

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：31501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03105

研究課題名（和文）寒冷地域における遺跡や石造文化財の保存・修復に関する研究

研究課題名（英文）Study of conservation and restoration of historical sites and stone monuments in cold regions

研究代表者

石崎 武志（Ishizaki, Takeshi）

東北芸術工科大学・文化財保存修復研究センター・教授

研究者番号：80212877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000 円

研究成果の概要（和文）：東北・北海道地域の遺跡や石造文化財は、冬季の凍結融解や積雪等により劣化が早く進む。ここでは、三内丸山遺跡や大湯環状列石など東北・北海道地域の遺跡に関して、冬季の周辺環境および劣化の進行に関する現地調査を行った。そこで、それぞれの遺跡での劣化原因に関して、その主要因を明らかにした。また、熱、水分移動によるシミュレーション解析により劣化のメカニズムに関して、定量的な評価を行った。さらに、遺跡や石材の凍結融解を防ぐ方法に関しては、室内実験および屋外調査により保存対策手法の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

寒冷地で屋外にある遺構や石造文化財は、冬季の凍結融解や積雪等により劣化が早く進む。この保存対策に関しては、様々試みられてきたが、成功した例は少ない。ここでは、劣化原因に関して、周辺環境の測定、劣化のメカニズムに関するシミュレーション解析等を行うことにより、より定量的な評価を行った。さらに、遺跡や石材の凍結融解を防ぐ方法に関しては、室内実験および屋外調査を行った。これらの研究により、今後の寒冷地の遺跡、石造文化財の保存対策を構築する上で、重要な研究成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Ruins and stone cultural heritages in the Tohoku/Hokkaido region will deteriorate rapidly due to freezing and thawing in winter and snowfall. Here, we conducted a field survey on the surrounding environment and the progress of deterioration in the Tohoku and Hokkaido areas, such as the Sannai Maruyama site and the Oyu Stone circles. Therefore, we have clarified the main causes of deterioration at each archeological site. In addition, the mechanism of deterioration was quantitatively evaluated by simulation analysis by heat and moisture transfer. On the other hand, regarding the method to prevent freezing and thawing of archaeological sites and stone materials, we proposed preservation measures by indoor experiments and outdoor surveys.

研究分野：文化財保存科学

キーワード：寒冷地域 遺跡 石造文化財 修復材料 凍結融解 シミュレーション解析 保存対策

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

1．研究開始当初の背景

遺跡や石造文化財を構成する部材である土や石などの多くは多孔質体と呼ばれるもので、部材内部の空隙に、水分や塩分などを含むことができる。乾季、雨季のある地域では部材表面への降水や蒸発の影響で、塩類の析出による塩類風化現象や乾湿の繰り返しによるスレーキング現象などで部材の劣化が進む。例えば、パキスタンのモヘンジョダロでは、この塩類風化現象を低減させるために、地下水位を下げるという対策がとられたが、それでも塩類風化の進行を低下させることはできず、現在の対策としては、レンガ表面に泥を塗って、塩類の析出をこの泥層の内部で生じさせ、レンガ自体を守るという方法がとられている。地下水位を下げるという対策の問題点は、この対策によりレンガ表面からの蒸発量を定量的にどれくらい低下させることができるかを見積もることができなかつたためと考えられる。また、寒冷地における例として、小樽にある重要文化財旧日本郵船小樽支店の修復の例を挙げると、建造以来 70 余年もの風雪により、建物各部に老朽破損箇所が見られ、特に外壁の凝灰岩の石壁の凍害と風化の進行が目立ったため、小樽市は、1984 年から 1987 年まで修理工事を行った。その際、風化、凍結・融解により破損が甚だしい箇所は、石壁を張石で補強や擬石で置き換えなど施工した後に、シリコン合成樹脂が塗布された。最近の申請者らの調査により、シリコン合成樹脂の浸透部分と浸透していない部分の境界面で、氷晶の析出による破壊が生じていることが分かった。これは、当初は予想していなかったことではあるが、撥水強化剤の塗布が、逆に劣化の進行を早めたとも言えよう。このように遺跡や石造文化財の保存に関しては、国内のみならず、世界的に見ても、必ずしも確立された工法があるわけではない。寒冷地における遺跡保存の研究も、まだ不十分であると言える。申請者は、北海道大学低温科学研究所に在職していた時に、北海道余市町にあるフゴッペ洞窟や小樽市にある手宮洞窟の劣化状況調査および、構成する部材である凝灰岩の凍結劣化試験などを行ってきた。これらの研究から、寒冷地における遺跡保存に関する材料・技術の開発研究の重要性を認識し、本研究課題の提案に至った。

