

技術報告~~~~~

RO/RO 船の乗下船時に美術品輸送専用車両 の荷台上で発生する振動について

和田 浩*

Analysis of Vibrations Generated on the Loading Platform of Specialized Truck for Art Objects at the Boarding and Leaving the RO / RO Ship

Hiroshi WADA *

日本国内においては文化財輸送の大半は美術品輸送専用車両(美専車)による陸上輸送で実施されているが、一部船舶輸送が生じる区間が存在する。その際に使用されるのは美専車が乗船できる形式の RO/RO 船である。筆者らは過去に RO/RO 船の航行中に美専車荷台上において発生する振動について計測を行い、航行中は非常に安定していることを確認した。一方で RO/RO 船の乗下船時にどのような振動が発生するのかについては詳細が不明であった。そこで、8 回の船舶輸送時に振動データを計測し、その解析によって RO/RO 船の乗下船時に美専車荷台上で発生した振動を抽出した。その結果 Grms および PSD プロファイルからは、乗下船工程では海上航行中では見られないレベルの振動が生じていたことが分かった。これらの振動レベルは美専車が一般道あるいは高速道路を走行する際に現れるレベルとほぼ変わらないものもあった。ただし、加速度分布の尖度で比較すると乗下船工程は尖度が大きく、より高い値が生じる環境であるという傾向が分かった。これらは船内や港との接続部分等の段差等が影響したと考えられる。

In Japan, most of the cultural property transport is carried out by land transportation by specialized truck for cultural properties, but there are zones where some shipping will occur, and the RO / RO ship is used in that case. The authors measured the vibration generated on the platform during the voyage of the RO / RO ship and confirmed that it is very stable during the voyage. On the other hand, details on what kind of vibration occurs when boarding and leaving the RO / RO ship are unknown. Therefore, the vibration data was measured during shipping of eight times, and by analyzing it, the vibration generated on the truck at the time of boarding and leaving was extracted. As a result, it was found from the Grms and PSD profiles that vibration was occurring at a level not seen in the sea voyage during the boarding and leaving process. Some of these vibration levels were almost the same as the levels appearing when the truck traveled on an ordinary road or an expressway. In comparison with the kurtosis of the acceleration distribution, it was found that the process boarding and leaving tends to have a large kurtosis. These are thought to have been influenced by steps such as inside the ship and the connection part with the port.

キーワード：RO/RO 船、文化財、輸送、振動、トラック、加速度データロガー

Keywords: RO/RO ship, Cultural property, Transport, Vibration, Track, Acceleration data logger

*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 :03-3872-1111 FAX:03-3872-1491 E-mail:wada@nmm.in

1 はじめに

筆者らは文化財の輸送環境を把握するために、輸送中に発生する振動の調査を継続している。最終的には調査の結果を基にして、文化財の梱包設計を行う上での科学的理論を構築することを目的としている。国内における文化財輸送の大半は陸上輸送が占めており、その陸上輸送では美術品輸送専用車両(美専車)¹⁾と呼ばれる特殊車両が用いられる。美専車の荷台上で発生する振動については、過去に実施した調査²⁾によって振動レベル等についてはおおよその把握が可能となった。

一方、国内では文化財が船舶によって輸送される区画も存在するものの、文化財の船舶輸送環境については、ほぼ情報が存在しなかった。そこで筆者らは船舶輸送時の調査を重点的に実施し、その結果航行中は非常に安定した振動レベルであることを確認した³⁾。なお、文化財輸送においてはトラックに文化財を積載した状態で乗船する形式の、RO/RO 船が原則用いられており、本稿で言及する振動レベルとは RO/RO 船内に駐車した美専車の荷台上のものを指す。RO/RO 船とは、車両等を直接 Roll on / Roll off 荷役できる船舶の総称であり、文化財輸送に使用されるのはカーフェリー(旅客自動車渡船)に該当する。ちなみに 1968 年に小倉と神戸間の運航が本格的長距離大型フェリーとしては最初となる。RO/RO 船と陸

