

技術報告

## 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

和田 浩\*、今北 憲\*\*、高木雅広\*\*、神庭信幸\*\*\*

### Study on Vibration Characteristic Evaluation of Polyethylene Foam Used for Cushioning Material of Cultural Properties Packaging

Hiroshi WADA\*, Ken IMAKITA\*\*, Masahiro TAKAGI\*\* and Nobuyuki KAMBA\*\*\*

文化財の輸送では、専用の車両が使用され、各工程は専門の技術者によって慎重かつ丁寧に輸送される。したがって、基本的には輸送中に生じる振動が、商工業分野の商品のそれと比較すると格段に小さい。ただし、文化財は環境中の振動レベルが低くても素材自体が極めて脆弱であるために細心の注意を払う必要がある。現状では振動レベルが低い環境下で示す梱包資材の振動特性については情報が不足している。そこで、文化財の梱包において高い頻度で用いられるポリエチレンフォーム材についての振動特性を把握するための加振実験を行った。その結果、入力加速度の変化に伴って緩衝材の固有振動数が変化することが分かった。また、入力加速度が小さくなると、それに応じて緩衝材の固有振動数における伝達率が急激に低下する現象が見られた。こうした特性はほとんど知られておらず、一般的によく用いられる包装資材の振動特性を文化財輸送環境のレベルの範囲で詳細に把握しておく重要性は高い。

Specialized tracks are used in the transport of cultural properties, and each process is carefully transported by a specialized technician, so basically the vibration received during transport is compared with case of commercial products, it is much smaller. However, even though the level of vibration in the environment is low, the material itself is extremely fragile, so careful attention must be paid to the cultural property. It is necessary to understand the vibration characteristics of the packing material in an environment where the input acceleration is low. Vibration test for understanding the vibration characteristics of the polyethylene foam material used frequently in the packaging of cultural properties was carried out. As a result, it was found that the natural frequency of the cushioning material changes as the input acceleration changes. In addition, when the input acceleration decreases, the transmissibility at the natural frequency of the cushioning material sharply decreases accordingly. It is important to understand the vibration characteristics of commonly used packaging materials in detail within the range of the cultural property transport environment level.

キーワード：緩衝材、ポリエチレンフォーム、文化財、梱包、輸送、振動、加速度、伝達率、固有振動数

Keywords: Cushioning material, Polyethylene foam, Cultural properties, Packaging, Transport, Vibration, Acceleration, Transmissibility, Natural frequency

\* 連絡者(Corresponding author), 東京国立博物館(〒110-8712 東京都台東区上野公園13-9), Tokyo National Museum, 13-9 Ueno Park, Taito-ku, Tokyo, 110-8712, Japan, TEL:03-3822-1111, FAX:03-3822-1491, Email:wada@tnm.jp

\*\* エクサーチ株式会社, eXsearch Corporation

\*\*\* 研究当時東京国立博物館

## 1 研究背景

文化財輸送においては、落下衝撃に対してだけでなく、振動への対策も重視せねばならない。そのためには、緩衝材の振動特性を文化財輸送環境のレベルの範囲で詳細に把握しておくことが重要となる。文化財梱包における緩衝材の選択に関する研究に関して、特にキャンバスに描かれた絵画作品を対象としたものは、1980年代頃から梱包技術や輸送環境に関する研究の一環として比較的盛んに行われている<sup>1-5)</sup>。また近年、Lauchliらは、輸送会社が製作した文化財輸送に用いられるいくつかの定型梱包箱を用いた加振実験により相互比較を行い、トラック輸送時に発生する振動を効果的に減衰させるための梱包資材の組み合わせを検討している。衝撃吸収用と振動減衰用の2種類の梱包資材を組み合わせの場合、例えば、衝撃吸収に最適な静的応力を選択すると、振動の減衰が効果的でなくなる場合もあり、衝撃と振動の双方から効果的に保護するための手法の困難性について述べている<sup>6)</sup>。また、振動対策について、文化財近傍で音楽コンサート<sup>7)</sup>や大規模な工事<sup>8)</sup>が行われる際にその振動の絵画作品への影響を調査した報告があり、防振器を組み込んだ展示台の提案も論じられている。これらは非常にレベルの小さい振動に対する研究事例であるが、文化財は環境中の振動レベルが低くても素材自体が極めて脆弱であるために細心の注意を払う必要がある<sup>9)</sup>。

