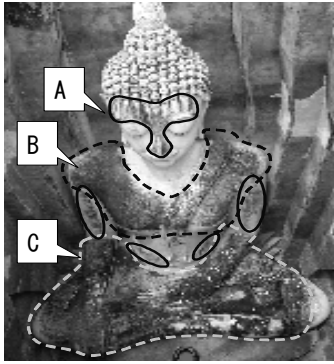


図3 大仏表面の生物繁茂状況

- A) 額、両腕および腹部の凸面などのほぼ鉛直面：雨が直接は当たらないが、上部から雨水が流れてくる。
- B) 傾斜面：日射量が多く、雨が直接あたり流れていく。表面に付着する水の量が多い場所といえる。
- C) 上向き面：日射量が多い。また、流れてくる雨と直接あたる雨の量が多く、流出しにくくたまりやすい場所である。

反対に、藻類がほとんど繁茂していない部分は、雨はあたるが乾燥しやすい頭部の上の方と、あまり雨があたらず影になる首、胸の下や腕と腰の間などの鉛直面である。

以上より、藻類が繁茂しやすい条件は次のようにまとめられる。

- ①水分供給が多い
- ②水分がたまりやすい、乾燥しづらい
- ③光合成に必要な日射量を得られる

つまり、ある場所に藻類が繁茂するか否かは、その部位への水分供給があるかどうか、また、水分保持能力が高いかどうかが支配的な要因であると考えられる。日射には光合成の役割（成長）と、逆に表面の温度を上昇させたり水分の蒸発を促進したりする作用（成長抑制）とがある。

(3) 微気象条件を考慮した藻類の成長モデル

①藻類成長のモデル化

藻類の成長速度に影響を及ぼす物理的環境要因を日射量・温度・水分量とみなし、藻類個体群の成長は次式により定まるとする。

$$\frac{dN}{dt} = Gr_0 \cdot N \quad (1)$$

$$G = g_T \cdot g_W \cdot \{G_0 + (1 - G_0)g_S\} \quad (2)$$

(ただし、 $g_S = 0$ が 7 日間続くと $G = -0.05$)

N : 個体群密度[個/m²] (初期値を N_0 とする),
 t : 時間[s], G : 総合環境指数[-],
 G_0 : ($g_T, g_W = 1, g_S = 0$)での G [-],
 r_0 : $G = 1$ のときの成長率[1/s],
 g_T, g_W, g_S : 温度, 水分量, 日射量についての

環境指数[-]

藻類の単位面積あたりの個体数（個体群密度） N [個/m²]の増殖速度は個体数 N に比例するととして、(1)式のように表す。 G は藻類の環境条件に対する適応度を示す値で、対象面の藻の温度・含水率と、対象面への日射量の関数で表す（(2)式）。 G と r_0 の積がそのときの環境条件に応じた成長率となる。藻類の温度・含水率・日射量を算出し(③)、それぞれの値に応じた環境指数を(1), (2)式に逐次代入して藻の成長予測を行う。

②環境指標

温度についての環境指数 g_T は、生物の温度が最適温度域より低すぎても高すぎても、その成長速度が遅くなるということを考慮し、次の式(3)で表す。

$$g_T(T) = \exp \left\{ \frac{4 \log(0.5)}{(T_2 - T_1)^2} \cdot \left(T - \frac{T_1 + T_2}{2} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

水分量（含水率）についての環境指数 g_W は、含水率が大きい程、藻類の成長は促進されるが、ある程度で飽和することを考慮し、単調増加関数だが、ある含水率値以上では常に1になるとした。

日射量についての環境指数 g_S [-]は光合成に対する適応度を表すものとし、水分の蒸発を促進するという意味での作用は、含水率の計算において考慮される。従って、 g_S は藻類の光-光合成曲線に基づいて決定する。

以上を表現する関数には、 T_1, T_2 [°C], W_1, W_2 [-], $S_1 \sim S_4$ [W/m²]がパラメータとして現れるが、その値は実際の繁茂状況と解析結果とを比較することで決定する。

③計算の流れ (図4)