岸との接続は、RO/RO 船の舷外ランブウェイにより行われる⁴⁾。

RO/RO 船を用いる場合には航行の前後に乗船、下船といった工程が必ず生じるが、これまでのところ、乗下船工程における振動レベルについては、まだ詳細な解析ができていない状態であった。そこで本稿では近年調査を実施した RO/RO 船による輸送(全 8 回)において、乗下船時に美専車荷台上で発生する振動について焦点を当てて解析を行った結果を考察する。

2 既往研究と本稿の位置付け

船舶の輸送環境について古くは Foley らの報告があり、陸上(トラック、鉄道、船舶)および航空機(ジェット機、プロペラ機、ヘリコプター)についてタイプ別に輸送環境の特徴がまとめられている。特に船舶輸送はデータが少なく、環境が詳細に分かっていないものの、振動レベルは他の輸送機関より低いことは明らかであるとしている⁵⁾。まず、振動については、柳によると、船体振動はプロペラや主機などの起振源による定常的振動現象と、波浪衝撃力による過度振動現象とに分類され、主船体(3-10Hz)、上部構造(4-15Hz)、主機関・軸系(4Hz-)、局部パネル構造など振動する構造も多岐に亘っておりやや複雑である⁶⁾。この内、定常的振動現象については、プロペラ起振力はプロペラ翼数と回転数で変わる振動数の起振力を

船体に与えるものであり、主機からの起振力はディーゼル機関からの起振力であるとされる⁷⁾。

船上で発生する振動計測の調査例として、Singh らはバナナ輸送用の冷蔵船の中央アメリカからヨーロッパや米国への航路における輸送環境計測を実施している⁸⁾。笹島らは、大型コンテナ船のいくつかの積付が異なった状態での上部構造の振動特性把握のために、船体振動計測を行っている⁹⁾。安部らは、コンテナ船による輸送における環境因子についてまとめており、振動と衝撃については、荒天時のみであるが、加速度としては最大2G弱を示したデータが存在し、また荷役時には大きな加速度が出現すると述べている¹⁰⁾。宮城は上海から2日間、マレーシアから10日間の2航路において、輸送環境を計測した結果、航行中は非常に安定していたと報告している¹¹⁾。胡らはコンテナ床面に加速度センサーを設置し、コンテナヤードでの搬入作業から目的地の倉入までに受けた加速度の計測を行い、貨物が受ける振動の方向別(上下・左右・前後)の分布を比較している¹²⁾。小西らは船舶用貨物のランダム振動試験を実現するために船舶の振動を計測し、コンテナ内においては、トラック輸送時の振動と比較した場合、8.5Hzと13Hzの振動が大きく現われることを報告している¹³⁾。中嶋は日本から欧州向けに輸送した海上コンテナ床面の加速度発生状況を解析し

たところ、海上輸送中に現れた加速度については寄港地で船体の荷重バランスを取るために船倉内でコンテナ移動を行ったことが原因であったと報告している¹⁴⁾。Borocz らは、北欧から南アフリカまでの非常に長い航路における環境計測を報告しており、航海中の Grms は低く、上位10の加速度値で見た場合、港でのハンドリング時に13.11Gを記録したものが最大であったと報告している。なお当該ハンドリング時には4.95Gも記録されており、これは全体の8番目に大きい加速度であったとされる¹⁵⁾。

なお、コンテナ船では温度環境が環境因子の中でも注意すべきものと認識されており、関連研究としては、玉木の計測によるとコンテナ船による輸送中、外気が30°C程度に上昇すると、輻射熱の影響でコンテナ内は60°C位まで上昇したという報告が存在する¹⁶⁾。同様にSingh らもコンテナ船の環境計測を行った結果、振動は安定しているが、温湿度が厳しい環境となり、特にドライドックにおいて最高温度を記録したという報告をしている¹⁷⁾。

