

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：84604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K01135

研究課題名（和文）塩類風化が進行する遺跡構成材料からの効果的な脱塩方法の開発

研究課題名（英文）Development of effective salt weathering control methods for archaeological site components undergoing salt weathering

研究代表者

脇谷 草一郎（Wakiya, Soichiro）

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・室長

研究者番号：80416411

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は屋外に位置する遺跡を現地保存する際に、世界各地で問題となっている塩類風化を抑制する手法を検討したものである。この目的のために、塩類風化のリスクを予測するための電気伝導率センサーを用いた遺跡現地における塩濃度測定技術の開発、主に煉瓦組積造建築物を対象として煉瓦からの電気的脱塩法の基礎的検討、脱塩が不可能な地盤遺跡において、遺跡表面における塩析出を抑制する適切な埋め戻し方法の開発、以上のテーマについて基礎実験をおこなった。については遺跡の現地保存を実施している現場において実践的研究をおこない、については塩類風化の抑制に対して非常に効果的であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヴェニス憲章によって遺跡は現地保存されることが世界標準となっている。そのため遺跡には周辺地盤から水、塩が供給され続けており、遺跡保存における塩類風化対策は地域を問わない普遍的な課題と言える。塩類風化対策として、過去には合成高分子材料による遺跡の強化処置や、遺跡保存施設を設置し、内部で空調設備を運用する事例が散見されるが、これらは環境への負荷、持続可能性という点において課題が多い。本研究はエネルギー消費を伴う塩害対策を最小限とする塩害リスクを予測する技術の確立、化学薬品に拠らない土の物性による塩析出の抑制方法を目指すもので、今日世界が抱える諸課題と遺跡保存の両立を可能とする基礎研究と言える。

研究成果の概要（英文）：This study examines methods to control salt weathering, which is a problem in many parts of the world, for the on-site preservation of archaeological sites located outdoors. For this purpose, we conducted basic experiments on the following themes: 1) development of on-site salt concentration measurement techniques using electrical conductivity sensors to predict the risk of salt weathering, 2) basic investigation of electrical desalination methods from bricks, mainly for brick masonry structures, and 3) development of appropriate backfilling methods to control salt deposition where desalination is not possible. (3) Development of an appropriate backfilling method to control salt precipitation on the surface of archaeological sites where desalination is not possible. Practical studies on (1) and (3) were conducted at sites where archaeological sites are being preserved on-site, and (3) was confirmed to be very effective in inhibiting salt weathering.

研究分野：保存科学

キーワード：塩類風化 脱塩 遺跡の現地保存 環境調整 電気伝導率 埋め戻し 透水性 塩析出の抑制

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

いわゆるヴェニス憲章のもと、遺跡はそれらが立地する現地で保存されることが原則とされている。したがって、遺跡は周辺の地盤と切り離すことが出来ず、地盤内部を移動する水の影響を受け一方で、覆屋と呼ばれる保存施設を伴うことが一般的であるため、遺跡表面では水分蒸発が卓越した環境となる。地盤内部を移動する土中水、地下水中には、遺跡が立地する地域によって多寡はあるものの、何等かの溶存成分が含まれるため、これらを含む水が遺跡表面で蒸発すると、遺跡表面近傍では溶存成分や温湿度条件に応じて様々な塩が析出する。

このように遺跡を構成する土壌や石材あるいはレンガなどの表面で塩が析出すると、これらの材料表面の粉状化や層状の剥離が生じることになる。たとえば装飾古墳や磨崖仏では表面に顔料などによる彩色や精緻な彫刻が施されており、あるいはこのような装飾を伴わないものであっても、石材表面に製作当時の加工の痕跡が残されているため、表面一層を失うことは文化財として大きな価値の滅失になる。