筆者らは博物館で開催する特別展覧会に

出品する文化財の借用、梱包、輸送といった作業に従事する機会がある。過去に開催した展覧会において、唐招提寺所蔵の国宝盧舎那仏坐像、興福寺所蔵の国宝阿修羅像といった仏像を梱包するに際し、緩衝材としてワイヤーロープ防振器(エニダイン(株))を使用したことがある(Fig. 1)<sup>10)</sup>。いずれも奈良と東京の間の陸上輸送であったが、文化財を損傷することなく無事に完了し、防振効果は発揮できたものと評価している。

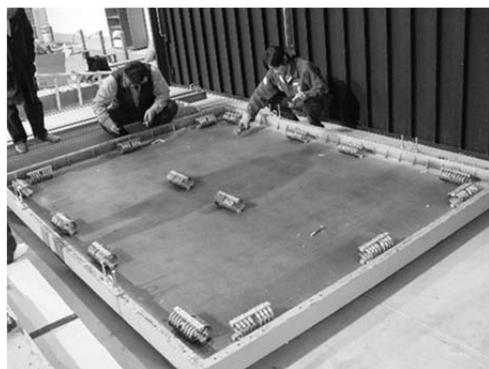


Fig.1 Wire rope isolators were set on the bottom of packaging case for big buhddism statue.

一方で、輸送後に加速度データロガーに記録されたデータを解析すると実際の輸送においては事前の想定よりも高い周波数帯域で共振が生じていたことが判明した。その現象を調査したところ、ワイヤーロープ防振器の加速度応答の非線形性に原因があることが実証された<sup>11)</sup>。

ワイヤーロープ防振器のカタログ仕様によると、その固有振動数は、1個あたりの支持荷重によって決まるとされている<sup>12)</sup>。ここではワイヤーロープ防振器のばね定数が一定という前提になる。文化財の輸送では、専用の車両<sup>13)</sup>が使用され、各工程は専門の

技術者によって慎重かつ丁寧に輸送されるため、基本的には輸送中に受ける振動（加速度および変位）が、商工業分野の商品のそれと比較すると格段に小さい<sup>14)</sup>。変位が非常に小さいと、ワイヤーロープ防振器のばね定数を一定とみなすことに無理が生じる。つまり、ばねとして非線形の領域で動作するようになるため、固有振動数もばね定数の値に応じて大きく変化する。

この現象は、ワイヤーロープ防振器以外の緩衝材においても起こる可能性があり、入力加速度に応じて固有振動数が変化することが推測される。そこで今回、文化財の梱包に頻繁に使用されている（Fig. 2）<sup>15)</sup>、ポリエチレンフォームの振動特性を検証することとした。



Fig.2 Polyethylene foam blocks were set between buhddisum statue and wooden frame.

## 2 実験目的

一般的な緩衝包装の手法では、緩衝材の固有振動数は、静的応力（単位面積あたりの支持荷重）と板厚の 2 つのパラメータにより決まるものとされている<sup>16)</sup>。

今回の実験では、パラメータに入力加速

度を加え、これら 3 つのパラメータの変化に伴い、緩衝材の固有振動数がどのように変化するかを測定する。

## 3 実験方法

### 【実験場所】

日本ビジネスロジスティクス(株)

### 【使用設備】

振動試験装置：(株)振研 G-8210-1LT-112

デジタル振動コントローラ：(株)振研 D-57 シリーズ

加速度センサー：Bruel & Kjaer 社 Model 4393

### 【緩衝材】

品名：サンテックフォーム 35

製造者：旭化成(株)

主原料：発泡ポリエチレン

密度：0.032 g/cm<sup>3</sup>

板厚：40 / 50 / 60 mm

### 【実験条件】

Fig. 3 に実験治具の略図を、Fig. 4 に外観を示す。静的応力は Table 1、加振条件は Table 2 にまとめた。加振に用いたのは正弦波である。静的応力はサンテックフォームの技術資料<sup>17)</sup>を参照し、緩衝包装に適的な範囲から区切りの良い数値を選定したものである。加振条件は予備試験を実施して上限を設定した。緩衝材の板厚条件が 3、荷重条件が 6、入力加速度条件が 4 の組合せであるため、全 72 回の加振実験を行うこととなる。

