

技術報告~~~~~

美術品輸送専用車両荷台上での振動に対する 高速道路橋梁部伸縮継手の影響に関する研究

和田 浩*

A Study on the Influence of Expansion Joints on Expressway Bridges on Vibration of Platform of Truck Specialized for Transport of Art

Hiroshi WADA *

文化財輸送に添乗するクーリエ等からは「高速道路のつなぎ目を通過する際の振動が気になる」という話がよく聞かれる。そこで、文化財の輸送に用いられる専用のトラック(美術品輸送専用車両(美専車))の中でも高い頻度で使用される、2 t 車と 4 t 車が特に、首都高速道路で頻繁に現れる高速道路橋梁部伸縮継手を美専車が通過する際に、振動レベルへどのような影響が生じるのかについて重点的に調査を行った。Grms 値から見ると 2 t 車の方が 4 t 車よりも継手走行時の影響が大きく現れる傾向が見られた。また、今回実施した走行試験では往路と復路の Grms において明確な差異が認められた。荷台上の位置による振動レベルの差異は存在し、荷台上の振動レベルの分布は、4 t 車の方が、往路復路ともに明確な傾向が見られた。垂直方向については、後輪車軸上の中央部にピークが存在し、荷台前方に向かい徐々に減衰していた。4 t 車、2 t 車ともに継手走行時では、2 Hz から 4 Hz の振動が増加していた。

Many museum staff who accompanied the transport of arts are concerned about the vibrations that occurred when the truck passed through the joint of the expressway. Vibrations generated on the platform during traveling 2 t truck and 4 t truck, which are frequently used in dedicated trucks used for transporting cultural properties were measured in this study. An important investigation was made, in particular, on the influence on the vibration level when the truck passes through the expressway bridge extension joint frequently appearing on the Metropolitan Expressway. From the Grms value, there was a tendency for 2 t truck to show a greater influence on expansion joint than 4 t truck. In the running test conducted this time, a clear difference was found between Grms on the outward route and return route. There was a difference in vibration level depending on the position on the loading platform, and the distribution of the vibration level on the loading platform showed a clear trend in the 4 t truck. In the vertical direction, there was a peak at the center part on the rear wheel axle, and it gradually declined toward the front of the loading platform. Vibration of 2 Hz to 4 Hz increased at the time of joint running with both 4 t and 2 t trucks.

キーワード：文化財、梱包、輸送、博物館、伸縮継手、高速道路

Keywords: Cultural Properties, Packaging, Transportation, Museum, Expansion Joint, Expressway

*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

1 はじめに

筆者らは文化財輸送環境において重要な影響をもつ環境因子である振動、衝撃から文化財の劣化を予防することを目指して、その発生実態を把握するための環境計測を継続している。国内における文化財の陸上輸送では美術品輸送専用車両（美専車）が用いられ、そこにはクーリエとして博物館職員が添乗するのが通常となっている。クーリエからの聞き取りおよび筆者自身の体験からも、高速道路の橋梁部の走行時に伸縮継手（Fig. 1）を通過する際、車両がある程度の音とともに振動するため、積載された文化財への影響が懸念されている。特に首都高速道路は大半が高架で構成されており、区間によっては伸縮継手が多発する。公道の高速道路であるために他の走行車両も当然存在し、安全な車間維持のためにも美専車だけ極端に減速するわけにもいかない。したがって、ある程度の速度で伸縮継手部の段差を乗り越えねばならない。そこで、今後も必ず利用せねばならない高速道路および通過せねばならない伸縮継手部に関してのリスク評価を目的として、美専車を借り上げ、首都高速道路などにおいて走行試験を実施し、特に伸縮継手多発地帯での荷台上の振動レベルを重点的に解析することとした。また、荷台上の振動レベルに明確な分布傾向が存在するのであれば、将来、文化財の荷台への積載方法に関するレギュレーション

化を行う際に有用な情報となる。本稿は上記背景のもとで実施した走行試験の結果および解析と考察について論じるものである。



Fig. 1 Expansion joint on expressway

2 既往研究と本稿の位置付け

道路橋は鉄骨から構成されており、寒暖差に伴う伸縮を吸収するためのジョイントとして、伸縮継手が必要となる。伸縮継手については車両が通過する際に受ける振動やその際に発生する騒音が、橋の損傷や周辺環境の悪化につながる因子となりうる。こうした課題に関連する既往研究としては実態調査から始まり、本田らは、道路橋の伸縮装置部を自動車が通過する際に生じる衝撃に着目し、道路橋路面の実態調査として、北陸3県の91橋について248の伸縮装置部の凹凸を測定している¹⁾。横山らは、人工段差を用いた荷重車走行試験を行い、段差量、速度、積載荷重、車種、車軸といったパラ

メータの衝撃力に対する影響を調査し、段差量の影響が大きいことを報告している²⁾。徳永らは、車両が路面の凹凸上を走行する際に高架道路橋等で生じる振動が地盤振動へ影響し、最終的に道路周辺の家屋を揺らすといった被害の改善に向けて、実態解明を行った。その結果、従来は考慮されていなかった比較的長周期の路面凹凸が地盤振動に影響を与えており、その凹凸量としては伸縮継手部から1から3 m離れた地点で20から40 mmに達するものが多いことが分かった。また、車両のばね振動は凹凸量だけでなく、凹凸のパターンによって振動の大きさの傾向が異なると解析している³⁾。これを踏まえて、米田らは、走行車両による一連の動的応答解析を実施し、橋梁交通振動に及ぼす緩やかな路面段差の影響を調査した。波長の長い緩やかな路面凹凸に対してのシミュレーション解析により、車両と橋梁との共振現象で加速度応答が増大することを明らかにしている⁴⁾。徳永らは、新設路線における路面調査と車両のばね振動測定を行い、伸縮継手近くの路面は、極近くには段差がなくとも、比較的長周期の凹凸が存在する場合が多く、その凹凸によって走行車両が大きく振動することを報告している⁵⁾。梶川らは、リーフサスペンション車両とエアサスペンション車両が走行した際の高架橋における交通振動について調査し、エアサスペンション車両は加速度振幅等にお