このような塩害に対する遺跡の保存対策としては、これまで石材など材料の強度を向上することを目的とした基質強化処理が主として実施されてきた。しかし、これらの処理によって得られる強度は塩が析出する際に生じる応力に対して決して十分なものではないこと、また塩が析出する環境の改善を伴っていないため、継続して塩が析出による劣化が進行した事例が散見される。塩の種類によって析出し得る相対湿度の閾値が温度ごとに明確に定まっており、その値よりも高い相対湿度環境下では塩は溶液の状態でのみ存在するため、材料の破壊を引き起こす応力を発することがない。そこで、申請者らは硫酸ナトリウムの析出による劣化が顕著に進行していた磨崖仏を対象に、外界気象および保存施設内部の環境条件について実測調査をおこない、周辺環境が塩析出に対して及ぼす影響について検討した。そして、その成果に基づいて、保存施設の気密・断熱性を向上させることで磨崖仏周辺の温熱環境の改善をはかり、硫酸ナトリウムの析出を抑制し、塩析出による磨崖仏の劣化の進行を抑制することに成功した。このように、塩の析出を抑制する遺跡の保存環境を構築することで、塩析出による遺跡の劣化進行を抑制することには成功した。しかし、引き続き遺跡を構成する材料表面には高濃度の塩が蓄積されていることから、保存施設の気密性等にはほころびが生じた際には、再び塩析出による劣化のリスクが高まる可能性があると言わざるを得ない。以上のことから、保存施設の適切な運用による保存環境の調整と合わせて、材料表面に農集する塩を適切に除去する脱塩技術と、劣化リスクが遺跡周辺の保存環境に依存しない保存方法の開発が求められている。

## 2. 研究の目的

先述の通り、本研究の最終的な目的は、塩析出による遺跡の劣化を抑制することである。この目的のために、以下に示す小テーマについて、調査・研究を実施した。

### 遺跡を構成する多孔質材料中の塩移動を適切に予測するモデルの構築

遺跡を構成する多孔質材料中を移動する水が塩水の場合、その移動に関する挙動は純水とは異なることが知られている。遺跡表面に向かう塩の移動によって高まる塩害のリスクを適切に評価するために、また脱塩を行なう場合においても多孔質材料に含まれる水中の塩移動を適切に予想するためにも、多孔質材料中の塩移動を予測するモデルを構築する。このテーマについては共同研究者である京都大学工学研究科の小椋教授、高取助教が中心となって進めた。

### 遺跡現地において多孔質材料中の塩濃度をモニタリングする技術の開発

で構築したモデルの妥当性を評価するとともに、遺跡現地において塩害による劣化リスクと脱塩を実施した場合の効果の評価するために、多孔質材料中の塩濃度をモニタリングする手法を開発する。

### 遺跡現地において塩害による劣化の進行を定量的に評価する手法の検討

塩害が進行する遺跡現地において、塩害による表面形状の変化が生じた場所を把握するとともに、その変化量、変化速度を定量的に把握することは塩害への対策を講じる上で重要な知見となる。近年、三次元計測技術の進歩によって精度は飛躍的に向上したものの、計測には時間と専用の機材を必要とする。そこで、本研究では通常のスチルカメラで撮影した写真から簡易に三次元データを作成可能な SfM-MVS (Structure from Motion and Multi-View Stereo、以下 SfM と記す) の技術を用いて、遺跡で塩害によって生じる表面形状の変化と、変化速度の把握を試みた。

### 電気的脱塩法による多孔質材料からの脱塩法の検討

レンガを試験体として用い、試験体両端に電極を密着させて外部電圧を印加することで、材料内部に溶存する塩を電気泳動によって電極周辺に移動させて除去する手法を試みた。既往研究

では脱塩効率の向上を目的として、外部電圧や試験体と電極間の充填材料などについての最適化が図られている。本研究では、電氣的脱塩法による塩移動のモデル化に主眼をおき、主に蛍光 X 線分析法による元素マップの測定から、試験体内部での塩分布の可視化を試みた。

#### 埋め戻しによる遺跡表面への塩移動を抑制する手法の開発

ここでは地盤遺構を対象とした塩害抑制手法について検討した。建造物の柱穴など、遺跡である地盤そのものを保存施設内部で展示する場合、そのエリアが広範囲におよぶことが一般的であり、遺跡表面からの脱塩の実施は現実的には実施不可能である。このような場合、遺跡としての価値を有する範囲（遺構と呼ぶ）以外のエリアを適切な材料で埋め戻すことで、地盤表面への塩移動を抑制する方法が有効と考えられる。ここでは透水性が異なる材料を用いて地盤表面の埋め戻しをおこない、盛土表面への塩移動の抑制効果について検討した。

### 3. 研究の方法

先述の通り、[図 1](#)については共同研究者である京都大学工学研究科の小椋教授、高取助教が中心となって進めたテーマのため、ここでは上記 [図 1](#) から [図 2](#) について記す。

