

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

和田 浩¹，高妻 洋成²，脇谷 草一郎²，宇田川 滋正³，建石 徹³

●キーワード：加速度 (acceleration)，輸送 (transport)，梱包 (packaging)，荷役 (handling)
振動 (vibration)，衝撃 (shock)

1. はじめに

筆者らは文化財の輸送に用いられる輸送機関上で発生した加速度および梱包箱が受けた加速度を継続的に調査している。工業製品とは異なり、文化財に衝撃試験等を行いその脆弱性を評価することが不可能であり、どのようにどの程度文化財を梱包すればよいのかを判断することが極めて難しい。こうした状況下であっても、結果的に梱包によって文化財が強化され、輸送中に発生する振動や衝撃に耐えられるレベルになったとすれば、理論的には輸送による損傷を回避できる。しかし、表面の状態が劣悪、あるいは、強度が低いために、梱包資材と直接接触することのできない文化財や、全体的に極めて脆弱であるために、梱包による強度向上がさほど期待できない文化財も存在する。

本稿で輸送事例として取り上げる古墳壁画は、上記のように、梱包資材との接触が困難で、極めて脆弱である文化財の最たるものである。このような文化財を輸送するに際しては、梱包技術以外に、輸送中に輸送機関や荷役作業によって発生する振動、衝撃を最小限度に抑制するという工夫については、特に重視せねばならない。

輸送機関に関しての具体的な工夫としては低速で慎重に輸送することにより、振動、衝撃を抑制できると考え

られる。しかし、文化財の輸送において、低速走行による振動低減効果がどの程度得られるものであるのかを示したデータがほぼ存在しない。また、荷役作業については一般的に、文化財の梱包、輸送は専門の輸送会社あるいは輸送会社内の専門部署に所属する熟練した作業員がその作業を請け負うことが多い。近年創設された資格制度（遠藤：2017）や日々の訓練、実務経験によって作業員の技術は高いレベルで維持されており、輸送によって文化財が損傷した事例が極めて少ない現状がそれを裏付けている。しかし、作業員の荷役作業により発生する振動、衝撃レベルを数値的に公表したデータについても少ない。

こうした状況下で、筆者らはキトラ古墳壁画を修理施設から展示機能を持つ保存管理施設（管理施設）へと輸送する作業に携わる機会を得た。輸送は、比較的交通量の少ない郊外においての短距離経路という条件下で走行速度を低速に維持することができた。また、荷役作業についても、文化庁の指導下で極めて慎重に執り行われた。計測値以外の要素から判断した場合、上記輸送は国内文化財輸送において現在実現可能なあらゆる工夫を施した高い水準のものであると考えられる。今回は筆者らが全ての輸送工程に終始立ち合うことができ、作業内容を時刻とともに詳細に記録することで、加速度データロガー

¹ 東京国立博物館 〒110-8712 東京都台東区上野公園 13-9

² 奈良文化財研究所 〒620-8577 奈良県奈良市二条町 2-9-1

³ 文化庁 〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-2-2

の計測値と具体的な作業とを正確に結び付けることができた。

文化財の輸送中に発生する振動、衝撃に関しては古くからその危険性について認識されていた。特に空港内の荷役作業時や陸上走行時における路面凹凸からの振動、衝撃は作品への損傷リスクとして考慮すべきものであり、こうした観点に基づいた研究が、キャンバスに描かれた絵画作品の輸送安全性向上を目指したテーマとして、1980年代から1990年代初めに発表されている。例えば、ガラスカプセル方式の衝撃検知器を梱包箱へ設置する加速度検知方法 (Staniforth:1984)、温湿度、振動、衝撃が絵画へ及ぼす影響 (Michalski:1991)、展示室内での移動等の際に生じる振動 (Saunders et al:1991)、荷役作業時の加速度リスク (Marcon:1991)、ランダム振動を用いた加振試験の応用 (Caldicott:1991)、キャンバスの張り具合と振動応答性の関係性 (Green:1991) に関する研究等が存在する。また、緩衝材に関する研究の成果の一つとして、梱包箱の設計を支援するソフトウェア PadCAD が CCI (Canadian Conservation Institute) で開発された (Marcon and Strang:1999)。輸送環境モニタリングに関しては、ロンドンのナショナルギャラリーによる一連の輸送環境計測で、特に航空機輸送においては離着陸時よりも、カーゴエリアにおけるパレットへの固定を始めとする荷役作業で大きな衝撃加速度が発生しうることが報告された (Saunders:1998)。なお東京国立博物館の調査によって、この指摘は荷役作業の中でも特に空港内でのパレット牽引車両 (ドリー:Dolly) による工程で非常に大きな加速度が発生する現象が存在するとして実証されている (Kamba et al:2008)。さて、計測機器の進化に伴い、加速度データロガーが3軸方向での同時計測が可能となると、輸送中の各方向の振動に対する絵画キャンバスの応答 (Saunders:2005)、レーザー計測による輸送中のキャンバスの挙動計測 (Lasyk et al:2008) など、絵画作品が輸送中の振動から受ける影響の詳細な調査がなされるようになった。こうした経緯を踏まえ、近年ではトラック輸送時の振動から絵画を保護するための梱包システムに関する総合的な研究事例として、共振現象を回避するための梱包設計を実現するための非常に具体的な実験報告が存在する (Baschlin et al:2011, Lauchili

et al :2014)。

Fig.1 に示したのは脆弱な文化財を梱包する意義と効果についての概念図である。未梱包のある文化財の強度 (A) を上回る外力 (B) がある輸送中に発生する場合、梱包せずに輸送すると理論的にはこの文化財が損傷する。そこで、梱包によって文化財を強化し、強度を A' まで上げることができればこの輸送によって理論的には損傷を回避できる。簡単に表現すると文化財を梱包する意義と効果は上記のように説明できる。しかしながら、文化財は工業製品とは異なり、唯一無二の物体であるため、振動試験や落下試験などによってその強度 (A) を計測することができない。包装業界では A' と B の差は安全余裕と呼ばれており、工業製品の輸送では安全余裕を最小限度に抑えることがコストカットにつながる。従って製品の強度試験を行った上で梱包設計を行うのが通常の工程となるが、文化財の場合は強度 (A) が不明確ゆえ、安全余裕を多く見積もる必要がある。上述した文化財の輸送、梱包に関する研究を俯瞰し、その現状をまとめると、輸送中のリスク (B) のレベルがほぼ明らかとなり、特に絵画作品については強度 (A) についても多くの研究によって解明されつつある。また、主に絵画作品が対象となるが、梱包による効果 (A') についても定量化されつつある状況である。一方で、そもそも輸送中に発生する外力 (B) をどれだけ低減できるのか (矢印 C) については、研究報告がほぼ存在しない。本稿の位置付けはこの点について、低速走行による輸送と、熟練した技術者による荷役作業により発生する振動、衝撃レベルを数値的に表現したデータを得たことにより、いわば現時点で実現可能な最高水準を評価したものと捉えられる。

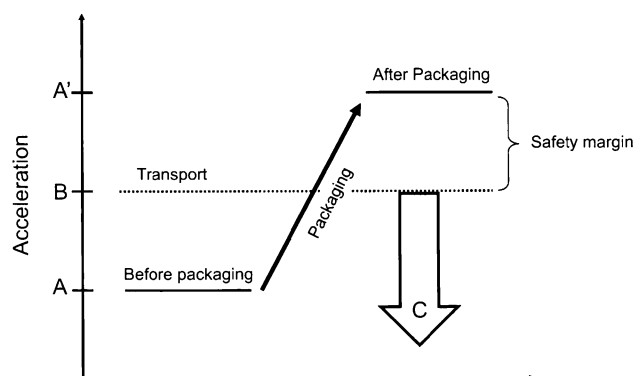


Fig.1 Strength of cultural properties and effect of packaging
文化財の強度と梱包による効果

2. 輸送概要

キトラ古墳壁画が輸送に至るまでの経緯については本稿では割愛し、輸送についての概要を説明する。輸送は修理施設から管理施設までを、全5面（東、西、南、北、天井）存在する壁画を1面ずつトラックに積載し、2016年8月に第1便から第3便、同年12月に第4便と第5便に分け、計5便が2期に分けて行われた。