いてリーフサスペンション車両よりも大きく低減できていることを報告している。その中で、伸縮継手部通過時に前者は0.4 G程度であるのに対し、後者では約1 Gの加速度の計測値が報告されている⁶⁾。室井らは、高速道路橋での走行試験を行い、特定の車線を走行する際の振動加速度が卓越していることを突き止め、当該車線においては伸縮継手付近の路面凹凸が長周期性を有することが原因となって大型車両のばね上（サスペンションより上部）を大きく振動させていることを報告している⁷⁾。そこで広井らは、橋梁上の長波長の路面に対してIRI（国際ラフネス指数）を評価手法として用い、その適用性を検討し、現実の振動問題に対応する路面評価が可能であることを報告している⁸⁾。長船らは、交通量の増加に伴い、道路橋を取り巻く問題としては、橋梁本体の損傷以外にも、周辺生活環境に与える問題が重要視されている背景を踏まえ、高速道路橋において振動と低周波音の調査を実施し、その関係性について報告している⁹⁾。黒木らは、舗装の維持管理に用いられる路面性状の評価項目では、伸縮継手部等の局所的な路面段差への定量評価ができないという背景を踏まえて、路面段差測定車による車軸加速度測定を行い、路面段差に起因する振動苦情は走行速度50 km/hの場合に車軸加速度が4 Gを超えると発生するという結果を得ている¹⁰⁾。深田らは、路面凹凸につ

いてドライバーのアンケート結果と振動計測結果を照合し、苦情路面と振動加速度との関係性を明らかにした。瞬間的な加速度ではなく、繰り返しにある一定レベルを超える振動を受ける場合が苦情路面につながり、これは、路面形状によっては車両のばね振動を増幅させる効果が発生することにも起因するとしている¹¹⁾。

以上から橋梁部の伸縮継手に関わる課題は、従来から研究対象として続いているものであり、その内容から、伸縮継手部分の段差だけではなくその周辺の路面形状との組み合わせがむしろ問題であり、しかもそれは比較的長周期の(緩やかな)路面凹凸を伴うものがより問題となるという点が浮かび上がる。研究内容としては、どちらかといえば振動や騒音問題の解決に関連するものが多い。

トラックの走行速度と振動レベルの関係については、エアサスペンションはリーフサスペンションよりも振動レベル低減効果があり¹²⁾、3方向別の振動レベルを比較した場合、通常は前後方向は垂直方向よりも非常に小さい¹³⁾。また、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されている¹⁴⁾。これについて、Luらはトラックの走行試験を行い、振動計測結果から、エアサスペンション仕様のト

ラックについては、速度と Grms (実効加速度) 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 以下では速度上昇に伴い Grms が増加する現象が見られたことを報告している¹⁵⁾。この結果は、低速による振動レベル低減の効果はある一定以下の速度に限定されることを示している。これに関連して、筆者らは古墳壁画という極めて脆弱な文化財を輸送するに際して行った、約 15 km/h の低速輸送時のトラック荷台上における振動の解析を行い、特に垂直方向の振動レベルは全周波数帯で非常に減少していたことを報告した¹⁶⁾。荷台位置の振動レベル差については、中馬らおよび中村らは、果実輸送の積荷の段ボール箱の振動加速度を計測し、上段へ行くほど、また後部にゆくほど大きくなる傾向を報告している^{17),18)}。同様に Hinsch らの計測においても、荷台の中央部は後部よりも大きな加速度が生じなかったとの報告があり¹⁹⁾、臼田らは 10 t トラック (リーフサスペンション) の荷台床面の前端および後端位置での振動特性を比較した結果、概して荷台前端に比べ後端での振動が大きかったと報告している²⁰⁾。国際的にも物流の主流はトラックによる陸上輸送であり、タイ^{21),22)}、米国²³⁾、日本²⁴⁾、スペイン²⁵⁾、ブラジル²⁶⁾、インド²⁷⁾、中国^{28),29)}など、トラック輸送時の振動環境計測報告が数多く存在する。国毎に異なる路面状況、

車両仕様、物流環境といった総合的地域的特徴とも言える要素が影響して、トラック荷台上の振動レベルの把握は複雑なテーマの一つとなっている。

文化財輸送に用いられる美専車は輸送会社が車両メーカーに特注して製造される特殊な車両であり、一般的なトラックとは異なる部分が多い³⁰⁾。したがって、美専車で発生する振動についての調査報告は豊富とはいえず、今後の計測を蓄積する必要性は未だ非常に高い状況である。また、荷台位置と振動レベルの関係についての報告は、その多くが大型トラックの計測であるとともに、荷台上の計測位置についても床面全体を対象としたものではない。本稿では、既往研究で一部報告のある高速道路橋梁の伸縮継手付近で発生する振動問題において、当該箇所を美専車が走行した場合に、橋梁や周辺空間ではなく、車両内部である荷台上で発生する振動現象を計測し、それが他の路面を走行する場合と比較した相対的なレベル、および伸縮継手付近通過時の荷台上における振動レベルの分布について考察する。

3 計測方法

3.1 計測機器と計測設定

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。各機器の仕様

と計測設定は以下の通りである。

【加速度データロガー】

製品名：SAVER3X90

製造：Lansmont Corporation (USA)

サイズ/質量：95 × 74 × 43 mm / 473 g

加 速 度 セ ン サ ー 種 別：Tri-axial piezoelectric

サンプリング間隔：0.2 ms

計測インターバル：2 s

フレーム長：8,192 点

トリガーモード：タイムトリガーのみ

【GPS データロガー】

製品名：i-gotU GT-600

製造：Mobile Action Technology Inc. (Taiwan)

