覆屋の改修が石仏の塩類風化に与える影響の熱水分移動解析による評価

- 元町石仏の保存に関する研究 その2 -

NUMERICAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SALT DAMAGE
BY IMPROVEMENT OF THE SHELTER

- Study on the conservation of a stone Buddha carved into a cliff at Motomachi PART 2 -

高取 伸光^{*1}, 小椋 大輔^{*2}, 脇谷 草一郎^{*3}, 安福 勝^{*4}, 桐山 京子^{*5}

Nobumitsu TAKATORI, Daisuke OGURA, Soichiro WAKIYA,

Masaru ABUKU and Kyoko KIRIYAMA

In this paper, we develop a numerical analysis model to calculate the heat and moisture behavior at Motomachi Sekibutsu and clarify the effect of suppressing salt damage by renovation of the shelter. Using this model, we divide the renovation as three component, thermal insulation, airtightness, solar transmission, and verify the effectiveness of them. Our results show that all the renovation contribute to decreasing the evaporation from the statue and suppressing the salt phase change. Thus, we consider that the renovation of the shelter suppresses salt damage

Keywords : Conservation environment, Salt damage, Numerical analysis, Coupled heat and moisture transfer, Repair of shelter

保存環境, 塩類風化, 数値解析, 熱水分同時移動, 覆屋の改修

1. 序論

1.1 研究の背景

元町石仏は、大分市を代表する磨崖仏の一つであり、1934年に国指定史跡に指定された。磨崖仏は、岩壁に直接彫られた石仏であり、空間側の環境だけでなく岩盤を通じた熱や地下水の影響も受けるため劣化の生じやすい環境にある。近年では、特に塩の析出やそれに伴う劣化、いわゆる塩類風化が懸念されており、その対策として2015年11月に覆屋内温湿度環境を調整することで硫酸ナトリウム（以下 Na_2SO_4 ）による塩類風化を抑制することを目的とした、覆屋（Photo1）の断熱性向上、気密性向上、日射遮蔽性向上に関する改修が行われた¹⁾。しかしながら、塩の析出量や塩類風化のリスクを現地調査から定量的に判断することは難しく、改修による塩類風化抑制効果がどの程度あるのかは明らかにされていない。

1.2 既往の研究

塩類風化のリスクを定量的に予測・判断するための方法として数値解析は有用な手段である。ここで、例えば Derluyn²⁾や Castellazzi *et al.*³⁾は多孔質材料中の熱・水分・塩の移動・析出・結晶化応力を予測するモデルを提案しているが、これらのモデルは特定の塩、し

Photo1 The exterior of the shelter

かも単一の塩から構成される溶液を想定しており、実在の文化財のように材料中の溶液が複数のイオン種を有している場合には適応が困難である。また、塩の結晶化時に生じる応力は塩の種類ごとに異なり、その原因については未だ議論の余地がある。一方、溶液は塩を含むことでその移動速度を変化させるが、材料が半透膜性能や表面電荷を有さない限りダルシー則からは外れないため、既報⁴⁾では、塩の移動、蓄積などに大きな影響を及ぼす熱水分移動のみを考慮した解析を行い、 Na_2SO_4 の応力発生メカニズムに着目することで、塩の析出および材料の塩類風化傾向について明らかにした。

^{*1} 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程／
日本学術振興会 特別研究員

^{*2} 京都大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

^{*3} 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所
主任研究員・博士(工学)

^{*4} 近畿大学建築学部 准教授・Ph.D.

^{*5} 京都大学大学院総合生存学館思修館総合生存学専修
博士一貫課程／日本学術振興会 特別研究員

Ph.D. Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University /
JSPS Research Fellowships for Young Scientists

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

Senior Researcher, National Institutes for Cultural Heritage Nara National Research
Institute for Cultural Properties, Dr.Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Architecture, Kindai University, Ph.D.

Ph.D. Student, Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human
Survivability, Kyoto University / JSPS Research Fellowships for Young Scientists

一方で、Ogura *et al.*⁵⁾は、材料中に含まれる溶質を塩化ナトリウム塩に限定することで、材料中の熱・水分・塩の移動を考慮した数値解析により材料中における塩の析出量を定量的に評価しており、桑原ら⁶⁾や石崎ら⁷⁾は、材料中の水分状態がほぼ飽和に等しい場合、材料表面からの水分流は材料内部における水分蒸発量の総和と等しく、水分蒸発量は塩の析出のしやすさに比例すると考えられることから、対象とする文化財の検討において、本研究同様塩の移動は考慮せず、材料内の熱と水分のみの移動を考慮した数値解析から、塩の析出のしやすさを評価している。しかし、塩類風化の問題に対し、塩の種類を限定し、その応力発生メカニズムに着目することで塩類風化の進行のしやすさについて検討を行った例は非常に少ない。特にこれらの手法を、覆屋内温湿度環境を予測するための数値解析手法と連成することで、塩類風化対策の定量的評価を行った研究は皆無である。

1.3 研究の目的と方法

本研究の最終目標は元町石仏において懸念される塩の析出や塩類風化を出来る限り抑制する保存環境の制御方法を提案することである。既報⁴⁾では覆屋内温湿度環境が石仏の塩類風化に与える影響に着目し、覆屋改修前の環境では石仏膝部において塩類風化が生じやすくなることを数値解析により明らかにした。

本報では 2015 年 11 月に行われた覆屋の改修による石仏の塩類風化抑制効果を明らかにすることを目的とし、数値解析によりその定量的評価を行った。数値解析では石仏及び覆屋壁体内の熱と水分の移動を考慮した計算を行い、これらのモデルを連成することで覆屋内温湿度環境の形成過程を明らかにした。また本モデルを用い覆屋の改修による環境性能向上要素を断熱性、気密性、日射遮蔽性に分け、各要素による石仏の塩類風化抑制効果について検討を行った。

なお、塩の析出と材料の破壊は等価ではないため、塩類風化の評価のためには塩の析出量だけでなく、塩が材料を破壊するプロセスに関しても評価する必要がある。そのため本報では、既報⁴⁾同様水分蒸発量から塩の析出のしやすさを評価する方法に加え、 Na_2SO_4 の結晶化圧力の発生メカニズムに着目し、その相の変化が材料の破壊をもたらすと仮定することで塩類風化のリスクを定量的に評価した。

