

博士論文

文化財輸送時に生じる振動と衝撃の評価手法

Evaluation of Vibration and Shock

for the Transport of Cultural Properties

2019年3月

筑波大学大学院

人間総合科学研究科

世界文化遺産学専攻

和田 浩

目次

第1章 序論	1
1. 1 文化財輸送が生じる背景.....	1
1. 2 本研究の目的.....	4
1. 2. 1 文化財の梱包と輸送の現状.....	4
1. 2. 2 技術の維持と継承.....	15
1. 2. 3 現状の課題.....	17
1. 2. 4 本研究の目的と方針.....	19
1. 3 本論文の構成.....	20
引用文献.....	22
第2章 梱包と輸送に関する既往研究	25
2. 1 各種業界.....	26
2. 2 陸上輸送.....	27
2. 3 海上輸送.....	28
2. 4 航空輸送.....	29
2. 5 緩衝材.....	31
2. 6 文化財.....	33
引用文献.....	36
第3章 計測原理	43
3. 1 計測機器の仕様.....	43
3. 1. 1 加速度データロガー.....	43
3. 1. 2 GPS データロガー.....	43
3. 2 計測手順.....	44
3. 2. 1 計測機器の設定.....	45
3. 2. 2 計測機器の設置および計測.....	46
3. 2. 3 データの回収.....	48
3. 3 解析方法.....	49
3. 3. 1 加速度.....	49
3. 3. 2 ピーク加速度.....	49

3. 3. 3 実効加速度	50
3. 3. 4 パワースペクトル密度	51
引用文献	52

第4章 文化財の輸送環境調査－陸上輸送時における振動と衝撃.....53

4. 1 はじめに	53
4. 2 計測	53
4. 3 解析結果と考察	57
4. 3. 1 荷役作業時における振動と衝撃	57
4. 3. 2 走行中における振動と衝撃－走行速度との関係	62
4. 3. 3 走行中における振動と衝撃－走行路面との関係	69
4. 3. 4 その他の考慮すべき因子－車種による差異	76
4. 3. 5 その他の考慮すべき因子－荷台上の位置による差異	79
4. 4 文化財の陸上輸送環境のまとめ	82
引用文献	87

第5章 文化財の輸送環境調査－海上輸送時における振動と衝撃.....89

5. 1 はじめに	89
5. 2 計測	90
5. 3 解析結果と考察	95
5. 3. 1 航海中における振動と衝撃	95
5. 3. 2 乗船時および下船時における振動と衝撃	99
5. 4 文化財の海上輸送環境のまとめ	104
引用文献	107

第6章 文化財の輸送環境調査－航空輸送時における振動と衝撃..... 109

6. 1 はじめに	109
6. 2 計測	110
6. 3 解析結果と考察	111
6. 3. 1 飛行中における振動と衝撃	113
6. 3. 2 離着陸時における振動と衝撃	114
6. 3. 3 空港内荷役時における振動と衝撃	116
6. 4 文化財の航空輸送環境のまとめ	118

引用文献	121
第7章 文化財の輸送環境調査結果を反映した緩衝設計の最適化.....	123
7. 1 はじめに	123
7. 2 計測	128
7. 2. 1 緩衝材	128
7. 2. 2 試験仕様	130
7. 3 解析結果と考察	132
7. 4 緩衝設計の最適化に関するまとめ	139
引用文献	143
第8章 文化財の輸送履歴を評価するための指標.....	145
8. 1 はじめに	145
8. 2 蓄積疲労現象の確認試験.....	149
8. 2. 1 振動試験	149
8. 2. 2 衝撃試験	151
8. 2. 3 試験設備	153
8. 2. 4 解析結果と考察.....	155
8. 3 文化財の輸送履歴を評価するための指標.....	161
引用文献	167
第9章 結論.....	171
引用文献	178
本研究に関する発表論文等の一覧	181
謝辞.....	185

