

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：32710

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K16341

研究課題名(和文)塩類風化を数値化する測定方法とその活用

研究課題名(英文)The method for measurement which digitizes salt weathering and the utilization

研究代表者

星野 玲子(HOSHINO, REIKO)

鶴見大学・文学部・准教授

研究者番号：90583485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：この研究は石造文化財及び岩盤の塩類風化に関するものである。これまでは塩類の含有量、劣化の度合いの客観的な比較、結晶のない石造文化財と岩盤に含まれる塩類などを知ることは困難だった。そこで、新たな方法で石造文化財と岩盤表面の塩化物イオンとしての値を測定した。その結果、摩耗して湾曲している箇所は高い数値を示し、状態の良い箇所は低い数値という傾向であった。また、碎屑物も同様の傾向である。そのため、塩化物イオンの測定は塩類風化を客観的に判断する上で効果的な方法と考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

文化財は所有者や管理者の力により維持・保存されており、そこに石造文化財の劣化に詳しい専門家が日常的に関与しないことの方が多い。そこで、専門知識や高度な技術を要することなく調査をしたり、劣化の進行度を判断できる本研究の測定方法は、誰でも簡単に多くの人が使うことができるという点において、広く一般的に利用でき意義のあるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research is related with the salt weathering of the stone monuments and the base rocks. The crystallized place is intelligible that salt weathering has occurred. But it was difficult to compare objectively that the content of salts and the state of degradation, and to get to know what salts are contained in the stone monuments and the base rocks without a crystal until now. Then, when the concentration of the chloride on the surface of the stone monuments and the base rocks was measured by a new method. As a result, the high concentration was detected in the place which curving greatly by abrasion. On the other hand, the surface of the stone monuments and the base rocks at a good state showed low values. In addition, a similar tendency was seen in the debris form thing. This measurement of the chloride ion is considered to be an effective method for judging salt weathering objectively.

研究分野：文化財科学

キーワード：塩類風化 石造文化財 測定方法 文化財科学 保存科学 劣化 塩害

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

石造文化財の多くは様々な要因に囲まれた屋外にあり、凍結・融解や乾湿の繰り返し、生物被害、物理的負荷などによる劣化が生じる。中でも塩類風化は特に深刻で、その対策は急務である。塩類風化は、結晶の析出によって石に悪影響をもたらすものとして知られている。析出する塩類の種類により殻状や皮膜状の硬質のものや、綿状や針状の軟質の結晶があり、結晶の成長圧や重みで石材が損傷する。しかしこの他に、明らかな結晶を伴わず石材が摩耗して凹凸を形成する状況が確認される。この状況も軟質の結晶同様、数年から数十年単位で著しく進行する。こうした状況において、そのメカニズムの解明や劣化の度合いを知ることは、その後の保存対策の検討に不可欠であるものの、客観的指標で劣化度を比較することが困難で、主観による判断に頼らざるを得なかった。そこで、こうした問題への取り組みの一つとして本研究に至った。

2. 研究の目的

石造文化財の塩類風化に着目し、新たな濃度測定方法を用いて石造文化財への影響を明らかにし、また今後の保存対策の検討に役立つ劣化度の指標を示すことを目的とする。

A. 石造文化財及び岩盤表面の含有量、B. 劣化によって落下した碎屑物や、石造文化財周辺の土壌中の含有量、この2種を対象とし、塩化物イオン（理論上、他の塩類を算出することは可能だが、今回は直接含有量を得られる塩化物イオンで判定）量を測定した。さらに石質・周辺環境・経年変化・他の劣化要因を含めた状態観察を行い、対象物について総合的に検討する。

この塩分濃度測定方法により、遠隔地の劣化状況を同一基準で検討することが可能になる。また、低予算でできることや、高度な技術を要しないという利点から、多くの人々が利用し、石造文化財の健康診断のような役割や、保存対策を講じる時期の検討に活用してもらえよう普及にも努める。

3. 研究の方法

本研究の主体は塩分濃度の測定であるが、目視観察はもちろん、対象となる石造文化財（岩盤）に関する歴史的背景及び基礎研究、温度、湿度、水分量、同一箇所に発生しているその他の劣化状況も併せて検討した。

（1）塩分濃度の測定方法

具体的な塩分濃度測定方法を以下に示す。理論値として様々な塩類の量を算出することが可能だが、本研究では測定して得られる一次情報の塩化物イオンから判断する。なお、申請の段階では塩化ナトリウムと塩化物イオン量としていたが、塩化ナトリウム量も塩化物イオン量を基に換算式から算出する理論値であるため、主に塩化物イオン量にて判断することに変更した。