さて、RO/RO 船については、原らによると、船底剛性が低く、主船体と連成しやすい構造であるという。また、起振力に近い船尾部に可動橋(ランプウェイ)の様な巨大な構造物があるため、上部構造、機関室、主船体などの振動と連成して複雑な性状を示す可能性が指摘されている

¹⁸⁾。運航については、乾によると、RO/RO 船は多数の旅客と車両を積載するため、運航管理における安全管理の規定は厳しく定められており、また、直接の運航以外にも、配乗や地上作業・設備についても詳細に定められて安全確保に努めているとされている¹⁹⁾。

以上の既往研究を見ると、輸送環境調査の中心はほぼコンテナ船に限定され、さらにコンテナ船輸送中の温湿度の維持が最大の課題の一つであると考えられる。振動については、航行中は非常に安定しているのが船舶輸送の特徴であると考えられる。一方で発地港や着地港あるいは途中の寄港地における揚げ荷や積み荷といった荷役作業においては、貨物は比較的大きな加速度を受ける場合が多いことも分かっている。ただし、これらのデータはコンテナ船に関するものであり、RO/RO 船に関するものはほとんど存在しない。コンテナ船輸送における揚げ荷

や積み荷に相当するのが、RO/RO 船輸送における乗船、下船工程(**Fig.1**)であるとすれば、それらを含めたものが船舶輸送環境であると定義できる。本稿の位置付けは現在まで未着手の領域と考えられる、乗下船時における美専車荷台上の振動レベルについての解析である。

3 計測方法

今回の計測では加速度データロガー(**Fig.2**)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。また、解析時に実際の交通状況を時刻とともに確認するため、一部の輸送においてはタイムラプスカメラをフロントガラス付近に設置して前方の様子を撮影した。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のサンプリング間隔については、同型のロガーを用いた計測事例²⁰⁻²²⁾および文献記載の推奨値²³⁾を



Fig.1 Leaving from the RO/RO ship at the port.



Fig.2 Acceleration data loggers on the loading platform of the truck.

参考にして決定し、計測インターバルについても既往の計測事例²⁴⁾を参考にしつつ、複数のロガーをタイマーで順に起動させることで全輸送工程を記録できるような設定とした。また、現状では文化財輸送に危険性の閾値が存在しないため、どのようなデータであっても収集対象としておきたいという考えから、加速度等にトリガーをかけず、輸送全体を絶え間なくモニタリングするためにタイムトリガーのみの設定とした。

【加速度データロガー】

製品名：SAVER3X90

製造：Lansmont Corporation

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：1000 samples / s

計測インターバル：2 s

フレーム長：1,024 点

トリガーモード：タイムトリガーのみ

(トリガーのかかる時間間隔は 2 s)

【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

【タイムラプスカメラ】

製品名：TLC 200

製造：BRINNO Inc.(Taiwan)

サイズ/質量：64x 46x 106 mm / 120g(本体)

解像度：1280×720 pixel

撮影間隔：60 s

【計測対象とした航路】

計測対象とした航路は全 5 航路（輸送は 8 回）であり、それらの略図を **Fig.3** に示す。本稿で取り扱う各輸送に関する輸送番号、発着日時、出発地、到着地については **Table 1** に示す。

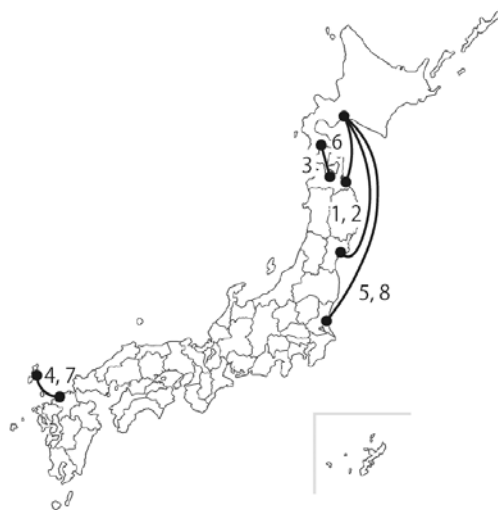


Fig.3 The route of the ship transport and its number.