サイズ/質量：46 × 41.5 × 14 mm / 37 g

GPS 種別：SiRF Star IV Low Power chipset

サンプリング間隔：5 s

3.2 走行試験

美専車の荷台で発生する振動レベルと荷台上の位置との関係性を把握するため、荷台全体を計測する必要がある。したがって、今回は文化財を積載した状態での輸送について計測するのではなく、各計測機器を設置した美専車を一定の区間走行させる、走行試験の形式で計測を実施した。走行試験に関する仕様は以下の通りである。

【試験実施日時】

2017 年 12 月 22 日 (4 t 車) 10:30-14:30

2017 年 12 月 23 日 (2 t 車) 10:30-14:30

【走行経路】

往路：東京国立博物館-首都高速道路上野 IC-東京料金所-東名高速道路海老名 SA (海老名 SA で機器を回収後、計測データを収集し、再設置)

復路：東名高速道路海老名 SA-東京料金所-首都高速道路上野 IC-東京国立博物館

走行距離は片道約 63 km

3.3 車両の仕様

走行試験では 2 台の車両 (美専車) を使用した。その詳細は下記の通りである。

【4 t 車】 (Fig. 2)

ベース車両：日野レンジャー (日野自動車)

サスペンション：リーフサスペンション (前軸)、エアサスペンション (後軸・4 バッグ)

サイズ：8980 mm (長) / 2300 mm (幅) / 3530 mm (高)、5150 mm (車軸間)

最大積載量：1850 kg、車両総重量：7965 kg

パワーゲート無し、荷室内エアコン有

【2 t 車】 (Fig. 3)

ベース車両：キャンター (三菱ふそう)

サスペンション：リーフサスペンション (前軸)、エアサスペンション (後軸・2 バッグ)

サイズ：7130 mm (長) / 2020 mm (幅) / 3280 mm (高)、3860 mm (車軸間)

最大積載量：2600 kg、車両総重量：7175 kg

パワーゲート無し、荷室内エアコン有



Fig. 2 Appearance of 4 t truck



Fig. 3 Appearance of 2 t truck

3.4 加速度データロガー設置箇所

走行試験では9台の加速度データロガーを荷台上に設置した。往路では荷台全体の分布傾向を、復路では前後および左右方向に対してより密にサンプリングする目的のもと、往復路で配置を変えた (Fig. 4,5)。各図に点線で示したグリッドは、左右方向については、前後車軸の中間、後軸の真上、荷台最後部の3本を引き、それぞれの中に2本引いたものである。前後方向は荷台中央、左右端部とその中間の5本のグリッドとなる。

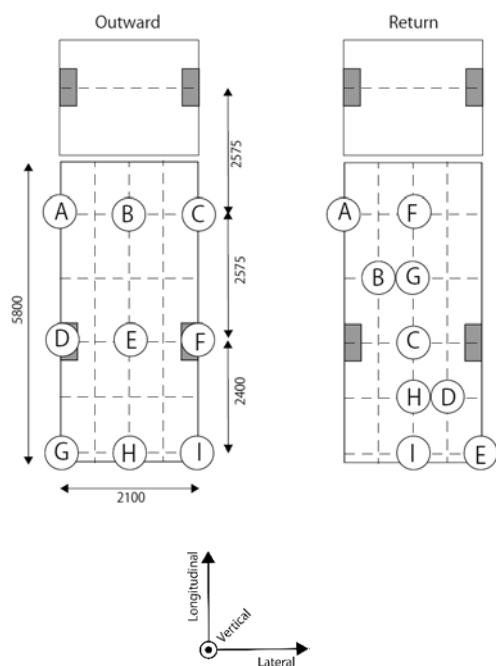


Fig. 4 Arrangement of data loggers on the platform (4 t truck).

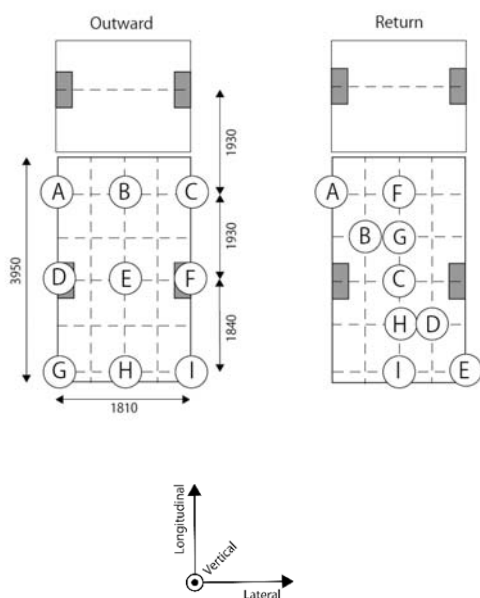


Fig. 5 Arrangement of data loggers on the platform (2 t truck).

4 解析結果

4.1 解析対象区間の抽出

高速道路を使用した走行試験はテストコースとは異なり、渋滞や長時間の信号待ちに遭遇するなど、不測の事態は必ず生じる。解析結果に再現性を持たせるために、振動データの抽出条件を安定した走行速度を維持した時間帯とした。GPSの計測値から走行速度の分布を確認したところ、今回の試験においては走行速度の目安として、首都高速道路は 50 km/h 以上、東名高速道路は 70 km/h 以上が安定した十分なデータ量を獲得できるため、分類区分として妥当と判断できた。その上で、本稿では首都高橋梁部の伸縮継手

をターゲットに設定しているため、この条件を満たし、かつ伸縮継手密度の高い区間を抽出した。その結果、上下線とも江戸橋 JCT 付近から御徒町駅付近の間が解析対象として最適であるとの結論に達した。その区画における伸縮継手の存在数については、筆者のカウントによると、約 2.5 km に 92 箇所であり、密度は、36.8 箇所 / km となる。一方、東名高速走行時（海老名 SA から東京料金所間）では約 24.8 km に 59 箇所存在し、密度は 2.4 箇所 / km となる。密度の比較では 15 倍以上となるため、十分な差異であると考えた。