全体の計算のフローを図4に示す。なお、藻類の平衡含水率曲線については、(本解析の後に) 実測を行い決定している。

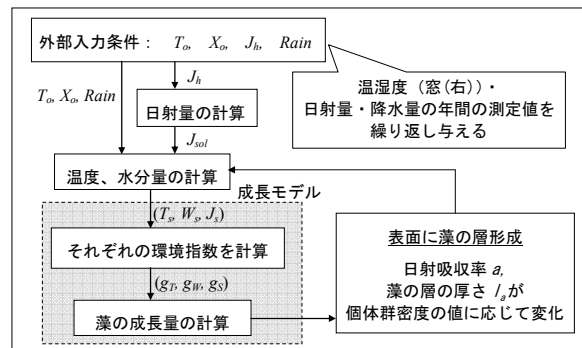


図4 計算の流れ

(4) 水分物性の測定

レンガとほぼ同様な性質を有すると考えられる瓦やコンクリートに関する幅広い熱

水分物性の測定を行った。また、気液分離や材料内気泡が及ぼす影響などについても検討を行った。

(5) 大仏表面における藻類繁茂状況の再現

藻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の再現を試みた。大仏は1998年に表面のクリーニングを行っているため初期状態が明確であり、また、繁茂している生物の大部分が藻類であるということから、モデルの挙動を確認しやすい対象物であるといえる。

①解析対象・解析条件

解析対象部位として、藻類の繁茂度合いの異なる部位を図5のように6点選択した。これらの点を繁茂度合いによって分類すると、ほとんど繁茂していない点が①、③、中程度に繁茂している点が②、④、著しく繁茂している点が⑤、⑥となる。

入力条件としては、温湿度は寺院内での測定値を、日射量は屋上における測定値の年間のデータを繰り返し与えた。各部位に与える降水量は、部位ごとの雨のあたりやすさの特徴を考慮して決めた。

②解析結果

解析対象部位のうち、まず①頭頂部、④右腹部および⑤左手について9年間の成長のシミュレーションを行った。その結果を図6に示す。横軸は時間、縦軸は藻類の個体群密度 N を表す。 N の値は、どの部位においても、毎年6月から増加し始め、11月初めにピークとなり減少に転ずる。これは、降水のある雨季に個体数が増加し、乾季には水分供給が少なくなるため減少することに対応している。

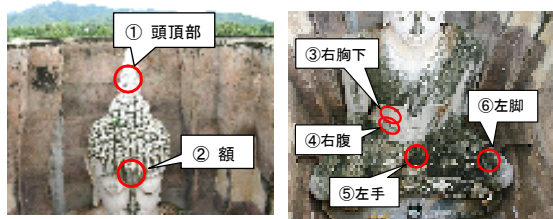


図5 解析対象部位

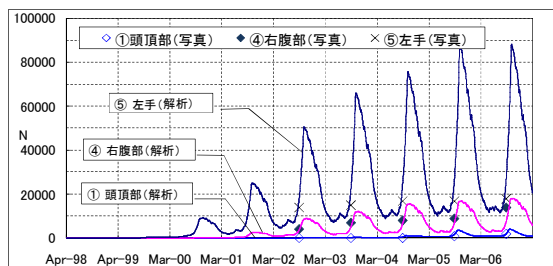


図6 成長度合いの経年変化 (①, ④, ⑤)

また、 N の年間の最大値は年を追うごとに増えているが、これは、成長速度 dN/dt が個体数 N に比例すること (式(1)) による。

③実際の繁茂状況の評価

藻類の実際の繁茂度合いの評価に利用できるデータは写真のみであるため、大仏表面のクリーニング以降に撮影された写真から繁茂度合いを読み取り、解析結果との比較を行った。

まず、2002年～2005年の9月に撮影された写真をグレースケールに変換し、場所ごとの明るさを均一に近づけたうえで、大仏の表面で最も白い点を0、最も黒い点を1として、濃淡を相対的に N_{real} という記号で表す。実際の繁茂度合いを表す個体数 N の値は N_{real} に比例するとし、ここでは④右腹部における2002年の計算結果 $N=4000$ (図6) を基準値とし、これを観察された繁茂度合い $N_{real}=0.2$ に対応させた (基準としてはどの点を選んでもよい)。この関係に基づき、他の部位、年における N_{real} の値についても、対応する個体数 N に換算した。得られる N の値と解析結果の個体数 N とが対応するように、環境指数などのパラメータを決定した。

