

京都大学	博士 (工学)	氏名	石川 和輝
論文題目	文化財収蔵空間の湿度変動時における土壁を下地とした壁画の損傷予測に関する研究		
<p>本論文は、文化財収蔵空間におかれている土壁を下地とした壁画を対象として収蔵空間内の湿度変動による壁画の損傷防止を目標として、壁画下地として用いられる白土と壁土の機械特性の測定と多孔質弾性体モデルにより、湿度変動の幅と変化速度に応じた壁画の損傷危険性を明らかにし、壁画の損傷危険性低減につながる文化財収蔵施設における湿度変動抑制方法を示した。</p> <p>第 1 章では、環境湿度の変動により引き起こされる文化財資料の損傷に対し、損傷予測にもとづく環境制御の必要性とその背景を示した。また、壁画資料の材料特性の把握、および、湿度変動時における文化財資料の損傷予測に関して既往研究のレビューを行うとともに、本研究の動機、目的、構成を示した。</p> <p>第 2 章では、損傷予測モデルの構築において対象とする法隆寺金堂飛天壁画の現状観察と材料・構成に関する文献調査について示した。壁画は土壁の複数の層に白土を塗って下地としており、その下に表土、中塗土が塗られている。各層の土の成分や配合率が部分的に明らかにされてきており、それらに関する文献資料をまとめた。</p> <p>第 3 章では、材料内の温度・含水率・ひずみ・応力分布の予測と損傷予測に用いた基礎理論を示した。ひずみ・応力分布の予測においては多孔質弾性体モデルの構成則を用いた。温度・含水率の予測においては、熱・水分同時移動モデルを用いた。損傷予測においては、最大主応力説を用いることを示した。</p> <p>第 4 章では、第 5 章と第 6 章における材料試験にて機械特性取得を行うために作成した壁画白土、表土、中塗土の模擬材料の作成方法について示した。材料の乾燥密度や空隙率をはじめとした基礎的な物性値を示した。模擬白土は、化学的成分が近いとされる天草陶石に、紙スサと米糊を混ぜて作成した。実資料の材料配合率が明らかでないため、これら材料の配合率を変えた複数の試験体を作成した。模擬表土、模擬中塗土は壁土を粒度ごとに分離して得た砂利、砂、粘土に、それぞれ麻スサ、藁スサを混ぜて作成した。また模擬材料の乾燥密度、空隙率、等温吸着線を示した。</p> <p>第 5 章では、模擬白土と表土の機械特性を明らかにするために割裂試験・圧縮試験を行った結果を述べている。それぞれの材料において、割裂試験により引張強度を、圧縮試験により Young 率、Poisson 比、圧縮強度を取得した。白土では材料配合率と平衡湿度を変えた 36 通り、表土では平衡湿度を変えた 4 通りの試験体を対象とした。白土の引張・圧縮強度、Young 率はいずれも平衡湿度の増加に対して減少する傾向であること、また、紙スサの配合が多いほど、米糊の配合が少ないほど強度、Young 率ともに減少する傾向であること、Poisson 比は平衡湿度の増加に対して上昇する傾向であることを明らかにした。取得した白土の機械特性は平衡湿度と材料配合率の関数として近似した。表土の引張・圧縮強度は、白土と同様に平衡湿度の増加に対して減少し、Poisson 比は平衡湿度に関わらず概ね一定であることを明らかにした。取得した表土の機械特性を平衡湿度の関数として近似した。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	石川 和輝
<p>第 6 章では、多孔質弾性係数のひとつである Biot-Willis 係数推定の提案を行い、模擬白土、表土、中塗土に対して行った乾湿ひずみ測定と併せて結果を示した。Biot-Willis 係数測定方法は材料を液水に飽和させることが前提であるが、本研究で対象とする白土や壁土などへの適用が困難であることから、乾湿ひずみ、間隙圧変化の予測値、Young 率、Poisson 比を用いて、液水で飽和させずに Biot-Willis 係数を推定する手法を提案した。白土、表土、中塗土を対象として、基準湿度と異なる湿度に平衡させた材料のひずみ(乾湿ひずみ)を取得し、第 4 章で示した飽和度-相対湿度関係、第 5 章で明らかにした弾性率を用いることで、白土と表土の Biot-Willis 係数を推定した。</p> <p>第 7 章では、法隆寺金堂飛天壁画を対象として、材料内の温度・含水率・応力・ひずみの空間分布の経時的変化と、応力分布に基づき損傷発生を予測する数値モデルを構築し 2 次元有限要素法を用いて解析を行い、壁画の白土と表土の各要素における最大主応力を引張強度で除した値を損傷危険度として定義し、損傷危険性を定量化した。</p> <p>第 8 章では、壁画の損傷予測モデルを用いて湿度変動時の壁画の損傷危険度を示した。壁画表面付近の材料は引張に弱く、乾燥時において壁画表面付近に引張力がかかるため、本研究では環境乾燥時を対象として検討を行った。環境湿度の瞬時変化を与え、湿度の変動幅に対する損傷危険度を求めて、相対湿度が 90%から 10%まで瞬時に下がる場合でも、最大主応力が強度を上回らないことを明らかにした。また、相対湿度の変動幅を一定として、変動にかかる時間を増やしたときの損傷危険度の低減効果を評価し、例えば 70%RH 平衡時からそれぞれ 3 時間、6 時間かけて 20%低下するときの損傷危険度は、環境湿度が 10%、5%の瞬時変化時の白土の損傷危険度を下回ることを明らかにした。</p> <p>第 9 章では、文化財収蔵空間の環境調整方法を明らかにするため博物館収蔵室を対象とした温湿度実測調査と室内の温湿度を予測する解析モデルを用いて湿度性状を明らかにし、壁画の損傷危険度低減のため建築的な対策として窓の気密性向上や二重壁部材の吸放湿の利用により室内の湿度変動を抑制可能であることを示した。空調運転に加え、建物性能や換気設備を総合的に活用し、運用方法を工夫することで、資料の損傷危険度の低減とともに、エネルギー消費やコストの抑制が可能となると考えられることを示した。</p> <p>第 10 章では、結論であり本論文で得られた成果についてまとめ、今後の課題と展望を示している。</p>			

