

機関番号：82620

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20300291

研究課題名（和文）歴史的建造物を構成する部材の劣化と対策

研究課題名（英文）Deterioration of building materials composing historical buildings and their protective measures

研究代表者

石崎 武志（ISHIZAKI TAKESHI）

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・センター長

研究者番号：80212877

研究成果の概要（和文）：

歴史的建造物を構成する部材である石材やレンガなどの劣化と保存対策に関する研究を行った。北海道の歴史的石造建造物の周辺環境を継続的に測定し、部材の劣化と環境の関係を明らかにした。また、石材表面に撥水性や強度を上げるために塗られる表面含浸剤に関しては、国内外で使用されている14種類の表面含浸剤を北海道の歴史的建造物の石材として使われている凝灰岩（札幌軟石）に塗布し表面の性質や吸水性などを調査し、その特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Deterioration of building materials composing historical buildings and their protective measures were studied. Meteorological data were obtained near the historical buildings. The relationship between the speed of deterioration and environmental condition was studied and clarified. Fourteen kinds of water repellent materials to prevent water penetration were applied to the stone sample and various physical properties such as surface characteristics and moisture adsorption were studied and the effectiveness of these materials were compared and evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学

キーワード：歴史的建造物、凍結劣化、塩類風化、撥水剤、保存対策

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、東京文化財研究所の国際文化財保存修復協力センターのプロジェクトである東南アジアの歴史的建造物調査に、平成9年より参加した。タイ、アユタヤの歴史的レンガ建造物のレンガの劣化や、スコータイ遺跡のワットスリチュム大仏の表面漆喰部分の生物劣化、カンボジア、アンコールワットの砂岩の柱の劣化、パキスタンモヘンジ

ョダロの日干しレンガの劣化などの主な原因は、建材中の水分量の変化、水分移動であり、その保存対策を構築するためには、文化財を構成する石材やレンガなどの建築部材の中の水分状況を十分に把握することが重要であることを認識した。

これらの現場での調査をもとに、平成11、12年度基盤研究（C）石造、レンガ建造物の劣化に係わる材料物性の研究、平成11、

12, 13年度国際学術研究、石造文化財の劣化機構と保存対策に関する研究を行った。ここでは、多孔質材料内の水分移動のシミュレーションに関しては、米国塩類研究所のバンゲニヒテン博士やシムネック博士らと共同で行った。また、この共同研究に、ドレスデン工科大学建築環境学科のハウプル教授、グルネワルド研究員、プラーゲ研究員が加わり、建築材料中の水蒸気移動、水の移動を含めた形で解析を進めた。

また、研究代表者は平成15年には、7月から9月にかけての2ヶ月間ドレスデン工科大学に招聘され共同研究を行った。研究テーマは、建材に使われている石材、断熱材などの多孔質材料中の水分移動、熱移動に関するシミュレーション手法、水分特性測定法の研究である。具体的な研究内容としては、北海道開拓の村で行っている土壁中の水分変化、温度変化を温湿度や日射などの環境条件をもとにシミュレーションを行い観測結果との比較を行った。11月には、ドレスデン工科大学建築環境学科のハウプル教授、研究員のグルネワルド氏、プラーゲ氏、フェヒナー氏を招聘して、「石造文化財、石造建造物中の水分移動解析と水分特性の測定」に関する研究会を開催した。また、プラーゲ氏らと、X線を用いた多孔質材料の水分特性測定を共同で行った。

これらの研究を進めていく過程で、実際の建造物の保存対策をより確実なものとするには、歴史的建造物中の水分特性や透水係数などの物性値に関するデータベースが不十分であること、また、シミュレーション手法の精度を向上させる必要があること、また、保存対策手法として用いられる、撥水剤や強化剤などの建築材料に与える影響、耐久性などの調査が不十分であることを再認識し、本研究課題を申請するに至った。

この様に、歴史的建造物や石造文化財の劣化には必ず水分の影響が関係している。例えば、近代の建造物に多く用いられている煉瓦、石、コンクリート、左官材料などの多孔質材料は水分を吸水しやすいため、凍害、白華、塩類風化などの劣化が引き起こされるからである。一方で、文化財的価値を維持しながら、適切な補修をするためには、劣化機構を明らかにした上で、適切な補修工法を採用することが不可欠である。1996年に登録文化財制度が施行され、歴史的建造物を保存・活用する事例が多くなってきた中で、保存・修復技術の早期の確立が望まれている。以上のような背景のもと、本研究では歴史的建造物に使用されている多孔質材料の水分に起因