④解析結果と実測との比較

得られたパラメータ値を用いて、②額、③右胸下および⑥左脚について同様に9年間のシミュレーションを行った (図7)。成長度合いは良く対応し、実際の繁茂状況をおおむね再現できている。

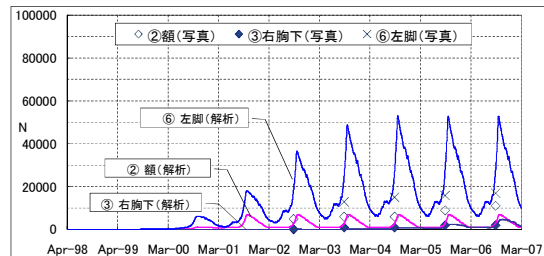


図7 成長度合いの経年変化 (②, ③, ⑥)

(6) 藻類の成長予測と周辺環境の変化が遺跡に及ぼす影響の評価

屋根を架け大仏周辺の微気象が変化した場合の藻類の繁茂状況を推定するため、環境条件を変化させたときの部位③、④、⑤に対する30年間のシミュレーションを行った。現状の降水量と日射量を1として、10年後以降から、降水量は1 (現状)、0.5 (雨を半分程度排除する屋根)、0 (雨を完全に排除する屋根)、2 (気候が変化し降水量が増えた場合)、日射量は1 (現状)、0.5 (光を取り入れる構造の屋根)、0 (全く光の入らない環境) と変化させ、12パターンの解析を行った。

①基本ケース

基本ケースとして、現状（降水量1, 日射量1）を維持した場合の結果を図8に示す。藻類の繁茂状況は2008年頃に周期的な定常状態に達する。

②日射量の変化が及ぼす影響

日射量を現状の半分になると（図9）、藻類の個体数は増加し、特に④においては急速に増えている。日射量の減少により水分が蒸発しにくくなることで、成長が促進されるためと考えられる。日射量を0としたときは光合成が不可能となり藻類は死滅する。しかし、本堂内部の視環境として全く光のない環境は、保存対策としては好ましくないであろう。

③降水量の変化が及ぼす影響

降水量が減少すると個体数はそれに伴って減少し、増加すると増加する。降水量を0としたときは図10のような経年変化を示す。⑤において、個体数は徐々に減少するが、③と同程度の個体数になった後は周期的に変動し、完全に0とはならない。また、④においては、個体数はやや減少するが、周期的な状態となったときの数は③、⑤よりも多い。これらは、結露による水分供給のため、内部への雨の侵入を防いだとしても、藻類が完全にはなくなる可能性のあることを示唆している。なお、この状況は、透明な屋根を架け、日射量を変化させずに雨を防いだ場合に対応する。

提案したモデルを用いた解析により、日射量を制御し減少させた場合に藻類の繁茂はさらに増加する可能性があり、また、屋根により雨を完全に防いでも藻類の繁茂がなくなる可能性のあるなどの結果が得られた。生物の成長モデルによる予測手法は、遺跡の保存対策の評価法として有用であると考えられる。

5. 主な発表論文等

【雑誌論文】（計16件）

- [1]小椋大輔、銚井修二、清水孝範、野口 浩、結露・蒸発過程における平衡含水率および水分伝導率の履歴の影響、日本建築学会環境系論文集、第74巻、第643号、PP.1065-1074、2009年9月（査読有）
- [2]伊庭千恵美、和中龍、銚井修二、小椋大輔、仕上げ層をもつ屋根瓦の水分移動特性に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第74巻、第640号、PP.693-699、2009年6月（査読有）
- [3]伊庭千恵美、銚井修二、屋根瓦における結露発生に関する研究、日本建築学会環境系論文集、第74巻、第639号、PP.587-593、2009年5月（査読有）