Table 1 List of the RO/RO ship transport for analyzing in this paper

No.	Date	Time and port
1	28/8/2015	19:40 from: Sendai
	29/8/2015	11:02 to: Tomakomai
2	6/11/2016	19:00 from: Tomakomai
	7/11/2016	09:50 to: Sendai
3	10/8/2017	11:23 from: Aomori
	10/8/2017	15:35 to: Hakodate
4	4/10/2017	10:01 from: Hakata
	4/10/2017	14:50 to: Tsushima
5	15/12/2017	01:25 from: Tomakomai
	15/12/2017	19:46 to: Ōrai
6	25/12/2017	23:59 from: Tomakomai
	26/12/2017	07:48 to: Hachinohe
7	7/11/2017	15:00 from: Tsushima
	7/11/2017	19:14 to: Hakata
8	18/3/2018	19:45 from: Ōrai
	19/3/2018	13:30 to: Tomakomai

4 解析結果

まず GPS 等で得られた情報から、各輸送における乗下船工程に該当する日時の特定を行った。特定後、各乗下船工程において最大の実効加速度(Grms)を示したイベントを抽出し、その Grms 値とともに PSD プロファイルを示したものが、**Fig.4** から **Fig.11** となる。また、これらの値が航行中や陸上輸送中と相対的に比較するために、船舶輸送とその前後の陸上輸送を含む Grms 値(垂直方向)の時系

列変化をプロットしたものが **Fig.12** である。ただし、このプロットは代表として輸送 No.2 についてのみを示し、他の輸送については省略した。

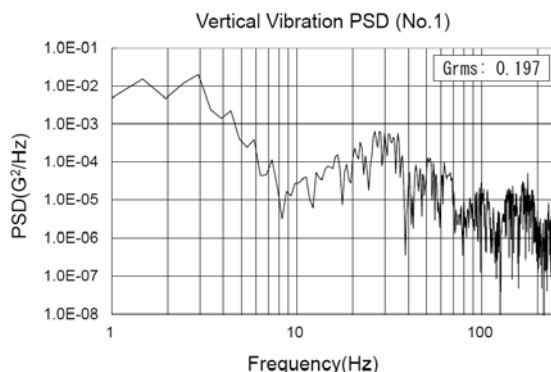


Fig.4 PSD profile for transport No.1 (vertical direction).

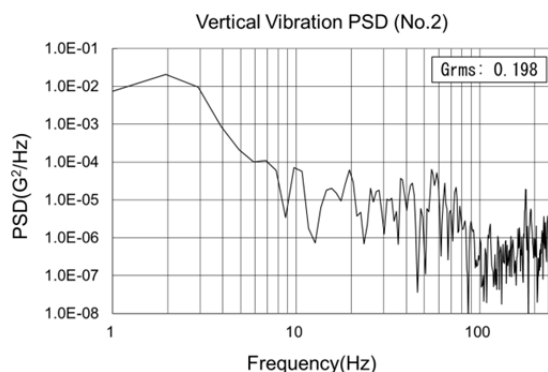


Fig.5 PSD profile for transport No.2 (vertical direction).

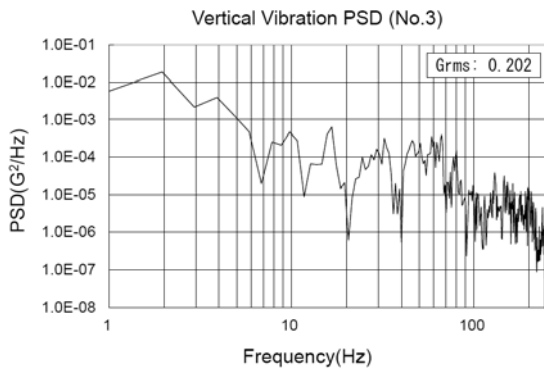


Fig.6 PSD profile for transport No.3 (vertical direction).