第1章 序論

1. 1 文化財輸送が生じる背景

博物館施設における文化財の活用形態の中で最も活発なのは展示による活用である。自館の収蔵品を常設展示等で展示する場合には、収蔵庫から展示室までの間、文化財が輸送される。特別展覧会等で外部の保管先から借用する場合には、国内外の経路を経る長距離輸送が発生する。いずれにせよ、文化財がどこかで展示される場合には文化財の輸送が必ず伴うことになる。このような文化財の活用に伴う動きからは、収蔵庫あるいは展示室が文化財の主な所在場所であり、両者は輸送によって繋がれているという形が見えてくる。従って、文化財をより長期的に安定した状態で保存するには、収蔵庫内の環境（収蔵環境）、展示室内の環境（展示環境）、輸送中の環境（輸送環境）の3つの環境を、文化財にとって安全な状態に保全することを考えるべきである。文化財が接する環境を保全し、劣化を抑制するという考え方は予防保存と呼ばれ、修理保存のみに依存しない考え方として、現在の文化財保存における主流となっている。予防保存の実践には、各環境の特徴を把握した上でそれに応じた対策を実施する必要がある、その対象の一つが輸送環境である¹⁾。

各種の交通網が発達した現代では、日本から海外への輸送も数日程度で終わられる場合が大半を占めており、輸送環境は文化財との接触時間が最も短い環境であることは間違いない。したがって、輸送環境中に発生する文化財の損傷は自ずと短時間で劣化進行した結果のものに限定される。その原因となりうる環境因子の中で、振動と衝撃は輸送環境における最も特徴的な環境因子として挙げられる。これらは文化財に物理的な損傷を発生させ、損傷発生までの時間経過は短くても、その被害は甚大なものとなる²⁾。振動によって周期性を持った加速度変化が連続して文化財を加振することで、文化財の各部位が共振し、共振によって亀裂や断裂、変形といった損傷を引き起こす。また、衝撃によって単発の大きな加速度が文化財に加わり、それが素材の強度を上回る場合に、振動と同様に亀裂や断裂、変形といった損傷を引き起こす。物理的な原理としては明確であるが、振動と衝撃が実際の文化財に及ぼす影響は定量化が難しく、例えば温湿度における推奨範囲といったものは現状では存在しない。

文化財輸送がどのくらいの頻度で発生しているのかについて、「平成29年度独立行政法人国立文化財機構 概要」³⁾には、国立博物館がどれだけの文化財を活用していたのかを示す数値が記載されており、一つの目安となる。まず、国立博物館の展示活用による

統計として、平成 28 年度の国立博物館 4 館の総来館者数は 3,663,777 人とされている。うち来館者が最多である東京国立博物館(1,907,647 人)では常設の展覧会(総合文化展)においては約 7,200 件余りの文化財を展示し、年間展示替え回数はおよそ 370 回程度に上る(いずれも平成 29 年度)。さらに、同館では平成 29 年度に館内で 6 回、海外で 2 回の特別展覧会を開催している。このデータから、特別展覧会の開催に際して多くの文化財の借用や長距離輸送が発生していることと、同時に館内展示替えに伴う館内輸送の物量も相当な規模であることが分かる。一方、収蔵品の外部機関への貸与については、「自己点検評価報告書」³⁾にその詳細が公開されており、平成 28 年度は国内の博物館等 103 機関に 750 件の作品を貸与し、海外の博物館等 4 機関に 34 件の作品を貸与しており、さらに海外交流展として 2 機関に 162 件を出品したとされている。過去の推移(平成 14 年度は 154(うち海外 14)の博物館施設へ 1,241 件の文化財の貸し出しが行われた。10 年後の平成 24 年度は 159(うち海外 5)の博物館施設へ 1,295 件。)と照らし合わせても、概ね毎年 1,000 件程度の文化財の貸与を実施しているが、貸与先機関数は年によってばらつきがあり、100 から 150 機関の範囲である。以上から、往路と復路の輸送をそれぞれ 1 回とカウントすれば、東京国立博物館では敷地内の単距離輸送および敷地外の海外を含めた長距離輸送がそれぞれ平均すると 1 年を通じて毎日行われているという状況となる。特別展覧会のような長距離輸送を伴う事業について、国内の全体的な状況は「日本の博物館総合調査報告書」⁴⁾に詳細にまとめられている。同書によると、国内の博物館施設全体の統計として平成 25 年に実施した 2,258 館へのアンケート調査では、うち 77.4%が特別展覧会を開催しており、開催頻度は平均で年 3 回であったとされ、過去 10 年でいずれの数値も上昇傾向が認められている。文化財輸送は社会的な要求を反映しており、輸送回数で考えた場合に膨大な数に上ることが分かる。