輸送に用いられたトラックは車両サイズからいわゆる2t車と呼ばれるものであり、リアにエアサスペンション（2バグ）が設置された特殊車両である（Photo.1）。エアサスペンションの効果としては、リーフサスペンションと比較した場合、リーフサスペンション仕様ではエアサスペンション仕様よりも振動レベルが50%以上高くなることが報告されている（Charles D.Piece et al:1992）。



Photo.1 Specialized truck for cultural property
美術品輸送専用車両

文化財の輸送では振動軽減効果の高いエアサスペンション仕様が必須であり、その他諸々の工夫が施された特殊車両は美術品輸送専用車両（美専車）と呼ばれている。美専車が修理施設から管理施設までを走行する経路は約1.7kmの一般道路である（Fig.2）。全体の作業手順としては、修理施設内における壁画の梱包箱への設置、梱包箱の組立、美専車への搬入、美専車による輸送、管理施設到着後の美専車からの荷降ろし、梱包箱の開梱、壁画の取り出し、展示ケースへの設置という内容になる。全ての荷役作業と美専車の運転は美術品梱包輸送専門の作業者が担当した。また、梱包箱内外には奈良文化財研究所が無線式の温湿度データロガーを設置し（Photo.2）、

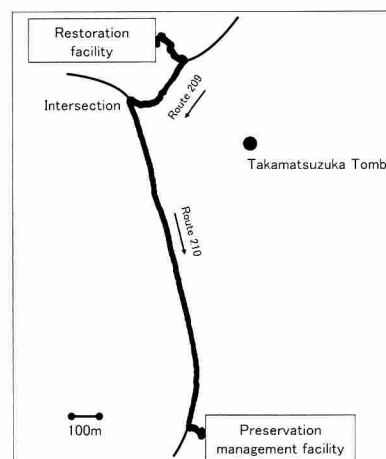


Fig.2 Transport route from the restoration facility to the preservation management facility.
修理施設から管理施設までの輸送経路

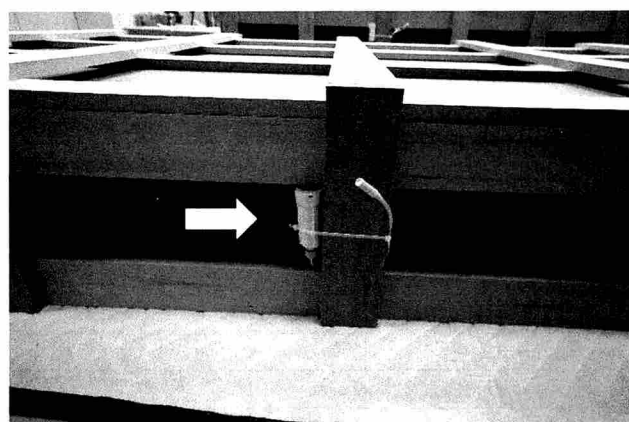


Photo.2 Data logger for temperature and humidity set on the packaging box.
梱包箱に設置した温湿度データロガー

管理施設到着後に梱包箱内外の温湿度差をリアルタイムでモニタリングしながら、安全に梱包箱の開梱を行うタイミングを決定した（脇谷ら:2017）。

3. 計測方法

今回の計測では加速度データロガーとGPSデータロガーを用いて、美専車荷台上および梱包箱上で発生した加速度およびそれらが発生した位置情報を計測した。加速度データロガーはLansmont社の「SAVER3X90」を用いた。この機種は内部に3軸方向の圧電型加速度センサーおよび温湿度センサーを有する。GPSデータロガーはmobile action社の「i-gotU GT-600」を用いた。仕様機材と計測設定についてはTable 1にまとめて示す。

加速度データロガーは美専車荷台上（Photo.3）と梱包箱底面（Photo.4）に両面テープで貼り付けて設置した。

Fig.3 は加速度データロガーの設置位置と梱包箱および壁画との関係を示したものである。壁画は修理によって裏面に金属製の支持体に取り付けられており、梱包箱(内箱)内では、水平に保ったまま支持体ごと緩衝材(発泡ポリエチレン)上に積載されている状態となる。内箱は2層段ボールおよび3層段ボールによって構成される頑丈な作りである。内箱全体を木枠で囲み、それが外箱に該当する。全5便の輸送における梱包箱の外観や概要をまとめたものがFig.4である。なお、1、5便と3、4便は修理後の壁画のサイズが同一であるため同一の梱包箱を使用している。5便全てについて、梱包箱底部、美専車



Photo.4 The acceleration data logger set on the packaging box.
梱包箱に設置した加速度データロガー

Table 1 Specifications and recording protocols for acceleration data logger and GPS data logger.

加速度データロガーとGPSデータロガーの仕様と計測設定

Acceleration data logger

Model	Saver 3X90
Company	Lansmont Corporation (USA)
Size	95 × 74 × 43 mm
Weight	473 g
Accelerometer type	Tri-axial piezoelectric
Sampling rate	5000 samples/s
Time triggered sampling	2 s
Recording window	1.6384 s
Sample size	8192

GPS data logger

Model	i-gotU GT-600
Company	Mobile Action Technology Inc.(Taiwan)
Size	46 × 41.5 × 14 mm
Weight	37 g
GPS	SiRF Star IV Low Power chipset
Time triggered sampling	1 s

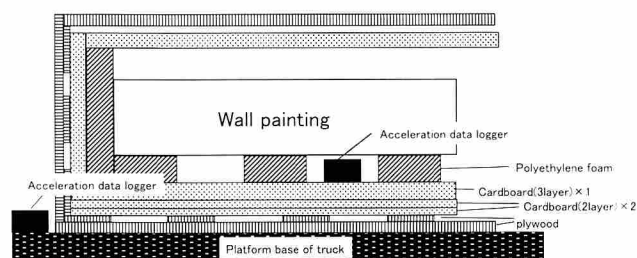


Fig.3 The cross section figure of packaging box and position of data loggers.

梱包箱断面図とデータロガーの位置

	1 Wall painting	2 Box	1+2		1 Wall painting	2 Box	1+2
No 1 West	50.5kg	78.7kg	129.2kg	No 5 East	55.1kg	77.5kg	132.6kg
No 2 Ceiling	72.0kg	87.7kg	159.7kg				
No 3 South	23.8kg	46.4kg	70.2kg	No 4 North	25.9kg	46.5kg	72.4kg

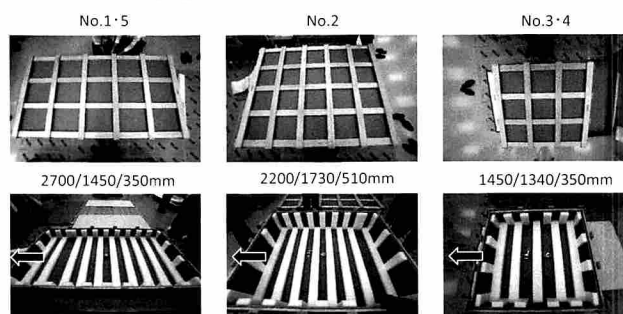


Fig.4 The appearance shapes and contents of all of the packaging boxes for five times transports.

全5便の輸送における梱包箱の外観や概要



Photo.3 The acceleration data logger set on the loading platform.
荷台に設置した加速度データロガー

荷台に加速度データロガーを設置し、全10データを解析対象として取得することになる。荷台上に設置した加速度データロガーは壁画の積み込み完了後に計測を開始(起動)し、管理施設到着後に計測を停止するため、記録されるのは車両走行中のデータのみとなる。一方、梱包箱に設置した加速度データロガーは設置後に起動し、壁画取り出し後に停止するため、荷役作業を含めた車両走行

中以外の工程についても記録される。2つの加速度データロガーを組み合わせることで、梱包、輸送、開梱という一連の環境を網羅的に記録することができる。

計測機材の設置に加えて、筆者らは一連の作業に同行し、随所でデジタルカメラによる撮影を行った。カメラの内蔵時計を予め時報によって標準時刻と合わせておくことで、撮影後の画像データにメタデータとして含まれる時刻情報を後の解析に役立てることができる。また、美専車輸送中は乗用車で追跡しながらデジタルカメラで動画撮影を行い、走行中のトラックの挙動を全て記録に収めた。