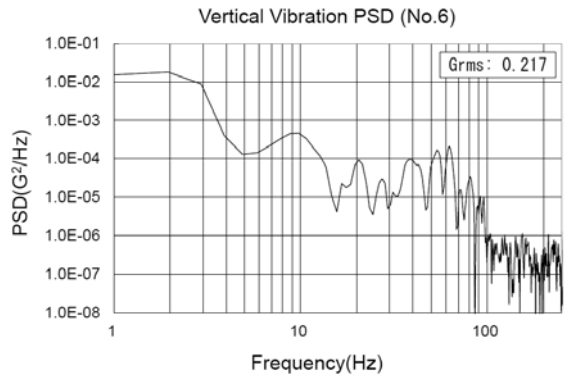


Fig.9 PSD profile for transport No.6 (vertical direction).

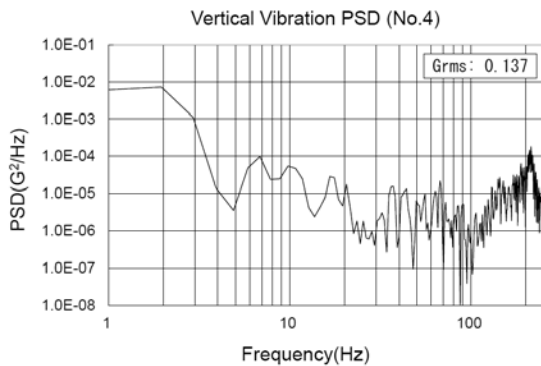


Fig.7 PSD profile for transport No.4 (vertical direction).

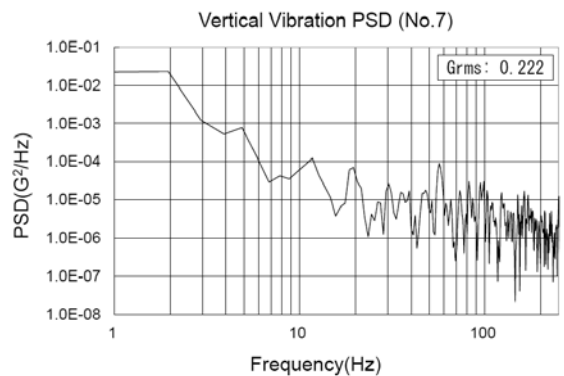


Fig.10 PSD profile for transport No.7 (vertical direction).

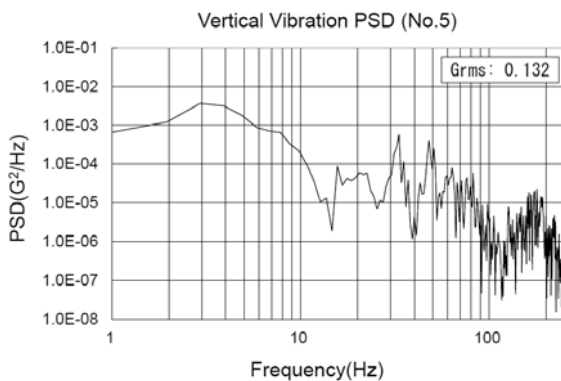


Fig.8 PSD profile for transport No.5 (vertical direction).

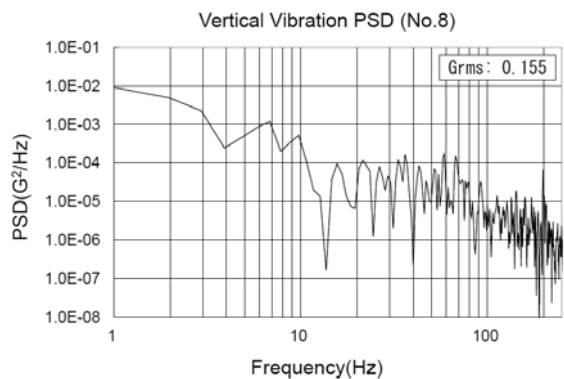


Fig.11 PSD profile for transport No.8 (vertical direction).