文化財輸送が促進するような国内の制度的側面について参考となるのは、文化庁が通知した「国宝・重要文化財の公開に関する取扱要項」の改訂(2018 年 1 月 29 日)⁵⁾である。まず同要項の位置付けについては、前文に「指針」という表現がされているものの、所管官庁が発した文化財保護に関する具体的な留意事項であり、文化財の所有者等にとって大きな影響力をもつものである。さて、上記改訂における重要事項は、従来までは最大公開日数が延べ 60 日であったところを、材質や保存状態によっては 150 日あるいは 100 日までという指針へ改訂されたことである。その背景として「展示設備等の技術的な進歩」「公開ニーズの多様化」が挙げられており、同庁から発せられた 2018 年度予算の概算要求事項に「文化財活用のためのセンター機能の整備」といった新規事業が盛り込まれた。こうした状況から、文化財を積極的に活用しようという動きは今後も拡大されることはあっても縮小傾向にはないと考えられる。公開に関する指針がある意味柔軟性を持って緩和され、行政が活用を促進するという状況であれば、文化財の輸送機会もそれに乘じて増加することが大いに見込まれる。

国際的に見ても、特別展覧会の開催に伴う文化財輸送回数は相当な数となっており、例えばドイツでは年間約 9,000 回の開催がここ 20 年間続いており、特別展覧会だけの入場者数はのべ 8,000 万人に届く勢いであることが統計として出ている⁶⁾。

以上から文化財輸送は制度的あるいは社会的要求という点からも今後も増えていく傾向にあると考えられ、輸送環境をいかに安全に保つかは、文化財を長期的に安定した状態で活用するための大きな鍵となる。

1. 2 本研究の目的

1. 2. 1 文化財の梱包と輸送の現状

A) 文化財の梱包の現状⁷⁾

まず、文化財の梱包と輸送の実態について把握し、そこから見出される課題の整理を行った上で本研究の目的と位置付けを明確化する。本節では、文化財の梱包の現状について述べる。文化財の梱包は内装梱包と外装梱包の2つの内容に大きく分けて整理できる (Table 1-2-1)。内装梱包は文化財表面を保護し安全に外装梱包へ固定するための準備として行われるものである。具体的には、文化財表面の保存状態に注意しながら、薄葉紙 (薄手の和紙) 等柔軟性の高い資材を用いて表面を保護する (Fig. 1-2-1)、可動箇所があれば固定する (Fig. 1-2-2)、構造上強度が低い箇所を補強するといった作業である。また、内装梱包を施すことによって、彩色層、装飾、彫刻による微細な凹凸は平滑化されるため、文化財の形状は単純化する。このことが外装梱包へ強固に固定される際に表面への圧力が局所的ではなく面的に分散する効果をもたらす。

内装梱包を行った後、頑丈な資材に固定する作業、あるいは梱包箱の組み立てそのものである外装梱包へと進む。外装梱包では、落下や接触によって梱包箱表面が容易に変形して内部の文化財に影響を及ぼさない程度、あるいはトラックの荷台や航空機の貨物室床面などの輸送機関上へのラッシングベルト等による締め付け時に生じる外力に対抗できる程度の、高い強度を持つ資材が用いられる。例えば、段ボール (Fig. 1-2-3)、木材 (Fig. 1-2-4)、鉄 (Fig. 1-2-5)、アルミ (Fig. 1-2-6) などが近年外装梱包に頻繁に使用される資材である。輸送中に内装梱包済の文化財が外装梱包内で動かぬように、しっかりと固定することになるが、固定箇所に該当する部分には最大の注意を要する。固定箇所には外力が集中するため、文化財の形状的・構造的に見て、固定による外力に耐えられる部分を適切に選択せねばならない。あらゆる文化財梱包に共通する事項は、内装梱包から外装梱包にかけて、文化財表面と接触する資材は柔らかく、表面から遠ざかるほど硬いものになるという点である。

具体的な工程としては、まず梱包する前に文化財を十分に観察し、形状、構造および、表面の保存状態を十分に把握しておく (Fig. 1-2-7)。この時に保存状態を記録しておくのに使われる媒体を一般的に「点検調書」 (Fig. 1-2-8) と呼んでいる。ちなみに点検調書には危険性のある箇所の記録はもちろんのこと、目立つ傷や汚れといったものも記録される。輸送後に文化財を観察し、状態に疑問点があれば点検調書を参照するためである。基本的に文化財の表面はそれほど高い強度を保っていない場合が多く、梱包においては、硬質の梱包資材が直接接触することは避ける。点検調書作成後に引き続き行われる内装梱包は、文化財表面の養生を中心に行なわれる (Fig. 1-2-9, Fig. 1-2-10)。文化財によつ