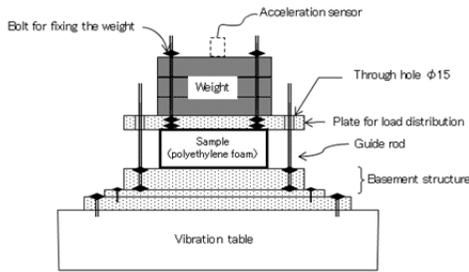


Fig.3 Vibration testing system



Fig.4 Vibration testing system on site

Table 1 Test condition

Mass of weight (kg)	Cushion area (cm <sup>2</sup> )	Static stress (kgf/cm <sup>2</sup> )
10	400	0.025
20		0.050
30		0.075
40		0.100
50		0.125
60		0.150

Table 2 Vibration condition

Direction	Vertical
Frequency range	4 Hz - 100 Hz
Sweep rate	0.5 Hz/s
Number of sweeps	1 (one way)
Input acceleration	0.1 G, 0.2 G 0.5 G, 0.8 G

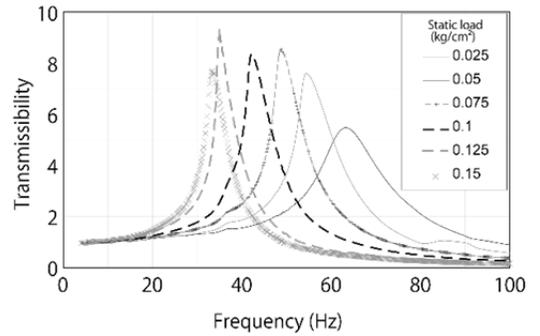


Fig.5 Transmissibility vs frequency of each static load at 40mm thickness · 0.1G

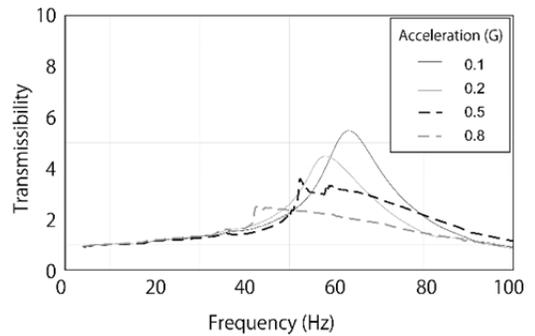


Fig.6 Transmissibility vs frequency of each acceleration at 40mm thickness · 0.025 kgf/cm<sup>2</sup>

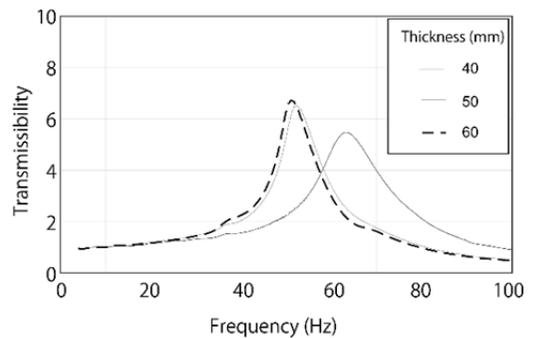


Fig.7 Transmissibility vs frequency of each thickness at 0.1G · 0.025 kgf/cm<sup>2</sup>

#### 4 解析結果

緩衝材の固有振動数の変化を調査するため、加振実験の結果を、加振した振動の周波数変化に伴う、その振動の伝達率変化としてプロットした。静的応力、入力加速度、板厚の内 2 つを固定し、残り 1 つを変化させた場合の代表的なプロットを抽出して Fig. 5 から Fig. 7 に示す。また、周波数、伝達率、静的応力の 3 軸を使った 3D プロットを、入力加速度と板厚毎に作成することで 72 回の加振実験のデータは 12 個の 3D プロットにまとめることができる。それら 12 個のプロットは Fig. 8 として示す。

Fig. 5 は、板厚 40 mm、入力加速度 0.1 G で固定し、静的応力を変動させた際の変化である。同図からは静的応力が大きくなるほど伝達率のピーク、すなわち固有振動数が低周波側へシフトする現象を確認することができる。

Fig. 6 は、板厚 40 mm、静的応力  $0.025 \text{ kgf/cm}^2$  で固定し、入力加速度を変動させた際の変化である。同図からは入力加速度が大きくなるほど、固有振動数が低周波側へシフトし、同時に固有振動数における伝達率が減少することを確認できる。