以降、東名高速道路の速度 70 km/h 以上での安定走行については「高速走行時（Normal expwy）」、首都高速道路の 50km/h 以上での橋梁部伸縮継手の高密度区間走行については、「継手走行時（Joint frequent section）」と表記する。

4.2 実効加速度

上記抽出条件に従った、高速走行時および継手走行時における、測定位置毎の方向別の Grms を算出した。本稿で取り扱う Grms は、得られた PSD の平均波形の面積値から求めた値となる。各 Grms 値と相対的なレベルをグラフ化したものをまとめて Table 1 に示す。

4.3 荷台上の振動レベルマッピング

各測定点の、高速走行時と継手走行時

における Grms (Table 1) を荷台を座標化した平面にプロットし、荷台上 9 点のプロットから等高線図を作成したものが Fig. 6 と Fig. 7 である。各図の縦軸横軸の数値は座標（荷台上の位置 (mm)）を示し、グレースケールの数値は Grms を、各図の上方が荷台前方(車両の進行方向)で、下方が荷台後方に該当する。前後方向については、計測された Grms が極めて小さい範囲に収まっており、分布傾向を解析する目的に適さないため、両図の対象からは除外した。

4.4 PSD プロファイル

4.4.1 4t 車について

継手走行時になるとどの周波数域の振動レベルが増加するのかを解析する目的で、垂直方向の振動に関して、往路においては、最大の Grms を示した計測点 E の高速走行時および継手走行時、最小の Grms を示した計測点 C の高速走行時および継手走行時の PSD プロファイルを作成した。復路においては、最大の Grms を示した計測点 H の高速走行時および継手走行時、最小の Grms を示した計測点 A の高速走行時および継手走行時の PSD プロファイルを作成した。

これら 8 個の PSD プロファイルはまとめて Fig. 8 に示した。

4.4.2 2t 車について

垂直方向の振動については、4t 車と同

Table 1 The value of Grms and the bar graph. “Normal expwy” indicates a section where the vehicle was traveling steadily at a speed of over 70 km/h. “Joint frequent section” indicates a section where expansion joints occur frequently. See Fig. 4 and Fig. 5 for “Logger position”.

Truck type		Logger position	Longitudinal		Lateral		Vertical	
			Normal expwy	Joint frequent section	Normal expwy	Joint frequent section	Normal expwy	Joint frequent section
			Grms	Grms	Grms	Grms	Grms	Grms
4t	Outward	A	0.059	0.049	0.080	0.068	0.141	0.111
		B	0.057	0.050	0.072	0.062	0.208	0.183
		C	0.047	0.040	0.067	0.059	0.104	0.106
		D	0.054	0.047	0.079	0.069	0.155	0.131
		E	0.050	0.046	0.082	0.072	0.252	0.231
		F	0.047	0.042	0.081	0.073	0.154	0.136
		G	0.051	0.047	0.105	0.108	0.162	0.172
		H	0.050	0.049	0.108	0.102	0.201	0.208
		I	0.050	0.045	0.106	0.102	0.181	0.189
		Average	0.052	0.046	0.087	0.079	0.173	0.163
	Return	A	0.059	0.051	0.077	0.075	0.143	0.127
		B	0.069	0.058	0.109	0.115	0.225	0.209
		C	0.059	0.058	0.086	0.088	0.256	0.293
		D	0.050	0.049	0.107	0.109	0.253	0.228
		E	0.051	0.049	0.106	0.113	0.215	0.234
		F	0.053	0.054	0.074	0.069	0.191	0.185
		G	0.053	0.051	0.087	0.107	0.229	0.266
		H	0.061	0.060	0.109	0.123	0.262	0.310
		I	0.057	0.059	0.123	0.129	0.203	0.244
		Average	0.057	0.054	0.098	0.103	0.220	0.233
2t	Outward	A	0.059	0.068	0.077	0.082	0.233	0.215
		B	0.063	0.072	0.103	0.096	0.375	0.311
		C	0.059	0.081	0.081	0.078	0.249	0.352
		D	0.057	0.065	0.096	0.085	0.229	0.209
		E	0.057	0.053	0.085	0.088	0.257	0.252
		F	0.052	0.058	0.080	0.073	0.164	0.161
		G	0.071	0.079	0.091	0.100	0.290	0.417
		H	0.065	0.079	0.121	0.115	0.164	0.271
		I	0.054	0.056	0.145	0.160	0.271	0.343
		Average	0.060	0.068	0.098	0.097	0.248	0.281
	Return	A	0.058	0.068	0.078	0.080	0.225	0.208
		B	0.079	0.110	0.126	0.121	0.333	0.294
		C	0.058	0.056	0.078	0.085	0.292	0.282
		D	0.075	0.110	0.103	0.167	0.327	0.658
		E	0.085	0.104	0.085	0.094	0.299	0.498
		F	0.062	0.067	0.101	0.096	0.371	0.352
		G	0.098	0.079	0.101	0.104	0.244	0.256
		H	0.078	0.145	0.084	0.124	0.325	0.536
		I	0.051	0.051	0.126	0.147	0.280	0.307
		Average	0.072	0.088	0.098	0.113	0.300	0.377