2. 現地調査

2.1 元町石仏の覆屋の変遷

元町石仏では 1995 年 4 月から 1996 年 3 月の期間および、2015 年 11 月に覆屋の改修が行われた。前者では覆屋内部の断熱性向上を目的とした天井や外壁への断熱材（発泡ウレタン）の注入や、気密性の向上を目的とした出入り口への風除室の設置といった工事が行われた⁸⁾。一方、2015 年 11 月の改修では主に Na_2SO_4 による材料の破壊過程に着目し、析出塩の相状態の変化が劣化に大きく影響を及ぼしていると考え、塩の析出およびその相変化抑制のため覆屋内の温湿度環境の安定化を目的とした改修が行われた⁹⁾。本改修では Fig.1 に示すように、気密性向上を目的とした覆屋正面入口へのドアクローザーの設置、断熱性および日射遮蔽性の向上を目的とした窓の二重化や遮光フィルムの貼付、風除室のガラス全面を断熱材入りの板張りにし、また発熱源の除去のため蛍光灯を人感センサー式の LED 照明に変更するといった改修が行われた。本論文では以降、改修とは 2015 年 11 月の改修を指すこととする。

2.2 改修前後の覆屋内温湿度環境測定結果

本研究では、覆屋内温湿度および地盤内熱水分状態を把握するために、2014 年 11 月から現在まで継続して石仏覆屋内外の物理環境調査を実施している。主な測定項目を Table1 に、測定箇所を Fig.1 に示す。なお①～④の測定高さは地面から 50～100cm であり、⑦および⑧は覆屋内の床面から深さ約 10cm の点に設置してある。

Fig.1 Repair contents and environmental measurement position

Table1 Contents of measurement

Position (Fig.1)	Contents of measurement	Measurement device
①～④	Temp. RH	HOBO Pro v2 U23-002(Onset)
⑤, ⑥	Door opening rate	UX90-001(Onset)
⑦, ⑧	Temp. water potential	MPS-2 Dielectric Water Potential(DECAGON)
⑨	Temp., RH, Solar radiation, Wind direction and speed, Air pressure	Weather station(Onset)
Attic	Temp. RH	RTR-507(T&D)

Table2 に覆屋内の②の位置 (Fig.1) で測定された覆屋の改修前後の温度・相対湿度の年平均値を、Fig.2 に 2014 年 12 月から 2017 年 9 月までの月平均値を、Fig.3 に同期間の同じ測定位置の温度と絶対湿度の月平均値と、日較差の月平均値を示す。Table2 より、覆屋内温度は覆屋の改修に伴い年平均値で 1.5℃上昇しているが外気温も 1.3℃上昇しており、改修前後で変化が小さい。一方で Fig.3 より日較差は年間を通じて縮小していることが分かる。また相対湿度に関しては改修前では年平均で 80.7%であったのに対し、2015 年 11 月の改修以降 96.8%となっており、覆屋内は非常に高湿状態を維持していることが分かる。絶対湿度に関しても温度と同様日較差が縮小しており、改修により温度・湿度ともに安定した環境になっていることが分かる。

Table2 Annual average value of Temp. and RH

Date	2014/11/11～2015/11/10		2015/12/01～2016/11/30	
Location	Inside	Outside	Inside	Outside
Temp.[℃]	17.7	16.4	19.2	17.7
RH[%]	80.7	70.6	96.8	72.3

Fig.2 Monthly average value of indoor temperature, relative humidity and absolute humidity

Fig.3 Monthly average value of indoor temperature, relative humidity, absolute humidity and daily range of them

2.3 覆屋内外の換気回数の推定結果

改修後の覆屋の気密性を把握するため、2016年10月3日～4日にかけて覆屋内外の二酸化炭素濃度の測定を行い、換気量を算定した。二酸化炭素濃度の測定については、覆屋閉鎖時と覆屋開放時(窓を開けたとき)の2つの場合について検討を行った。なお測定開始時の高い二酸化炭素濃度は覆屋内部の作業者に由来するものである。

換気量は以下に示す室内の二酸化炭素収支式を用い算定した⁹⁾。なお本論文で用いる式の記号は、文末の記号説明を参照のこと。

$$\rho_i V_i \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = -G(C_i(t) - C_o(t)) + M \quad (1)$$

ここで外気の二酸化炭素濃度を一定とみなすと、常微分方程式の解が以下の様に得られる。

$$C_i(t) = B \exp\left(-\frac{G}{\rho_i V_i} t\right) + \frac{M}{\rho_i V_i} t + C_o \quad (2)$$

なお室内内部における二酸化炭素発生量 M は定数とし、 B および M には計算値が実測値に合うよう適切な値を与えた^{注1)}。 $t=0$ の時、初期条件は室内の二酸化炭素濃度であり、 $t=\infty$ のとき平衡状態における室内の二酸化炭素濃度である。二酸化炭素濃度の測定結果をFig.4に示す。覆屋内外の換気回数は、覆屋閉鎖時では0.21回/時間、覆屋窓開放時では9.9回/時間という結果が得られた。

Fig.4 Change in carbon dioxide concentration over time

3. 本研究における塩類風化の検討方法

塩類風化は多孔質体内部に析出した塩が圧力を生じることにより材料を破壊する現象であると考えられている¹⁰⁾。塩類風化の過程は(1)塩が材料内部に析出すること、(2)析出した塩が材料を破壊するほどの圧力を生じること、の2つの過程に分離することができる。

塩の析出は一般に溶液中の塩濃度がその溶解度を超えることで生じる。塩濃度は塩と水分の比率によって決まるが、塩の量が一定の場合、水分が蒸発することで溶液の塩濃度は上昇するため、水分の蒸発量と塩の析出量には関係がある。また溶解度は溶液ごとに温度依存性が異なるため、塩の種類に応じた溶解度の把握が必要となるが、ここでは、溶液中の水分蒸発量と塩の析出量の相関性に着目し、石仏表面から室空間への水分流量が材料内部における水分の蒸発量と等しいと考えることで塩の析出量の考察を行う。

一方で、析出した塩が材料を破壊するほどの圧力を生じる過程は塩の種類ごとに異なる。元町石仏において最も懸念されている Na_2SO_4 は周囲の温度と相対湿度条件によって、無水和物(Thenardite (Na_2SO_4))と十水和物(Mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$))の2相状態を取り、Thenarditeとして析出した塩がMirabiliteへと相変化する際に非常に大きな圧力が生じる¹¹⁾と考えられている。