#### 遺跡現地において多孔質材料中の塩濃度をモニタリングする技術の開発

材料中の含水率及び電気伝導率の正確な測定は、それぞれガンマ線透過型水分計と 4 極センサーを用いることにより可能であるが報告されているものの、これらは遺跡が位置する屋外での実装が難しい。そこで、ここでは電気伝導率を測定可能な土壤水分センサー、METER 社製 TEROS12 含水率（以下 T12 と称す）を用いた測定結果から、遺跡現地において煉瓦中の含水率および塩分量を推定することを目的とした実験をおこなった。

4 極センサーの測定値は、個々のセンサーに対する換算式を用いることで材料の種類に依らず電気伝導率を得ることが可能である。そこで、電気伝導率が既知である塩溶液を測定することで換算式を得た。次に、純水と 3 通りの濃度の塩化ナトリウム水溶液の合計 4 通りの水溶液を調製し、これらがそれぞれ体積含水率 5%、10%、および 15% となるよう、合計 12 種類の土壤試料を調製した。得られた結果について、以下に示す Rhoades らによる測定方法を基に検討を行った。Rhoades らの測定方法では、土壤の電気伝導率  $EC_a$  [mS/cm] と土壤間隙水の電気伝導率  $EC_w$  [mS/cm]、土壤の電気伝導率のうち固相表面の寄与分  $EC_s$  [mS/cm]、土壤の体積含水率  $\theta$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>] の関係は定数  $a, b$  を用いて、

$$EC_a = EC_w \theta(a\theta + b) + EC_s \quad (1)$$

と表すことができる。本実験で用いた砂質土は粘土質を含まないため、体積含水率が 0 では  $EC_s$  を 0 として扱える。したがって、材料に対応する  $a, b$  を決定すれば土壤の電気伝導率  $EC_a$  と体積含水率  $\theta$  から土壤溶液の電気伝導率  $EC_w$  を求めることができ、塩の種類が特定され溶液の塩濃度と電気伝導率の関係が予め得られていれば、材料中の塩濃度を推定することが可能となる。

#### 遺跡現地において塩害による劣化の進行を定量的に評価する手法の検討

塩害が著しく進行する神戸市煉瓦倉庫の煉瓦壁（[図 1](#)）を対象に、壁体内部の水分および塩の分布を推定するとともに、壁体が接する空間の温熱環境の実測調査を実施した。塩は壁体の下半に析出箇所が集中するとともに、特に中央部付近で煉瓦の劣化が最も顕著であった。また、高さによって析出する塩の種類も異なっていることが明らかとなったことから、目視だけではなく、塩害の発生箇所と進行速度を定量的に評価することを目的として、SfM によりレンガ壁の簡易三次元モデルを定期的に作成し、その差分を抽出した。写真撮影に用いたカメラは Olympus 社製、Tough TG-5、SfM による三次元モデルの作成には Agisoft 社製の Metashape Pro を用いた。

#### 電氣的脱塩法による多孔質材料からの脱塩法の検討

[図 2](#) に実験の模式図を示す。焼成煉瓦（60 mm × 60 mm × 100 mm）を供試体として用い、側面をパラフィルムで断湿した。脱塩実験に先んじて供試体を純水で洗浄したのち、乾燥させた煉瓦に NaCl 水溶液（10 wt%）を大気圧条件下で飽和になるまで含浸させた。煉瓦の両端には、陽極側で水の電気分解に伴う pH の低下を防ぐために、炭酸カルシウム、カオリン、純水を混合したペーストを充填した。電極には白金電極（100 mm × 100 mm × 1 mm）を用い、a) 通電なしで 67 時間維持、および直流電源装置を用いて 20V の電圧を印加して、b) 18 時間、c) 67 時間の 3 条件で電氣的脱塩実験を行った。実験後の煉瓦を通電方向と並行に 2 分割し、それぞれ IC と XRF によって分析した。IC 分析に用いるものは 1 cm 間隔（中心のみ 2 cm）で分割し、微粉体にした。微粉体と超純水を重量比 1 : 50 で混合させたものを



図 1 神戸煉瓦倉庫の煉瓦壁



振とう、ろ過、希釈したものを分析に供した。XRF 分析は試料室をヘリウムガスパージして測定をおこない、煉瓦試験片中のナトリウム及び塩化物イオンの二次元マップ測定を実施した。