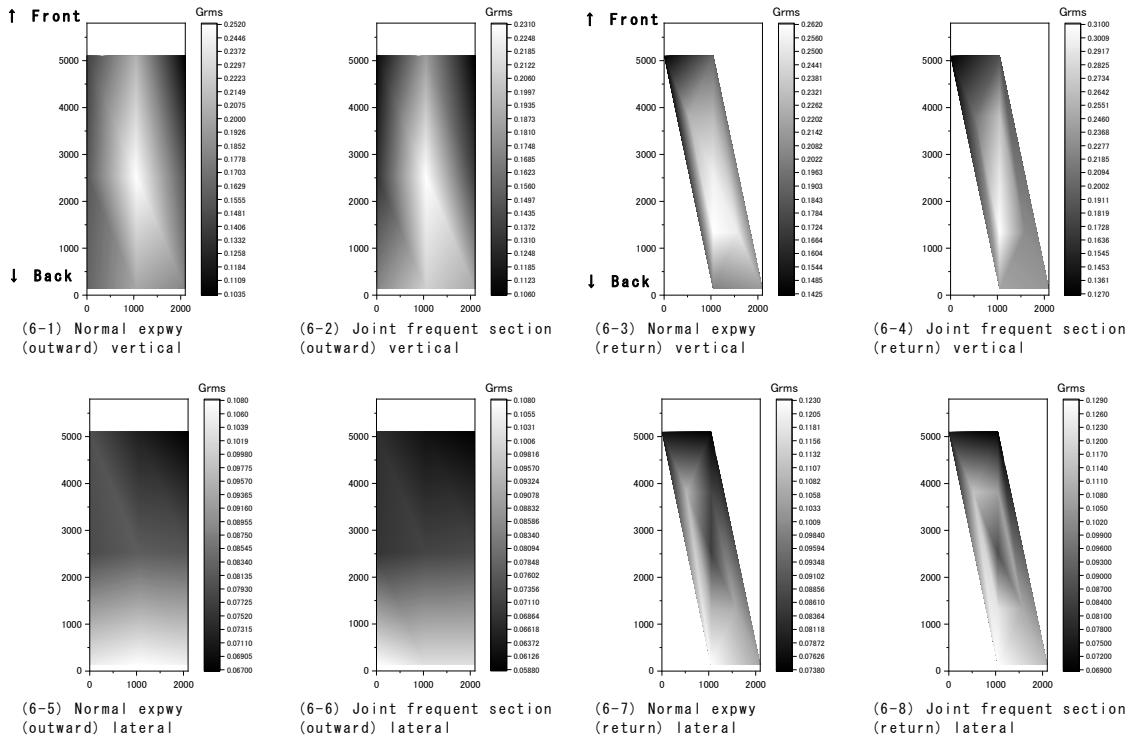


Fig. 6 Distribution of Grms (G) at 4 t truck' s platform.

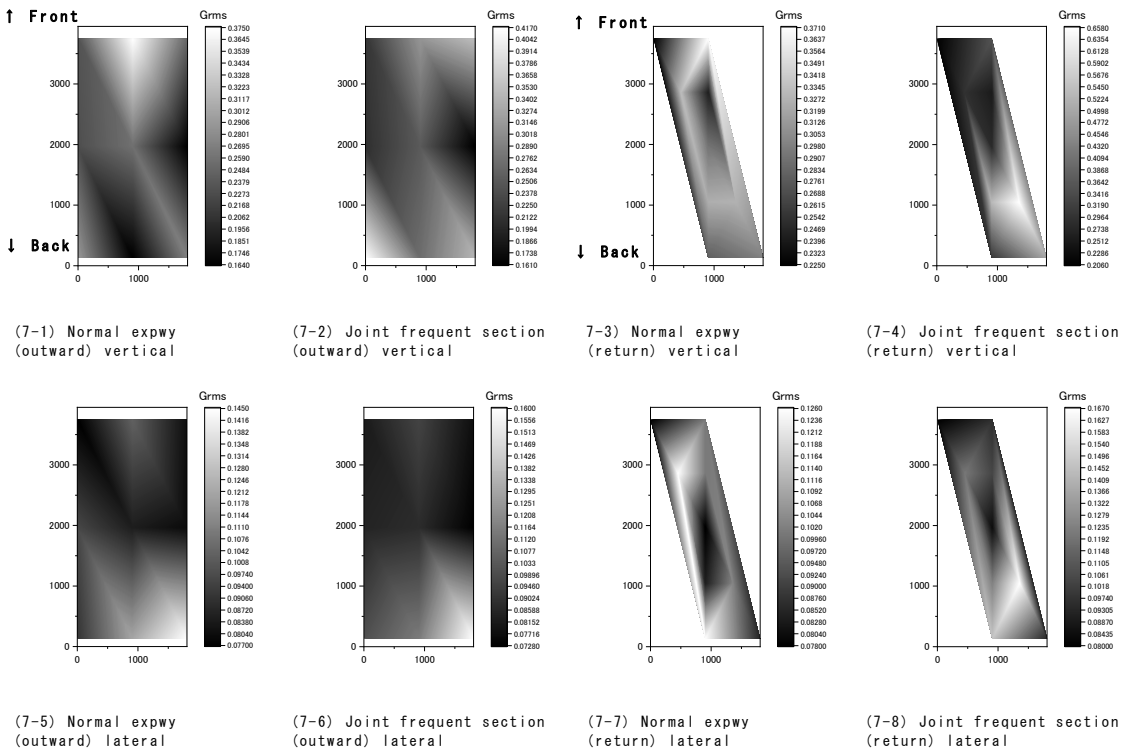


Fig. 7 Distribution of Grms (G) at 2 t truck' s platform.

様の目的で、垂直方向の振動に関して、往路においては、最大の Grms を示した計測点 G の高速走行時および継手走行時、最小の Grms を示した計測点 F の高速走行時および継手走行時の PSD プロファイルを作成した。復路においては、最大の Grms を示した計測点 D の高速走行時および継手走行時、最小の Grms を示した計測点 A の高速走行時および継手走行時の PSD プロファイルを作成した。

これら 8 個の PSD プロファイルはまとめて Fig. 9 に示した。なお、Fig. 8, 9 は横軸を常用対数、縦軸は線形軸で表記しており、それぞれ縦軸の最大値が異なっている。

4.5 ピーク加速度

4t 車と 2t 車について、往路および復路において最大の Grms を示した計測点のピーク加速度を時系列にプロットしたものが Fig. 10 から Fig. 13 である。各図の上部には(1)から(4)の番号が付記されており、往路については(1)一般道路、(2)首都高速道路の継手走行時、(3)その他の首都高速道路、(4)東名高速道路、の区間を示す。復路については、(1)東名高速道路、(2)その他の首都高速道路、(3)首都高速道路の継手走行時、(4)一般道路、を示す。