4. 解析結果と考察

(1) 全体の概要

加速度データロガーは計測設定によって定義された計測時間を1イベントとして、そのイベント内に発生した複数の加速度を連続的に記録する。1イベントとはTable 1中のRecording windowに該当し、1.6384sに設定した。従って加速度データロガーは2s毎に起動して、1.6384sの間に発生した加速度を記録することになる。また、本稿で扱う加速度単位Gは重力加速度の単位であり、 $1G \doteq 9.8\text{ m/s}^2$ に該当する。地球上で物体が自由落下する際の加速度が1Gである。

Table 2は、各便の梱包箱内に設置した加速度データロガーに記録された各イベントにおける3方向の加速度の中での最大加速度（通常これをピーク加速度と呼ぶ）の内、全イベントを通した最大の値を、3軸方向別に分けてまとめたものである。加速度の発生時刻とGPSデータやデジタル動画あるいは静止画に記録された情報から輸送工程を特定することができたので合わせて記載した。

各便で計測されたピーク加速度の最大値は概ね0.5G程度に収まっており、全便を通した最大値で1.67Gであった。また、ピーク加速度の最大値は車両走行中以外の荷役作業工程で発生しているものが多いことが分かる。これらの発生源となる作業内容を詳細に解析することが重要であると考え、梱包箱に設置した加速度データロガーの内、相対的に大きなピーク加速度が検出された第4便のデータを対象として、詳細な解析を行うことと

Table 2 The largest peak G of three direction of each transport and content of operation.
全輸送における各方向のピーク加速度の最大値とその作業内容

	Position	Direction	Peak acceleration(G)	Operation
No.1	Truck	1	0.16	
		2	0.27	
		3	0.39	
	Box	1	0.42	Loading to the truck
		2	0.30	Loading to the truck
		3	0.33	Running
No.2	Truck	1	0.25	
		2	0.30	
		3	0.43	
	Box	1	0.75	Loading to the truck
		2	0.56	Handling in preservation facility
		3	0.98	Loading to the truck
No.3	Truck	1	0.20	
		2	0.29	
		3	0.65	
	Box	1	0.44	Loading to the truck
		2	0.25	Loading to the truck
		3	0.65	Handling in preservation facility
No.4	Truck	1	0.17	
		2	0.44	
		3	0.48	
	Box	1	1.67	Loading to the truck
		2	1.48	Building the packaging box
		3	1.16	Building the packaging box
No.5	Truck	1	0.16	
		2	0.36	
		3	0.46	
	Box	1	0.41	Loading to the truck
		2	0.31	Running
		3	0.51	Loading to the truck

した。

(2) 荷役作業時に梱包箱が受けた加速度の解析について

① G_{rms} の時系列分布

ピーク加速度は直感的に輸送環境の過酷さを把握しやすく、まずは全体的な加速度のレベルを確認する上で使いやすい指標となる。ただし、連続した振動の中での最大値なのか、単発の衝撃なのかは生データの加速度変化波形を確認せねば判別が付かない。文化財が単発の加速度には耐えられるが、連続した加速度を受けて損傷するケースは十分に考えられる。つまり、加速度データロガーに記録される1イベント同士を比較した際、ピーク加速度が高いイベントの方がリスクとして他方よりも高いとは限らず、ピーク加速度としては低いが続いている程度の加速度を複数含んだ波形として表れているイベントの方が、文化財に与える影響としては大きいことが多い(Davit Thickett:2002)。特に検出された加速度が全体的に低いレベルである本事例においてはピーク加速度のみの評価だけでは十分ではないと判断した。そこで、

指標とされるのが実効加速度と呼ばれる加速度の実効値である。これは、1 イベントに含まれる全ての加速度の2乗値の平均の平方根をとったもので、加速度単位 of G と root mean square の頭文字を取って G_{rms} で表記される。加速度データロガーは1 イベント内 (1.6384s) で様々な大きさの加速度を 8192 データ記録する。 G_{rms} はそれら全てを総じて量的に評価するのに適した単位である。 G_{rms} は瞬時値の G を2乗したものを時間平均し、その平方根で表され、 G_{rms} と G との関係式は次式で表現される。

$$G_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T G(t)^2 dt}$$

Fig.5 は梱包箱内において記録された G_{rms} の時系列分布を美専車の走行速度とともにプロットしたものである。 G_{rms} の解析は、前後 (longitudinal)、左右 (lateral)、垂直 (vertical) の3方向について1 イベント内での値を算出したが、全方向をプロットすると図が煩雑になるため、ここでは垂直方向の G_{rms} のみを抽出した。一般的にトラックによる輸送では前後、左右方向の振動レベルは垂直方向と比較するとレベルが低く (S.Paul Singh et al:1992) 本事例についても同様の傾向が出ている。Fig.5 において G_{rms} 値の変化が全く見られない時間帯は梱包箱が静止している状態を示す。この時間は梱包箱内部と外気の温湿度との差を縮めるために管理施設内で安置したシーズニング工程に該当する。また、美専車の走行速度がプロットされた時間帯は壁画輸送中に該当する (Fig.5 中 R)。これらのシーズニングと走行中以外の時間帯に着目すると、いくつかの時間帯にあるレベルを持った G_{rms}

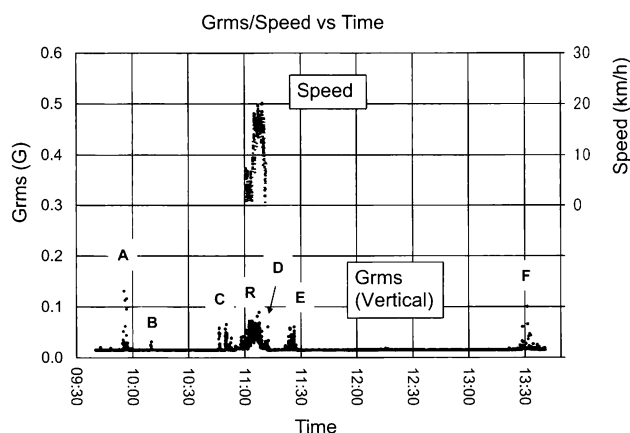


Fig.5 Change with time of G_{rms} (Vertical) and speed.
 G_{rms} と走行速度の時系列変化

値が集中して検出されており、Fig.5 中それらに A から F の記号を付した。A から F の時間帯に行われた作業については、上述した画像データなどによりその内容を特定することができた。Table 3 は作業時間帯とその詳細内容をまとめたものである。こうして G_{rms} の時系列分布 (Fig.5) から作業工程を区分し、作業工程の内容を追跡 (Table 3) することにより、輸送全体の状況を把握することができた。この情報を基にして、作業工程毎の詳細な解析を以下に行った。

Table 3 Time sections and operation contents.
各時間帯と作業工程

Section	Duration	Operation
A	09:58:20-10:00:08	Closing the packaging box.
B	10:21:12-10:21:28	Changing the direction of the pakaging box for preperation of loading to the truck.
C	10:50:08-10:53:27	Moving the packaging box from restoration studio to the preperation room and loading the truck.
D	11:15:24-11:16:02	After arriving at the exhibition hall, low the packing box from the truck.
E	11:26:04-11:29:34	Moving to the exhitition room and put the pakaging box on the floor.
F	13:37:18-13:38:28	Opening the pakaging box.
R	11:00:00-11:11:24	The truck ran on a public road.