A. 石造文化財及び岩盤表面の測定方法

この方法は、海辺の鉄橋脚の耐震診断などに用いる方法を石造文化財に応用した初の試みである。試料採取方法は、塗装表面の残留塩分濃度測定法（JIS Z0313・IS08502）を参考にしているが、測定範囲は石造文化財への負担の軽減や、調査対象物の大きさを鑑み5 cm×5 cmとした。石造文化財の測定については、この測定範囲を推奨する。

1. 測定範囲を水で濡らしたガーゼ（30 cm×30 cm）で縦横50回拭き取り、水（150ml）で濯ぐ。これを1サイクルとし計5回繰り返す。
2. 5サイクル後、濯ぎに用いた水に塩素イオン検知管（光明理化学工業株式会社製 201SC）を入れ、変色部の値を読み取る。
3. 換算式にて塩化物イオン量（ppm=mg/m²）を算出する。

$$\text{Cl}^- \text{濃度} = (\text{読取値} - \text{使用した水の読取値}) \times \text{水量} (\text{l}) \times \frac{1}{\text{面積} (\text{m}^2)}$$

石材表面に塩類が析出或いは付着していても、雨が直接かかると洗い流されるため、それ以前の量がわからなくなる。同様に、高温多湿の時期は塩類の飽和量も高くなるため、国内では一般的に塩類風化が生じやすい冬季に行くと最大量が検出できるだろう。ただし、石造文化財の置かれている環境を知ることは、今後の保存対策を講じる際の参考となるため、急務でない場合は冬季以外も実施し、石造文化財の置かれている環境変化を比較するとよい。

B. 碎屑物や土壌の測定方法

この方法は農地の土壌測定に用いる方法である。

1. オープンで碎屑物（土壌）を乾燥させる。なお、乾燥させず現地でも測定することも可能だが、より精度を高める場合は乾燥させた方がよい。
2. 乾燥させた碎屑物10gと水50mlを攪拌し、濾紙（コーヒーフィルターでよい）で濾す。
3. 濾した水溶液に土壌中塩分用検知管（光明理化学工業株式会社製 201DL）を入れ、変色部の値（%）を読み取る。なお、厳密には使用する水に含まれる量を差し引くが、多くの場合ごく微量であるため、そのまま読取値を含有量と考えてもよい。

(2) 塩分濃度測定以外の調査

塩類風化は、湿度と水が大きく関わるため、適宜湿度測定や赤外線サーモグラフィによる表面温度測定、水分量測定、塩類風化以外の劣化状況の確認、対象物の歴史的背景の把握、析出物の抑制、塩化物イオン以外の塩類が本測定方法に与える影響の検討などを併せて実施した。

(3) 調査対象

主にデータ収集を実施した調査地域は、神奈川県、千葉県、静岡県、東京都などである。石質は凝灰岩が最も多く、他に安山岩、花崗岩、泥岩、煉瓦、比較対象として金属製品も対象とした。Aを実施した石造文化財や岩盤の用途・形状は、人工的な加工の施されていない露頭の岩盤、石切場、擁壁、石垣、横穴状遺構、トンネル、階段、建物、門といった大型のものから、墓石を含む各種石塔、石仏、燈籠、切石、煉瓦製の建物と煉瓦製の花壇など様々である。

この測定方法は、特殊な機器を用いないため、機器のある場所に試料を持ち帰って計測する必要がなく、また持ち運び可能な道具しか使用しないため、現地で測定し、その場で結果を得ることができる。そのため、現地状況と測定値の関係を考えつつ、測定箇所を効率よく選定することができることも利点である。

4. 研究成果

(1) A. 石造文化財と岩盤表面の塩分濃度について

全ての調査データの最高値は、神奈川県逗子市にある大切岸（中世に築かれた切り立った崖）の59400ppmであった。これほどの値を示す場所はこの大切岸以外にはなかったが、10000ppm以上の測定値は他の地域においても多く見られた。一方、最低値は0ppm、即ち塩化物イオンを含まないことを示す。塩化物イオン量と現状の対比から、劣化の度合いについて大まかな指標を考察した（表1）。各地のデータを分析すると、含有量と見た目の状況を明確に線引きすることは難しいため、「大まかな」とした。また、調査地点と検出値の例を以下に示した。