5 考察

5.1 実効加速度について

5.1.1 全体的な傾向

今回の走行経路では、全体的に往路より復路の Grms 値が高く現れていた。車線の違いによる振動レベルの差異は既往研究でも報告があり⁷⁾、こうした路面状態の差異や、あるいは走行速度の若干の差が影響を及ぼしたものとも推測できるが、原因については特定できていない。また、4 t 車より 2 t 車の方が Grms 値が高く現れていた。今回は積荷の無い状態であったため、他の要因としては、いずれかの車両仕様が考えられる。車両質量やサイズの違い、エアバッグの数の差異（4 t 車は後軸に 4 つのエアバッグを搭載する 4 バッグエアサス仕様であるのに対して、2 t 車は 2 バッグエアサス仕様）等が影響したのかもしれないがこの点についても特定できていない。

5.1.2 伸縮継手の影響について

4 t 車では、平均 Grms 値で比較した場合、継手走行時と高速走行時の差はかなり小さく、伸縮接手部分を通過した際の影響は低減されていると評価できる。一方、2 t 車では継手走行時の振動レベルが明らかに高く現れている。

5.2 荷台上の振動レベルマッピングについて

5.2.1 4 t 車について

垂直方向については、往路も復路も高速走行時と継手走行時の分布には共通した傾向が見られた。後輪車軸上のほぼ左

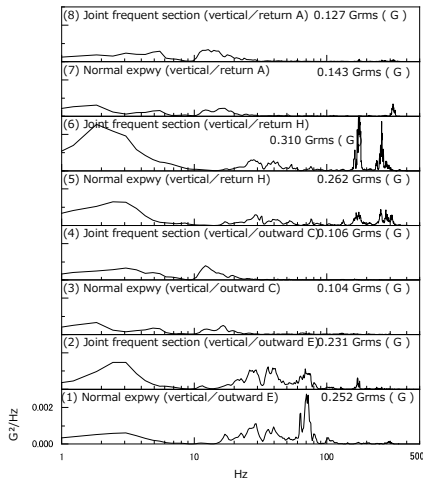


Fig. 8 PSD profiles for 4 t truck.

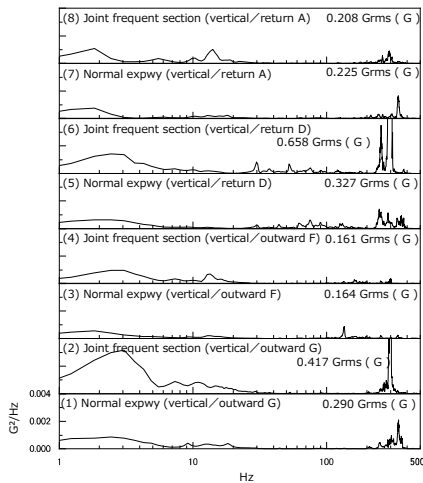


Fig. 9 PSD profiles for 2 t truck.

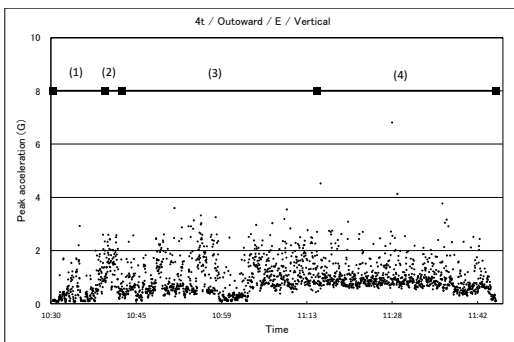


Fig. 10 Peak G plot.
4 t truck/outward/logger E/vertical

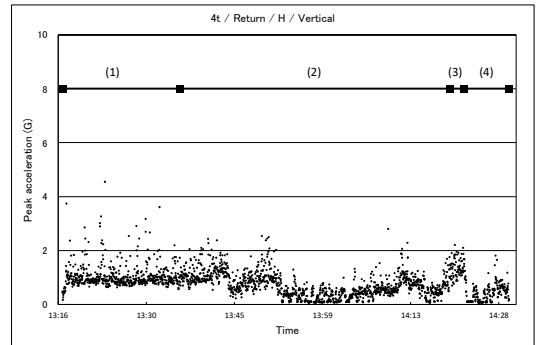


Fig. 11 Peak G plot.
4 t truck/return/logger H/vertical

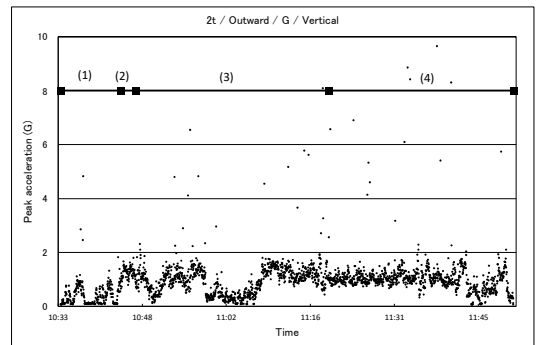


Fig. 12 Peak G plot.
2 t truck/outward/logger G/vertical

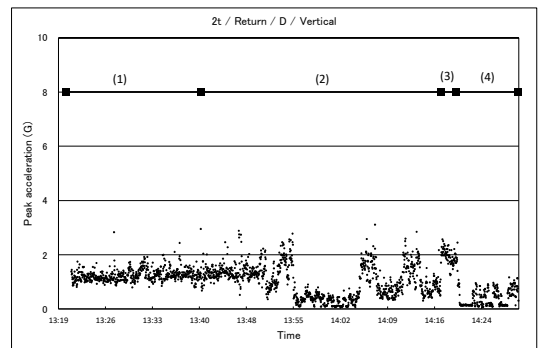


Fig. 13 Peak G plot.
2 t truck/return/logger D/vertical

右中央部にピークが存在し、荷台前方に向かい徐々に減衰している。継手走行時には荷台全体的に振動レベルが上がる傾向を示している。前軸と後軸との中間地点が比較的安定した環境になっているものと考えられる。