②各工程の PSD

G_{rms} 値だけでは、それがどのような周波数の振動によって生じた加速度であるのかは分からない。計測された各イベントの加速度変化波形を FFT (Fast Fourier Transform:高速フーリエ変換) 解析することにより、どの周波数成分がどれだけ含まれているのかを確認することができる。その結果得られた単位周波数毎のパワー分布をプロットしたものは PSD (Power Spectral Density: パワースペクトル密度) と呼ばれる。本稿で示す PSD は、横軸が周波数 (Hz)、縦軸が単位周波数当たりの加速度の2乗 (G^2/Hz) を示しており、PSD を積分した値の平方根が実効加速度 (G_{rms}) という関係性である。

Fig.6-11 は各作業工程に対して求めた3方向別の PSD であり、各方向の PSD から算出した平均 G_{rms} が Table 4 に該当する。これらを解析することで以下の特性を見出すことができた。

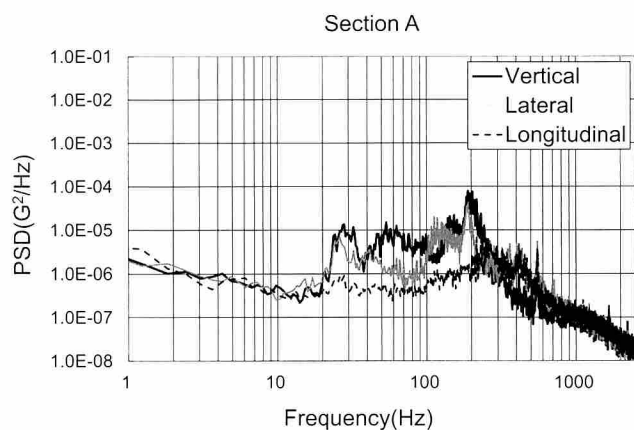


Fig.6 PSD plot for Sec.A(Closing the box)
Sec.A（梱包箱の組立て）における PSD

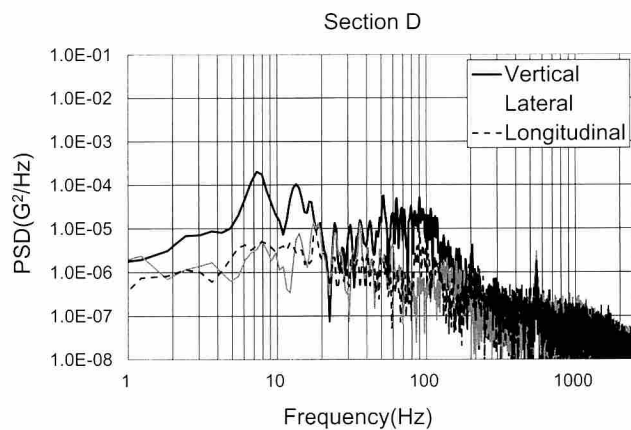


Fig.9 PSD plot for Sec.D(Unloading from the truck)
Sec.D（美専車からの荷降ろし）における PSD

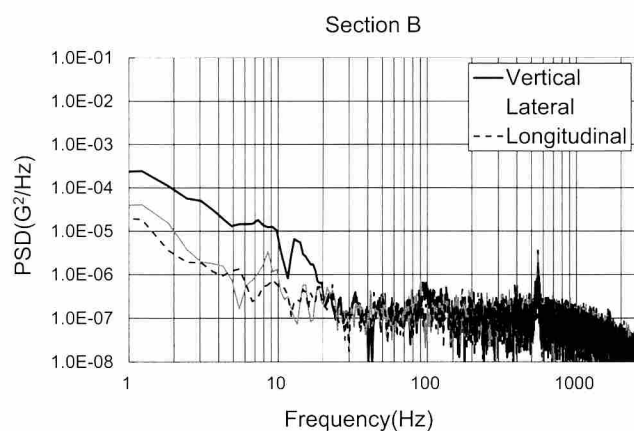


Fig.7 PSD plot for Sec.B(Changing direction of the box)
Sec.B（梱包箱の方向転換）における PSD

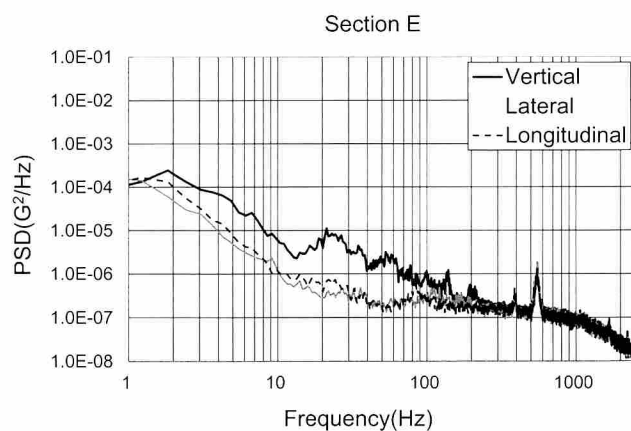


Fig.10 PSD plot for Sec.E(Moving to the exhibition room)
Sec.E（展示室への移動）における PSD

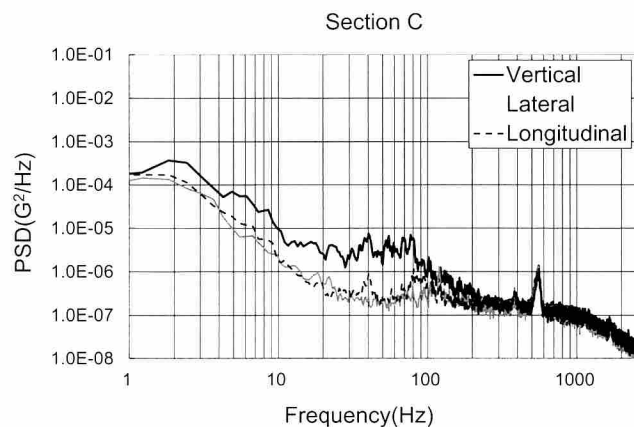


Fig.8 PSD plot for Sec.C>Loading to the truck)
Sec.C（美専車への積み込み）における PSD

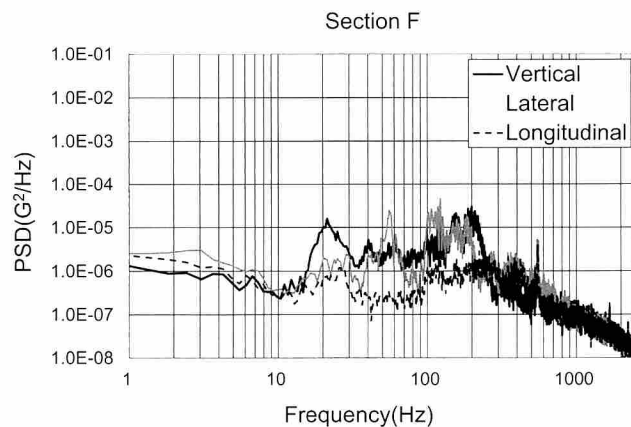


Fig.11 PSD plot for Sec.F(Opening the box)
Sec.F（梱包箱の解体）における PSD

(i)工程 A と F について

これらは箱の組立て（工程 A）と解体（工程 F）という組み合わせである。10Hz 以下の領域は小さく、20 から 200Hz 辺りの領域が大きいという傾向がみられる。作業は箱を床面に設置した状態で蓋を閉じるあるいは開ける、電動ドリルでビスを締めるあるいは緩める、といったことが主な内容となる。従って蓋を閉じる際は木材同士の擦れが発生し、電動ドリルからは回転に伴う振動が発生する。100-200Hz には例えば、ドリルのびびり振動（藤井ら:1985）等が現れていると考えられる。PSD にはこうした作業等の影響が表れているが、振動レベルとしては極めて低い。

(iii)工程 B, C, D, E について

これらは作業員が梱包箱を手で持ち上げた後の作業（工程 B, E）、美専車への積み込み（工程 C）、美専車からの荷降ろし（工程 D）が主な内容となる工程である。これら 4 つの作業工程に共通するのは、工具を使わず、身体の動きのみを用いた作業という点である。梱包箱底部が荷台表面や管理施設室内の床面とこすれることによる影響は多少含まれていると考えられるが、基本的には 20Hz 以下の周波数領域のみにピークが現れるという傾向が見られる。

以上は、壁画輸送中以外の荷役作業時において検出された加速度に対する解析である。荷役作業時には、加速度としては突発的に大きな値が出ていたが、その頻度は極めて小さかった。また、荷役作業工程における G_{rms} 値は後述する壁画輸送中の値と大きな差異は存在しなかった。ただし、荷役作業を行う時間は輸送時間と比較すると非常に短いため、文化財に対する同レベルの振動による影響であれば長時間作用する輸送の方が大きいと考えられる。

もちろん、こうした環境は文化財取り扱い者の技術の熟練度が大きく影響したものである。一般的に一定レベル以上の作業員がそれに従事するという前提で考えた場合、今回得られたデータからは、荷役作業時には、特に箱の持上げや降ろす際、箱の組立と解体時における作業をより慎重に行うことで大半のリスクは回避できると考えられる。文化財とは異なるが、一般的な宅配便で

輸送される荷物が受ける衝撃力の実態としては、加速度値として 10G 程度のレベルはそれが「ワレモノ」指定であっても頻繁に発生する（斎藤ら:1998）。文化財取り扱い者が高い技術力で慎重に作業を行った結果の輸送環境水準がどれほど高いものであるかが客観的に明確である。