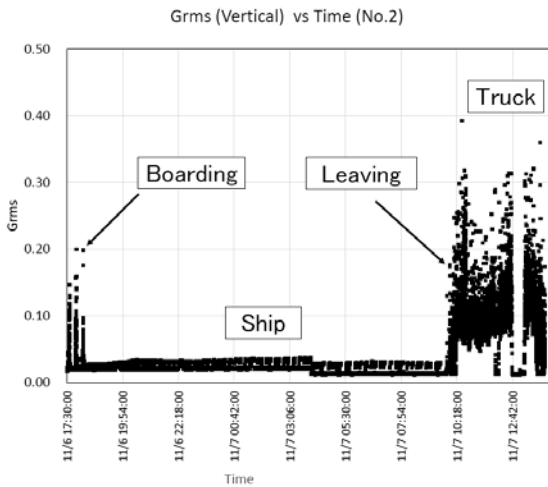


Fig.12 Time series change of Grms (vertical direction) in transport No.2. Arrows indicate boarding and leaving processes (several minutes each).

5 考察

Grms および PSD プロファイルからは、乗下船工程では海上航行中では見られないレベルの振動が生じていたことが分かった。これらの振動レベルの Grms 値については、美専車が一般道あるいは高速道路を走行する際に現れるレベルとほぼ変わらないものもあった。Grms 値で 0.2 程度、振動は主に 10Hz 以下の領域で発生しており、乗下船で美専車がどのような路面を走行する状況にあるのかを調査する必要があった。

そこで、改めて乗下船時の車両の様子を調査したところ、床面には、船内の駐車場(Fig.13)で車両が床面に固定される場合に用いる金具(Fig.14)の比較的高い

密度での分布(Fig.15)、床面に平滑でない部分の存在(Fig.16)、ランプウェイにより生じる段差(Fig.17)あるいはランプウェイ表面の凹凸(Fig.18)など振動の発生原因となりうる要素の存在を確認することができた。

この環境は具体的には Table 1 の輸送 No. 7 における博多港での下船時の様子に該当するもので、輸送当日に用いられた船舶と同じであることも確認した。そこで、No. 7 の下船時と下船後の高速道路(下船後は博多港付近の IC から福岡都市高速道路を使用した)走行時間帯とその区画におけるピーク加速度、実効加速度の最大値および平均値を Table 2 にまとめた(いずれも垂直方向)。また、下船時最大の実効加速度を示した際の PSD を Fig. 19 に示す。

上記追跡調査によって下船時の走行路面状況が明確となったため、実効加速度のみによる検証ではなく、Table 2 で区分した、下船時と高速道路走行時の加速度分布の尖度による評価をおこなった(Table 3)。尖度の比較では、実効加速度の比較で現れなかった大きな差異が見られることが分かった。この結果から、当該下船時は道路走行中よりもより大きな加速度値が発生する環境である²⁵⁾という評価が妥当である。

現在のところ、現場を確認できたのは上記博多港のみであり、船内における駐車場や、乗下船時の段差状況は港や船舶

によって差異があるため、一概には断定できないが、乗下船時の路面状態に関するこれらの要素が大きく影響していると推察している。船舶によっては多くの車両が限られた時間内に乗下船を完了せねばならない場合もあるため美専車のみ、こうした工程を低速かつ慎重に走行することは困難な場合も多いが、こうした路面環境であることは予め想定しておく必要がある。



Fig.13 Car parking on board



Fig.15 Floor surface with a lot of brackets.



