

## 屏風の振動応答特性を検証するための基礎的研究

和田 浩\*

### The Basic Research to Examine the Vibration Response Characteristics of Folding Screens

Hiroshi WADA\*

美術品の振動に対する応答特性は、その構造や素材等に応じて異なることが想定されるため、具体的な対象物を絞った上での定性から始める必要がある。筆者は、美術品の中でも屏風という形状に着目した。屏風形式で仕立てられた美術品を対象として、輸送中に受けた振動がどのように影響するのかを検証するための加振実験を実施した。今回は屏風の木製の骨格のみを再現したレプリカを製作し、10-100 [Hz]の範囲で、正弦波で加振したところ、ほぼ全ての計測箇所で70 [Hz]付近に共振周波数の存在が認められた。また、共振周波数においては、レプリカ中央部に向かうほど加速度値が上昇することが分かった。

Since the response characteristics of art objects to vibration are expected to vary depending on their structure, materials, etc., it is necessary to start with a qualitative study by focusing on a specific object. The author focused on the shape of a folding screen among objects of art. A vibration experiment was conducted to verify the effect of vibration during transportation on a work of art made in the form of a folding screen. In this study, we fabricated a replica of the wooden frame of the folding screen and vibrated it with a sinusoidal wave in the range of 10-100 [Hz], and found that there was a resonance frequency around 70 [Hz] at almost all measurement points. In addition, the acceleration value increased toward the center of the replica at the resonance frequency.

キーワード：振動、博物館・美術館、輸送、美術品、屏風、加速度、加振実験

Keywords: Vibration、Museum、Transport、Art object、Folding screen、Acceleration、Vibration experiment

---

\* 東京国立博物館, Tokyo National Museum  
(〒110-8712 東京都台東区上野公園 13-9), 13-9 Ueno park, Taito-Ku, Tokyo 110-8712, Japan  
TEL:03-3822-1111, Email: wada-h6p@nich.go.jp

## 1. 緒言

### 1.1 背景

筆者は美術品輸送の安全性向上を目指した研究を継続している。美術品の梱包については、未だ科学的根拠を伴った理論構築が圧倒的に不足している現状は否めない。ただし、一度の輸送で損傷が生じなかった美術品であっても、輸送によって素材や構造には大小の蓄積疲労が発生しているという考え方は、一般的な工業製品に対するそれと全く同じであると考えている。蓄積疲労の生じない梱包設計は理想的である。しかし、現実的にはそれを最小限度に抑制したものが最適な手段と位置付けられる。輸送中に美術品がどの程度共振するのか、その頻度やレベルは蓄積疲労の大きさと直結する。したがって、輸送時に生じた振動に対する美術品の応答特性を把握しておくことは非常に重要と考えている。こうしたアプローチは重要と認識されつつも、美術品のバリエーションは無限に存在するため、従来から着手されない状態が続いている。筆者は、美術品の梱包はブラックボックス化したものであったと言っても過言ではないと考えている。しかし、何らかの方法論を用いてこうした現状を改善していかねばならない。筆者は美術品のレプリカ（複製品）を用いた実験から着手することとした。

美術品の振動に対する応答特性は、その構造や素材等に応じて異なることが想定されるため、具体的な対象物を絞った

上での定性から始める必要がある。まず、美術品の中でも屏風という形状に着目した。屏風は東洋の美術品特有の形状を持っており、海外への輸送も頻繁である。また、屏風表面には精緻な書画が描かれており、薄い彩色層が存在する場合には、わずかな擦れによっても画面が損傷を受けてしまう。振動に対して敏感な美術品であるとも位置付けられる。そこで、屏風のレプリカを製作して、加振実験を実施することとした。