Table 4 Average G_{rms} of each direction in each section
各工程における方向別の平均 G_{rms} 値

section	Grms(Ave.)		
	longitudinal	lateral	vertical
A	0.030	0.045	0.058
B	0.015	0.016	0.027
C	0.028	0.025	0.040
D	0.020	0.020	0.049
E	0.024	0.023	0.033
F	0.024	0.043	0.043
R	0.020	0.022	0.048

(3) 壁画輸送中の美専車荷台上で発生した加速度の解析について

①壁画輸送時とその他の輸送時における G_{rms} の時系列分布の比較

次に、荷台上に設置した加速度データロガーの記録から、荷台上で発生した加速度についての解析を行った。Fig.12 は壁画輸送中（Sec.R）に検出された G_{rms} （垂直方向）と走行速度の時系列分布である。この振動レベルを評価するためには、美専車を用いた他の文化財輸送の事例と比較する必要があるため、計測機器の設置や設定を同じ条件に合わせ、高速道路走行時のデータとして 5 つ、一般道路走行時のデータとして 5 つを計測した（Table 5）。この内、Ref.6 の一般道路走行時（Fig.13）と Ref.2 の高速道路走行時（Fig.14）について、壁画輸送中のデータ同様に G_{rms} （垂直方向）と走行速度の時系列分布を示す。これらの G_{rms} の時系列分布と比較すると、壁画輸送中の振動レベルが極めて低レベルに維持できていたことがよく分かる。低速で走行することにより、どの方向のどの周波数範囲の加速度成分が軽減する効果が得られるのかを解析するため、荷役作業時のデータ同様に PSD を用いた評価を行うこととした。

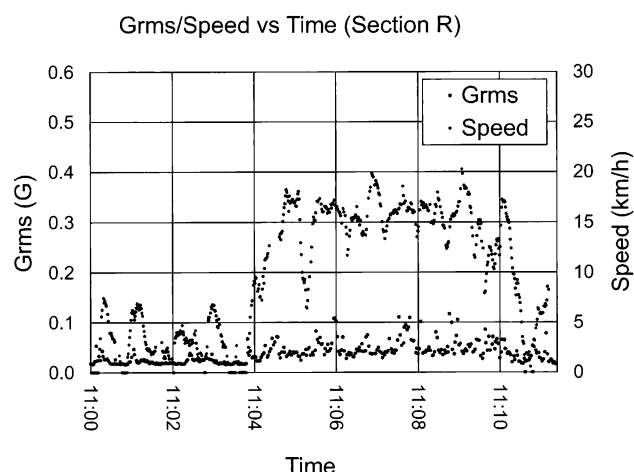


Fig.12 Change with time of G_{rms} (Vertical) and speed for Sec.R (during transport of wall painting).

Sec.R（壁画輸送中）の G_{rms} と走行速度の時系列変化

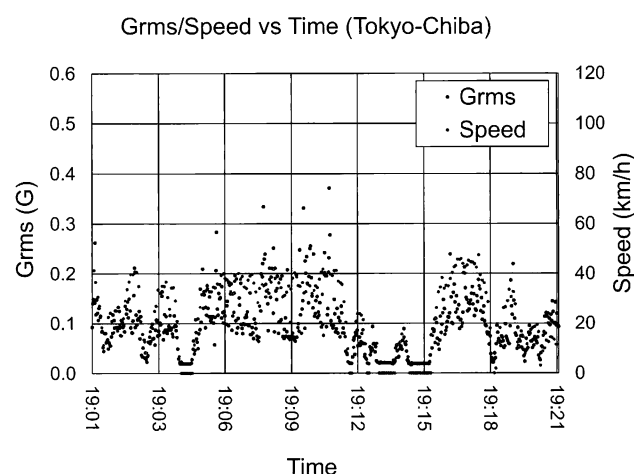


Fig.13 Change with time of G_{rms} (Vertical) and speed for public way transport in Ref.6.

Ref.6 の一般道路走行時における G_{rms} と走行速度の時系列変化

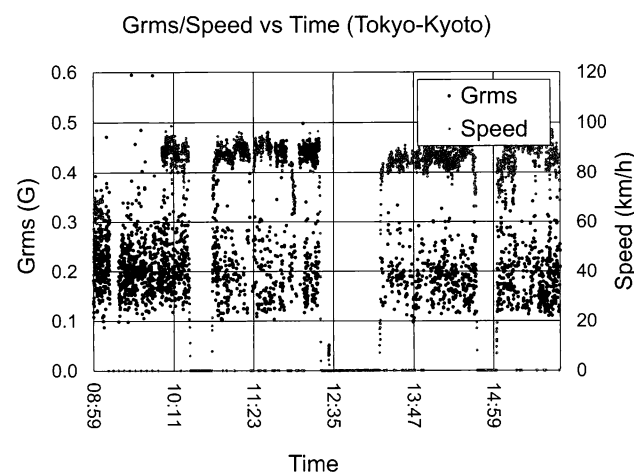


Fig.14 Change with time of G_{rms} (Vertical) and speed for high way transport in Ref.2.

Ref.2 の高速道路走行時における G_{rms} と走行速度の時系列変化

Table 5 List of other transport as comparison samples of wall painting transport. Specialized truck for cultural property was used in each transport, and measurement settings of the acceleration data logger were also the same as transport wall painting. Because the number of data was not enough, highway of Ref.1 and public load of Ref. 5 were excluded as comparison data in this paper.

壁画輸送時と比較対象とした他の文化財輸送時のデータ一覧。全て美専車を用いた輸送であり、加速度データロガーの計測設定も壁画輸送時と同一に揃えた。Ref.1 は高速道路走行時のデータ数が、Ref.5 は一般道路走行時のデータ数が十分ではなかったため、本稿では比較対象として取り扱わないこととした。

ID	Root		Date of Transport	Highway data	Public road data
	from	to			
Ref.1	Tokyo	Tokyo	21-Dec-16	—	●
Ref.2	Tokyo	Kyoto	8-Mar-17	●	●
Ref.3	Kyoto	Tottori	9-Mar-17	●	●
Ref.4	Tokyo	Kyoto	29-Jun-17	●	●
Ref.5	Kyoto	Nagasaki	30-Jun-17	●	—
Ref.6	Tokyo	Chiba	29-Jun-17	●	●

②壁画輸送中とその他の輸送時における PSD の比較

Fig.15-20 は壁画輸送中の美専車荷台上で発生した方向別の振動に対する PSD と Table 5 にリストアップした別件の文化財の輸送作業において一般道路走行中の 5 つの PSD を重ねてプロットしたものと、同様に高速道路走行中の 5 つの PSD を重ねてプロットしたものである。壁画輸送中の PSD は実線で、その他の輸送時の PSD は薄いグレーで表示した。また、Table 6 は PSD から算出した各輸送における方向別の平均 G_{rms} をまとめたものである。

トラック荷台上で発生する振動については、その発生源として、サスペンション由来の振動 (1-4Hz)、タイヤが路面凹凸を受けた際に生じた振動 (10-20Hz)、トラック荷台の構造に由来する振動 (40-55Hz) に区分されている (Jagjit Singh et al:2006, 瀬戸上:2010)。また、振動レベルについては、前後、左右方向は垂直方向と比較すると非常に低いことが報告されており (S.Paul Singh et al:1992)、今回算出されたどの方向の PSD に関しても同じ現象が見られる。高周波領域については詳細な報告が存在せず、発生源が明確ではないが、壁画輸送中の PSD では 500Hz 以上はほぼ現れなくなることから、走行速度やエンジンの回転数に依存して現れる振動ではないかと推測している。

方向別に詳細に比較すると、前後方向に関しては、壁

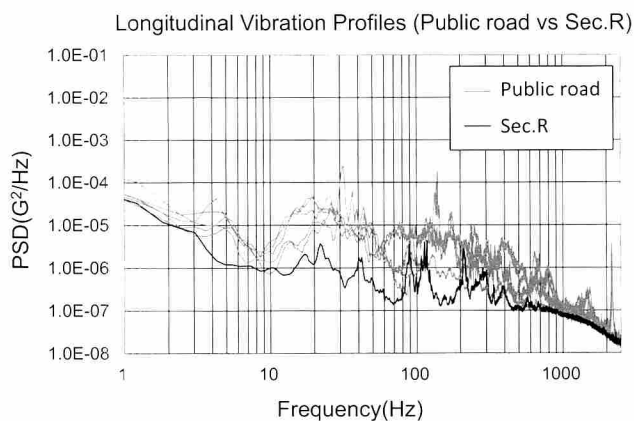


Fig.15 Comparison for PSD of longitudinal direction of wall painting transport (Sec.R) and public road transport (Ref.1.2.3.4.6).