表1. 劣化の度合いと石造文化財及び岩盤表面の状態

塩化物イオン量	調査箇所の状態
0~1000ppm 程度	見た目が良好で表面は比較的硬く、触れても粒子が手につかない。雨の後の特に平滑面は、洗い流され0ppmになることが多い。なお、2018年3月の嵐（所謂春一番）後に千葉県富津市金谷港近くの窓ガラスの飛来塩を測定したところ、多い所で約400ppm、窓の前に木があり妨げとなっている窓ガラスは約20ppmであった。
1000~3000ppm 程度	見た目は比較的良好であったり、やや摩耗していたり様々である。例えば塩類を含有していても、比較的水分量が多く飽和状態を持続できる場合は、損傷を与えず進行速度が遅いが、乾湿を繰り返す環境ではこの範囲の含有量でも摩耗や表層剥離が進行しやすい。
3000~6000ppm 程度	摩耗し表面に窪みを形成していることが多い。
7000ppm 以上	更に表面が摩耗し数cm~数十cm、大きい所で1m以上のノッチと呼ばれる窪みや、楕円形の棚状の穴であるタフォニが形成されている。風や僅かに触れただけで粒子が落ち、周囲に落下した碎屑物が堆積していることが多い。劣化速度は非常に速い。



燈籠（安山岩）0ppm



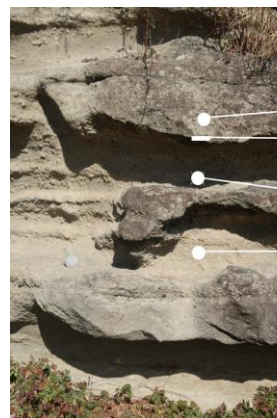
塀（凝灰岩）1920ppm



塀（凝灰岩）5400ppm

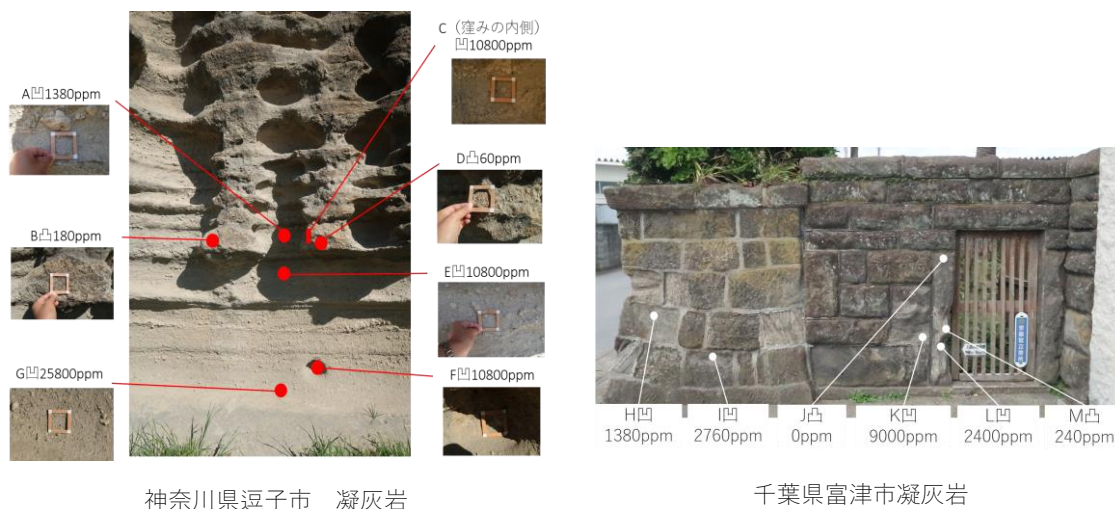


塀（凝灰岩）16500ppm



D凸: 120ppm
E凸: 4200ppm
F凹: 13800ppm
G凹: 40320ppm

神奈川県逗子市凝灰岩



(2) B. 碎屑物や土壌の濃度測定について

碎屑物や土壌は見た目の状況からある程度予測のつく A と異なり、元々の地質によって色や粒径が様々で、これだけでは塩類の含有状況を推察することは困難であるため、堆積する碎屑物の採取が可能な場合はやはり実際に測定するとよい。