そのため本研究では塩類風化を(1) Na_2SO_4 が析出する過程(2) Na_2SO_4 が相変化し圧力を引き起こす過程に分離して評価する。前者については、上述のように石仏表面からの水分流量が塩の析出量と等価であるとみなすことで、石仏全表面からの水分流量から塩の析出のしやすさの傾向について検討する。後者については、既報⁴⁾より石仏膝表面(Fig.5)が塩類風化の生じやすい部位であることが明らかとなっているため、この部位の温湿度から Na_2SO_4 の相状態を推定することで相変化の有無について検討を行う。

4. 解析方法

解析では石仏および覆屋内の温湿度環境の再現および、覆屋の改修による石仏の塩類風化抑制効果の定量的評価を目的とした熱・水分移動に関する数値解析を行う。本連成解析はFig.5に示すように覆屋内の2空間(室空間・小屋裏空間)の温度、絶対湿度をそれぞれ1質点で代表させ、それらの空間に接する石仏からの熱水分流は既報⁴⁾で示した2次元の熱水分移動モデルを、覆屋壁体からの熱水分流は1次元の熱水分移動モデルを用いて計算し、室内での熱水分発生や内外の換気も考慮する。石仏から覆屋内空間への熱・水分流は、2次元モデルの石仏に横方向の長さを乗じ、壁体の1次元モデルからは各壁体の覆屋内空間側の表面積を乗じることで算出した。

Fig.5 Outline of the model for analyzing the indoor temperature and humidity

4.1 基礎方程式および境界条件

石仏や壁体といった材料内の熱水分性状の解析には既報⁴⁾と同様に、以下に示す松本の熱水分同時移動方程式¹²⁾を用いた。

$$\text{熱収支式} \quad : c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{(\lambda + r\lambda'_{Tg})\nabla T\} + \nabla \cdot (r\lambda'_{\mu g}\nabla \mu) \quad (3)$$

$$\text{水分収支式} \quad : \rho_w \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_{\mu} (\nabla \mu - n_x g)] + \nabla \cdot (\lambda'_T \nabla T) \quad (4)$$

また材料境界では熱・水分は空気を介して熱伝達、湿気伝達によって移動し、材料表面は日射および降雨の影響を受けるものとし、境界条件は以下のように表した。

熱境界条件：

$$\alpha(T_A - T_s) + r\alpha'_m(p_A - p_s) + q_s = -(\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial n} - r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n} \quad (5)$$

水分境界条件

$$\alpha'_m(p_A - p_s) + J_p = -\lambda'_{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial n} - n_x g \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \quad (6)$$

ここで q_s は材料表面に入射する日射量、 J_p は降雨である。なお、地盤側の境界条件は既報⁴⁾同様、覆屋内床面から1.1m以下の深度は水分化学ポテンシャル -7J/kg 一定、温度は2次元モデル境界である12.2mの深さで既報⁴⁾同様2013年の年平均値である 16.9°C で一定、地盤鉛直側面の水平方向は断熱断湿とした。

室空間における熱・水分収支は、室空間に接する材料表面からの熱・水分流、換気による熱・水分の交換、日射や発熱源などから空間に吸収される熱量と水分発生量を考慮した以下の式を用いる。

熱収支式：

$$c_A \rho_A V \frac{\partial T_A}{\partial t} = \sum S \alpha_i (T_s - T_A) + \sum c_A \rho_A V N (T_O - T_A) + Q \quad (7)$$

水分収支式：

$$\rho_A V \frac{\partial A}{\partial t} = \sum S \alpha_i (p_s - p_A) + \sum \rho_A V N (A_O - A_A) + W \quad (8)$$

なお、本解析では水分発生量 W は常に0とし、小屋裏空間も同様の式を用い、換気は室-小屋裏間、室-外気間、小屋裏-外気間で生じるものとした。

4.2 覆屋を構成する壁体の1次元モデル

覆屋は、Fig.6に示すように断熱壁、板張り壁、天井、屋根、二重窓、単板ガラスから構成される。天井は室空間と小屋裏空間に、屋根は小屋裏空間と外気に、それ以外は室空間と外気に接するものとした。覆屋内空間と連成する際には各壁体にTable3に示すように

方位ごとに一定面積を与えることで壁体からの熱水分流を算出し、改修前後ではその面積を変更することとした。壁体表面にあたる日射量は、全天日射量を直散分離することにより直達日射量および天空日射量を算出した結果を用いて算出した。なお方位角は北を 0° とし時計回りに北東面を 45° 、南東面を 135° 、南西面を 225° とした。また、式(4)に示すように、鉛直壁面以外には水分にかかる重力の影響を考慮し、垂直面では $n_x = 1$ とする。降雨は崖面にのみあたるものとし、鉛直壁面では降雨は当たらないものとした。また、屋根面は防水処理が行われており、屋根瓦への浸透も非常に小さいことから、降雨は覆屋内の湿度にほとんど影響しないものと想定し、屋根面に与える降雨は無視した。

Table3 The area and inclination angle of the wall

	Surface area[m ²]				Inclination angle[°]
Direction	NE・SW		SE		
Renovation	before	after	before	after	
Insulating-wall	13.4		17.3	24.5	90°
Wood-wall	2.0		2.0		90°
Roof	26.76		33.11		30°
Single-glass	5.17	0.0	9.5	0.0	90°
Double-glass	0.0	5.17	0.0	2.3	90°
Ceiling	50.8 (no-direction)				0°

Fig.6 The wall constitution of the shelter

Table4, Fig.7, 8に壁体を構成する各材料の熱・水分物性値¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾を示す。なおガラスと瓦については水分の移動が生じないものとし、中空層については空気を熱および湿気の伝達抵抗として取り扱い熱

伝達抵抗 $0.09[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$ とし、湿気伝達抵抗は対流熱伝達率を $6.7[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ としてルイス関係より算出した。なお、解析における壁体の差分刻みは全て 1mm 、解析の時間刻みは 30 秒、室および小屋裏での総合熱伝達率と水分伝達率はそれぞれ $9.3[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 、 $2.85 \times 10^{-8}[\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}]$ とし、外気はそれぞれ $23.3[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 、 $1.14 \times 10^{-7}[\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}]$ とした。

Table4 Thermal properties of materials for analysis

	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kgK]	Thermal conductivity [W/mK]
Wood	365	1880	0.25
Urethane foam	39	1470	0.0265
Kawara	1970	920	0.937
Glass	2540	770	0.78