壁画輸送時 (Sec.R) と一般道路走行時 (Ref.1.2.3.4.6) の前後方向における PSD の比較

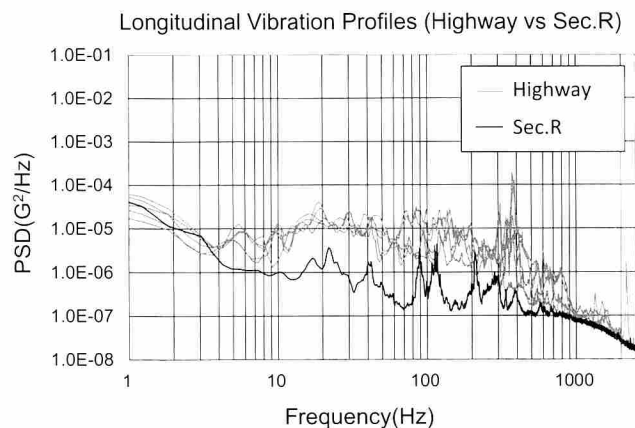


Fig.18 Comparison for PSD of longitudinal direction of wall painting transport (Sec.R) and highway transport (Ref.2.3.4.5.6).

壁画輸送時 (Sec.R) と高速道路走行時 (Ref.2.3.4.5.6) の前後方向における PSD の比較

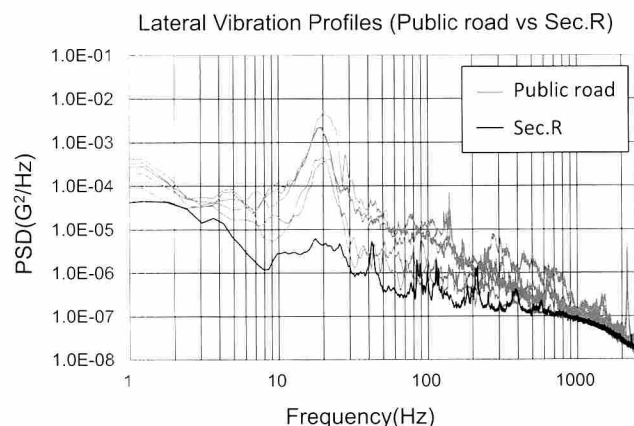


Fig.16 Comparison for PSD of lateral direction of wall painting transport (Sec.R) and public road transport (Ref.1.2.3.4.6).

壁画輸送時 (Sec.R) と一般道路走行時 (Ref.1.2.3.4.6) の左右方向における PSD の比較

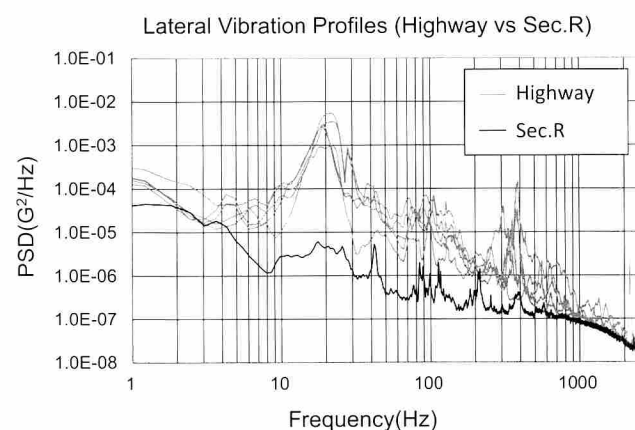


Fig.19 Comparison for PSD of lateral direction of wall painting transport (Sec.R) and highway transport (Ref.2.3.4.5.6).

壁画輸送時 (Sec.R) と高速道路走行時 (Ref.2.3.4.5.6) の左右方向における PSD の比較

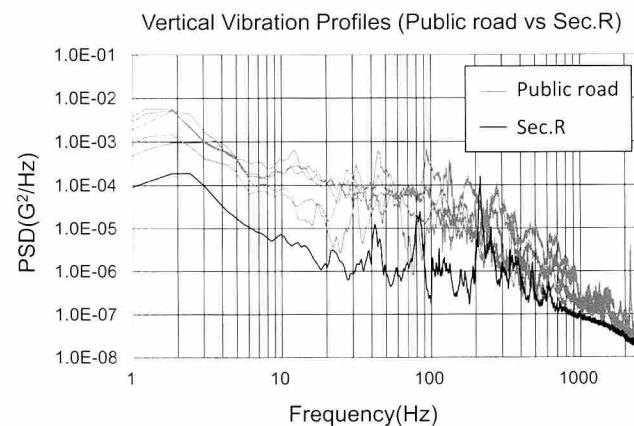


Fig.17 Comparison for PSD of vertical direction of wall painting transport (Sec.R) and public road transport (Ref.1.2.3.4.6).

壁画輸送時 (Sec.R) と一般道路走行時 (Ref.1.2.3.4.6) の垂直方向における PSD の比較

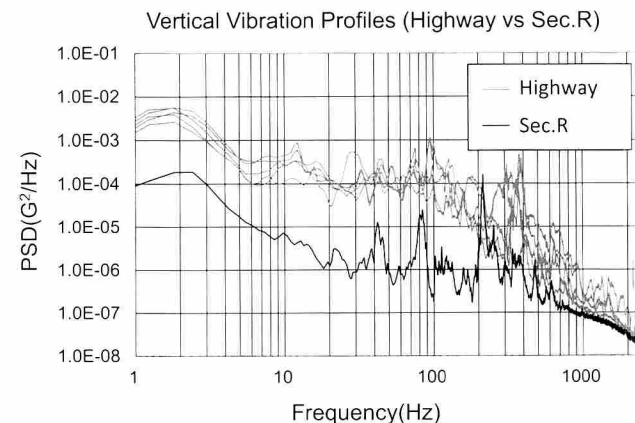


Fig.20 Comparison for PSD of vertical direction of wall painting transport (Sec.R) and highway transport (Ref.2.3.4.5.6).

壁画輸送時 (Sec.R) と高速道路走行時 (Ref.2.3.4.5.6) の垂直方向における PSD の比較

画輸送中、一般道路、高速道路の PSD に共通する 1-3Hz 領域はほぼ差異が無く、4Hz 以上の領域で壁画輸送中が他と比べて減衰している。ただし、前後方向はそもそも振動レベルが低く、壁画輸送中のデータが際立って低いレベルを示したのではない。左右方向に関しては、基本的には壁画輸送中の PSD は前後方向と同様の減衰傾向を示している。特に一般道路、高速道路では際立っている 20Hz 付近のピークが壁画輸送中では大きく減衰し、ピークとしてはほぼ現れていない。これは路面の凹凸をタイヤが乗り越えた際に発生する横揺れ現象（ロール振動）が走行速度の低下に伴い減衰することによる結果と考えられる。壁画輸送中の PSD で全周波数領域において振動レベルの低下が最も顕著に表れたのが垂直方向であり、1-200Hz 付近までの領域において、大きく減衰している。

Table 6 から今回計測したデータ内で相対比較すると、壁画輸送中の G_{rms} 値は垂直方向で最も減衰が大きく、概ね 80 km/h で走行する高速道路走行時の約 4 分の 1 に、15-45 km/h で走行する一般道路走行時の約 3 分の 1 程度のレベルに該当することが分かった。また、周波数域を限定して見た場合、左右方向における 20Hz の振動レベルは高速道路走行時、一般道路走行時の PSD と比較すると、共に最大で 100 倍程度減衰していることが分かる。これは加速度レベルで約 10 分の 1 の減少に該当する。