この方法の利点は、試料が既に石造文化財（母岩）から分離しているため、調査による資料破壊にはならないという点である。碎屑物は元の姿を留めない粉末状になっており、剥離片のように修復（接合）作業にて元の位置に戻すことは不可能である。そのため、母岩に新たな負担をかけずに状態を知る手がかりを得ることができる。また、石造文化財と接地している土壌を調べることで、塩類の侵入経路を考察することも可能である。例えば土壌から高濃度の塩類が検出されたら、土壌と石造文化財が設置しないように別の石やコンクリートなどで遮断する対策を考えるとよい。一方塩類が検出されなければ、供給源は他にあるということがいえるため、劣化原因の可能性を絞り込む材料としても役立つデータとなる。また、亀裂や欠損箇所の充填には仕上がりの良さを考え、色や質を合わせるため充填剤と碎屑物を混合させることも案の一つだが、もし碎屑物が塩類を含有していたら再び母岩に塩類を供給することになってしまうため、碎屑物の混入は避けるべきである。このように、修復方法の検討材料としても有効であると考えられる。

代表的な事例を表 2 に示した。なお、農地に利用する土壌の基準、つまり農作物に影響の出ない値は 1.0%未満とされている。測定データを見ると I・II・V のように A（石造文化財表面の含有量）が高い箇所は B（碎屑物）の測定値も高く、A が低いと B も低いという両者の関係性を示した。また、脆弱化した石材表面は、僅かに触れただけで剥離する可能性があるため、その際は A の測定を避けた方がよいという制約が生じる。その点 B は石造文化財そのものに触れる必要がないため、碎屑物から母岩の状態を考える際の目安として使用することは差し支えない。但し、中には母岩の値（A）が高く碎屑物（B）は低い、或いはその逆の場合（表 2 の IV）もあるため、B だけで A の状態を確実に把握できるとは限らない場合もある。III は I・II に比べると A の値が低いものの、表 1 に記したように 5040ppm という値は、劣化が既に進行していることを示している。

表 2. 測定結果

	B の測定値 (%)	A の測定値 (ppm=mg/㎡)
I	1.7	59400
II	1.6	25800
III	1.4	5040
IV	0.4	20400
V	0.2	300

(3) 塩分濃度測定以外の調査について

多くの石造文化財がある屋外の環境では、様々な劣化が複合的に生じている。そのため、塩類風化だけを見るのではなく、他の損傷原因や置かれている環境を把握することも今後の保存を考える上で必要となる。

結晶の有無に関わらず、温湿度の低下や乾湿の繰り返しで生じやすい劣化は多い。神奈川県の横穴状遺構内の温度を調査したところ、夏季・冬季ともに屋外よりも変動幅が小さかった。一方湿度は夏季が 90%台を推移するのに対し、冬場は 20%台にまで低下することがあり、この温湿度変化により、毎年冬場に硫酸マグネシウムと思われる結晶が大量に析出する。そこで、石材表面をビニールシートや気泡緩衝材などで覆ったところ、石材表面の水分蒸発が抑制され、石材表

面は水分を含む濡れ色を呈し、覆いの内側に水滴がつくほどであった。そしてこの措置をした箇所は塩類が結晶化しないことを確認した。また、地面と石塔の間を同様の材料で遮断したところ、塩類の析出量が減少した。今回測定している塩化物イオンは顕著に結晶が認められないが、塩化物イオン量の多い場所に対しても、塩類風化のメカニズムを考えると同様のことが予測できる。この温湿度と水分量を整えることの必要性は、全国の先行研究事例からからもいえることである。また、苔や地衣類は塩類に強い種もあるというが、多くの場合高濃度の塩分環境下での活動は困難であるため、これらの見られる場所はある程度水分を保持しており、塩類風化の懸念は小さい。

調査対象物によっては、その構築年代や修理の変遷が分かっているものもあり、塩類風化速度を考える手がかりになった。また、これまでの地震や台風のような災害による被災履歴もその文化財の損傷原因を知る上で欠かせない。さらに過去の写真と照らし合わせることで、摩耗や剥離の進行状況を知ることができた。現在、表面に刻まれた文字や文様に亀裂や摩耗が生じつつある光景を目にする。また、本研究の期間内においても剥離が進み、表層が失われた箇所も確認している。本来、このような状況に対し早急な対処が理想だが、様々な事由から困難な場合、せめて現状を記録しておくことも、この数年或いは数十年の間の変化、及び劣化の進行速度の判定の際重要である。

(4) まとめ

塩分濃度測定に用いる道具のうち、検知管は1本約300円である。その他いずれの道具も安価で入手しやすいものばかりである。また、大型で現地に持ち運べなかったり、特殊で高価な機器を必要としない。さらに、高度な技術を必要とせず、誰でもいつでも短時間で簡単に測定すること可能であり、調査費用を抑えることもできる。文化財の維持や修理費用は、確保することが難しいのが現状である。例え修理に対する費用を設けることはできても、保存措置が必要か検討するための調査・委託費用を確保するのはなおさら厳しい。そこで、所有者や管理者自らが低予算で短時間に調査できることは、大きな利点といえよう。この調査結果をもとに、近いうちに修復の必要があれば予算を立て、またその際の根拠としてこの測定データを利用できると考える。反対に健全な状態であれば、しばらくは経過観察を続ければよいという判断ができる。