Fig.7 Moisture retention curve of the wood and urethane foam

Fig.8 Moisture conductivity of the wood and urethane foam

4.3 計算条件

4.3.1 再現性確認における計算条件

解析モデルの妥当性は、2012年1月1日から2017年10月1日までの覆屋改修前後の期間の解析により確認する。外気条件は、大分地方気象台¹⁰⁾における外気温度・相対湿度・日射量・降雨量を用いる。ここでは覆屋内温湿度の測定が始まる2014年11月1日までの助走期間とした。覆屋の改修はおおよそ10日程度かけて行われたが、解析では2015年11月16日0時0分に覆屋の改修が行われたものとし、同時刻から上述した壁体構成の変更を行った。なおモデル変更時に新たに追加された材料の初期温湿度は室の温度・相対湿度と同値を与えた。

4.3.2 改修要素ごとにおける計算条件

次に、覆屋の改修により覆屋内の温湿度環境がどのように変化し、塩の析出および劣化への影響度がどのように変化したか検討するため、改修を1)断熱性向上(TI)、2)気密性向上(AT)、3)日射遮蔽性向上(SS)の各改修要素に分類し、改修前の場合(BR)、改修前からそ

れぞれ「断熱性向上」・「気密性向上」・「日射遮蔽性向上」のみを行った場合(それぞれTI、AT、SS)、改修後の場合(AR)の計5パターンの計算を行った。解析期間は2016年4月1日から2017年3月31日までとし、助走期間として予め上記期間の外気条件が繰り返す計算を2年間行った。なお「日射遮蔽性向上」の要素には内部熱源の抑制を含める。各改修に対する計算条件は以下に示す通りである。

「断熱性向上(TI)」: Table 3に示すように壁体の種類・面積のみを変えることでその断熱性を変化させた。なお覆屋の外壁面(屋根・天井を除く)の外皮平均熱貫流率 U_A 値は改修前で $2.54[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、改修後で $1.38[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ であった。

「気密性向上(AT)」: 覆屋内外の換気回数は2.3節の測定結果に示す通りである。ここで覆屋改修前は風除室の扉がほぼ常時開放されていたため、改修前の室空間の換気回数は窓を常時開放していた時に相当すると仮定し $10.0[\text{回}/\text{h}]$ 、覆屋改修後は一時的な扉の開閉はあるものの基本的には閉鎖が保たれているため $0.2[\text{回}/\text{h}]$ とした。なおドアの開閉回数およびそれに伴う換気量の変化の予測は困難であるため、換気回数は年間を通じて一定として与えた。また小屋裏と外気間での換気回数は文献¹⁵⁾より $2.0[\text{回}/\text{h}]$ 、室空間と小屋裏間での換気回数は室容積に対して $0.1[\text{回}/\text{h}]$ とした。なお空間の容積は覆屋の図面より室が $164.2[\text{m}^3]$ 、小屋裏が $100[\text{m}^3]$ とした。

「日射遮蔽性向上(SS)」: 覆屋内に入射する日射量の抑制に加えて照明の変更による発熱量の減少の2つの要素を取り扱うこととする。まず日射量の取り扱いについて説明する。覆屋内に入射する日射量 Q_R は各窓ガラスに入射する日射量 E_{glass} 、面積 S_{glass} 、日射透過率 τ を用いて以下のように表される。

$$Q_R = \sum \tau S_{\text{glass}} E_{\text{glass}} \quad (9)$$

覆屋内に流入した日射は石仏表面もしくは床面に必ず入射し、吸収されなかった分(第一反射成分)は全て室の空気に吸収されると仮定する。ここで石仏表面や床面に入射する日射量の和を $\sum Q_C$ 、材料の日射吸収率を β 、室空気に吸収される成分を Q_{AR} とすると Q_{AR} は以下のように表される。

$$Q_R = \sum Q_C = \sum \beta Q_C + Q_{AR} \quad (10)$$

次に石仏表面に入射する日射量について説明する。既報⁴⁾では覆屋の形状、太陽高度・方位角を考慮することで石仏中央にあたる日射量を算出し、2次元モデル各部位に対し適切な日射量を与えた。一方、実際には石仏にあたる直達・天空日射量には3次元的な分布が存在する。例えば太陽高度が低く正面開口部から覆屋内に直達日射の流入しやすい冬季では石仏中央部は周辺部よりも直達日射を大きく受ける。このため、この石仏中央部にあたる日射量がそのまま左右の周辺部位にもあたると仮定すると、入射日射量を過大に見積ってしまう。従って、本解析では日射のあたる石仏と、日射の一切あたらない石仏に分け、前者の幅を正面開口部と等しい 2.4m 、後者を 4.8m とし計算を行った。なお窓ガラスの日射透過率は解析結果に合うよう改修前で 0.6 、改修後で 0.2 、日射吸収率は窓ガラスが 0.1 とし、瓦およびその他は文献値⁹⁾¹⁵⁾を参考に 0.7 、 0.9 とした。

また室空間の照明発熱量は、改修前では3灯の蛍光灯が、改修後は人感センサー式のLED照明に変更されたことを考慮し、改修前のみ 300W の発熱量を空間に与え、改修後は簡単のため 0W とした。

Fig.9 Comparison of the daily average value of indoor temperature, relative humidity and absolute humidity

5. 数値解析結果

5.1 解析値と測定値の比較

本研究では覆屋内温湿度環境が石仏の塩類風化に与える影響に着目していることに加え、測定可能な情報が限られていることから、覆屋内温湿度および地盤（石仏）の温度・水ポテンシャルの測定値と解析値を比較することで本解析の妥当性について検討を行う。

5.1.1 覆屋内温湿度

Fig.9 に 2014 年 11 月 1 日から 2017 年 9 月 31 日までにおける覆屋内温度・相対湿度・絶対湿度の測定値と解析値の日平均値を示す。改修前では温度・相対湿度・絶対湿度ともに解析値は測定値を概ね再現できていることが分かる。一方で改修後は、温度については冬季に解析値が測定値よりもやや低く、相対湿度については 5 月～7 月頃に測定値が 100% 付近まで上昇する季節変動を解析では上手く再現できていないことが課題であるが、年間での変動の傾向は概ね再現できていることが分かる。また、Fig.10 に改修前の 2015 年 9 月 1 日から 10 日までの温度と絶対湿度の瞬時値を、Fig.11 に改修後の 2016 年の同月日の値を示す。温度については改修前・後ともに一致がよく、絶対湿度については、一部（例えば改修前における日中の温度上昇に伴う絶対湿度上昇など）再現性が悪いものの日変動の傾向は概ね一致していることが分かる。