ては、表面の彩色層が極めて脆弱化 (Fig. 1-2-11) している場合もあるため、内装梱包においても梱包資材が触れないように注意が必要な場合も多い。内装梱包が完了したら、文化財を内箱へ納める (Fig. 1-2-12)。ここではダンボール製の内箱 (Fig. 1-2-13) を用いているが、通常は一般的な単層のダンボールが2層あるいは3層となって加工された非常に強度の高いものが用いられる。次に、内箱を外箱 (Fig. 1-2-14) へ納める。外箱内部には緩衝材と調湿材が設置されている (Fig. 1-2-15)。調湿材とは相対湿度を一定に維持する機能を持つ素材から構成されるものである。いずれの博物館施設でも概ね湿度が一定範囲内に収まっており、梱包した文化財周囲の湿度を一定に維持した状態で、輸送先で開梱すれば外気と箱内との湿度差が存在せず、理論的には湿度変化による劣化は文化財に生じない。最後に外箱を密閉して梱包作業が完了する (Fig. 1-2-16)。なお、文化財が梱包箱と一体化していない状態で輸送すると、輸送中に梱包箱内でずれを生じ、大きな損傷を招く危険性がある。外装梱包では文化財と梱包箱を確実に一体化させることが重要であるが、上述した通り、梱包箱への文化財の固定箇所には比較的強い力が加わることにも注意せねばならない。構造的に丈夫な場所を見極めて固定箇所を決定することが重要である。こうした判断に際しては、レントゲン写真 (Fig. 1-2-17, Fig. 1-2-18) など、内部構造に関する情報があれば極めて有用性が高い。

基本的には大型の文化財でも上記の工程に大きな差異は無いが、重量や大きさが大きくなるに従って、梱包箱にも高い強度が要求されるため、梱包箱を含めた総重量も大きくなる (Fig. 1-2-19) ことが多い。必要に応じて、館内の床養生 (Fig. 1-2-20) など、文化財以外の空間を準備する段取りを作業計画に見込んでおくことも、現場作業を円滑に進めるためのポイントである。特に寺院等から大型の文化財を借用する場合は作業空間が狭い上に建築そのものが指定文化財等であることも多い。現場担当者は文化財以外のものを含めた全体的な安全を常に意識せねばならない。

Table 1-2-1 工程による文化財梱包の分類

	内容	梱包資材	注意点
内装梱包	作品表面を保護して、安全に梱包箱へ固定するための梱包。	薄葉紙 (和紙)、綿布団 (真綿を薄葉紙で包んだもの)、サラシ (木綿製の幅広い布)、薄紐 (薄葉紙を絞ったもの)、発泡ウレタン等。	表面の保存状態、突起物、可動部分、外れる部分。
外装梱包	内装梱包の済んだ作品を頑丈な資材に固定すること、および梱包箱そのもの。	段ボール、木材、鉄、アルミ等。	固定箇所 (構造的に外力に耐えられる部分)。