国内の道路事情を鑑みると、路面状態は整備頻度の高い高速道路が一般道路よりも良好である。従って路面から受ける振動や衝撃を考えた場合には、一般道路の方が高速道路よりも大きいレベルのものが生じるとも考えられるが、これまでの計測からは、高速道路走行時の方が大きく検出されている。この現象を生み出す因子の一つとして、走行速度の差が考えられる。速度と振動レベルの関係性については、基本的には高速走行中は荷台に発生する振動の全体のレベルが増加し、トータルで大きなエネルギーとなるため、高速走行時は振動レベルを低く保つことはできないと考えられている（長谷川:2008）。さらにエアサスペンション仕様のトラックについては、速度と G_{rms} との関係において、45 km/h 以上の場合には速度上昇に伴い顕著な変化は見られないが、45 km/h 以

Table 6 Average G_{rms} for each direction calculated from PSD wall painting transport(Sec.R), public road transport, highway transport

壁画輸送時 (Sec.R)、一般道路走行時、高速道路走行時における PSD から算出した方向別の平均 G_{rms} 値

public road	Longitudinal	Lateral	Vertical
Ref.1	0.040	0.056	0.100
Ref.2	0.052	0.123	0.175
Ref.3	0.049	0.119	0.173
Ref.4	0.059	0.183	0.189
Ref.6	0.030	0.066	0.107
Sec.R	0.020	0.022	0.048

high way	Longitudinal	Lateral	Vertical
Ref.2	0.078	0.152	0.213
Ref.3	0.081	0.134	0.229
Ref.4	0.048	0.173	0.202
Ref.5	0.050	0.214	0.232
Ref.6	0.037	0.098	0.164

下では速度上昇に伴い G_{rms} が増加する現象が報告されている (Fei Lu et al:2010a)。つまり、低速で走行する場合にはより低速の方が安全性は高まるが、ある程度の速度以上になるとその効果は薄れることになる。壁画輸送中は美専車は約 15 km/h で走行しており、他の PSD と比較した際に G_{rms} が非常に小さかった結果は上記報告と一致する結果である。

一方、路面状態に関しては、一般道路の方が高速道路よりも整備されていないのは事実である。一般道路上を走行する場合の輸送環境を正確に把握するためには、高速道路上と比較するとより細かなサンプリング間隔を要するのは、高速道路に比べて路面凹凸による衝撃波発生頻度が高いことに起因するという報告がなされている (Fei Lu et al:2010b)。しかしながら、前述した通り文化財輸送においては必ずしもこの現象が該当しない。これは美専車が慎重かつ低速で走行していることによる効果

または運転者の技術力による効果とも推測されるが、一般道路走行時のデータ数が未だ少ないため原因特定は難しい。いずれにしても、道路が未舗装という状況、可能性も含めると一般道路の走行に注意を払うことは、輸送環境の安全性の向上に確実に寄与する点は、今回実証できたと考えている。

(4) 振動や衝撃に対する文化財の耐性について

工業製品については衝撃加速度に関しての耐性に関する程度の目安が存在する（United States Department of Defence 1997）（Table 7）。これらは振動試験や衝撃試験を行った上での経験値という見方ができる。

Table 7 Fragility of military equipments and industrial products
軍事機器、工業製品の許容加速度による脆弱性評価

Fragility (G)	Equipment
15-24	Missile Guidance Systems, Precision Aligned Test Equipment, Gyros, Inertial Guidance Platforms
25-39	Mechanically Shock-Mounted Instruments, Digital Electronics Equipment, Altimeters, Airborne Radar Antennas
40-59	Aircraft Accessories, Most Solid-State Electronics Equipment, Computer Equipment
60-84	TV Receivers, Aircraft Accessories
85-110	Refrigerators, Appliances, Electro-Mechanical Equipment
110-	Machinery, Aircraft Structural Parts such as Landing Gear, Control Surfaces, Hydraulic Equipment

一方で、文化財についてこうした境界線を定めるのは極めて難しい。本稿冒頭で述べたように各種の試験を実物に対して施すのはほぼ不可能である。また、輸送によって損傷した場合であっても、こうしたネガティブな情報は公表された事例が少ない。さらに、その輸送時に加速度データロガーによる計測がなされているという条件を加えると、より文化財が破損する加速度レベルを知る困難性が増してしまう。そうした背景はあるものの、筆者らが計測に関与した海外輸送において、文化財が損傷した事例が1件存在するので、その計測値に関する考察をここで補足する。重要文化財の「埴輪 猪」が2006年にカナダから日本への輸送中に前脚部分を損傷した（Photo. 5）。



Photo.5 Haniwa damaged by transport
輸送によって損傷した埴輪

当該輸送では、航空機輸送時に機内へ積載する際、同じパレットに固定されていた別の文化財の梱包箱内に加速度データロガーが設置されていた。そのデータ解析を行ったところ、カナダの空港内でドリーによる牽引工程（Photo. 6）において非常に大きな加速度が検知されており（Kamba et al:2008）、加速度変化の波形（Fig.21）から、ピーク加速度で10G発生していたことが分かる（ただし、この値は当該輸送における加速度データロガーの計測設定上の最大値であり、波形を見る限り実際はそれを超える加速度が発生したと推定される）。また、そのイベントの G_{max} は、1.605Gである。この値は当該輸送の全工程において加速度データロガーが記録した最大値に該当するが、どの瞬間に文化財が破損したのかは不明である。

仮に、ドリーによる牽引時に破損したのであれば、こ



Photo.6 Transportation process by Dolly in the airport
空港内のドリーによる輸送工程

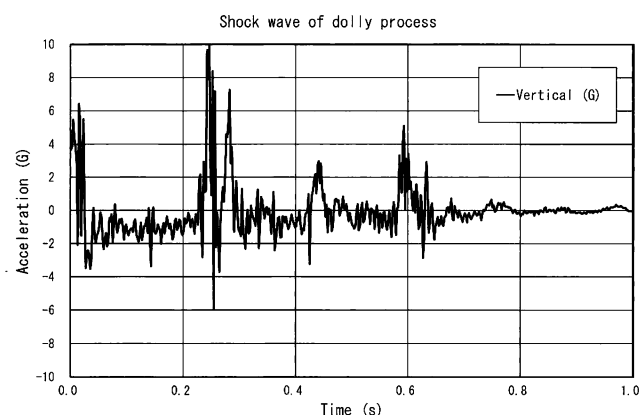


Fig.21 Shock waveform including the maximum acceleration generated during the transport process by Dolly (vertical acceleration only)

ドリーによる輸送工程で発生した最大加速度を含む衝撃波形（垂直方向の加速度のみ）

の値が損傷を引き起こすレベルという判定に繋がるが、あくまでもこの埴輪に関しての評価にとどまる。また、素材や構造が異なれば当然強度も変わるため、文化財全般の耐性を考察するには現状ではデータ数が圧倒的に不足している。この課題については、今後、文化財の素材等について振動、衝撃試験を行い、輸送対象となる文化財の強度を推定するための工程を提案する計画である。いずれにしても、壁画輸送時に計測された加速度レベルは非常に低いものであるという評価は変わらない。逆の見方をすれば、今回の加速度レベルであっても損傷危険性の高い文化財は、輸送によって損傷する危険性も非常に高いと認識すべきである。

5. まとめ

本稿では、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を行った。その結果は以下の通りにまとめることができる。

(1) 荷役作業について

荷役作業時における解析結果は以下にまとめられる。

- ・荷役作業全体では突発的に大きな加速度が発生することがあるが、その頻度は極めて小さい。
- ・ G_{rms} （実効加速度）で振動レベルを評価した場合、美専車走行中の荷台上のレベルと大きな差異はない。ただし、振動が作用する時間が短く、同レベルの振動であれば走行中よりも影響は小さいと評価できる。
- ・3方向の内、垂直方向の振動レベルが大きい。
- ・ドリル等の工具を主に用いた工程では、10Hz以下の振動レベルは小さい。100-200Hzに振動が検出されるが、振動レベルは極めて小さい。
- ・作業員が身体のみを用いた工程では20Hz以下に振動が集中する。

(2) 壁画輸送について

15 km/hの低速で一般道路を走行した場合、高速道路走行時（約80 km/h）および一般道路通常走行時（15-45 km/h）との比較から以下にまとめられる。

- ・ G_{rms} を比較すると、高速道路走行時の4分の1、一般道路通常走行時の3分の1程度に振動レベルが減少する。
- ・垂直方向の振動レベルが周波数全域で大きく減少する。また、垂直方向の振動レベルは全ての走行において最も大きい。
- ・周波数域を限定すると左右方向の20Hzの周波数における振動レベルが大きく減少し、振動レベルとして100倍程度の差異に該当する。
- ・500Hz以上の振動レベルはほぼ無くなるとみなすことができる。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP16H03109の助成を受けたものです。感謝申し上げます。