(続紙 2)

氏名

石川 和輝

本論文は、文化財収蔵空間におかれている土壁を下地とした壁画を対象として収蔵空間内の湿度変動による壁画の損傷防止を目標として実験及び解析により研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 法隆寺金堂壁画に代表される壁画下地として用いられる白土と壁土を対象として、紙スサと米糊の配合率や水分状態を考慮した Young 率、Poisson 比、圧縮強度といった機械特性を明らかにした。
2. 多孔質弾性係数のひとつである Biot-Willis 係数について、乾湿ひずみ、間隙圧変化の予測値、Young 率、Poisson 比を用いて、不飽和時の液水で飽和させずに推定する手法を提案し、白土と表土について湿度を考慮した係数の値を推定した。
3. 多孔質弾性体モデルと熱水分同時移動モデルを用いて乾湿による壁画の損傷を予測する数値モデルを構築し、法隆寺金堂飛天壁画を対象として、材料内の温度・含水率・応力・ひずみの空間分布の経時変化と、応力分布に基づく損傷発生を予測する解析を行い、湿度変動の幅と変化速度に応じた壁画の損傷危険性を明らかにした。
4. 博物館収蔵室を対象とした温湿度実測調査と室内温湿度を予測する解析モデルを用いて湿度性状を明らかにし、壁画の損傷危険度低減のための建築的な対策として窓の気密性向上や二重壁部材の吸放湿の利用により室内の湿度変動を抑制可能であることを示した。

本論文は、土壁を下地とした壁画の湿度変動による材料中の温度・含水率・応力・ひずみの予測のための材料の多孔質弾性係数などの機械特性の測定と解析モデルによる予測による推定を行い、それらに基づく損傷防止のための収蔵室の湿度制御方法を明らかにしており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 9 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、令和 8 年 4 月 1 日までの間当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。