する劣化機構を明らかにし、それに基づいた保存対策を提案することを目的として本研究プロジェクトを提案した。

2. 研究の目的

現在までのドレスデン工科大学との共同研究で、歴史的建造物の部材中の水分移動に関する基礎的な解析、物性調査などを行ってきた。これらの研究を土台にして、日本の近代の歴史的建造物の劣化状況調査と劣化要因の特定、建造物部材の物性値の測定、建造物内の水分分布、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、その評価という流れで研究を行う。日本の近代の歴史的建造物としては、札幌にある北海道開拓の村の歴史的建造物、小樽にある旧日本郵船（重文）や岩手の旧九十銀行（重文）など、調査対象を決めて、その建築部材の劣化状況調査を行うとともに、その劣化が何の原因によるものなのかを、微気象データなどと比較しながら劣化要因の特定を行う。

物性に関しては、近代の建造物に多く用いられている煉瓦、石、コンクリート、左官材料などの水分特性、不飽和透水係数などの測定を行う。現在、建築材料の水分特性に関するデータベースは、ドレスデン工科大学のプラーゲらが作成しているが、日本の歴史的建造物に関するものは、共同研究で行った漆喰材料以外はない状況であるが、この研究を通してデータベースを充実させることができる。

劣化要因として、建築材料中の水分量の変動等が明らかな場合は、建築材料中の水分量の変化に関するシミュレーション解析を行い、その変動状況を予測する。研究対象として選んだ建造物内の水分量の変動に関しては、可能な場所では、水分量の変動を測定し、シミュレーション結果と比較する。

以上の解析を基に、保存対策手法の策定を行う。ここでは、例えば、雨水の石材への浸透を止める様に、石材表面に撥水強化処理を行った場合に、建築部材中の水分量は、処理前と処理後でどの様に変動するか、水分移動に関するシミュレーション解析で評価を行う。

建築部材の保存対策として用いられる撥水剤や表面強化剤などは、建築材料に対してどの様な影響があるかに関しては、微視的な面からの石材表面の観察また耐久性などの試験が必要である。この点に関しては、東京工業大学建築物理センターの田中享二教授が詳しいので、研究分担者として協力頂き、研究を進め、文化財的価値を維持しながら、

適切な保存対策をする手法の確立をめざす。

3. 研究の方法

研究は、歴史的建造物の劣化状況調査とその劣化要因の特定、建造物部材の物理的特性の測定、建造物内の水分分布、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。

1) 歴史的建造物の劣化状況調査とその劣化要因の特定

歴史的建造物の対象としては、寒冷地では、札幌にある北海道開拓の村の歴史的建造物、旧九十銀行(重文)や岩手銀行中の橋支店(辰野金吾設計、重文)などがある。北海道開拓の村には、歴史的石造建造物、日本壁をもつ木造建造物、レンガ建造物など様々な建築材料で作られている建造物がある。これらの建築材料の劣化状況調査から、劣化状況の要因の特定を行う。現地調査は、研究代表者の石崎が担当する。建築部材の試験体が入手可能である場合は、部材の微細構造、化学的組成を調査し、微視的な面からも劣化の要因を明らかにする。建築部材の微視的調査は、研究分担者の田中が担当する。劣化要因として、建築部材の物性の他に、その歴史的建造物を取り巻く環境が重要な要因となっている。例えば、北海道開拓の村の石造建造物では、南壁の方が北壁より劣化が著しいことが報告されている。また、NPO 法人歴史建築保存再生研究所理事の松波秀子氏は、歴史的建造物の保存、修復に関しては、重要文化財に指定されているものを含めて幅広い実績があるので、本課題に関しては、研究協力者として参加頂く。さらに、調査を進めるに当たって、現地の教育委員会などの協力も得ながら調査を進めていく予定である。