参考文献

- 遠藤啓 2017 「第6回美術品梱包輸送技能取得士認定試験の実施について」 博物館研究 52 (7) pp.24-25
- 斎藤勝彦・久保雅義・劉剛 1998 「宅配便で輸送される荷物が受ける衝撃力の実態」 日本包装学会誌 7 (1) pp.23-33
- 瀬戸上裕 2010 「輸送包装設計 (1) 輸送ハザードと荷扱い特性」 日本包装学会誌 20 (1) pp.42-55

- 長谷川淳英 2008 「走行速度と加速度実効値」 斎藤勝彦・長谷川淳英（著）『輸送包装の基礎と実務』
幸書房 pp.98-101
- 藤井洋・丸井悦男・江馬諭 1985 「ドリルのびびり振動の発生機構」 日本機械学会論文集 C 編 51 (462)
pp.436-445
- 脇谷草一郎・高妻洋成・柳田明進・金旻貞・和田浩・宇田川滋正・建石徹 2017 「キトラ古墳壁画搬送時
の熱・水分環境評価」 日本文化財科学会第 34 回大会研究発表要旨集 pp.250-251
- Baschlin, N., M. Lauchli, T. Fankhauser, C. Palmbach, and A. Hoess 2011 "Backing boards and glazing on
paintings: Their damping capacity in relation to shock impact and vibration" In: Janet Bridgland (ed.)
"ICOM-CC Lisbon 2011 : preprints" Almada: Critério 12pp.
- Caldicott, P.J. 1991 "Vibration and shock in transit situations: a practical evaluation using random vibration
techniques" In: M.F. Mecklenburg (ed.) "Art in transit: studies in the transport of paintings" National
Gallery of Art SE-1-SE-7.
- Charles D.Piece, S.Paul Singh, Gary Burgess 1992 "A Comparison of Leaf-spring with Air-cushion Trailer
Suspensions in the Transport Environment" Packaging technology and science 5 pp.11-15
- David Thickett 2002 "Vibration damage levels for museum objects" ICOM-CC 13th Triennial Meeting, Rio
de Janeiro, 22-27 September 2002 preprints Vol.1 pp.90-95
- Fei Lu, Yutaka Ishikawa, Hiroaki Kitazawa, Takaaki Satake 2010a "Effect of Vehicle Speed on Shock and
Vibration Levels in Truck Transport" Packaging technology and science 23 pp.101-109
- Fei Lu, Yutaka Ishikawa, Hiroaki Kitazawa, Takaaki Satake 2010b "Effects of Sampling Intervals on Truck
Transport Vibration Levels" 農業施設 41(3) pp.103-110
- Green, T. 1991 "Vibration control: paintings on canvas supports" In: M.F. Mecklenburg (ed.) "Art in transit:
studies in the transport of paintings" National Gallery of Art pp.59-67
- Jagjit Singh, S.Paul Singh, Eri Joneson 2006 "Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf
Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate these Conditions" Packaging
technology and science 19 pp.309-323
- Kamba, N., Wada, H., Tsukada, M., Takagi, Y., and Imakita, K. 2008 "Measurement and analysis of the
global transport environment for packing cases for artifacts" In: Saunders, D., Townsend, J., Woodcock
S. (eds.) "Conservation and Access: Contributions to the IIC London Congress, 15-19 September 2008"
International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works pp.60-63
- Lasyk, L., M. Lukomski, L. Bratasz, and R. Kozlowski 2008 "Vibration as a hazard during the
transportation of canvas paintings" Studies in Conservation 53 (supplement 1) pp.64-68
- Lauchli, M., Baschlin, N., Hoess, A., Fankhauser, T., Palmbach, C., Ryser, M. 2014 "Packing systems for
paintings: damping capacity in relation to transport-induced shock and vibration" In: Janet Bridgland
(managing ed.) "Preprints ICOM-CC 17th Triennial conference, Building strong culture through
conservation, 17-19 September 2014, Melbourne, Australia" (Electronic publication) The International
Council of Museums 9pp.
- Marcon, P.J. 1991 "Shock, vibration, and the shipping Environment" In: M.F. Mecklenburg (ed.) "Art in
transit: studies in the transport of paintings" National Gallery of Art pp.121-132
- Marcon, P.J., and T.J.K. Strang 1999 "PadCAD User manual - Cushion design software" Canada: Minister,

Public Works and Government Services ISBN 0-660-17870-2 30p

- Michalski, S. 1991 "Paintings – Their response to temperature, relative humidity, shock, and vibration" In: M.F. Mecklenburg (ed.) "Art in transit: studies in the transport of paintings" National Gallery of Art pp.223-248
- Saunders, D., et al. 1991 "Soft pack – the soft option?" In: M.F. Mecklenburg (ed.) "Art in transit: studies in the transport of paintings" National Gallery of Art pp.311-321
- Saunders, D. 1998 "Monitoring shock and vibration during the transportation of paintings" National Gallery Technical Bulletin 19 pp.64-73
- Saunders, D., 2005 "The effect of painting orientation during air transportation" In: I. Verger(ed.) "ICOM Committee for Conservation, 14th Triennial Meeting, The Hague, 12-16 September 2005: Preprints" James and James / Earthscan pp.700-707
- Staniforth, S. 1984 "Packing: A Case Study" National Gallery Technical Bulletin 8 pp.53-62
- S.Paul Singh, John R.Antle, G. Burgess 1992 "Comparison Between Lateral, Longitudinal, and Vertical Vibration Levels in Commercial Truck Shipments" Packaging technology and science 5 pp.71-75
- United States Department of Defence 1997 "MIL-HDBK-304C, DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK: PACKAGE CUSHIONING DESIGN" 94p

(2017 年 9 月 4 日受付, 2017 年 11 月 27 日受理)

Evaluation of the Transportation and Handling of Cultural Properties with a Special Focus on the Transportation Environment of the Kitora Tomb Wall Paintings

Hiroshi Wada¹⁾, Yousei Kouzuma²⁾, Soichiro Wakiya²⁾, Shigemasa Udagawa³⁾, Toru Tateishi³⁾

¹⁾ Tokyo National Museum, 13-9 Ueno Park, Taito-ku, Tokyo 110-8712

²⁾ Nara National Research Institute for Cultural Properties, 2-9-1 Nijyo-cho, Nara 630-8577

³⁾ Agency for Cultural Affairs, 3-2-2 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8959

In addition to protecting cultural properties from vibration and shocks by employing effective packaging techniques, methods to reduce vibration and shocks during transportation and handling must also be developed. It is expected that vibration and shocks can be minimized by transporting items slowly and carefully. However, there is a lack of quantitative analyses examining the extent to which vibration can be reduced by the careful transportation of cultural properties. Furthermore, scant numerical data are available describing the vibration and shock levels generated by handling operations. Thus, objective data on the transportation and handling of cultural property are insufficient.

We were involved in transporting the Kitora Tomb wall paintings from a restoration facility to a preservation management facility. We measured acceleration during packaging operations and transportation using an acceleration data logger.

The analysis of handling operations shows the following trends: (1) sudden, large accelerations may occur, but are infrequent; (2) based on G_{rms} , the vibration level of handling operations is approximately the same as the vibration level of the cargo area of the truck during driving; (3) the vibration level in the vertical direction is high; (4) the use of tools, such as drills, infrequently creates vibration frequencies below 10 Hz; and (5) vibrations caused by manual labor are generally below 20 Hz.

During transportation by truck, the wall paintings were transported at a very low speed (about 15 km/h). The comparison between low-speed transportation to highway transportation (about 80 km/h) and public road transportation (15–45 km/h) for other cultural properties using the same type of truck revealed the following trends: (1) G_{rms} for the very low speed transportation of the wall paintings was approximately one-quarter that for highway transportation and one-third that for public road transportation; (2) vibration levels in the vertical direction were considerably reduced over the entire frequency range; (3) 20 Hz vibration in the horizontal direction was considerably reduced; and (4) vibration over 500 Hz was negligible. This study establishes a methodology for assessing the handling and transportation of cultural property. We would like to continue accumulating data in order to ensure safety in the packaging, handling, and transportation of cultural property according to a scientific basis.