左右方向については、往路も復路も高速走行時と継手走行時の分布傾向は同様であるが、継手走行時の振動レベルに垂直方向で見られたほどの顕著な増幅は見られない。分布傾向としては、後方が相対的に大きく、前方へ向かい徐々に減衰している。荷台後部の方が若干左右に揺れやすい環境になるものと考えられる。

5.2.2 2 t 車について

垂直方向については、分布傾向としては、往路も復路も継手走行時には荷台後方部の振動レベルが増幅する現象が見られる。この現象については、復路の方が継手走行時の影響がより大きく現れている。具体的な位置としては、後輪車軸直上から後方における振動レベルが高くなっている。垂直方向の跳ね上がりが荷台の後方ほどより大きく現れるものと考えられる。

左右方向の分布は垂直方向の分布傾向に追随した形で現れており、傾向についても垂直方向と同様である。

5.3 PSD プロファイルについて

5.3.1 4 t 車について

垂直方向の振動周波数についての Fig. 8 の内、(1)から(8)の PSD プロファイルを見ると同一の計測点においては、概ね継手走行時と高速走行時の傾向は一致していると考えられる。同一計測点における高速走行時と継手走行時の振動レベルを比較した場合、継手走行時には 2 Hz から 4 Hz において増加する傾向が認められる。この周波数域は基本的にサスペンションからの振動とされているが³¹⁾、(1)と(2)および(5)と(6)の比較から分かるように、その傾向は荷台上の Grms が大きい計測点ほど顕著である。また、(1)、(2)、(5)、(6)といった Grms が最大であった計測点では往路復路ともに 20 Hz から 100 Hz の周波数が顕著に現れている。その他、復路の継手走行時(6)では、高速走行時(5)と比較して、180 Hz、260 Hz 付近が顕著に増加していた。特に 180 Hz 付近の周波数は後述する 2 t 車では見られず、4 t 車に特徴的な振動であると見受けられる。

5.3.2 2 t 車について

2 t 車についても、4 t 車と同様に、継手走行時には 2 Hz から 4 Hz において増加する傾向が認められ、Fig. 9 の(1)と(2)および(5)と(6)の比較から分かるように、その傾向は荷台上の Grms が大きい計測点ほど顕著である。また、(1)、(2)、(5)、(6)といった Grms が最大であった計測点では往路復路ともに 250 Hz から

300 Hz の周波数が顕著に現れている。その他、復路の継手走行時(6)では、高速走行時(5)と比較して、260 Hz、300 Hz 付近が顕著に増加していた。特に 300 Hz 付近の周波数は 2 t 車に特徴的な振動であると見受けられ、車両構造に起因するものと考えている。

5.4 ピーク加速度について

継手走行時に該当するのは、往路は Fig. 10, 12 の(2)、復路は Fig. 11, 13 の(3)であるが、ピーク加速度が他の区間よりも突出した値を示してはいないが、4 t 車、2 t 車の双方において、復路における継手走行時のレベルがやや高く計測された。この傾向は 2 t 車においてははっきりと現れており、Fig. 13 の(3)は他の区間よりも 2 G 付近に加速度が集中している状況が分かった。

6 まとめ

文化財の輸送に用いられる美専車の中で高頻度で使用される、2 t 車と 4 t 車の走行中の荷台上で発生する振動について計測を行った。特に、首都高速道路で頻繁に現れる高速道路橋梁部伸縮継手を美専車が通過する際に、振動レベルへどのような影響が生じるのかについて重点的に調査を行った。その結果は下記のようにまとめられる。

- ・全体的な Grms 値から見ると 2 t 車の

方が 4 t 車よりも大きく現れる傾向が見られた。その原因は明確ではないが、同じ美専車仕様であっても車種による顕著な差異は存在することは明らかであると考えられる。

- ・伸縮継手は橋梁部では上下線を横断して設置されているが、今回実施した走行試験では往路と復路の Grms において明確な差異が認められた。したがって、伸縮継手の有無とともに走行経路の違いも振動レベルに大きく影響すると考えられ、今回の経路においては復路の方がより厳しい路面状況であったと推察される。

- ・荷台上の位置による振動レベルの差異は存在する。荷台上の振動レベルの分布は、4 t 車の方が、往路復路ともに明確な傾向が見られた。垂直方向については、後輪車軸上の中央部にピークが存在し、荷台前方に向かい徐々に減衰していた。前軸と後軸との中間地点が比較的安定した環境になっているものと考えられた。継手走行時には荷台全体的に振動レベルが上がる傾向を示した。左右方向の振動の分布傾向としては、後方が相対的に大きく、前方へ向かい徐々に減衰していた。

- ・4 t 車、2 t 車ともに継手走行部では、2 Hz から 4 Hz の振動が増加していたことから、サスペンションからの振動とされるそれらの周波数域については、継手

の段差が大きく影響したと考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H03109 の助成を受けたものです。