屏風の最表面の和紙には彩色層が存在

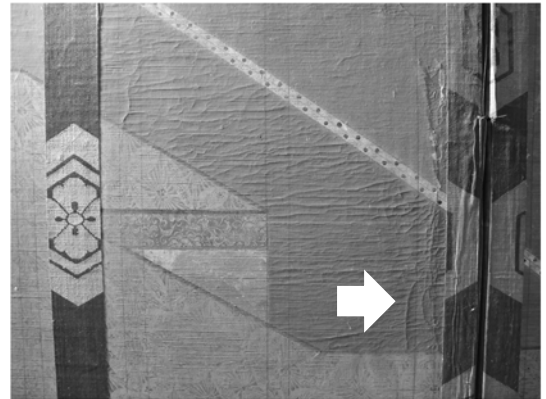


Fig.1 Crack of surface

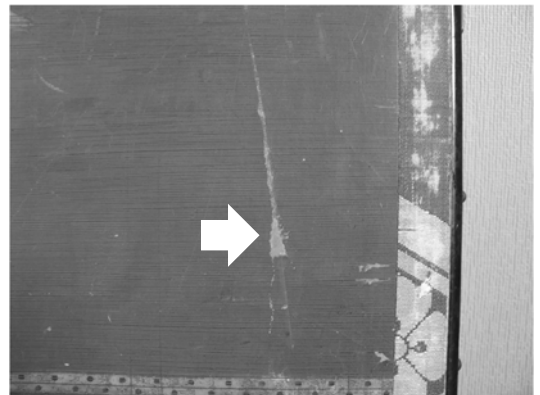


Fig.2 Loss of surface

し、最も保護せねばならない部位である。彩色層の損傷とは、例えば亀裂 (Fig.1) や剥落 (Fig.2) といった現象が挙げられる。こうした損傷は一度の輸送で発生することは稀であるが、輸送が繰り返された結果、多くの振動を受けることで徐々に進行する危険性があると考えられる。したがって、輸送時に和紙の振動を極力軽減することが、結果的に彩色層の保護につながる。

以上の背景から筆者は、屏風の振動応答特性に関する基礎的研究を開始した。本稿は、近年実施した加振実験の結果について整理、検証したものである。

## 1.2 屏風の梱包工程

展示された状態の屏風 (Fig.3) の長辺を垂直に立てた状態と定義する。収蔵庫等での収納用の箱は一般的に、折りたたんだ屏風の短辺を垂直に立てた状態で屏風が箱に収まるように設計されている。また、梱包時では、折りたたんだ屏風を横に寝かせて画面を水平にした状態にする場合もある。一方、輸送中のトラック等で振



Fig.3 Folding screen at gallery

動レベルが高いのは一般的に垂直方向の成分である<sup>2)</sup>。屏風を横に寝かせて画面を水平にした状態であれば、垂直方向の振動成分が影響しやすいことは推測できる。つまり条件的には厳しいものとなるが、現実的にはこうした梱包仕様で輸送される事例も存在する。筆者は、このような比較的厳しい条件を再現した実験を行うことで、より強調された振動応答特性の結果が得られるのではないかと考えた。そこで、本項では屏風を横に寝かせて画面を水平にした状態での梱包工程について予め説明を加えておく。

まず、屏風全体を薄葉紙 (薄手の和紙) で包み、表面を保護する (Fig.4)。続いて、クラフト防水紙で全体を包む (Fig.5)。以上が内装梱包に該当するものである。内装梱包後、全体を段ボール製の内箱に収める (Fig.6)。底面にポリエチレンフォームが設置された段ボール製の外箱に内箱を収める (Fig.7)。以上で1件の屏風の梱包は完了するが、海外輸送の場合には、いくつかの内箱をまとめて木製梱包箱に収める場合もある。いずれにしても、筆者の経験上、屏風の通常の梱包において、緩衝材に該当するものはポリエチレンフォームが使用されることがほとんどである。