Fig. 7 は、入力加速度 0.1 G、静的応力  $0.025 \text{ kgf/cm}^2$  で固定し、板厚を変動させた際の変化である。板厚が大きくなるほど、固有振動数が低周波側へシフトする現象を確認することができる。

Fig. 8 で全体的な傾向を見た場合、伝達率の変化に着目すると、入力加速度の増加にともない、固有振動数における伝達率が急

激に低下する現象が確認できる。その一方で静的応力や板厚が変化しても、固有振動数における伝達率は、それほど大きく変化せず、緩やかな変化を示すにとどまっていた。また、固有振動数の変化に着目すると、いずれの板厚においても、静的応力の増加にともない、低周波側へシフトする現象と、入力加速度の増加にともない、低周波側へシフトする現象を確認できた。全体的には概ね以上のような傾向を示したが、個々の現象についてはまだ未解明な部分も残っており、今後の解析が完了した時点で続報を示したいと考えている。

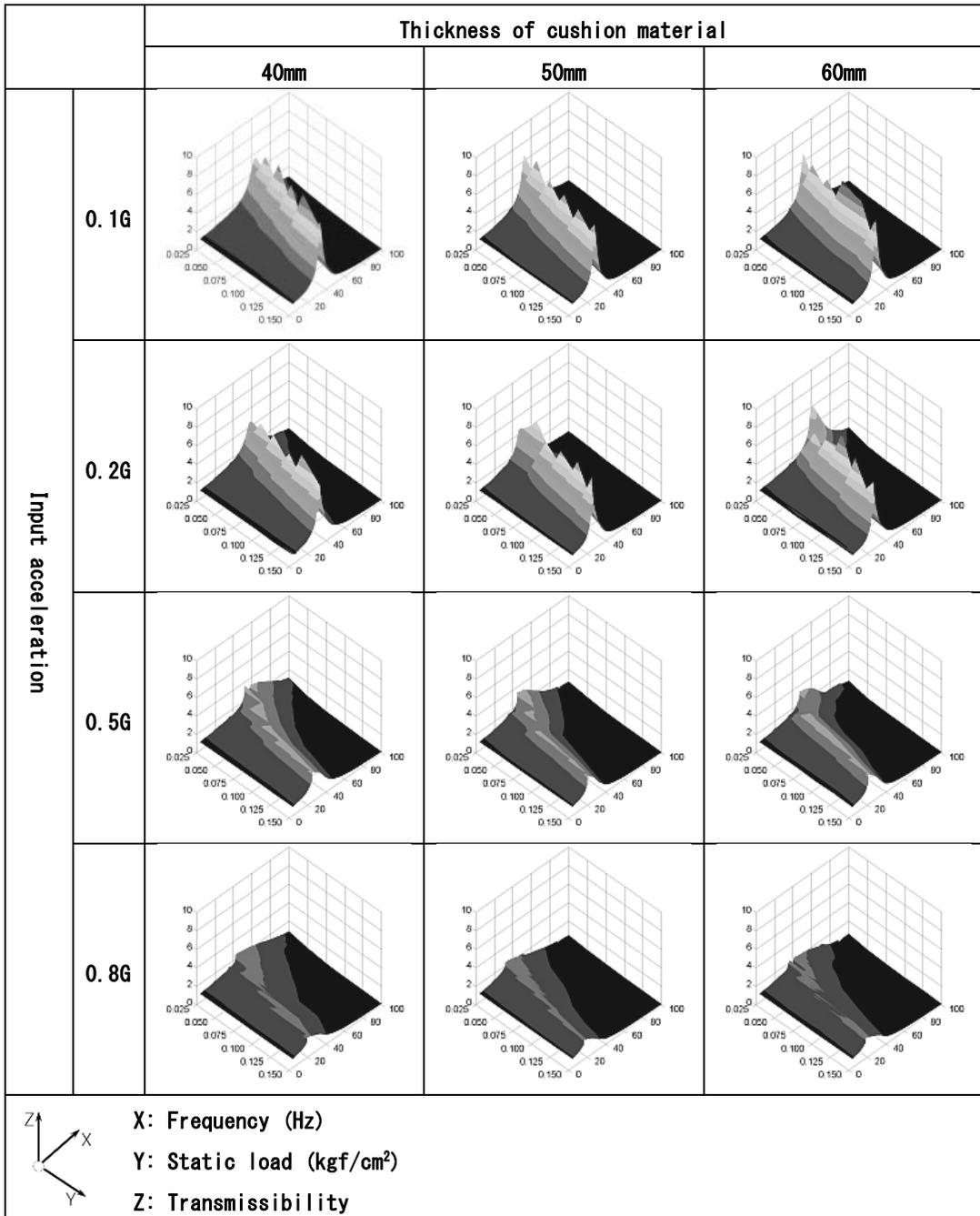


Fig.8 List of experiment results plotted on 3D coordinates with Frequency set as X axis, Static load as Y axis and Transmissibility as Z axis.