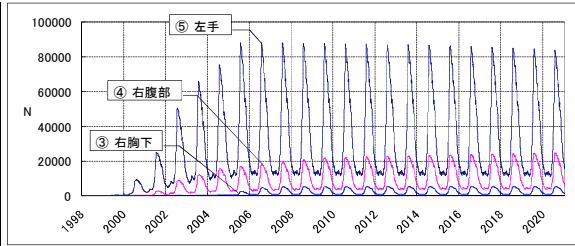


図8 現状がつづいたときの経年変化

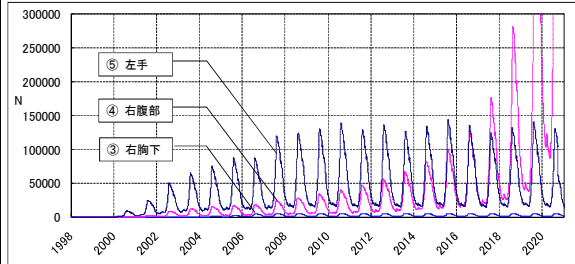


図9 日射量を半分に減少させたときの経年変化

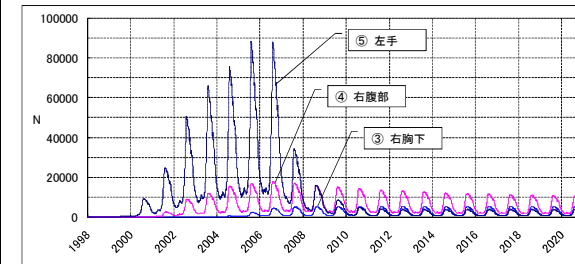


図10 降水量を0としたときの経年変化

- [4]恩村定幸、銚井修一、松下敬幸、小椋大輔、小南和也、安井義貴、強度の異なるコンクリートの熱湿気物性に関する研究熱湿気物性の測定、日本建築学会環境系論文集、第625号、PP.299-306、2008.3（査読有）
- [5]宮内真紀子、銚井修一、宇野朋子、小椋大輔、高温多湿気候下における遺跡への藻類による影響、日本建築学会環境系論文集、第623号、PP.17-22、2008.1（査読有）
- [6]S. Takada, S. Hokoi, and M. K. Kumaran, Experimental and Analytical Investigation of Moisture Movement in Clothing, Journal of Building Physics 2007 31: 125-142.（査読有）
- [7]安福 勝・銚井修一・高田 暁・箸方 稔、塩の影響を考慮した布における熱・水分同時移動 第1報 塩溶液の浸透実験と塩の影響を考慮した布の平衡含水率、空気調和・衛生工学会論文集、No.119、PP.17-22、2007.2（査読有）
- [8]Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Takayuki Matsushita, Sadayuki Onmura, Kazuya Kominami and Yoshitaka Yasui, A method

of Separation Between Moisture Diffusivity Derived from Liquid and Vapor Phase, Journal of ASTM International, 2006 (査読有)

〔学会発表〕(計 16 件)

- [1] 中嶋麻起子、銚井修一、小椋大輔、建物外壁における藻類の繁茂状況に関する研究、日本建築学会大会学術講演会 東北学院大学、09.9.26-29 (査読無)
- [2] 吉田有里、銚井修一、小椋大輔、レンガ造大仏内部における水分移動、日本建築学会大会学術講演会、東北学院大学 09.9.26-29 (査読無)
- [3] 川本伸一、銚井修一、小椋大輔、宇野朋子、スコータイ遺跡における仏像の保存に関する研究 周辺気象の計測と藻の繁茂状況、日本建築学会大会学術講演会 広島大学、08.9.18-20 (査読無)
- [4] Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Takanori Shimizu, A Study on Condensation and Evaporation Behavior of Building Walls Considering Hysteresis -Effect of Sorption Isotherm and Moisture Conductivity-, Proceedings of 12th Symposium for Building Physics, Dresden, Vol.2, PP.885-892, 2007.3.30 (査読有)
- [5] 宮内真紀子、銚井修一、宇野朋子、スコータイ遺跡における仏像の保存に関する研究 その4 藻類の成長モデルの作成、日本建築学会大会梗概集、横浜、D2、PP.369-370、2006.9.9 (査読無)
- [6] 宇野朋子、銚井修一、宮内真紀子、スコータイ遺跡における仏像の保存に関する研究 その3 大仏周辺の温熱環境調査、日本建築学会大会梗概集、横浜、D2、PP.367-368、2006.9.9 (査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

銚井 修一 (HOKOI SHUICHI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80111938

(2) 研究分担者

朽津 信明 (KUCHITSU NOBUAKI)
(独)東京文化財研究所・主任研究員
研究者番号：50234456
宇野 朋子 (UNO TOMOKO)
(独)東京文化財研究所・特別研究員
研究者番号：90415620
小椋 大輔 (OGURA DAISUKE)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60283868