何より最大の利点は薬品や樹脂を用いず、石材に与える影響が小さいことである。しかし、表面が脆弱化してわずかな衝撃で剥離しそうな面や、拭き取りによって彩色が剥がれる可能性のある場合は、測定を避けた方がよい。そこで、脆弱化した場所でなおかつ周辺に堆積物がある場合はBを併用し、母岩の状況を予測するとよい。

これまで遠隔地同士の状況を比較する際は、主観的な判断に頼らざるを得なかったが、本研究で用いた測定方法は塩分濃度を数値で示すため、個々の場所で誰でも用いることのできる方法であると同時に、客観的な指標として広範囲の比較検討に利用できる。以上のことから、今後の塩類風化の研究、及び保存対策の一つの方法として本研究を提案する。

謝辞 最後に、調査に際しご協力を賜りました皆様に心より御礼申し上げます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 57
2. 論文標題 塩類風化による岩盤表面の凹凸の形成 大切岸の事例	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鶴見大学紀要 第4部 人文・社会・自然科学編	6. 最初と最後の頁 91-104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 16
2. 論文標題 石切場と石材消費地における劣化状況について 鋸山の岩舞台の塩類風化を中心に	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 文化財学雑誌	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 56
2. 論文標題 房州石の劣化に関する調査－金谷ステーションの事例－	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鶴見大学紀要 第4部 人文・社会・自然科学編	6. 最初と最後の頁 119 - 127
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） info:doi/10.24791/00000498	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 15
2. 論文標題 登録有形文化財 鈴木家石蔵の劣化調査	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 文化財学雑誌	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 55
2. 論文標題 久能山東照宮の石燈籠の劣化に関する研究(1)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 鶴見大学紀要 第4部 人文・社会・自然科学編	6. 最初と最後の頁 29 47
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) info:doi/10.24791/00000190	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 8
2. 論文標題 房州石の健康診断 鈴木家の石塀と塩害	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 房州石の歴史を探る	6. 最初と最後の頁 22 35
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 星野玲子	4. 巻 54
2. 論文標題 鶴見大学文化財学科所蔵 近世墓石の科学的調査	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 鶴見大学紀要 第4部 人文・社会・自然科学編	6. 最初と最後の頁 125 - 134
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) info:doi/10.24791/00000223	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件(うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 金谷ステーション駐車場の石塀における 劣化調査
3. 学会等名 第11回金谷石のまちシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 碎屑物と土壌から塩類風化を判断する方法
3. 学会等名 日本文化財科学会 第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 横浜赤レンガ倉庫の煉瓦に関する現状調査 2019～2020年
3. 学会等名 文化財保存修復学会 第42回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 石の劣化と塩類風化の調査方法
3. 学会等名 第10回金谷石のまちシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 春一番と塩分濃度
3. 学会等名 第10回金谷石のまちシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 岩盤の劣化－日本寺護摩窟の例－
3. 学会等名 第10回金谷石のまちシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 金谷ステーション駐車場の石堀における劣化調査
3. 学会等名 第10回金谷石のまちシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 塩類風化被害の遠隔地の比較
3. 学会等名 日本文化財科学会 第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 石切場の劣化と塩類風化 鋸山 岩舞台の事例
3. 学会等名 文化財保存修復学会 第41回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 塩化物イオンによる岩石表面の凹凸の形成
3. 学会等名 日本文化財科学会 第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 房州石製石塀の塩類風化と塩化物イオン測定時の注意
3. 学会等名 文化財保存修復学会 第40回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 房州石の健康診断 - 鈴木家の石塀と塩害
3. 学会等名 第9回金谷石のまちシンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 星野玲子・橋本直樹
2. 発表標題 石造文化財表面に発生する析出物の抑制に関する研究
3. 学会等名 文化財保存修復学会 第38回大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 星野玲子・橋本直樹
2. 発表標題 石造文化財における析出物抑制対策の効果と課題
3. 学会等名 日本文化財科学会 第34回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 星野玲子
2. 発表標題 久能山東照宮の石燈籠の劣化に関する研究
3. 学会等名 文化財保存修復学会 第39回大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考