

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：82619

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01383

研究課題名（和文）輸送中の振動を受ける美術品の蓄積疲労予測システムの理論構築

研究課題名（英文）Development of the System of Cumulative Fatigue Estimating for the Art Objects Subject to Vibration During Transport

研究代表者

和田 浩（WADA, HIROSHI）

独立行政法人国立文化財機構東京国立博物館・学芸研究部・課長

研究者番号：60332136

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,500,000円

研究成果の概要（和文）：脆弱な文化財の輸送環境に関する研究として、法隆寺金堂壁画を奈良国立博物館へ輸送する際の経路選定、振動計測、作業工程の最適化を総合的に検証した。特に屏風構造の文化財に注目し、木製骨組み下地の振動応答特性をレプリカを用いた加振試験で検証した。文化財の梱包に使用される綿の衝撃吸収特性を落下衝撃試験で調査し、学会で発表した。また、ハンドリフトを用いた博物館施設内輸送で生じる振動を計測し、電池を使わずに非接触で電力供給できる無線センサの有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、文化財の輸送における振動対策と最適な梱包方法を明らかにし、文化財保護のための具体的なガイドラインを提供した。特に、振動応答特性や衝撃吸収特性の詳細なデータを基に、より安全な輸送手法が確立された。無線センサの応用により、輸送中のモニタリングが容易になり、文化財の損傷リスクを低減する技術的革新ももたらした。これにより、文化遺産の保全と次世代への伝承に大きく貢献した。

研究成果の概要（英文）：As part of a study on the transport environment for fragile cultural properties, the route selection, vibration measurement and optimisation of the work process for the transport of the mural paintings of the Golden Hall of Horyuji Temple to the Nara National Museum were comprehensively verified. Particular attention was paid to cultural property with a folding screen structure, and the vibration response characteristics of the wooden framework base were verified in a vibration test using a replica. The shock-absorbing properties of cotton used for packing cultural property were investigated in a drop impact test and presented at the conference. Vibrations caused by transport within museum facilities using a handlift were also measured, demonstrating the effectiveness of a wireless sensor that can supply power contactlessly, without the use of batteries.

研究分野：保存科学

キーワード：美術品 輸送 振動 加速度 蓄積疲労 博物館 文化財

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

輸送中の美術品は、大小の振動を受け続ける。振動は衝撃と比較して、その加速度は小さいが連続性を有する。したがって、振動が原因で生じる損傷は単発の衝撃により生じる損傷とは異なり、断続的に振動を受けながら徐々に劣化が進行する類のもので、蓄積疲労現象が生じた結果によるものと考えられている。輸送による蓄積疲労は、美術品へ加わる振動レベルと、美術品に損傷が発生するまでの時間の関係を明確にした上で、現在まで受けた振動の積算値の損傷発生時点での振動の積算値に対する割合で評価できると考えられる。

そこで申請者は美術品輸送に用いる輸送機関上で振動を計測し、陸上、海上、航空の各輸送のあらゆる工程における振動データを解析した。そして、解析結果を用いて輸送中の振動環境を再現し、振動を受けた梱包資材の応答の計測手法と評価手法を確立した。また、振動を受けた美術品素材に蓄積疲労が生じる現象を捉えることに成功し、小さい加速度でも徐々に美術品を劣化させる原因となりうることを検証した。以上の成果から、輸送によって美術品が受ける振動履歴は、各工程の振動レベルと所要時間との積の総和(振動の積算値)から、梱包資材による振動減衰効果を差し引いた関数で表現できる。これを STAY Index 1.0 として指標化し、提唱するに至っている。指標化された振動履歴を、今後輸送される美術品の劣化予防に繋げるためには、上記指標化で構築できた理論を用いて個々の美術品に生じる蓄積疲労予測の実現が求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、検証手法を確立した蓄積疲労について、素材ではなく輸送する個々の美術品の蓄積疲労予測システムの理論を構築することである。美術品の持つ多様性から、一般的な物理学的手法ではなく、レプリカ試験の結果を AI 技術の機械学習を適用して解析する。その解析で得られた判定結果を逆解析することで理論モデルを構築し、理論モデルを用いて美術品毎の蓄積疲労予測の実現、すなわち本研究の目的を実現する。

本研究によって、美術品が輸送で受けた振動履歴の指標 (STAY Index 1.0) が、輸送によって個々の美術品に輸送に生じた蓄積疲労の指標へアップデートする。新たな指標は、これを最小限に抑制した値にするための梱包設計、すなわち梱包設計の最適化の指標として利用できる。現在、美術品の公開活用に関しては温湿度や積算照度といった指標を基に管理されているが、輸送環境についての指標は存在しない。本研究の成果が、今後の美術品を科学的根拠に基づき、安全に活用できる仕組みの定着につながることを最終的な目的と位置付けている。

3. 研究の方法

平面形状の代表として、屏風のオリジナルレプリカを製作する。屏風は画面の振動による彩色への影響が懸念されることから候補として選定した。また、機械学習の精度向上に必要な試験体数を揃えるため、市販の工業製品も収集するが、屏風はオリジナルレプリカに改造を加えて十分な供試体数を準備できるように工夫する。

加振実験によって、レプリカの振動伝達特性を明らかにする。加速度センサーをレプリカ上に設置して周波数を変えながら振動を与える計測の他、幾つかの供試体では全体の振動モードを把握するためにスキャニング振動計による面全体の振動解析も実施し、周波数毎の振動伝達特性を調査する。