## 謝辞

本稿の一部は JSPS 科研費 16H03109 の助成を受けて実施されたものです。

## <引用文献>

- 1) Staniforth S., Packing: A Case Study, National Gallery Technical Bulletin, **8** pp.53-62 (1984)
- 2) Green T, Hackney S, The Evaluation of a Packing Case for Paintings, ICOM-CC 7th Triennial Conference Preprints, pp.84.12.81-84.12.86 (1984)
- 3) Art in Transit Studies in the Transport of Paintings, (Mecklenburg Marion F.), National Gallery of Art, 0-89468-163-X, (1991)
- 4) Lasyk Łukasz, Łukomski Michał, 他, Vibration as a Hazard During the Transportation of Canvas Paintings, Studies in Conservation, **53** (supl), pp.64-68 (2008)
- 5) Baschlin N., Lauchli M., 他, Backing Boards and Glazing on Paintings: Their Damping Capacity in Relation to Shock Impact and Vibration, ICOM-CC 16th Triennial Conference Preprints, (Bridgland Janet), Almada: Critério, pp.12pp. (2011)
- 6) Lauchli M., Baschlin N., 他, Packing Systems for Paintings: Amping Capacity in Relation to Transport-Induced Shock and Vibration, ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, Melbourne, 15-19 September 2014, (Bridgland Janet), Paris: International Council of Museums, pp.9pp. (2014)
- 7) Wei W., Kragt W., Visser A., Non-Contact Measurement of Vibrations in Paintings Using Laser Doppler Vibrometry, Art '05 – Proceedings of the 8th International Congress on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, Lecce, Italy, 15-19 May 2005, (2005)
- 8) Wei William, Krumperman N., Delissen N., Design of a Vibration Damping System for Sculpture Pedestals: An Integral Object-Based Approach, ICOM-CC 16th Triennial Conference Preprints, (Bridgland Janet), Almada: Critério, (2011)
- 9) Thickett David, Vibration Damage Levels for Museum Objects, pp.90-95 (2002)

- 10) 和田 浩, 文化財輸送の解析と評価, 東京国立博物館紀要, 第 51 号, 東京国立博物館, pp.1-84 (2016)
- 11) 神庭 信幸, 和田 浩, 他, CAEシミュレーション解析による緩衝機材の特性評価事例, 第 48 回全日本包装技術研究大会研究事例発表資料, pp.21-24 (2010)
- 12) エニダイン株式会社, ワイヤロープ防振器カタログ, [http://www.enidine.co.jp/02\\_product/04\\_pdf\\_02/Enidine\\_Isorator.pdf](http://www.enidine.co.jp/02_product/04_pdf_02/Enidine_Isorator.pdf), (アクセス日: 2018 年 5 月 1 日)
- 13) 和田 浩, 美術品輸送専用車両, 日本包装学会誌, 26 (6), pp.382 (2017)
- 14) 和田 浩, 高妻 洋成, 他, キトラ古墳壁画の輸送環境解析から見た文化財の輸送および荷役作業の評価に関する考察, 考古学と自然科学, 75 pp.59-74 (2018)
- 15) 和田 浩, 文化財の梱包, 日本包装学会誌, 26 (6), pp.293-301 (2017)
- 16) 長谷川 淳英, 包装設計, 輸送包装の基礎と実務, (斎藤 勝彦, 長谷川 淳英), 幸書房, pp.103-130 (2008)
- 17) 旭化成株式会社, サンテックフォーム技術資料, <https://www.asahi-kasei.co.jp/infofoam/suntecfoam/feature/flexible.html>, (アクセス日: 2018 年 5 月 1 日)
- (原稿受付 2018 年 5 月 2 日)  
(審査受理 2018 年 9 月 2 日)