Fig. 1-2-1 薄葉紙（薄手の和紙）等柔軟性の高い資材を用いて表面を保護



Fig. 1-2-2 可動部分があれば固定する



Fig. 1-2-3 段ボール製の梱包箱



Fig. 1-2-4 木製の梱包箱



Fig. 1-2-5 鉄製の梱包箱



Fig. 1-2-6 アルミ製の梱包箱



Fig. 1-2-7 十分に観察し、形状、構造および、表面の保存状態を把握

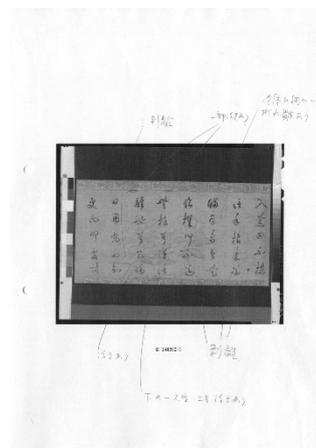


Fig. 1-2-8 保存状態を記録する点検調書



Fig. 1-2-9 文化財表面の養生が中心となる内装梱包



Fig. 1-2-10 内装梱包がほぼ完了した状態



Fig. 1-2-11 表面の彩色層が極めて脆弱化している例



Fig. 1-2-12 内装梱包済みの文化財を内箱へ納める



Fig. 1-2-13 ダンボール製の内箱を組み立てる

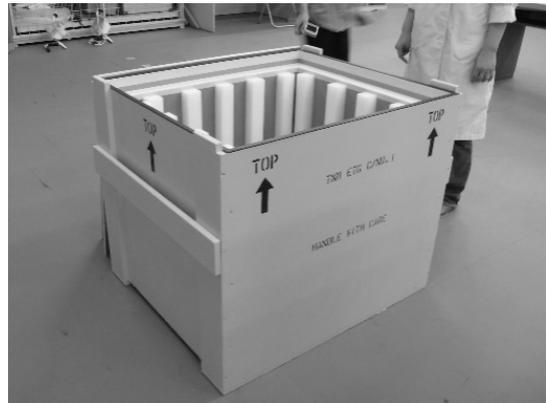


Fig. 1-2-14 海外輸送用の木製の外箱



Fig. 1-2-15 箱内部には緩衝材と調湿材が設置



Fig. 1-2-16 内箱を入れ、外箱を密閉して梱包作業が完了

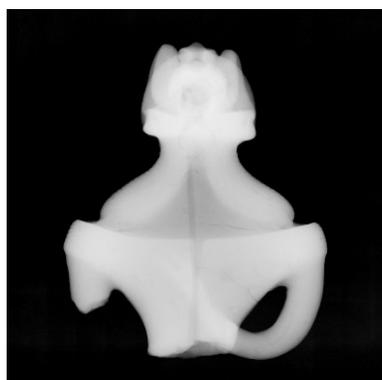


Fig.1-2-17 内部構造の診断に用いられる文化財のレントゲン写真



Fig. 1-2-18 Fig. 1-2-17 と同じ文化財の画像



Fig. 1-2-19 大型で総重量も大きい文化財の
梱包



Fig. 1-2-20 館内の床面を保護するために全
面に敷かれたベニヤ

B) 輸送の現状

文化財の輸送で用いられる輸送機関としては、人、台車、トラック、航空機、船舶が挙げられる (Table 1-2-2)。航空機は海外輸送では必須であるが、船舶は近年海外輸送で用いられることはほぼ無く、本州・北海道間など国内輸送で用いられる。また、列車による輸送はターミナル駅における荷役作業分が追加発生することと、輸送時刻の調整自由度が低いことからほとんど用いられていない。

Table 1-2-2 輸送形態の分類

	輸送目的	輸送機関
館内輸送	陳列替え、調査、修理	人力、台車、トラック
国内輸送	国内施設との間の文化財の貸借	人力、台車、トラック、船舶、航空機
海外輸送	海外施設との間の文化財の貸借	人力、台車、トラック、航空機

したがって、最も多用されるのはトラックであり、文化財の輸送では「美術品輸送専用車両 (美専車)」⁸⁾と呼ばれる専用の車両が用いられる (Fig. 1-2-21)。美術品輸送専用車両の基本的仕様は、(1) サスペンションにエアスプリング (荷室を支持する後輪は必須) が用いられているエアサスペンション仕様であること (Fig. 1-2-22)、(2) ダブルキャビンで添乗者 (文化財所有者等) のシートが確保されていること (Fig. 1-2-23)、(3) コンテナ内をエアコンによって空調できること (Fig. 1-2-24)、が主な要件でありその他に、コンテナパネルへの断熱材の設置、コンテナ内の各所へのラッシングベルト固定用金具の装備 (Fig. 1-2-25)、パワーゲートの装備 (Fig. 1-2-26)、等がある。美術品輸送専用車両は文化財の輸送業務を請け負う輸送会社が車両メーカーに特注して製造されるものであり、輸送会社によって車両毎の仕様については微妙な差異が存在する。1 台毎の厳密な仕様は異なるものの、その大きさ等から 2 トン車 (Fig. 1-2-27)、4 トン車 (Fig. 1-2-28)、10 トン車 (Fig. 1-2-29) という大まかな分類で呼称されている。現在のところ、10 トン車では美術品輸送専用車両としての車両が存在せず、ダブルキャビン仕様とはなっていないが、他の要件は美術品輸送専用車両と同様である。2 トン車および 4 トン車は博物館等の学芸員が日常的に目にする車両であり、文化財業界では最もなじみ深いため、概要を Table 1-2-3 にまとめた。2 トン車は後輪 1 軸に 2 つのエアバッグの付く 2 バッグエアサス、4 トン車は 4 つが付く 4 バッグエアサス仕様が大半を占める。10 トン車に関しては基本的に後輪が 2 軸で 4 バッグエアサスとなる。また、特殊事例として、大型文化財を輸送する際には低床エアサストレーラー (Fig. 1-2-30) を使用する場合もある。運転は輸送会社の専門部門の作業員が受け持つ。