Fig.16 Floor surface with rough surface

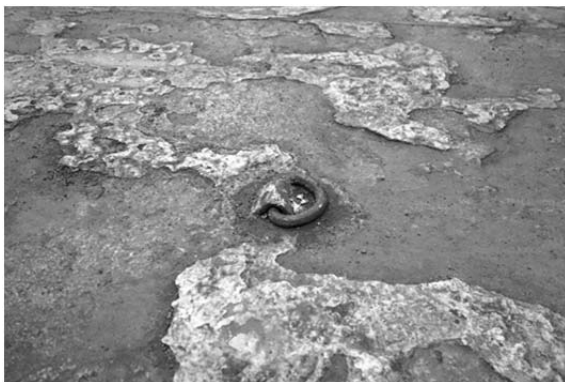


Fig.14 Bracket for fixing the vehicle



Fig.17 Step between the ramp way and the harbor road



Fig.18 Unevenness of the rampway surface

Table 2 Comparison of each process at No.7 (vertical direction)

Date	Time	Route (from / to)	Peak G (max)	Peak G (ave)	Grms (max)	Grms (ave)
7.Nov.2017	19:17:17	from: Ship	0.594	0.222	0.193	0.067
	19:18:27	to: Hakata Port				
	19:22:25	from: Chikkou Interchange	0.915	0.301	0.185	0.080
	19:35:19	to: Mizuki Interchange				

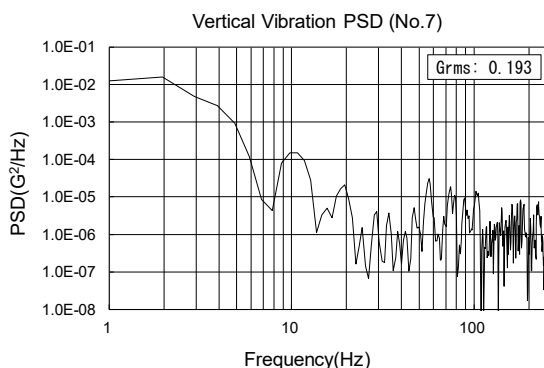


Fig. 19 PSD profile for transport No.7 at Hakata port (vertical direction).

Table 3 Comparison of kurtosis of acceleration distribution in each process of No.7 (vertical direction)

Route	kurtosis
Leaving from ship at Hakata port	5.12
Fukuoka Metropolitan Highway	2.91

6 まとめ

RO/RO 船の乗下船工程に焦点を絞り、美術品輸送専用車両を用いた文化財輸送時に、当該工程において荷台上で発生する振動レベルについての解析を実施した。その結果、Grms および PSD プロファイルからは、海上航行中では見られないレベルの振動が生じていたことが分かった。また、Grms が道路走行時とさほど変わらない値であっても、加速度値分布の尖度による比較では道路走行時と大きな差異が存在することから、乗下船工程ではより高い加速度が発生しやすい環境であることも分かった。それらは乗下船時の路面状態の起伏の大きさが影響した結果であることも推測された。乗下船工程までを含めて、RO/RO 船輸送環境と定義すると、乗下船は注意を要する工程であると位置付けられる。