Fig.10 Comparison of indoor temperature and absolute humidity fluctuation in summer before renovation (September 1-10, 2015)

Fig.11 Comparison of indoor temperature and absolute humidity fluctuation in summer after renovation (September 1-10, 2016)

5.1.2 地盤温度・水分化学ポテンシャル

Fig.12,13 に、2016 年 1 月 1 日から 2017 年 9 月 30 日までの測定番号⑧ (図 2.1) における温度・水ポテンシャルの測定結果と、2 次元モデルにおける当該箇所の温度・水分化学ポテンシャルの解析結果の比較を示す。なお測定に用いた機器^{注 2)}は土壤に平衡したセラミックカップ内の溶液の電気伝導度から水ポテンシャルを測定する機器であるため、土壤水分中の電解質の影響を受けるものと考えられる。ただし、不飽和領域において電気伝導度は、電解質の存在よりも水分の飽和度に大きく依存すると考えられるため、以下では水ポテンシャルの測定値と水分化学ポテンシャルはほぼ等しいものと考えて検討を行う。

Fig.12 より地盤温度は 2016 年、2017 年ともに 4 月から 9 月ごろまで精度良く一致しているが、それ以外の期間、特に冬季では最大 1℃ほど解析結果の方が測定値よりも温度が低く計算されている。

次に Fig.13 より解析条件に示した条件 (以下 Case0) では水分化学ポテンシャルの年平均値は概ね一致するが、測定値は 2016 年の 7 月頃 (以下：夏季) に緩やかに上昇し同年 8 月頃下降し、同年 9 月頃から 2017 年 4 月頃 (以下：冬季) に若干上昇するが、解析では年間を通じて変動が小さく傾向をうまく再現できていないことが分かる。この原因を検討するため室空間に覆屋内温湿度の測定値を与えた計算 (以下 Case1) と室空間に外気温湿度の測定値を与えた計算 (以下 Case2) を行った。Case1 では通常の解析結果と同様の年変動、季節変動を示している。一方で Case2 では冬季の傾向の再現性は依然として悪いが、夏季の傾向については概ねその変動を再現できていることが分かる。このことから、地盤の水分状態は、覆屋内空間よりも覆屋外地盤の水分状態変動の影響を強く受けており、本解析では地盤側の 3 次元性を無視していることが再現性に影響を与えているものと考えられる。しかし冬季の不一致については十分説明できておらず、地下水位の変動、地盤の透水性の違いや、測定機器の浸透ポテンシャルの影響などいくつかの原因が考えられる。

Fig.12 Comparison of instantaneous values of temperature at the ground

Fig.13 Comparison of instantaneous values of chemistry potential of water at the ground

以上より本解析モデルは覆屋内温湿度は概ね再現できているが、改修後の冬季の室空間や地盤の温度、夏季の室空間の相対湿度、地盤の水分化学ポテンシャルの季節変動に関して一部一致が悪い。これは主に窓面の日射透過率の誤差や、換気回数に日変動・季節変動を入れず一定値として与えていること、地盤側の 3 次元性や浸透ポテンシャルの影響などが原因と考えられる。そのため本モデルで温度や絶対湿度の日変動の詳細な予測を行うことは難しいが、地盤側は年間を通じて十分に高温な状態であることから本解析モデルの誤差であれば、後述の検討のような入力パラメータを一つずつ変更した場合における石仏からの水分流量の結果を季節ごとに比較することは十分可能であると考えられる。

5.2 覆屋の改修による塩類風化抑制効果の検討

5.2.1 改修が覆屋内温湿度変動に与える影響の検討

まず「断熱性向上(TI)」、「気密性向上(AT)」、「日射遮蔽性向上(SS)」の各要素の改修を行った場合の室内温湿度の変化について検討を行う。Table5, Fig.14, 15 に各改修前後における覆屋内温度・相対湿度の解析結果の年平均値と、それらの日平均値の年変動を示す。

「断熱性向上(TI)」により温度の年平均値は改修前に比べやや低下し、相対湿度はやや上昇した。これは外壁表面にあたる日射の影響が抑制されることによるものと考えられる。また、温度の日変動はやや減少したものの日平均値への影響は小さかった (図省略)。

Table5 Annual average value of temperature and relative humidity inside the shelter after each renovation

Title	BR	TI	AT	SS	AR
Renovation element	Before Renovation	Thermal Insulation	Air Tightness	Shielding Solar radiation	After Renovation
Temp.[°C]	17.4	16.7	21.2	15.2	16.6
RH[%]	73.5	76.3	87.6	82.8	96.9

Fig.14 Daily average temperature in the shelter after each renovation

Fig.15 Daily average relative humidity in the shelter after each renovation

「気密性向上(AT)」により室の相対湿度は大きく上昇し年間を通じて安定して高い値を示すことが分かる。また温度は改修前と比べ年平均値で約 4℃上昇し、特に冬季の上昇幅が大きく、約 6℃上昇している。気密性を向上させた場合、室と外気の間での水蒸気の交換回数が減るため、相対的に地盤と室との間の熱・水分移動の影響が大きくなる。ここで、地盤側の水分性状は地下水の影響により年間を通じて高い値を維持するため、結果として室内の相対湿度は高い値を維持する。一方、換気回数が減少することで覆屋内に入射する日射や蛍光灯による発熱量が外部に流出しづらくなり、室の温度が高くなると考えられる。

「日射遮蔽性向上(SS)」により室の温度は年平均で約 2℃低下し、相対湿度は約 10%上昇している。改修後はこれらの結果、室の相対湿度は年間を通じて高い値で安定し、温度は夏季では改修前より低く、冬季では同程度となった。

5.2.2 改修が石仏内の塩の析出に与える影響の検討

次に石仏表面からの水分流量から石仏内部における塩析出量について検討を行う。Fig.16 に各改修を行った場合における石仏表面からの水分流量の年平均値を、Fig.17 に日平均値を、Fig.18 に改修前に対する各改修後の水分流量の減少率を示す。

「断熱性向上(TI)」により改修前に比べ、水分流量は年間で 19.9%減少した (Fig.16)。減少率の季節変動は小さく、年間を通じてほぼ一定であることが分かる (Fig.18)。