2．研究の目的

(1)北海道・東北地域の遺跡にある環状列石などの石造文化財や土遺構の劣化状況を調査する。調査に当たっては、各遺跡を管理する、地方公共団体の担当者に協力を受けて調査を実施する。調査手法としては、石造文化財においては、表面の顕微鏡観察およびエコーチップ装置などを用いた表面強度の測定等を行う。

(2)それぞれの地点に微気象観測装置を設置して周囲環境の状況を調べるとともに、石造文化財や土遺構の表面温度および水分量の測定を行うことにより冬期間の石材や土内の水の凍結が、これらの遺跡をどう劣化させているのかについて定量的に見積もり、劣化原因を科学的な方法で明らかにする。石造文化財内の水分分布を T D R（Time Domain Reflectometer）水分計を用いて測定を行う。

(3)それぞれの遺跡で、石造文化財や土遺構の中で、年間を通して、どのような温度変化や水分量の変化が起こっているのか、周囲の微気象観測データを用いて、シミュレーション解析を行う。

(4)温度変化や水分量変化のシミュレーション解析結果をもとに、個々のケースにおいて、石造文化財や土遺構の保存対策を構築する。また、これらの保存対策において、寒冷地における遺跡保存に関する撥水剤や強化剤などに関して、その材料の有効性および耐久性について、室内でのウェザーメータなどによる加速劣化試験、屋外での曝露試験により、適切な材料を選択し、また、その施工技術に関する開発研究を行う。

(5)いくつかの遺跡で、保存対策のテスト施行を行い、その後の、状況に関して、現地の担当者と協力しながら、施行前、施行後の状況を比較し、保存対策手法の評価を行う。

3．研究の方法

(1)研究は、積雪・寒冷地域での石造文化財、土遺構の劣化状況調査とその劣化要因の特定、これらを構成する部材の物理的特性の測定、遺跡内の水分分布、水分移動に関するシミュレーション、保存対策手法の策定、保存対策手法の評価という流れで行う。調査の対象としては、北海道森町の史跡鷲ノ木遺跡、北海道網走市のモヨロ貝塚、青森県青森市の三内丸山遺跡、秋田県鹿角市の大場環状列石、秋田県秋田市の伊勢堂岱遺跡などを選択し調査を進める。

(2)寒冷地における、石造文化財や土構造物の劣化原因として、部材内の水が凍結する影響が大きい。この影響を定量的に判断するためには、これらの部材中の水分量、水分移動特性などを把握する必要がある。そのための基礎データとして、石材試料、土試料の水分特性、透水係数などの物性値を測定する。

(3)寒冷地における遺跡の劣化原因を調べるためには、遺跡の周辺の降雨量、降雪量、温度、湿度、風向、風速、日射量などの気象要素を調べることが重要である。ここでは、北海道、東北の遺跡に、気象観測装置を設置して観測を進める。

(4) 部材の劣化とそれを取り巻く環境との関係を把握するためには、石造文化財、土構造物全体が、雨や降雪などの気象条件のもとで、どのような影響を受けるのか把握する必要がある。このため、降雨時の雨の部材への浸入、雨が降らない時の部材表面からの蒸発、冬季の部材の凍結等を考慮したシミュレーションを行う。

(5) 部材の劣化の主たる要因が明らかになった後で、その劣化の防止を行う上で必要な対策について検討する。例えば、その部材が雪に覆われた場合に、雪は断熱材として石材を保護する面と、水の供給源となり劣化を進めるといふ、相反する2つの面がある。これは、部材の温度分布、水分分布の測定やシミュレーション解析を用いて、個々の遺跡に応じて対応策を検討していく必要があると考えられる。また、撥水剤、強化剤等の樹脂の塗布が適切と判断される場合には、これらの樹脂をウエザーマータなどによる加速劣化試験を行い、適切な樹脂を選択する。保存対策手法に関しては、既に行われている例なども含めて、対策を行った後の状況も調査し、評価を行っていく。