2) 建造物部材の物理的特性の測定

建造物の劣化の要因として、水の影響が大きい。寒冷地では、部材の凍結劣化、乾燥する時期がある地域では、部材の塩類風化現象などが顕著である。この影響を定量的に判断するためには、建築材料中の水分量、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、建築材料の水分特性、透水係数などの物性値を測定する。建築部材の凍結劣化、塩類風化に関しては、その特性を、部材の凍結実験、乾燥実験により確認する。この実験は研究代表者の石崎が担当する。また、建築部材の凍結劣化、塩類風化に関しては、建築材料の間隙構造などの微細構造の把握が重要である。この調査は、研究分担者の田中が担当する。

3) 建造物内の水分分布、水分移動に関する

シミュレーション

建築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、建築物全体が、雨や日射などの気象条件のもとで、どの様な影響を受けるのか把握する必要がある。このために建築部材を多孔質体と考え、降雨時の雨の壁面内への進入、雨がなくなるときの壁面からの蒸発等を考慮した建造物内の水分分布、水分移動に関するシミュレーションを行う。シミュレーション解析の対象としては、北海道開拓の村の歴史的建造物など、それぞれ劣化の要因が特徴的なものを選択し、解析を行う。解析は、研究代表者の石崎が担当する。また、歴史的建造物周囲の気象変化による建築部材内の水分量の変動に関しては、ドイツのドレスデン工科大学のグルネワルド研究員らは、Delphin という解析ソフトを開発し解析を行っている。本研究においても、ドレスデン工科大学のグルネワルド研究員やプラゲ研究員と共同で研究を進めていく。

4) 保存対策手法の策定

建築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、石材表面に撥水剤を塗布して、表面からの水の浸透を防ぐ工法が選択された場合には、その撥水剤の塗布により表面の濡れ色の変化等はないかなど、文化財的価値を維持しながら、適切な補修をすることが可能かどうかについても検討する必要がある。また、保存対策を施す前と後の違いについて、例えば建築部材中の水分量などに関しては、3) で示した水分移動に関するシミュレーションによって定量的に評価を行っていく。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、対策を行ったその後の状況も調査し、評価も行っていく。

4. 研究成果

本研究は、歴史的建造物を構成する部材である石材やレンガなどの劣化と保存対策に関するものである。調査対象としては、札幌の北海道開拓の村で保存されている歴史的建造物と小樽にある旧日本郵船株式会社(重文)の石造建造物、函館にある歴史的レンガ建造物を選び調査を行った。北海道開拓の村では、石造建造物の近くに微気象観測装置を設置し、温度、湿度、風向、風速、降雨量などの環境データを継続的に測定した。測定結果から、表面剥離などの劣化の度合いが冬季の凍結・融解の繰り返し回数に対応していることが明らかになった。また、石壁の強化のために使われた石材内部の金属製のかすがいの爆裂などにより劣化が進んでいること

が分かった。さらに、石材のポーリングにより試料を採取し調査を行ったところ、亀裂が撥水剤の染みこんだ部分とそうでない部分の境界で発生していることが観察された。そのため、凍結劣化が生じる寒冷地では、撥水剤の選択に注意しなくてはならないことが分かった。

旧日本郵船株式会社小樽支店の石造建造物の内部および外部に温湿度データロガーを設置し、環境条件を継続的に測定した。壁面には、小樽軟石（溶結凝灰岩）が使われている。壁面は冬季の凍結・融解の繰り返しにより劣化が進んでいる。この建物では、雨水の排水が不十分であり、石壁部分の含水率が高くなることが問題であり、早急に適切な対処が必要である。

北海道開拓の村の石造建造物の壁面の石材には札幌軟石（溶結凝灰岩）が使われている。この部分の石材試料を採取し岩石薄片観察を行い、含有鉱物、含有物比測定、X線回折分析、水銀圧入法による空隙量の測定などを行い、凍結・融解を受ける層と未踏結層の違いに関して比較を行った。

石材表面に撥水剤や強度を上げるために塗られる表面含浸剤に関しては、国内外で使用されている14種類の表面含浸剤を北海道の歴史的建造物の石材として使われている凝灰岩（札幌軟石）に塗布し表面の性質や吸水性などを調査した。外観変化に関しては、ハンディ色差計で骨材部分を避けて測定し、光沢度測定装置で60°鏡面光沢度を測定した。この他、含浸深さの測定、透水性、透湿性、吸水性試験等を行い、これらの表面含浸剤の特性を明らかにした。