文化財の船舶輸送については、上述の通りほぼ国内の一部航路で実施されているのみと考えてよい。そこでは使用される船舶は形式が限定されており、RO/RO 船と呼ばれ

るトラックに文化財を積載した状態で乗船する形式の船舶となる (Fig. 1-2-31)。したがって、船舶輸送とは船舶内に駐車した美術品輸送専用車両の荷台上に積載された状態での海上輸送が大部分を占め、そこに RO/RO 船との乗船、下船といった特徴的な工程が含まれるものを指すことになる。文化財輸送専用の船舶輸送便が仕立てられることはなく、一般の車両および旅客とともに乗船する。船内の駐車空間 (Fig. 1-2-32) には空調制御がなされておらず、船舶によっては海風に晒される屋外環境と同様なものになると想定した方がよい。また、輸送中は原則として、添乗者は駐車場に立ち入ることはできない。

文化財の航空機輸送については、海外施設との貸借時には必ず実施されると考えてよい。ただし、博物館施設と空港との間は美術品輸送専用車両による陸上輸送が必須となるため、全工程を考慮すると単純に航空機だけを使用する輸送とはならない。空港に到着後、梱包箱を航空機へ積載するための準備として、通常は複数の梱包箱がまとめてパレットへ固定される (Fig. 1-2-33)。この工程はパレットイズと呼ばれ、代表的な空港内荷役作業の1つである。パレットイズの際には、フォークリフトが用いられることもある (Fig. 1-2-34)。添乗者が梱包箱近傍で作業に立ち会うことができるのは、パレットイズ工程まで (復路ではパレットイズ工程以降) となる。その後、台車に積載されたパレットはドーリーと呼ばれる車両で滑走路を牽引されて、航空機近傍へと輸送される (Fig. 1-2-35) が、滑走路はセキュリティレベルが極めて高いエリアであるため、添乗者は基本的に立ち入ることはできず、旅客ターミナルからこうした工程を観察するにとどまる。やがてドーリーは航空機下へ到着するが、航空機荷室入口は路面からやや高い位置にあるため、ハイリフトローダーと呼ばれる車両でパレットごとリフトアップする (Fig. 1-2-36)。定位置で水平方向にスライドさせて荷室内に移動し、荷室内ではパレットは荷室の床面と一体化されることで飛行中のずれ等を予防する。その後、航空機が離陸し、着陸後は上記工程の逆順を辿ることになる。現在、多くの航空機輸送は一般旅客便を使用したものであり、添乗者は同じ機体のキャビンに搭乗して航空機輸送に同行する形をとる。