### 埋め戻しによる遺跡表面への塩移動を抑制する手法の開発

福井県立一乗谷朝倉氏歴史博物館では、館内において石敷き遺構を含む、20m×43mの広大なエリアで地盤遺構の露出展示を実践している（図3）。石敷き遺構周辺の地盤は河川堆積物の比較的細粒、粘質土からなっており、施設近傍を流れる足羽川によって遺構周辺地盤の地下水位が支配されていることから、露出展示地盤表面は常に高い含水状態にあった。石敷き遺構周辺の地盤は発掘調査後、砂質土と元の粘質土をそれぞれ5cm、20cmの厚さで埋め戻され、保護が図られた（図4）。しかし、露出展示後、地盤表面は引き続き高い含水状態にあったため、カビや藻類の繁茂、石材表面に塩の析出が認められ、これらの進行を抑制する対策が求められた。

本研究では上記の通り、対象となるエリアが非常に広大であることから、塩害への対策として脱塩は適切ではないものと考え、地盤表面への塩移動を抑制することを目的として地盤の埋め戻し方法を検討することとした。当初、地盤表面を覆っていた土壌は細粒の粘質土であったことから（図4中のB、C）、透水性が低いものの保水性が高く、地盤表面は常に高い含水状態にあったと考えられた。そこで、施設内部で露出展示されている地盤のうち、遺構を含まない領域で1.5m四方の試験区画を3カ所を選定して地盤表面にアクリル板を用いて仕切りをおき、図4に示すように3通り（B～D）の遺構地盤の埋め戻しをおこない、各土層中の含水率変化をモニタリングした。そしてDに示すように、粘質土表面を粗粒の砂質土で覆うことで地盤表面の含水率を低減させ、塩害やカビなどの繁茂に対する抑制効果を評価した。

## 4. 研究成果

### 遺跡現地において多孔質材料中の塩濃度をモニタリングする技術の開発

図5に土壌を測定した際の4極センサーの測定値から換算した電気伝導率とT12で測定した電気伝導率の比較を、図6に土壌に対して設定した体積含水率とその土壌に対してT12で測定した体積含水率の比較を示す。図7よりT12の含水率の測定値は塩濃度の影響を受けていることが分かる。T12で測定した体積含水率を換算する際に設定値 $\theta_s$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]とT12での測定値 $\theta_m$  [cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>]の関係が土壌の電気伝導率の一つの関数として表されるように関係式を作成した（式(2)、図8）。

$$\theta_s / \theta_m \times (\theta_s - \theta_m) \quad (2)$$

式(1)に既知の土壌間隙水の電気伝導率及び4極センサーで測定した土壌の電気伝導率、体積含水率の設定値を各土壌について代入し、最小二乗法により定数 $a$ 、 $b$ の値を求めたところ $a=2.42$ 、 $b=-0.800$ となった。この $a$ 、 $b$ の値と4極センサーやT12の測定値を換算した値を用いて土壌溶液の電気伝導率を計算し、実際の土壌溶液の電気伝導率との誤差率を算出した結果を表1に示す。

電気伝導率は4極センサー、T12のどちらの測定値からの換算値から換算しても低い誤差率に抑えられておりある程度の確度で測定・換算が行えていることが分かる。一方、含水率はT12の測定値からの換算値を用いた場合のみ極端に誤差率が高く、現状ではT12による含水率の測定あるいは測定値の換算のいずれかに課題があると考えられた。