また、撥水剤を塗布したレンガ試料を用い、試料内の水分移動、塩分移動測定に関する実験を行った。

撥水剤の塩類風化抑制効果を調べるために、1050℃、900℃、750℃で焼成したレンガ試料を作成し、促進塩類風化試験を行った。試験体は、直径100mm、厚さ60mmの円柱形である。撥水剤は試験体の片面に塗布し、浸透深さは、5.0mm、7.5mm、10.0mmに設定した。実験では、可溶性塩類として硫酸ナトリウム飽和水溶液を用い、撥水剤塗布面の背後から水が浸透してきたときの条件を考え、撥水剤の塗布面を上にし、試料下面から吸水させた。実験結果から、含浸層の厚さ5.0mm、7.5mmの試験体では表層剥離が発生し、10.0mmの試験体では表層剥離が発生しなかった。促進塩類風化試験終了後、試料内部の塩類の分布状況を観察するために、電子線マイクロアナライザー（EPMA）による面分析を行った。この結果から、含浸層の深さが5.0mm、7.5mmの試験体では、撥水剤

の含浸層と非含浸層の界面に塩類が集積している様子が分かった。これは、撥水剤としては、試料深くまで浸透するものの方が、塩類風化抑制効果上望ましいということを示唆している。

この条件での水分移動・塩分移動をドレスデン工科大学で開発された熱水分・塩分移動解析プログラム（Delpin5）を用いて解析を行った。シミュレーションにより得られた結果は、電子線マイクロアナライザー（EPMA）により得られた塩類の分布状況と対応した。これらの結果から、歴史的レンガ・石造建造物の塩類風化対策を構築する上で、シミュレーションによる水分移動・塩類移動に関する解析は有効であると考えられる。

また、既往の重要文化財の建造物の保存修理に関して、どの様な撥水剤、強化剤が使用されてきたのかを知る目的で、既往の修理工事報告書を調査しまとめた。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

- ①Khalil, M., R. Plagge, T. Ishizaki and J. Grunewald, Determination of moisture profiles of building materials by Microfocus X-ray projection (Khalil, M., R. Plagge, T. Ishizaki and J. Grunewald), in Proceedings of the First European Conference on Moisture Measurement, Aquametry 査読有 2010, 481 - 490
- ②石崎武志、遺跡保存と水、埋蔵文化財の保存・活用における遺構露出展示の成果と仮題—平成20年度遺跡整備・保存修復科学合同研究集会報告書一、奈良文化財研究所、査読無、2009、58-64
- ③石崎武志、文化財を構成する多孔質部材の劣化、熱物性、査読無、Vol. 22, No. 2, 2008, 125-129

〔学会発表〕（計6件）

- ①石崎武志、高見雅三、松尾隆士、田中享二 寒冷地における歴史的石造建造物の壁面劣化調査 日韓文化財科学国際シンポジウム 現代美術館、ソウル 2010
- ②石崎武志、石造文化財の凍結劣化のメカニズム、平成21年度保存科学研究集会 九州国立博物館 2010
- ③石崎武志、犬塚将英、ルドルフ・プラーゲ 凝灰角礫岩の乾燥過程のシミュレーション解析、文化財保存修復学会第32回大会

長良川国際会議場 2010

- ④高見雅三、石崎武志、積雪寒冷地における歴史的建造物の壁面劣化調査 日本文化財科学会 第27回大会 関西大学 2010
- ⑤高見雅三、石崎武志 北海道開拓の村の歴史的建造物の壁面劣化調査(その3)、日本文化財科学会 第26回大会 名古屋大学 2009
- ⑥石崎武志、松尾隆士、菅野 拓、田中享二 旧小樽新聞社の凍害を受けた外壁石材の鉱物学的特徴(石崎武志、松尾隆士、菅野拓、田中享二) 日本建築学会大会 東北学院大学 2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石崎 武志 (ISHIZAKI TAKESHI)

独立行政法人国立文化財機構東京文化財研究所・保存修復科学センター・センター長

研究者番号：80212877

(2) 研究分担者

田中 享二 (TANAKA KYOUJI)

東京工業大学大学院・工学研究科・教授

研究者番号：40016829