Fig. 1-2-21 美術品輸送専用車両（美専車）



Fig. 1-2-22 美専車に取り付けられたエアサスペンション（矢印）



Fig. 1-2-23 ダブルキャビン仕様で後部（矢印）に添乗者のシートを確保

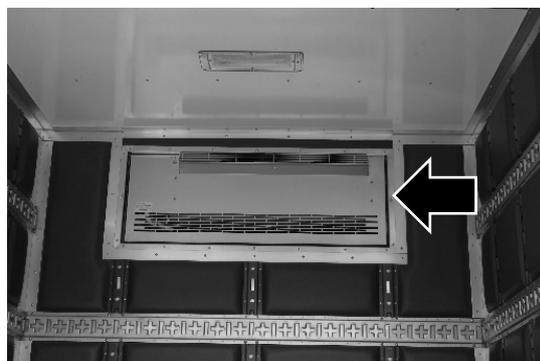


Fig. 1-2-24 コンテナ内をエアコン（矢印）によって空調



Fig. 1-2-25 荷室内の各所へラッシングベルト固定用金具（矢印）が装備されている



Fig. 1-2-26 貨物をリフトするために後部に取り付けられたパワーゲート（矢印）



Fig. 1-2-27 通称 2 トン車と呼ばれる車両



Fig. 1-2-28 通称 4 トン車と呼ばれる車両



Fig. 1-2-29 通称 10 トン車と呼ばれる車両



Fig. 1-2-30 大型の文化財を輸送する際に用いられる低床エアサストレーラー



Fig. 1-2-31 トラックに積載した状態で乗船する形式の RO/RO 船



Fig. 1-2-32 RO/RO 船内の駐車場



Fig. 1-2-33 空港内でパレットへ複数の梱包箱を固定するパレタイズ作業



Fig. 1-2-34 フォークリフトによる荷役作業



Fig. 1-2-35 パレットを航空機下まで牽引するドーリー



Fig. 1-2-36 航空機の貨物室までリフトアップするハイリフトローダー

1. 2. 2 技術の維持と継承の現状

上記のような文化財の梱包と輸送に関する現状の技術については、その水準を認識した上で技術の維持と改善および次世代への継承を確実にを行う必要がある。これについては、各輸送会社内での研修⁹⁾、現場における実地作業を通じた訓練といった他に、近年創設された美術品梱包輸送技能取得士認定試験という資格制度も大きな役割を担っている¹⁰⁾。技術についての基準が設定されてはじめて現状に対する客観的評価が可能となるため、民間資格ではあるが、関連業界で技術水準についての認識を共通化したという点では画期的な制度である。この制度は、平成24年に財団法人日本博物館協会が創設したものであり、文化財の梱包および輸送を業務として行う輸送会社に所属する技術者が受験することを想定しており、資格は1級から3級に区分されている。実施要項において各基準を、「(1級) 美術品の梱包輸送に関し、作業員について必要な指導及び指示ができるとともに、美術品の梱包及び輸送に関する設計ができる」、「(2級) 美術品の梱包及び輸送に関し、独立して作業ができるとともに、必要な準備ができる」、「(3級) 比較的取扱いの容易な美術品の梱包及び輸送に関する知識及び技能が備わっている」と定めている。試験構成は、1級が筆記試験と面接試験、2級が筆記試験、実技試験、面接、講習、3級が筆記試験、実技試験、講習となっている。合格者累計は、17名(1級)、87名(2級)、215名(3級)、総受験者数は延べ543名、合格者が所属する輸送会社は18社であり(いずれも平成30年2月現在)、財団法人日本博物館協会のウェブサイトで情報公開されている¹¹⁾。

したがって、上記制度のテキストとして位置付けられている「博物館資料取扱いガイドブック」¹²⁾は現在、文化財の梱包および輸送を担当する技術者に求められている水準を示すものとしての位置付けを持つ。そこには文化財の分野毎に取扱い方法、梱包方法、輸送方法、展示方法、保存管理方法が記載されている。同書では全ての分野の文化財に共通して、文化財の取扱い方を非常に重視している。文化財の取扱い方とはいわば梱包の前段階の作業であり、伝統的な作法、収蔵棚からの取り出し、箱からの出し入れ、机や床への置き方、展示作業の手順といった内容を指す。こうした内容について、人間が手で文化財を持って作業を行う上での基本技術について細部にわたり標準化されている。実際に上記実技試験ではこの辺りの技術がしっかりと身に付いているかは採点上の大きなポイントとなっている。これは日常的に博物館が所蔵する文化財に対しては、こうした取扱いが最も高い頻度で発生する動きであり、この技術の安全性確保が文化財の損傷予防に直接的に影響する部分が大きいためである。

さて、長距離輸送を前提とした梱包について同書では、使用する資材とその使用方法についての標準化がなされている。その標準の前提となるものは、従来から引き継がれた伝統的な梱包手法であり、様式を正確に伝えることを、この標準化によって実現しようという趣旨である。まず、取扱い技術の延長線上として、分野毎に梱包時に注意を要