加振実験で得られたレプリカの振動伝達特性と、レプリカの各種要素との間に存在する関係

についての特徴を、機械学習の解によって得る。振動伝達特性の予測メカニズムが明らかとなり、そのメカニズム自体が新たに構築された理論モデルとなる。輸送予定の美術品についての各種要素を理論モデルへ入力し、得られた振動伝達特性予測の精度確認のために、再度レプリカの加振実験を実施し、誤差修正を行う。

理論モデルを用いて、蓄積疲労予測システムを完成させる。理論モデルにより得た美術品毎の振動の伝わり方（伝達特性）と輸送時に生じる振動レベルの予測を対応させることで、輸送時の美術品の揺れ方（応答）を美術品毎に算出する。輸送時に生じる振動レベルの予測は振動履歴の算出と同一であり、美術品の輸送時の応答は疲労と等価であるため、具体的には振動履歴の指標に理論モデルを適用し、輸送時の蓄積疲労の指標化を新たに行うことで、美術品の蓄積疲労予測システムが完成する。

4．研究成果

2020 年度は、平面形状と立体計上の代表として、屏風のオリジナルレプリカを用いた加振実験の結果を解析した。加振実験により、周波数毎の振動伝達特性を把握することができた。屏風のレプリカについては、骨下地と呼ばれる基本構造上で生じた振動が表面の和紙にどのように影響するのかについてさらに検証を進めた。検証に必要なシミュレーション解析を実施し、モデル化に向けての準備を開始した。

2021 年度は、美術品（屏風）のレプリカを振動試験し、入力周波数に対する和紙表面の振動の大きさを計測した。当初は和紙が貼られた状態のレプリカを用いた試験を行った。振動を支配しているのが屏風のフレーム（骨下地）部であるという推定に基づき、骨下地のみレプリカを作成し、同様の振動試験を実施した。また、美術品の輸送時に生じる振動計測データについてもさらに計測値を蓄積することができた。それらの試験結果の検証については、論文等で公表し、関連する研究者同士での議論を深められた。

2022 年度は、美術品輸送包装における現在の課題をとりまとめ、輸送機関、梱包資材、振動計測、および文化財のモデル化に取り組んだ。前年度より引き続き、美術品の中でも屏風構造を持つものに焦点を当て、木製の骨下地を 3DCAD で再現し、各部材の物性値を入力したモデルを作成した。作成したモデルを仮想空間上で加振し、振動応答の再現性を向上させるためのチューニングを行うことで、実大実験をモデル上で再現できることを検証した。また、慶応義塾大学の協力を得て、屏風レプリカ表面上に加速度センサーを設置し、梱包した状態で加振実験を行い、無線通信による無電源での計測実験を実施し、その効果を検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 和田浩	4. 巻 31(3)
2. 論文標題 屏風の振動応答特性を検証するための基礎的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本包装学会誌	6. 最初と最後の頁 169-176
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 和田浩	4. 巻 82
2. 論文標題 走行中の美術品輸送専用車両荷台上で生じた衝撃加速度値と荷台上の位置との関係についての考察	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本文化財科学会誌	6. 最初と最後の頁 33-47
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15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 博物館施設内輸送における振動計測
3. 学会等名 第60回全日本包装技術研究大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 美術品輸送包装の課題と研究開発
3. 学会等名 総務省電波資源拡大のための研究開発 「同期・多数接続信号処理を可能とするボックスキャット通信技術の研究開発」 令和4年度 第1回 実利用推進検討会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 綿の衝撃試験についての基礎的研究
3. 学会等名 日本包装学会第31回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田浩 , 谷口耕生 , 北澤菜月 , 早川泰弘 , 建石徹 , 高妻洋成
2. 発表標題 ハンドリフトを用いた文化財の施設内輸送時に生じる振動の原因と対策に関する研究
3. 学会等名 文化財保存修復学会44回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 屏風用木製骨組みの振動応答特性に関する研究
3. 学会等名 第59回全日本包装技術研究大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 文化財の振動対策
3. 学会等名 日本機械学会令和3年度第1回耐震問題研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田浩, 小西毅
2. 発表標題 屏風に用いられる木製骨組み下地の振動応答特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田浩, 小西毅, 星野裕明, 三上貴治
2. 発表標題 屏風下地を想定した木組み構造の振動応答解析シミュレーションに関する基礎的研究
3. 学会等名 日本包装学会第30回年次大会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田浩, 松井敏也
2. 発表標題 地震動を受けた屏風の挙動に関するシミュレーション
3. 学会等名 日本文化財科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 屏風の展示用支持具の耐震効果についての検証
3. 学会等名 日本展示学会第40回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 施設内での文化財輸送時に台車上で生じる振動への対策
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 和田浩
2. 発表標題 美術品レプリカを用いた加振実験について
3. 学会等名 日本包装学会第29回年次大会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 輸送時に屏風構造を持つ美術品に発生する共振現象に関する基礎的研究
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 和田浩
2. 発表標題 屏風構造を持つ美術品の振動応答に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田浩
2. 発表標題 美術品に用いられる包装資材の評価に関する現状と課題
3. 学会等名 JPI (日本包装技術協会) 北海道支部2020年度包装懇話会 (招待講演)
4. 発表年 2020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	川村 洋平 (Kawamura Youhei) (40361323)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	小西 毅 (Konishi Takeshi) (90463033)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部地域技術支援部城東支所・副主任研究員 (82670)	

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
---------	---------