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) 和田 浩, 美術品輸送専用車両, 日本包装学会誌, **26** (6), p.382 (2017)
- 2) 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)
- 3) Wada Hiroshi, Saito Katsuhiko, Study On Transport Environment of Cultural Properties Via Ship In Japan, 28th IAPRI Symposium on Packaging 2017 Proceedings, p.163-167 (2017)
- 4) 鷺尾祐秀, RO/RO 船の種類と特徴 (<特集> RO/RO 船), 日本造船学会誌, **797** p.799-809 (1995)
- 5) Foley J. T., Gens M. B., Magnuson C. F., Current Predictive Models of the Dynamic Environment of Transportation, Proceedings of the Institute for Environmental Science, p.35-44 (1972)
- 6) 柳 和久, 船体振動 - 主機関起振力による船体振動, マリンエンジニアリング, **44** (2), p.219-224 (2009)
- 7) 造船テキスト研究会, 第 4 章 船体振動, 商船設計の基礎知識(改訂版), 成山堂書店, p.163-171 (2009)
- 8) Singh S. Paul, Burgess Gary J., Marcondes Jorge A., Antle John R., Measuring the package shipping environment in refrigerated ocean vessels, Packaging Technology and Science, **6** (4), p.175-181 (1993)
- 9) 笹島 洋, 水野 博介, 楠本 裕己, 金山 維史, 3-14 コンテナ船就航時の振動計測および特異点分布法を用いた数値解析, 関西造船協会講演論文集, **223** p.75-79 (1994)
- 10) 安部 浩二, 寺田 健一, 坂本 宗彦, 4. 輸送中のコンテナ内環境 (<特集> 専用船による物流 (1) コンテナ船), らん: 纜, **34** p.26-31 (1996)
- 11) 宮城兼一, 海外輸送に関する包装研究 (特集 最近の輸送包装事例), 包装技術, **45** (9), p.680-687 (2007)
- 12) 胡 紅鋼, 中野 公彦, 鈴木 謙一, 大堀 真敬, 貨物輸送時に荷物が受ける振動の解析, 日本機械学会 2011 年度年次大会論文集(交通・物流部門一般セッション), p.G180012-180011-G180012-180014 (2011)
- 13) 小西 毅, 阿保 友二郎, 船舶で輸送される貨物のランダム振動試験の実現, 研究報告 / 東京都立産業技術研究センター [編], **7** p.70-73 (2012)
- 14) 中嶋 理志, 輸送環境から見る事故対応事例, 日本包装学会, (2012)
- 15) Böröcz Péter, Singh Paul, Singh Jay, Evaluation of Distribution Environment 45 Evaluation of Distribution Environment in LTL Shipment between Central Europe & South Africa,

- Journal of Applied Packaging Research, **7** (2), p.45-60 (2015)
- 16) 玉木厚誌, 海上輸送・国内輸送・保管における温度対策について (コンテナライナー)(特集 包装副資材の動向), 包装技術, **47** (12), p.920-924 (2009)
 - 17) Singh S. Paul, Saha K., Singh J., Sandhu A. P. S., Measurement and Analysis of Vibration and Temperature Levels in Global Intermodal Container Shipments on Truck, Rail and Ship, Packaging Technology and Science, **25** (3), p.149-160 (2012)
 - 18) 原 忠彦, 藤田 一誠, 満山 慶明, 堀雅之, RO/RO 船の振動実験 (環境技術特集号), 三菱重工技報, **16** (4), p.500-504 (1979)
 - 19) 乾 猛士, 6.1 長距離カーフェリーの役割および運航(特集 RO/RO 船), 日本造船学会誌, **797** p.822-824 (1995)
 - 20) Singh S. P., Sandhu A. P. S., Singh J., Joneson E., Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India, Packaging Technology and Science, **20** (6), p.381-392 (2007)
 - 21) Garcia-Romeu-Martinez Manuel- Alfredo, Singh S. Paul, Cloquell-Ballester Vicente-Agustin, 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)
 - 22) Chonhenchob Vanee, Singh Sher Paul, Singh Jay Jagjit, Stallings Joseph, Grewal Gary, Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small-Sized and Medium-Sized Trucks and Automobiles, Packaging Technology and Science, **25** (1), p.31-38 (2012)
 - 23) 長谷川 淳英, 輸送環境解析, 輸送包装の基礎と実務, (斎藤 勝彦, 長谷川 淳英), 幸書房, p.75-101 (2008)
 - 24) Lu Fei, Ishikawa Yutaka, Kitazawa Hiroaki, Satake Takaaki, Effects of Sampling Intervals on Truck Transport Vibration Levels, 農業施設, **41** (3), p.103-110 (2010)
 - 25) 細山亮, 津田和城, 輸送環境における 3 軸振動成分の相関解析, 日本包装学会誌, **25** (5), p.261-274 (2016)

(原稿受付 2018 年 5 月 1 日)

(審査受理 2018 年 5 月 26 日)