「気密性向上(AT)」により水分流量は年間で 42.0%減少し (Fig.16)、冬季に若干減少率が下がる傾向にある (Fig.18)。これは、室と外気の間での換気による水蒸気の交換回数は少なくなるものの覆屋内の温度および相対湿度が上昇するため、覆屋内外の水蒸気圧差は大きくなり、覆屋内外の温度差の大きい冬季での蒸発量は減りづらくなったものと考えられる。

「日射遮蔽性向上(SS)」により、年間での水分流量は気密性を向上させた場合とほぼ等しく 42.8%減少する (Fig.16)。また、夏季に大きく減少するものの冬季に減少率が小さくなる傾向が見られる (Fig.18)。これは季節ごとに室内に入射する日射量が異なるというのも理由の一つであるが、日射遮蔽による室温変化は夏季、冬季ともに大きな差がないことから、温度変化に対する飽和水蒸気量の変化が高温時(夏季)の方が大きいことに起因していると考えられる。そのため、飽和水蒸気量の低い冬季では、温度低下に伴う水分流量の抑制は夏季と比べると小さくなると考えられる。

改修後では各改修の影響により年間での水分流量は 81.1%減少するが (Fig.16)、季節的な挙動としては夏季において水分流量が減少する一方、冬季に上昇する傾向が見られた (Fig.17)。改修後では、外界気象の影響を抑制することで、地盤側の温度・水分状態に近い温湿度性状となり、年間を通じて水分状態は飽和に近づくものの、夏季では外気より温度が低くなり水分流量は低下し、冬季では外気より温度が高くなり水分流量が上昇するものと考えられる。ただし、改修後は総じて改修前より石仏からの水分流量を大幅に低減できたため本改修は塩の析出抑制に大幅に寄与しているものと考えられる。

Fig.16 Annual average value of moisture flux from the stone Buddha to room space

Fig.17 Daily average moisture flux from the stone Buddha to room space

Fig.18 The percentage of moisture flux rate after each renovation compared to before the renovation

5.3 硫酸ナトリウムの相変化に関する検討

最後に塩類風化の進行の危険度について Na_2SO_4 の相変化の観点から検討を行う。3 章で述べたように Na_2SO_4 による塩類風化の多くが Thenardite と Mirabilite の相変化によって生じると考えられる。元町石仏では既報⁴⁾で指摘するように、地下水の影響により内部の含水量が高く維持されるが、石仏膝表面近傍では空間側の影響により乾湿の繰り返しがしやすく Na_2SO_4 の相変化による劣化の危険性が指摘されている。そのため以下では石仏膝表面の温度・相対湿度から Na_2SO_4 の相変化に伴う塩類風化のリスクについて検討を行った。

石仏膝表面の温度・相対湿度の解析結果から Na_2SO_4 の相を算出すると、改修前では Thenardite の状態を取る時間帯は計 255 時間、「断熱性向上(TI)」後では計 39 時間、その他の改修要素では Thenardite 領域に至ることはなかった。また、Thenardite の状態

から Mirabilite の状態へ移動する相変化が生じる年積算回数は、改修前では 71 回、「断熱性向上(TI)」後では 7 回であり、その他の改修要素では 0 回であった。従って塩類風化のリスクは各改修で大幅に減少したものと考えられる。

次に Na_2SO_4 の相変化のリスクの季節ごとの評価をするため、Fig.19 に石仏膝表面および外気の温度と相対湿度の月平均値を Na_2SO_4 の相図上にプロットしたものを示す。「断熱性向上(TI)」および「日射遮蔽性向上(SS)」を行った場合は、改修前に比べて若干ではあるものの温度の低下および相対湿度の上昇がみられ Na_2SO_4 の相変化のリスクは若干低下している。改修後は非常に高温な環境かつ年間での温度変動が小さな環境となることで相変化のリスクが大きく低下したものと考えられる。一方で「気密性向上(AT)」の場合、相対湿度が上昇することで Thenardite の状態を取りにくくなっているものの、改修前に比べ温度が上昇している。参拝者の急な来訪などで急激に換気が行われると、室内の湿度が急激に減少し Thenardite 状態を取りやすくなる可能性が考えられるため、今後の公開で留意すべき点であると考えられる。

Fig.19 Phase diagram of Na_2SO_4 plotting the monthly mean temperature and relative humidity of the knee surface of the stone Buddha under each analysis condition(Based on the phase diagram created by R.J.Flatt¹¹⁾)

6. 結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では元町石仏における覆屋の改修による塩類風化抑制効果を、覆屋内温湿度環境の数値解析により明らかにした。数値解析では石仏を含む崖面を 2 次元で、覆屋壁体を 1 次元でモデル化し熱水分同時移動方程式を用いることでその熱水分性状を明らかにした。またこれらを連成することで覆屋内温湿度を算出する数値解析モデルを構築し、覆屋改修時期を含む 2014 年 11 月 1 日から 2017 年 9 月 31 日までの期間における覆屋内温湿度を概ね再現することでその妥当性を確かめた。塩類風化抑制効果については、石仏からの塩の析出量は石仏からの水分蒸発量に比例し、塩類風化は析出した塩の相が変化する際に生じると仮定することで、石仏内の温湿度性状から塩の析出及び塩類風化の危険性を定量的に判断した。本解析モデルを用い、覆屋の改修を「断熱性向上」・「気密性向上」・「日射遮蔽性向上」の 3 要素に分けそれぞれの要素について検討を行うことで以下の結論を得た。

・本改修では「断熱性向上」・「気密性向上」・「日射遮蔽性向上」の

全ての要素で石仏からの水分蒸発を抑制できたと考えられる。

・水分蒸発量の季節変化を見ると、「断熱性向上」以外では、夏季の水分蒸発をかなり抑制できているものの、冬季では夏季に比べ水分の蒸発が抑制しにくいという結果が得られた。

・塩の相変化に関する検討では、全ての改修要素で石仏膝表面の温度・相対湿度が Thenardite 状態を取りづらくなったことから Na_2SO_4 の相変化に伴う塩類風化のリスクは減少したものと考えられる。一方で、気密性のみを向上させた場合、室内の温度が高温に保たれることから、参拝者の急な来訪などで急激に換気が行われると室内の相対湿度が急激に低下し Thenardite 状態を取りやすくなる可能性が考えられるため、今後の公開で留意すべきと考えられる。