4. 研究成果

(1) 積雪寒冷地域において、石造文化財は冬季に凍結・融解の繰り返しにより劣化する。室内実験により、石の凍結劣化の度合いは、 $+4$ 、 -4 の温度の繰り返し回数に依存していることが示されている。ここでは、秋田県、鹿角市にある大湯環状列石、北秋田市にある伊勢堂岱遺跡、および北海道森町にある鷲ノ木遺跡等において、環状列石周辺の温度環境の計測を行うとともに、タイムラプスカメラを用いて、積雪量の変化を計測した。測定結果から、積雪下にある部分は、積雪の断熱効果により、 0 以下になることが少なく、凍結劣化のリスクが低減されることが推察された。これらの、積雪状況と石造文化財の温度環境に関して、数値シミュレーションにより、解析を行い、積雪寒冷地域における積雪が石造文化財の劣化に与える影響について考察した。観測結果から、積雪があるときは、地表面温度がほぼ 0 になり、地盤が凍結しないことが分かった。ここでは、積雪が無いと仮定したときに、地盤内の温度を、気象観測地点のデータを用いてシミュレーション解析を行った。気温、風速に関しては、鹿角市のアメダスデータ、日射量、雲量、気圧のデータは、秋田県気象台のものを使用した。解析方法は、気象条件から平衡地表面温度を計算し、地盤凍結の計算を行った。積雪が無い状態では、12月末から地盤が凍結することが分かる。これらの結果から積雪は、断熱材として働き、積雪下にある組石の凍結を防いでいるのが分かった。

(2) 三内丸山遺跡の子供の墓では、周囲環境の温湿度を測定するために、子供の墓ドーム外に温湿度データロガーを設置すると共に、ドーム内には、南北に温湿度データロガーを設置し、30分ごとにデータを取得した。また、ドーム内には、遺構内の水の浸みだし状況を見るためにタイムラプスカメラを設置し、1日に1回撮影を行った。積雪がある状況で、三内丸山遺跡子供の子供の墓ドーム外部の気温が高い場合には、積雪が融解し、融雪水が、地中に浸透し、子供の墓ドーム内の遺構に流れ込むと考えられる。

子供の墓内部の水の浸透と気温の関係を調べたところ、気温の高い日の1日、2日後に、子供の墓内部に水の浸透が見られ、窪み部分に水がわき出てくる様子が見られた。これは、冬季に、気温の高い日に融雪や降雨により水が地面に浸透し、ドーム周辺からこの浸透水が流入し、子供の墓の遺構部分に出てくるものと考えられる。この水の浸透に関しては、UCリバーサイド大学のシムネック氏の開発した、水分移動解析プログラム(HYDRUS3D)を用いて解析した所、現地の状況を再現することができた。今後の保存対策手法の構築に結びつけていきたいと考えている。

(3) 寒冷地において、石造文化財や土遺構などの多孔質体は、その中に水分を含むため、冬季にその水が凍結することにより劣化する。しかし、室内実験により、土の内部に含まれる水分が少なくなるにつれて、凍結温度が低くなることが分かっている。岩手県、盛岡市、史跡志波城跡の復元築地塀の劣化観測を、1997年に完成した南門で行った。土壁の低い部分は水分量が高く、冬季の凍結融解による劣化が顕著であった。2004年、2005年に完成した政庁西門、政庁東門の構造に関しては、なるべく土壁に雨水が、当たらないように屋根の庇を長くするなどの工夫がなされたため、特に、政庁東門の土壁は、完成後10年を経ても、版築の木目が見えるほど良好な保存状態である。これは、土壁の体積含水率が低く抑えられていて、土の凍結温度が低下し、凍結劣化のリスクが軽減されているためと考察される。ただし、下部は、体積含水率が高い状態で、現在でも劣化は見られる。これらの室内実験や現地調査などの結果から、土壁の含水率を、低く抑えることが、冬季の土壁の凍結劣化を防ぐ上で重要であることが分かった。