## 1.3 梱包設計上の課題と本稿の位置付け

こうした状況を踏まえて、筆者が現状の梱包設計における課題と考える点は大きく2つである。1つ目は、緩衝材がどの周波数帯をどのように緩衝しているのか

定かではない点である。これは、2つ目の課題にもつながる内容である。つまり、共振させたくない美術品を梱包する上で、どのように緩衝材を用いればよいのかに



Fig.4 Surface protection with thin paper



Fig.5 Kraft paper packaging



Fig.6 Cardboard inner box

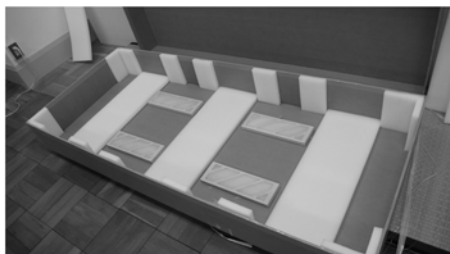


Fig.7 Cardboard outer box with polyethylene foam

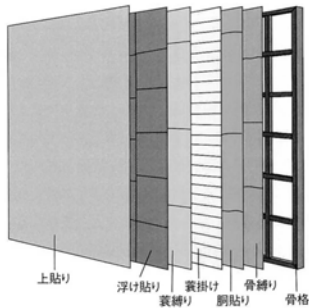
についての最適解が現状の梱包設計になっていない。これに対しては、筆者らは先行研究<sup>3)</sup>によって、ポリエチレンフォーム材の振動応答特性の静的荷重に伴う変化をある程度明確化できたと考えている。このデータを梱包設計スキームに効果的に盛り込む必要がある。2つ目の課題はそもそも梱包対象である美術品の共振がどのように発生するのかが不明である点である。この点がクリアになって初めて1つ目の課題も連動して解決できると考えている。本稿は特に2つ目の課題解決の糸口としての位置付けに該当するものである。

## 2. 加振実験

2021年2月に屏風のレプリカを用いた加振実験を実施した。以下に加振実験の内容と結果について記載する。

### 2.1 実験目的とレプリカについて

彫刻のように立体的な美術品とは異なり、屏風は平面的な外観を持つためにあまり意識されないが、内部構造は非常に立体的で複雑である (Fig.8)<sup>4)</sup>。構造体としては、木製の骨格が存在し、そこに下張りの和紙が糊で貼り重ねられ下地となる。幾重にも和紙の下地があり、その最表面に本紙と呼ばれる鑑賞面となる和紙が設置されている。以上の屏風の構造からは、骨格部分が屏風全体の強度を維持している構造部材と位置付けられる。保護したいのは最表面の和紙であるが外部からの



**Fig.8 Internal structure of the folding screen (reproduced from reference (4))**

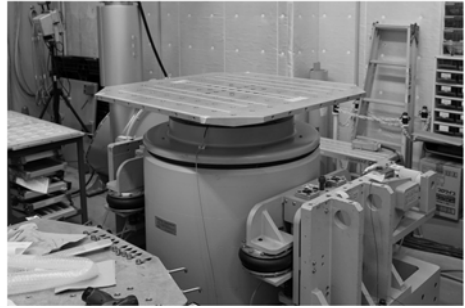


**Fig.9 Wooden structure replica**

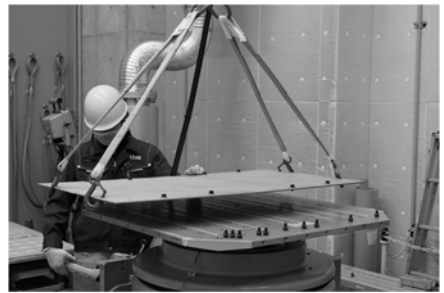
振動を受けた骨格が応答した結果、和紙へ振動が伝わるという仮定で考えた際、骨格の振動応答特性をまずは把握する重要性に行き着いた。そこで本研究では木製の骨格のレプリカ (Fig.9) を製作し、加振実験を実施することとした。

## 2.2 実験条件

加振実験は、東京都立産業技術研究センターが所有する大型加振試験機 (Fig.10) を用いた。加振試験機はエミック株式会社製・F-35000BDH/LA36AW であり、主要