a) 実験装置の模式図

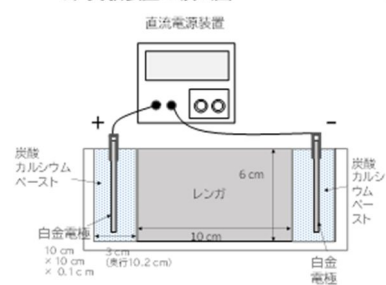


図2 電氣的脱塩実験の概要



図3 博物館内の石敷き遺構



図4 遺構地盤の埋め戻し方法

図4に示すように、粘質土表面を粗粒の砂質土で覆うことで地盤表面の含水率を低減させ、塩害やカビなどの繁茂に対する抑制効果を評価した。

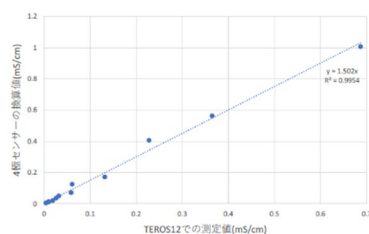


図5 4極センサーとT12の電気伝導率比較

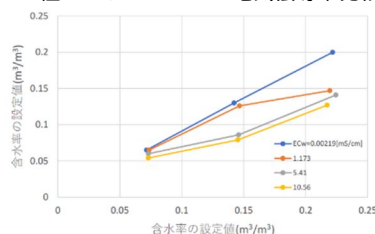


図6 含水率の設定値とT12による測定値比較

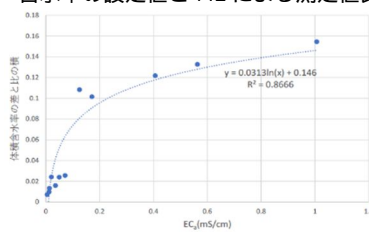


図7 電気伝導率と(2)式から得られる値の相関

### 遺跡現地において塩害による劣化の進行を定量的に評価する手法の検討

調査対象とした神戸煉瓦倉庫壁面の調査開始時の状態として、2022年6月に撮影した写真から3次元モデル作成し、さらに、半年後の2022年12月に撮影した写真から作成したモデルとの差分画像を図8に示す。図中、緑色を呈する箇所は表面形状の変位が認められなかった領域で、青色を呈する箇所では壁面表面が窪んだ領域を示す。

図8の結果から、レンガ壁上部および下部では表面形状に変化が認められない一方で、中央部(白色破線囲み範囲)ではわずかに青色を呈する領域が認められた。以上の結果から、半年間で塩害によって煉瓦倉庫壁面の崩落が進行する領域が確認出来たとともに、変位体積を算出することで崩落量を推定することが可能と考えられた。

### 電気的脱塩法による多孔質材料からの脱塩法の検討

図11に煉瓦内含まれる塩分布の分析結果を示す。通電せず濃度拡散のみ生じる場合と比べ、通電した場合は陽極側の炭酸カルシウムペーストにClとCa、陰極側にNaが多く含まれており、同じ脱塩時間でも多くの塩が除去されていることが分かる。特に条件c)(通電あり20V、67時間)の条件では、Clはほとんど除去されているのに対してNaが残存しており、陽イオンと陰イオンの移動は必ずしも並行して進行しておらず、Naの方が除去さらばらいことが示唆された。XRFによる元素マッピングの結果でも、Naの分布特性についてはIC分析と同様に陰極側に寄って分布する傾向が見られた(図12)。また元素マッピングでは、c.通電あり20V、67時間の条件で、上下分布差が確認された。長時間脱塩を行う際は、炭酸カルシウムペーストの分離や重力の影響といった要素も考慮する必要性を示唆している。

表1 EC<sub>w</sub>の誤差率

用いた体積含水率	用いた電気伝導率	誤差率(%)
設定値	4極センサー	9.78
設定値	T12	16.6
T12	T12	82.7

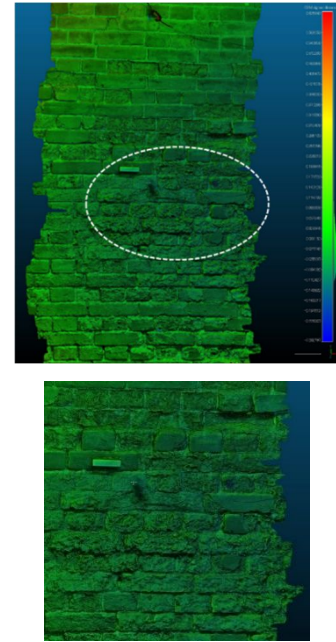


図8 壁面三次元データの差分画像(左:全体、右:中央部拡大)