(4) 毛越寺庭園は景観に価値の重きが置かれているため、遺水やその周辺の景観を破壊しない方法で石材の強化を行うことが求められる。従って、石材自体を強化する樹脂処理法が最適であると言える。

含浸方法による岩石への含浸率の違いについて、未劣化の粘板岩は違いがほとんど見られないことに対し、景石のような劣化した粘板岩は凝灰岩と似たようなグラフの動きとなることが

わかった。従って、劣化した粘板岩に対しては、凝灰岩と同様に減圧含浸による樹脂含浸が有効であることが考えられる。実験室で行う凍結融解は短期間に集中して強制劣化させるが、現場で起こる凍結融解は長期間にわたりゆっくりと進行するといった違いがあるため、実際の現場では含浸した樹脂自体の劣化といった問題もあると考えられる。そのため、現場作業では定期的に樹脂含浸処理をし直すことが前提となることが考えられる。また、本研究における実験の過程で、樹脂含浸処理において広く使用されている合成樹脂の岩石への含浸率と蒸留水の含水率の結果がほぼ同等のものとなることがわかったため、合成樹脂の含浸方法の評価には、岩石への透水等の先行研究を参考にすることが重要であることが確認された。

(5) 寒冷地において、屋外にある石造文化財は、冬期間の凍結・融解により劣化する場合がある。劣化する条件として、石材中の水分量が多いこと、また、石材の温度が石材中に含まれる水分が凍結するまで温度が低下することがあげられる。石材中の凍結温度は、水分量が低下すると低くなることから、凍結劣化の防止策の一つは、石材中の水分量をなるべく低下させること、もう一つは、石材の温度をなるべく低下させないことである。

これらの目的で、ドイツでは冬季に大理石の彫像に、木造の覆屋をかける対策がとられている。日本では、石造文化財をむしろなどで覆うかたちの冬季養生がなされている。山形市元町にある重要文化財の石鳥居では冬季養生が行われている。この石鳥居は平安時代に作られたもので、日本最古の石鳥居といわれている。この養生は、まず鳥居上部の石材をビニールシートで覆い、その上にむしろを置き、さらにその上をビニールシートで覆うという構造である。この養生の効果を見るために、養生内部の石材表面の温度、養生表面の温度および周囲の温湿度を測定した。また、ここでは、タイムラプスカメラを用い、石鳥居の写真を撮影して、積雪の変化の様子を観測した。