**Fig.10 Vibration test machine**



**Fig.11 Iron expansion plate**

諸元は東京都立産業技術研究センターの HP に詳しく掲載されているのでご参照いただきたい<sup>5)</sup>。実験で使用した加速度センサーは RION 製 PV-90H、IMV 製 VP-2M1ZR 他である。加振機で得られた時系列加速度データを LightStone 社製解析ソフト OriginPro ver.2022 で処理し、本項での挿図 (Fig.13、Fig.14) に用いた。

レプリカのサイズが大きく、一部が加振テーブルからはみ出してしまうため、加振試験機上に、今回製作した鉄製の加振台拡張板を固定した (Fig.11)。この拡張板によって、レプリカ全体が加振テーブル上に設置された状態を実現できた。その上で、レプリカの四周の縁木部分全域に両面テープを貼り、拡張板の上に固定した。加速度センサーはレプリカ表面にグ

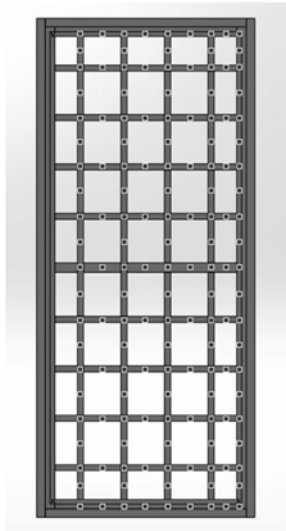


Fig.12 Measurement points

リスで固定した。加速度計測位置は、レプリカ表面全体を網羅するように、160箇所を選択した (Fig.12)。加振条件をまとめると、加振方向：垂直方向、周波数範囲：10-100[Hz]、加速度：0.3[G]、掃引速度：1[oct/min]、加振波：正弦波、である。周波数範囲は JIS-Z0200 の条件を参考にして定めたものである。さらに高周波領域の加振試験についても検討の余地はあるが、筆者らが調査した梱包資材の振動特性<sup>3)</sup>を参考に、確実に減衰可能な範囲は除外することで全体の実験時間と加振回数を短縮し、レプリカへの過度な負荷を軽減することを優先した。

なお、実験に先立ち、鉄製の加振台拡張板が上記条件下において、共振することで影響を及ぼさないことは構造解析シミュレーション (Ansys 社製構造解析ソフト Ansys を使用) および拡張板のみで加振して予め確認した上で実験に臨んだ。

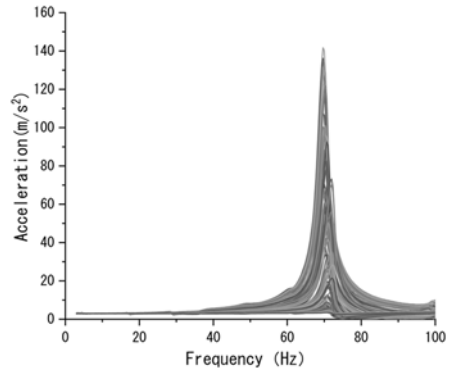


Fig.13 Response acceleration plot

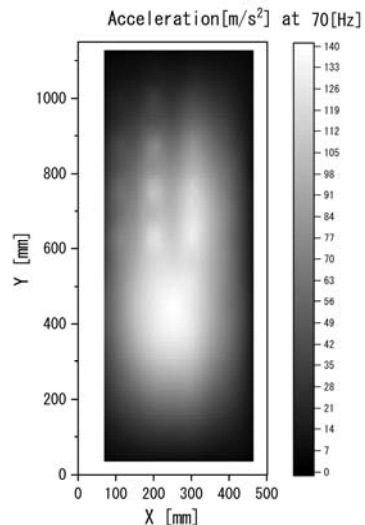


Fig.14 Response acceleration mapping  
(at 70[Hz])

### 2. 3 実験結果と考察

加振実験で掃引した周波数の変化に伴う、全ての計測箇所における加速度の変化を Fig.13 に示す。共振周波数が約 70[Hz] であるという結果が得られた。また、計測箇所によって共振周波数における加速度値の大小に差があることが分かる。この差と、計測箇所の平面上の関係を考察す