### 埋め戻しによる遺跡表面への塩移動を抑制する手法の開発

本調査結果については、現在論文の投稿準備中であるため、地盤の各土層中の水分化学ポテンシャル測定結果は割愛する。実測調査の結果、遺構地盤を露出した場合(図4中A)では、遺構地盤表面の水分化学ポテンシャルが大きく低下しており、クラックの発生といった劣化の発生が認められた。遺構地盤を砂質土で覆い、さらに粘質土で埋め戻した場合(図4中B)では、遺構地盤面は高い含水状態を維持しており、クラックなどの劣化が抑制された状態と推測される一方で、粘質土も高い水分化学ポテンシャルを維持しており、地盤表面にカビや藻類の繁茂などが将来発生することが予想される。一方、遺構地盤を砂質土と砂利で覆い、その表面を粘質土で埋め戻した場合(図4中C)遺構地盤はBと同様に高い水分化学ポテンシャルを維持しつつ、粘質土の水分化学ポテンシャルは大きく低下した。この場合、Bで懸念されるような粘質土表面でのカビや藻類の繁茂は抑制される一方で、粘質土であるためクラックの発生が懸念される。さらに粘質土を粗粒の砂質土で覆土した場合、同様に遺構地盤は高い水分化学ポテンシャルを維持しつつも、表層の砂質土の水分化学ポテンシャルは大きく低下した。最表層の砂質土では乾燥が進行しても塩析出やクラックなどの劣化現象を抑制し得た。以上の実測調査結果から、異なる透水性状を有する土壌を適切に組み合わせることで、遺構地盤の含水状態を埋蔵環境にある時と同様に安定して高い状態に維持しつつ、地盤表面ではカビや藻類の繁茂といった高い含水状態に起因する劣化を抑制し、かつ塩析出やクラックといった乾燥にともなう劣化も同時に抑制することに成功した。塩の除去を現実的に実施することが困難である広大な面積を有する遺跡においては、塩害を抑制しつつ遺跡を安定した水分状態に維持し得る有効な手法と言える。

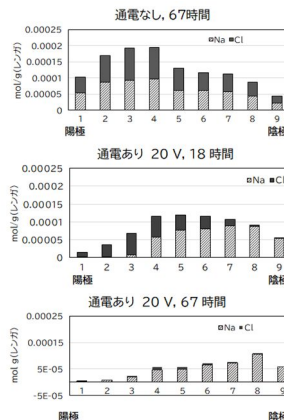


図11 イオンクロマトグラフィによるレンガ供試体中のイオン分布

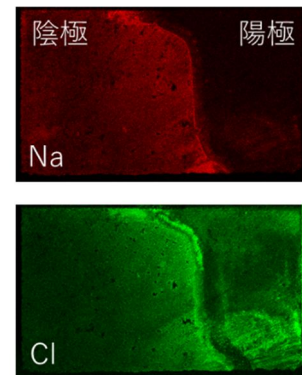


図12 煉瓦試験体(条件c))断面の元素マップ測定

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 藤井佐由里、渡邊英明、脇谷草一郎、柳田明進	4. 巻 2021
2. 論文標題 博物館内における遺構の展示手法と周辺環境の最適化に関する研究 - 遺構展示室内における遺構の展示環境の調査 -	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 一乗谷朝倉氏遺跡資料館紀要2021	6. 最初と最後の頁 47-62
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 Nobumitsu Takatori, Kotaro Sakai, Daisuke Ogura, Soichiro Wakiya, and Masaru Abuku	4. 巻 5
2. 論文標題 Measurement of sodium chloride solution permeability and sorptivity in tuff stone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SWBSS 2021	6. 最初と最後の頁 163-171
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 有
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 杜之岩・脇谷草一郎・高妻洋成	4. 巻 81
2. 論文標題 乾湿風化による軟岩製石造文化財の劣化メカニズムの検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 文化財科学	6. 最初と最後の頁 23-36
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 有
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 Du Zhiyan, Soichiro Wakiya, Yohsei Kohdzuma	4. 巻 14
2. 論文標題 Deterioration Mechanism of Japanese Sandstone during the Drying and Wetting Cycles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone	6. 最初と最後の頁 443-48
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 有
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 Sayuri Fujii, Kyoko Kiriya, Soichiro Wakiya, Takayasu Koezuka, Yohsei Kohdzuma	4. 巻 14
2. 論文標題 Influence of Heat and Moisture Environment inside the Shelter on Sodium and Calcium Sulfate Behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone	6. 最初と最後の頁 913-918
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 有
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 TAKATORI Nobumitsu, OGURA Daisuke, WAKIYA Soichiro, ABUKU Masaru, KIRIYAMA Kyoko	4. 巻 85
2. 論文標題 NUMERICAL EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SALT DAMAGE BY IMPROVEMENT OF THE SHELTER	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 137 ~ 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.85.137	査読の有無 有
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 Sakai K, Takatori N, Ogura D, Wakiya S, Abuku M	4. 巻 2069
2. 論文標題 Investigation of the transport properties for saline water in porous materials - Modeling of the permeability coefficient for saline water-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012214 ~ 012214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2069/1/012214	査読の有無 有
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36件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 藤井佐由里、脇谷草一郎、渡邊英明、田中祐二、柳田明進、川越光洋、高妻洋成
2. 発表標題 博物館内における遺構の展示手法と周辺環境の最適化に関する研究 - 遺構展示室内の環境調査と遺構の埋戻し方法の検討 -
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 莊旺璋、脇谷草一郎、高妻洋成
2. 発表標題 史跡名勝瑞泉寺庭園における庭石の風化状況に関する調査
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 蛍光X線を用いた多孔質材料表面近傍の塩濃度分析手法の検討
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 采潤之介、小椋大輔、脇谷草一郎、水谷悦子
2. 発表標題 歴史的煉瓦造建築物の塩類風化対策に関する研究 塩を含む材料中の含水率、塩濃度の測定方法と電氣的脱塩方法に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 采潤之介、小椋大輔、脇谷草一郎、水谷悦子
2. 発表標題 歴史的煉瓦造建築物の塩類風化対策に関する研究 塩を含む材料中の含水率、塩濃度の測定方法と電氣的脱塩方法に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年～2023年