・全ての改修を行った場合(改修後)では、塩の析出量および塩の相変化を生じる回数が大幅に低減され、塩類風化のリスクが抑制されたものと考えられる。

6.2 総括及び今後の課題

本研究では元町石仏を対象に、保存対策として実施された覆屋の改修方法が塩類風化を抑制した効果について明らかにした。しかし、この保存対策が他の磨崖仏の塩類風化においても最適であるとは限らないことには注意すべきである。すなわち、元町石仏が周辺の地下水位が常に高いという条件や、劣化要因の析出塩の種類が硫酸ナトリウムであること、磨崖仏の材料の物性値などの条件を前提とした場合の最適な保存対策と考えられる。ただし、ここで提案し用いた予測手法は、周辺環境や磨崖仏の風化状況、材料の物性値を適切に考慮することで、他の磨崖仏においても保存対策の定量的評価を行うことが可能になると考えられる。

また、本研究の今後の課題を示す。元町石仏における覆屋の改修では石仏からの水分の蒸発量、ひいては塩の析出量を大幅に抑制できたものと考えられる。一方で、覆屋の改修により室内の高温化が進んだことで、今後カビの発生リスクが懸念されていることや、地下水という膨大な水分の供給源がある限り元町石仏では水分蒸発を完全に抑制することは難しく、徐々に石仏内に塩が蓄積していくことが懸念される。特に後者については、元町石仏における塩の析出は覆屋内環境の制御のみでは抑制しきれないものと考えられ、今後石仏内に蓄積する塩そのものを除去する技術の開発に着手するとともに、カビ発生による参拝者の健康リスクおよび石仏の保存両方の観点を備えた元町石仏の保存・公開方法を検討していく予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、奈良文化財研究所埋蔵文化財センター保存修復科学研究室長 高妻洋成氏には貴重なご支援・ご指導を頂いた。大分市教育委員会河野史郎氏・永松正大氏には当時の記録、測定データの提供など多大なるご協力を頂いた。また本研究は特別研究員奨励費(課題番号: 18H13936 研究代表者: 高取伸光)および、科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号: 18H01596 研究代表者: 小椋大輔)、石造文化財の保存研究会からの調査研究費の助成、科学研究費補助金若手(A)(課題番号: 26709043, 研究代表者: 安福勝)の助成を受けた。厚く御礼申し上げます。

注

注 1) 測定では 12 時間以上経過した後外気二酸化炭素濃度よりも高い値を示していたことから、線香や土壌中の微生物活動による二酸化炭素発生量

$M/\rho_i V_i = 280[\text{ppm/s}]$ が発生しているものとした。
注2) 建築分野では一般に水分化学ポテンシャルをマトリックポテンシャルと等価とみなすが、土壌分野における水ポテンシャルとはマトリックポテンシャルと浸透ポテンシャルの和を示す¹⁷⁾。

記号説明

t: 時間[s]
C: 二酸化炭素濃度[kg(CO₂)/kg(空気)]
G: 室内外の換気量[kg/s]
 ρ : 密度[kg/m³]
V: 容積[m³]
B: 初期における室内部と室外部の二酸化炭素濃度差[kg(CO₂)/kg(空気)]
M: 室内部における二酸化炭素発生量[kg/s]
 ρ_w : 水の密度[kg/m³]
g: 重力加速度[m/s²]
c: 比熱[J/kgK]
T: 温度[K]
p: 水蒸気圧[Pa]
A: 絶対湿度[kg/kg']
 ψ : 体積基準含水率[m³/m³]
 μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg]
r: 相変化熱[J/kg]
 α : 総合熱伝達率[W/(m²・K)]
 α'_m : 湿気伝達率[kg/(m²・s・Pa)]
 λ : 熱伝導率[W/(m・K)]
 λ_T : 温度勾配に関する水分伝導率[kg/(ms・K)]
 λ_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率[kg/(ms・K)]
 λ'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率[kg/(m・s・(J/kg))]
 $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率[kg/(m・s・(J/kg))]
 $\lambda'_{\mu l}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率[kg/(m・s・(J/kg))]
n: 法線方向ベクトル x または y
 n_x : 鉛直下向き単位ベクトル[-], 鉛直下向きなら 1, 水平方向なら 0
 q_s : 日射吸収量[W/m²]
 J_p : 降雨量[kg/m²s]
S: 面積[m²]
N: 換気回数[s⁻¹]
Q: 取得熱量[W]
E: 日射量[W]
 β : 日射吸収率[-]

下添字

o: 外気
i: 室空気
A: 空気
s: 石仏表面
AR: 室空気へ吸収される成分
R: 覆屋内への入射成分
C: 石仏を含む崖面に入射する成分
glass: 窓面に入射する成分

参考文献

- 1) Oita city board of education: Kunishitei Shiseki Motomachi Sekibutsu Hozonseibijigyo Hokokusyo, 2016. (in Japanese)
大分市教育委員会: 国指定史跡大分元町石仏保存整備事業報告書, 2016
- 2) H.Derluyn: Salt transport and crystallization in porous limestone: neutron-X-ray imaging and poromechanical modeling, Ph.D thesis, ETH ZURICH, NO.20673, 2012
- 3) G.Castellazzi, C.Clla, S.de Miranda, G.Formica, E.Gabrielli, L. Molari and F.Ubertini: A coupled multiphase model for hygrothermal analysis of masonry structures and prediction of stress induced by salt crystallization, Construction and Building Materials, vol.41, pp717-713, 2013
- 4) N.Takatori, D.Ogura, S.Wakiya, M.Abuku, K.Kiriyama: Numerical analysis of the influence of hygrothermal variation on salt weathering of a buddha statue carved into a cliff- Study on the