るため、骨格を縦軸、横軸に座標化し、70[Hz]における各計測箇所での加速度値をマッピングして相対的に比較したものが Fig.14 である。この結果からは、骨格の中央部に向かうにしたがい、共振周波数における加速度値が大きくなるという傾向を把握することができた。骨格の木製の組み構造は触感としても非常に堅牢な印象を受けたが、木材のしなりによって周囲の枠材から遠ざかるほど、振幅が大きくなった結果であると捉えている。

和紙の貼られていない骨格だけに限定されるが、この結果から、今一度、現状の屏風梱包について検証してみたい。従来から緩衝材としてポリエチレンフォームが多用されており、使用態様は本稿緒言で紹介した梱包工程の通りである。このポリエチレンフォームについては筆者らが振動特性を調査した結果<sup>3)</sup>、静的荷重が0.025[kg/cm<sup>2</sup>]以下の場合、0.1[G]の振動加速度による入力時には、共振点が70[Hz]付近になることが確認されている。したがって、使い慣れた従来型の梱包工程で作業を進める場合には、こうしたポリエチレンフォームの特性を踏まえた上でポリエチレンフォームと骨格との共振を回避することに注意が必要である。簡単に表現すると、ポリエチレンフォーム単位面積当たりの荷重が小さくなりすぎないような注意が必要である。そのように注意した上で、屏風の重量を踏まえてポリエチレンフォームを加工して適度な荷重面積に調整すれば、仮に輸送機関から

70[Hz]の振動入力が生じて、効果的に減衰し、骨格との共振も回避することが可能である。こうした知見を今回の実験から得られたものと考えている。

### 3. まとめ

屏風形式で仕立てられた美術品を対象として、輸送中に受けた振動がどのように影響するのかを検証するための加振実験を実施した。今回は屏風の木製の骨格を再現したレプリカを製作し、10-100[Hz]の範囲で、正弦波で加振したところ、ほぼ全ての計測箇所でも70[Hz]付近に共振周波数の存在が認められた。また、共振周波数においては、レプリカ中央部に向かうほど加速度値が上昇することが分かった。

屏風で最も保護すべき部位は最表面の和紙上の彩色層である。今後は骨格の振動特性が、最表面の和紙にどのように影響するのかを検証せねばならない。その結果を受けて、骨格に改良の余地があるのか、あるいは、梱包における防振材の選定で輸送リスクを効果的に減少できるのか、といった対策について検討を進めたいと考えている。

### 4. 謝辞

本稿で発表した成果の一部はJSPS 科研費 20H01383 の助成を受けたものである。振動試験全般においては、小西毅氏（東京都立産業技術研究センター）から多大なるご協力を賜った。レプリカ作製においては、文化財修復技術者の鈴木晴彦氏か

ら多大なるご協力を賜った。ここに感謝の意を表す。

＜参考文献＞

- 1) 北澤裕明、佐藤達雄、長谷川奈緒子、李艶傑、石川豊、蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築（第1報）一繰り返し衝撃によるイチゴの損傷発生一、日本包装学会誌 21(2)、p.125-132（2012）
- 2 ) Singh, S.P., Antle, J., Burgess, G., Comparison between lateral, longitudinal and vertical vibration levels in commercial truck shipments, Packaging Technology Science, 5(2), p.71-75(1992)
- 3) 和田浩、今北憲、高木雅広、神庭信幸、文化財梱包の緩衝材に用いられるポリエチレンフォーム材の振動特性評価に関する研究、日本包装学会誌 27(5)、p.339-346（2018）
- 4) 大林賢太郎、装潢文化財の保存修理-東洋絵画・書跡修理の現在、国宝修理装潢師連盟、p.84（2015）
- 5) <https://www.iri-tokyo.jp/setsubi/mec-h23-vibtemic.html>（最終閲覧日：2022年3月11日）

（原稿受付 2021年12月16日）

（採録受理 2022年3月18日）