1. 発表者名 脇谷草一郎
2. 発表標題 屋外文化財の保存－環境調整による遺跡現地保存法の考察－
3. 学会等名 龍谷大学文化遺産学研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Soichiro Wakiya, Du Zhiyan
2. 発表標題 Basic study on deterioration mechanism of wetting-drying cycles by comparing deterioration state and preservation environment of stone cultural properties
3. 学会等名 International Symposium on Architectural Heritage Conservation Technology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 杜之岩、王金華、脇谷草一郎
2. 発表標題 全天空写真による日射が石造文化財に及ぼす影響の推定
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 脇谷草一郎、杜之岩
2. 発表標題 同一石材で造られた石棺の劣化状態および保存環境の比較による乾湿繰り返しによる石材劣化メカニズムの検討
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝
2. 発表標題 地盤に接する文化財の脱塩に関する研究 多孔質材料中における塩溶液の移動特性の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝
2. 発表標題 地盤に接する文化財の脱塩に関する研究 多孔質材料中における塩溶液の移動特性の検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝
2. 発表標題 地盤に接する文化財の脱塩に関する研究 多孔質材料中における塩溶液の移動特性の検討
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Nobumitsu Takatori, Kotaro Sakai, Daisuke Ogura, Soichiro Wakiya, and Masaru Abuku
2. 発表標題 Measurement of sodium chloride solution permeability and sorptivity in tuff stone
3. 学会等名 Fifth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Du Zhiyan, Soichiro Wakiya, Yohsei Kohdzuma
2. 発表標題 Deterioration Mechanism of Japanese Sandstone during the Drying and Wetting Cycles
3. 学会等名 The 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sayuri Fujii, Kyoko Kiriyama, Soichiro Wakiya, Takayasu Koezuka, Yohsei Kohdzuma
2. 発表標題 Influence of Heat and Moisture Environment inside the Shelter on Sodium and Calcium Sulfate Behavior
3. 学会等名 The 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平沼柊哉、安福勝、麓隆行、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 大分市高瀬石仏の保存環境分析と対策の評価 その4 ) 液水拡散係数の異方性を考慮した2次元熱水分移動の数値解析
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝、桐山京子
2. 発表標題 電荷を有する多孔質材料中の熱水分塩同時移動と浸透現象
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝
2. 発表標題 熱水分塩同時移動方程式に基づいた数値解析による年度中における塩溶液の浸透現象の再現性の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 平沼柊哉、安福勝、麓隆行、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 大分市高瀬石仏の保存環境に関する研究 その5 液水拡散係数の異方性を考慮した熱・水分移動の数値解析
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 平沼柊哉、安福勝、麓隆行、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 大分市高瀬石仏の保存環境に関する研究 その4) X線照射による凝灰岩の水分拡散係数の測定
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 金永鎬、安福勝、麓隆行、脇谷草一郎、平沼柊哉
2. 発表標題 一軸圧縮下における凝灰岩のX線CTとDigital Volume Correlation
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年～2020年