- conservation of a stone Buddha carved into a cliff at Motomachi PART1-, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.733, pp.215-225, 2017.9 (in Japanese)
高取伸光, 小椋大輔, 脇谷草一郎, 安福勝, 桐山京子: 覆屋内温湿度変動が摩崖仏の塩類風化に及ぼす影響の数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 第82巻, 第733号, pp.215-225, 2017.9
- 5) D.Ogura, S.Hokoi, T.Hase, K.Okada, M.Abuku, T.Uno: Degradation of Mural Paintings in Mogao Cave 285 in Dunhuang, 2nd Central European Symposium on Building Phisics, pp.483-490, 2013
 - 6) N.Kuwabara, S.Hokoi, S.Wakiya, D.Ogura: Study on deterioration of remains on open exhibition in excavation site exhibition hall in Heijyo-kyu Palace site, Proceedings of AIJ KINKI Chapter Architectural Research Meeting, pp.385-388, 2015 (in Japanese)
桑原範好, 鉾井修一, 脇谷草一郎, 小椋大輔, 平城宮跡遺構展示館における露出展示遺構の劣化に関する研究, 建築学会近畿支部研究発表会, pp.385-388, 2015
 - 7) T.Ishizaki, N.Kuchitsu, T.Nishiura, J.Shimnek: Analysis of water regime in historical brick buildings in Ayutthaya, Thailand, Science for Conservation, No.38, pp154-163, 1999 (in Japanese)
石崎武志, 朽津信明, 西浦忠輝, ユッカシムネック: タイ国アユタヤの歴史的レンガ建造物中の水分移動解析, 保存科学, No.38, pp154-163, 1999
 - 8) Oita city board of education: Kunishiteishiseki Oita Motomachi Sekibutsu Hozonsyurijigyo Hokokusho, Oita, Sohrinsha, 1996 (in Japanese)
大分市教育委員会: 国指定史跡大分元町石仏保存修理事業報告書, 1996
 - 9) S.Hokoi, T.Ikeda, K.Nitta: Ace Kankyo Kougaku-Netsu, Shikki, Kanki-, Asakura-Shoten, 2002 (in Japanese)
鉾井修一, 池田哲朗, 新田勝通: エース建築環境工学II ―熱・湿気・換気―, 朝倉書店, 2002
 - 10) Andrew S. Goudie, Heather A. Viles: SALT WEATERING HAZARDS, Wiley, 1997
 - 11) R. J. Flatt: Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated, Journal of Crystal Growth, vol.242, pp.435-454, 2001
 - 12) M. Matsumoto: Shin Kenchikugaku Taikei, 10, Kankyo Butsuri, Shokokusha, pp.105-134, 1984 (in Japanese)
松本衛: 新建築学大系10 環境物理, 第3章 湿気, 彰国社刊, 1984
 - 13) Kumaran, M.K.: Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Final Report Volume 3 Task 3: Material Properties, International EnergyAgency ANNEX24, Laboratorium Bouwfysica, K.U. Leuven, Belgium, 1996
 - 14) Mavinkal K Kumaran: Thermal and Moisture Transport Property Database for Common Building and Insulating Materials, Final Report from ASHRAE Research Project 1018-RP, 2002
 - 15) Chiemi Iba, Ayumi Ueda, Shuich Hokoi, Frost Damage of Roof Tiles: A Study on Moisture Boundary Condition, Energy Procedia, 78, pp2530-253, 2015
 - 16) Japan Meteorological Agency. 2017. <<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>> [Accessed at October 24, 2017]
気象庁: 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp>, 2017.10.24 日閲覧
 - 17) Japanese Society of Soil Physics; Shinhen Dojobutsuri Yogojiten, Yokendo, 2002 (in Japanese)
土壌物理学会編: 新編土壌物理用語辞典, 養賢堂, 2002

NUMERICAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SALT DAMAGE BY IMPROVEMENT OF THE SHELTER

– Study on the conservation of a stone Buddha carved into a cliff at Motomachi PART 2 –

Nobumitsu TAKATORI^{*1}, *Daisuke OGURA*^{*2}, *Soichiro WAKIYA*^{*3},
Masaru ABUKU^{*4} and *Kyoko KIRIYAMA*^{*5}

^{*1} Ph.D. Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University /
JSPS Research Fellowships for Young Scientists

^{*2} Prof., Graduate School of Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

^{*3} Senior Researcher, National Institutes for Cultural Heritage Nara National Research Institute for Cultural Properties, Dr.Eng.

^{*4} Assoc. Prof., Faculty of Architecture, Kindai University, Ph.D.

^{*5} Ph.D. Student, Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University /
JSPS Research Fellowships for Young Scientists

In this study, we clarified how the shelter suppresses salt damage at Motomachi Sekibutsu, that is stone Buddha directly carved into a cliff at Motomachi, by calculating the hygro-thermal environment in the shelter. By numerical analysis, we modeled the cliff including the stone Buddha in two dimensions and the wall of the shelter in one dimension, and analyzed the heat and moisture behavior. In addition, we built a combining model to calculate the temperature and humidity in the shelter, and we verified the validity about the analytical results by reproducing the hygro-thermal environment in the shelter during the period from November 2014 to October 2017. We quantitatively estimated the risk of salt precipitation and salt damage by the hygrothermal properties in the stone Buddha, assuming that the amount of salt precipitation is proportional to the amount of evaporation from the statue and salt damage occurs during when salt(sodium sulphate) changes its phase. By using those models, we divide the renovation of the shelter into three elements: improvement of the thermal insulation, air tightness and shielding of solar radiation. The main results obtained by numerical analysis are described below.

1. By the renovation of the shelter, the amount of evaporation from the surface of the stone Buddha is suppressed by all the elements.
2. Focusing on the seasonal change in the amount of evaporation, it is possible to suppress the evaporation in summer, but difficult in winter except for the thermal insulation renovation.
3. In the study on the phase change of sodium sulphate, since the relative humidity in the shelter is higher than before the renovation and the hygrothermal property of the surface of the statue have become unfavorable to Thenardite, it is considered that the number of phase change about sodium sulphate is reduced. In other hand, if only we improve the air tightness, temperature in the shelter is kept high and it is easy for sodium sulphate to change its phase into Thenardite, so it may not be possible to say that the risk of salt damage has been generally suppressed.
4. When all the renovations are carried out (i.e. after the renovation), it is considered that the amount of salt precipitation and the the number of phase change about sodium sulphate are significantly reduced, so the risk of salt damage is suppressed.

Future issues are as follows. In Motomachi Sekibutsu, as a result of renovation of the shelter, the relative humidity in the shelter has become more humid throughout the year. In such a high humidity environment, there is a high risk of mold growth and we concern about the influence on the health of the visitor. In addition, as long as there is a huge water supply source such as groundwater, it is difficult to suppress the evaporation from the statue completely. Therefore, since salt is gradually accumulated in the stone Buddha, it is considered that the precipitation salt cannot be suppressed completely. In particular, the latter problem cannot be solved only by controlling the hygrothermal environment in the shelter, so we will start developing a technology to remove the salt accumulating in the statue. Furthermore, it is necessary to consider the preservation and exhibition method of Motomachi Sekibutsu based on the health risks of visitors and the preservation of the statue.

(2019年6月10日原稿受理, 2019年11月12日採用決定)