引用文献

- 1) 本田秀行, 梶川康男, 小堀為雄, 道路橋の伸縮装置部の凹凸性状, 土木学会論文報告集, 第 324 号, p.173-176 (1982)
- 2) 横山功一, 井上純三, 永原隆, 路面段差部に作用する自動車衝撃荷重の特性, 構造工学論文集, 35A, p.757-764 (1989)
- 3) 徳永法夫, 西村昂, 薄井王尚, 伸縮継手近傍の路面段差が地盤振動に与える影響とその改善対策の検討, 環境技術, 27(7), p.501-509 (1998)
- 4) 米田昌弘, 徳永法夫, 路面上の緩やかな段差によって誘起される橋梁交通振動に対する解析的考察, 鋼構造論文集, 7(25), p.79-87 (2000)
- 5) 徳永法夫, 薄井王尚, 西村昂, 道路橋伸縮継手周辺の路面凹凸による交通振動の周辺影響に関する実験と解析, 構造工学論文集, 47A, p.999-1008 (2001)
- 6) 梶川康男, 深田宰史, 林下貴彦, 山田健太郎, 小塩達也, サスペンション構造が異なった車両走行による高架橋の振動特性, 構造工学論文集, 50A, p.413-420 (2004)
- 7) 室井智文, 薄 王尚, 樺山好幸, 深田宰史, 梶川康男, 幸田信則, 伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性, 構造工学論文集, 54A, pp.171-180 (2008)
- 8) 広井智, 深田宰史, 樺山好幸, 室井智文, 岡田裕行, 高速道路を走行する大型車両のばね上振動に影響を与える橋梁上の長波長路面に対する評価方法, 舗装工学論文集, 第 14 巻, p.179-187 (2009)
- 9) 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 植田知孝, 道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究, 構造工学論文集, 56A, p.237-250 (2010)
- 10) 黒木幹, 峰岸順一, 岩井茂雄, 走行車両の車軸の加速度測定による路面の段差評価方法とその適用性, 舗装工学論文集, 第 16 巻, p.I_59-I_64 (2011)
- 11) 深田宰史, 松本剛也, 岡田裕行, 樺山好幸, 高速道路走行時の大型車ドライバーにより抽出された短波長の苦情路面に対する評価, 舗装工学論文集, 第 17 巻, p. I_45-I_53 (2012)
- 12) Charles D.Piece, S.Paul Singh, Gary Burgess, A Comparison of Leaf-spring with Air-cushion Trailer Suspensions in the Transport Environment, Packaging Technology and Science, 5(1), p.11-15

- (1992)
- 13) S.Paul Singh, John R,Antle, G. Burgess, Comparison Between Lateral, Longitudinal, and Vertical Vibration Levels in Commercial Truck Shipments, Packaging Technology and Science, 5(2), p.71-75 (1992)
 - 14) 長谷川淳英, 走行速度と加速度実効値, “輸送包装の基礎と実務” (斎藤勝彦, 長谷川淳英著), 幸書房, p.98-101 (2008)
 - 15) Fei Lu, Yutaka Ishikawa, Hiroaki Kitazawa,Takaaki Satake, Effect of vehicle speed on shock and vibration levels in truck transport, Packaging Technology and Science, 23(2), p.101-109 (2010)
 - 16) 和田浩, 高妻洋成, 脇谷草一郎, 宇田川滋正, 建石徹, 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, p.59-74 (2018)
 - 17) 中馬豊, 村田敏, 岩元睦夫, 西原明彦, 堀善昭, 冷蔵トラックによるイチゴの長距離輸送試験, 農業機械学会誌, 31(4), p.292-297 (1970)
 - 18) 中村怜之輔, 伊藤卓爾, 大部正博, トラック輸送時の果実段ボール箱の振動強度, 岡山大学農学部学術報告, 47, p.41-50 (1976)
 - 19) Hinsch, R.T., Slaughter, D.C., Craig, W.L., Thompson, J.F., Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport, Transactions of the ASAE, 36(4), p.1039-1042 (1993)
 - 20) 臼田浩幸, 椎名武夫, 石川豊, 佐竹隆顕, 青果物の3次元輸送振動シミュレーションのための基礎研究, 農業施設, 36(4), p.215-222 (2006)
 - 21) Bundit Jarimopas, S. Paul Singh, Wasan Saengnil, Measurement and analysis of truck transport vibration levels and damage to packaged tangerines during transit, Packaging Technology and Science, 18(4), p.179-188 (2005)
 - 22) Vane Chonhenchob, Sher Paul Singh, Jay Jagjit Singh, Sukasem Sittipod, Dathpan Swasdee, Supoj Pratheepthinthong, Measurement and analysis of truck and rail vibration levels in Thailand, Packaging Technology and Science, 23(2), p.91-100 (2010)
 - 23) Jagjit Singh, S. Paul Singh, Eric Joneson, 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(6), p.309-323 (2006)
 - 24) Fei Lu, Yutaka Ishikawa, Takeo Shiina, Takaaki Satake, Analysis of Shock and Vibration in Truck Transport in Japan, Packaging Technology and Science,

- 21(8), p.479-489 (2008)
- 25) Manuel-Alfredo Gracia-Romeu-Martinez, S. Paul Singh, Vincete-Augstin Cloquell-Ballester, Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport in Spain as a Function of Payload, Suspension and Speed, Packaging Technology and Science, 21(8), p.439-451 (2008)
- 26) Giovani Otavio Rissi, S. Paul Singh, G. Burgess, J. Singh, Measurement and Analysis of Truck Transport Environment in Brazil, Packaging Technology and Science, 21(4), pp.231-246 (2008)
- 27) S. P. Singh, A. P. S. Sandhu, J. Singh, E. Joneson, Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India, Packaging Technology and Science, 20(6), pp.381-392 (2007)
- 28) Chen Zhong, Jiang Li, Kazuaki Kawaguchi, Katsuhiko Saito, Hongshen An, Measurement and Analysis of Shocks on Small Packages in the Express Shipping Environment of China, Packaging Technology and Science, 29(8-9), p.437-449 (2016)
- 29) Ran Zhou, Liping Yan, Baiguo Li, Jing Xie, Measurement of Truck Transport Vibration Levels in China as a Function of Road Conditions, Truck Speed and Load Level, Packaging Technology and Science, 28(11), p.949-957 (2015)
- 30) 和田浩, 美術品輸送専用車両, 日本包装学会誌, 26(6), p.382 (2017)
- 31) Jagjit Singh, S. Paul Singh, Eric Joneson, 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, p.309-323 (2006)
- (原稿受付 2018 年 4 月 18 日)
(審査受理 2018 年 5 月 18 日)