観測結果より、石材表面の最低温度が、気温の最低温度より、4 程度高くなった。その理由としては、冬季養生のむしろを、ビニールシートではさむ様な形にすることによって、温度の低い空気が、石材表面に直接当たらなかったためと考えられる。石造文化財の冬季の凍結リスクを低減する方法としては、簡便で有効な方法であることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 石崎武志、小柴まりな、澤田正昭	4. 巻 9
2. 論文標題 山形市の重要文化財「鳥居」の劣化に関する総合調査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要	6. 最初と最後の頁 8-22
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 石澤夏帆、米村祥央、石崎武志	4. 巻 9
2. 論文標題 寒冷地における石造文化財の劣化調査と保存対策に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要	6. 最初と最後の頁 23-30
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 石崎武志、澤田正昭	4. 巻 1
2. 論文標題 積雪寒冷地域の遺構内の融雪水の浸透に関する調査研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 『伝統技術と現代科技』東亜文化遺産学会第6次国際学術検討会文集	6. 最初と最後の頁 434-441
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 石澤夏帆、米村祥央、石崎武志	4. 巻 1
2. 論文標題 寒冷地の石造文化財の凍結劣化事例調査および劣化対策に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 『伝統技術と現代科技』東亜文化遺産学会第6次国際学術検討会文集	6. 最初と最後の頁 584-590
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 小林純、米村祥央、石崎武志	4．巻 1
2．論文標題 日本の伝統的建造物の土壁の変色に関する調査研究	5．発行年 2019年
3．雑誌名 『伝統技術と現代科技』東亜文化遺産学会第6次国際学術検討会文集	6．最初と最後の頁 601-604
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 石崎武志	4．巻 1
2．論文標題 山形市の石鳥居の凍結・融解による劣化に関する総合調査	5．発行年 2019年
3．雑誌名 2019大田東アジア文化遺産保存国際シンポジウム論文集	6．最初と最後の頁 15-20
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 荒木徳人、石崎武志	4．巻 1
2．論文標題 石造文化財を構成する凝灰岩の材料特性を考慮した保存方法に関する基礎的研究	5．発行年 2019年
3．雑誌名 2019大田東アジア文化遺産保存国際シンポジウム論文集	6．最初と最後の頁 327-330
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 高見雅三、石崎武志	4．巻 1
2．論文標題 寒冷地における歴史的石造建造物の劣化と維持保守の重要性について	5．発行年 2019年
3．雑誌名 2019大田東アジア文化遺産保存国際シンポジウム論文集	6．最初と最後の頁 331-334
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 Takeshi Ishizak	4. 巻 1
2. 論文標題 Study on Deterioration and Protective Measures of Stone Cultural Property of Motsu-ji Temple	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the international forum the Conservation of World Cultural Heritage & Sustainable Tourism for Development	6. 最初と最後の頁 27-37
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 荒木徳人、米村祥央、石崎武志	4. 巻 10
2. 論文標題 石鳥居を構成する石材の材質分析による風化特性の基礎的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要	6. 最初と最後の頁 8-14
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 水谷悦子、小椋大輔、石崎武志、佐々木淑美、安福勝	4. 巻 59
2. 論文標題 ハギア・ソフィア大聖堂の屋外環境が壁画劣化に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 保存科学	6. 最初と最後の頁 89-102
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 荒木徳人、米村祥央、石崎武志	4. 巻 11
2. 論文標題 石造文化財の透水係数を現地で測定するための基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 東北芸術工科大学文化財保存修復研究センター紀要	6. 最初と最後の頁 8-16
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 Takeshi Ishizaki, Naruto Araki	4. 巻 1
2. 論文標題 EVALUATION OF THE DETERIORATION OF A STONE GATE (TORII) AND ITS PROTECTIVE MEASURE	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 -
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 Takeshi Ishizaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Environmental research of conservation conditions of Hagia Sophia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of HAGIA SOPHIA SYMPOSIUM	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荒木徳人、米村祥央、石崎武志
2. 発表標題 石造文化財を構成する軽石凝灰岩のスレーキングによる変化と保存強化処理に関する研究
3. 学会等名 文化財保存修復学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林純、米村祥央、石崎武志
2. 発表標題 古民家の土壁修復に使用する壁土の変色原因と材料に関する研究
3. 学会等名 日本文化財科学会
4. 発表年 2019年

1．発表者名 石崎武志、石澤夏帆、米村祥央
2．発表標題 石造文化財の凍結劣化対策のための樹脂処理に関する実験と解析
3．学会等名 日本文化財科学会
4．発表年 2018年

1．発表者名 石崎武志、小柴まりな、澤田正昭
2．発表標題 山形市の重要文化財「鳥居」の劣化に関する総合調査
3．学会等名 文化財保存修復学会
4．発表年 2018年

1．発表者名 石崎武志、澤田正昭、濱松優介
2．発表標題 積雪寒冷地の遺構内の融雪水の浸透に関する観測と解析
3．学会等名 日本文化財科学会
4．発表年 2017年

1．発表者名 石澤夏帆、米村祥央、石崎武志
2．発表標題 岩石の凍結劣化防止のための樹脂処理の研究
3．学会等名 日本文化財科学会
4．発表年 2017年

1．発表者名 石崎武志
2．発表標題 積雪寒冷地域における積雪と石造文化財周辺の温度環境
3．学会等名 文化財保存修復学会
4．発表年 2016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
研究 分担者	澤田 正昭 (SAWADA Masaaki) (20000490)	東北芸術工科大学・文化財保存修復研究センター・教授 (31501)	
研究 分担者	米村 祥央 (YONEMURA Sachio) (50332458)	東北芸術工科大学・芸術学部・准教授 (31501)	
研究 分担者	杉山 智昭 (SUGIYAMA Tomoaki) (90446310)	北海道博物館・研究部・学芸員 (80101)	