1. 発表者名 高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝、桐山京子
2. 発表標題 元町石仏における脱塩を用いた塩類風化抑制手法に関する研究 セロファンで遮られたNaCl溶液の半透性と浸透圧の測定
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 平沼柊哉、安福勝、麓隆行、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 大分市高瀬石仏の保存環境分析と対策の評価 その3)X線照射による凝灰岩の吸水速度の測定
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 元町石仏における石仏表面に蓄積する塩分量の測定および予測に関する研究 - その1 蛍光X線を用いた石材表面に蓄積する塩分量の測定手法の検討 -
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 元町石仏における石仏表面に蓄積する塩分量の測定および予測に関する研究 - その2 数値解析による多孔質材料表面に蓄積する塩分量の予測
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 磯村隆正、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎
2. 発表標題 屋外文化財の塩類風化と保存環境に関する研究 - 湿潤過程の違いが硫酸ナトリウムによる材料の変形挙動に与える影響の比較 -
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 元町石仏における石仏表面に蓄積する塩分量の測定および予測に関する研究 - その1 蛍光X線を用いた石材表面に蓄積する塩分量の測定手法の検討 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 元町石仏における石仏表面に蓄積する塩分量の測定および予測に関する研究 - その2 数値解析による多孔質材料表面に蓄積する塩分量の予測
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 采潤之介、小椋大輔、脇谷草一郎、水谷悦子
2. 発表標題 塩化ナトリウム溶液を含むレンガの電氣的脱塩に関する研究 電氣的脱塩の評価のためのICとXRFによる塩分布の推定と可視化
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 磯村隆正、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎
2. 発表標題 屋外文化財の塩類風化と保存環境に関する研究 - 湿潤過程の違いが硫酸ナトリウムによる材料の変形挙動に与える影響の比較 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Sayuri Fujii, Soichiro Wakiya, Akinobu Yanagida, Takeshi Ishizaki
2. 発表標題 Optimizing exhibition methods for the remains in the Ichijodani Asakura Family Site Museum, Fukui Prefectural, Japan
3. 学会等名 SWBSS-ASIS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Nobumitsu Takatori, Takamasa Isomura, Daisuke Ogura, Soichiro Wakiya
2. 発表標題 Comparison of damage by various hydration process of thenardite: water absorption and moisture adsorption
3. 学会等名 SWBSS-ASIS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Kotaro Sakai, Nobumitsu Takatori, Soichiro Wakiya, Daisuke Ogura
2. 発表標題 Measuring the amount of accumulated salt on the surface of porous materials using X-ray fluorescence
3. 学会等名 SWBSS-ASIS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 酒井紘太郎、高取伸光、脇谷草一郎、小椋大輔
2. 発表標題 蛍光X線を用いた多孔質材料表面に蓄積する塩の濃度の測定
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 水谷悦子、小椋大輔、脇谷草一郎
2. 発表標題 組積造建造物の電氣的脱塩に向けた煉瓦内の塩分布の定量化と可視化の試み
3. 学会等名 日本文化財科学
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 磯村隆正、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎
2. 発表標題 湿潤過程の違いが硫酸ナトリウムによる材料の変形挙動に与える影響の比較
3. 学会等名 日本文化財科学
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 脇谷草一郎（分担執筆）、文化庁編集	4. 発行年 2022年
2. 出版社 第一法規	5. 総ページ数 60
3. 書名 月刊文化財	



1. 著者名 脇谷草一郎 (分担執筆、早川泰弘・高妻洋成・建石 徹 編)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 アグネ技術センター	5. 総ページ数 332
3. 書名 文化財をしらべる・まもる・いかす 国立文化財機構 保存・修復の最前線	

〔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
研究協力者	小椋 大輔  (Ogura Daisuke)	京都大学・工学研究科・教授  (14301)	
研究協力者	高取 伸光  (Takatori Nobumitsu)	京都大学・工学研究科・助教  (14301)	
研究協力者	安福 勝  (Abuku Masaru)	近畿大学・建築学部・教授  (34419)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------