する部位とその部位への対処法がまとめられている。これはいわば梱包の性能仕様に該当するものである。例えば、ある材質である形状を持つ文化財では特定箇所が脆弱である傾向が高いため、梱包に際しては資材が直接接触しないように、かつ強度の高い箇所固定するように、といった内容であり、上記1. 2. 1節に記載した標準的なものである。梱包資材の選択と使用方法については、文化財の分野毎の基本的手順の解説内に記載されており、例えば陶磁器分野の壺の梱包手順においては、「下部の窪みの大きさの綿布団を作り、胴の太さに合わせる」「(直径より大きめの正方形の綿布団を作ったうえで)下に敷く」といった具体的記載がある。こうした梱包と輸送に関する教科書的な文献は、国際的にみても、ユネスコが刊行した「Temporary and Travelling Exhibitions」¹³⁾、Stolowの「Conservation Standards for Works of Art in Transit and on Exhibition」¹⁴⁾および、「Art in Transit」¹⁵⁾が存在するのみであり、その他は国際会議等での発表論文となる。既往研究については第2章で詳説するが、それらのほとんどが油彩画の梱包と輸送に特化した内容となっている。日本の実情に即した内容に限定されているとはいえ「博物館資料取扱いガイドブック」の位置付けおよび内容は重要なものとして捉えられる。そして、国内ではこうした基本技術を維持していくための制度、すなわち梱包技術者の技術水準を維持するためのシステムが始まったというのが現状である。

1. 2. 3 現状の課題

梱包技術についての維持と継承のシステムが存在する場合に、その技術の根拠が重要性をもつ。その観点から考えた場合、現状のシステムでは、未梱包の文化財の取扱いと、内装梱包の一部に関しては技術をほぼ確立できている。取扱の安全性、丁寧な仕事、仕上がり的美しさ、緩衝材の加工技術といった点においては、特に日本の技術は優れており、その維持継承システムが安定的に存在すると言ってよい。

一方、内装梱包および外装梱包における、緩衝設計に関しては、より安全性を高められる余地を有している (Fig. 1-2-37)。緩衝設計とは、梱包資材の選択と用法を輸送手段に応じて最適化することである。つまり、予め主に衝撃や振動のレベルを示す**輸送環境データ**と緩衝材の特性データの双方が揃っており、予定される輸送手段に対して、最適な緩衝効果が得られる緩衝材と使用法が導き出されるといった工程による緩衝設計である。さらに、この工程に文化財の脆弱性データが考慮されるようになっていけばより理想的なものとなる。こうした内容は個人技術への依存のみでは実現できず、科学的な技術構築が求められる。

また、輸送によって文化財には大小の疲労が蓄積していると考えられる。例えば、1回の輸送で文化財が損傷しなかった場合に、それと同一の輸送環境で100回輸送しても損傷しないとは言い切れない。もしも、100回目に損傷してしまった場合は、過去99回の輸送が影響していることが推測される。現実的には、1. 1節で述べたように近年、文化財輸送の頻度は上昇傾向にある。輸送に伴い文化財への蓄積疲労もより一層考慮せねばならない時代へ突入しており、文化財への蓄積疲労を現象として認識しておくこともまた重要である。

したがって、蓄積疲労が発生しているのであれば、少なくとも輸送された際の輸送環境をその文化財へ履歴として残しておかねばならない。しかし、現状では**輸送環境データ**を使った輸送履歴を表現できる指標が存在しない。仮に、このような指標が存在すれば、将来的に蓄積疲労の算出法が完成した際に、そこへ指標を代入することで、例えば損傷発現までの残り輸送回数などを推定できる、すなわち、今後の輸送による損傷リスクを見積もることができる。



Fig. 1-2-37 文化財の表面を保護する技術や文化財の取り扱い技術についてはほぼ確立されている。一方で図中の点線枠のような輸送機関との間の緩衝設計については未だ科学的なアプローチで改善できる余地を有する。例えば、使用する緩衝材の種類と厚みによって文化財の荷重を受ける面積の最適化等は科学的な試験データに基づいて導き出すといった仕様が必要である。

1. 2. 4 本研究の目的と方針

前節では、**緩衝設計**に関する課題と、**輸送履歴**に関する課題を現状抱える大きな課題として抽出した。双方の課題に共通するのは、**輸送環境データ**の活用であり、課題解決のためには整理された輸送環境データの存在が前提となる。そして、緩衝設計においては**緩衝材特性の計測手法**を確立する必要がある。また、輸送履歴については、文化財へ疲労が蓄積する現象の存在も前提となるため、**蓄積疲労現象を確認**しておく必要がある。以上を踏まえて、本研究の目的を以下のように設定する。

1) 文化財輸送の輸送環境を計測し、解析する。また、緩衝材特性の計測手法を確立する。そして、双方を利用した最適な緩衝設計を実現するための工程を策定する。

2) 文化財輸送の輸送環境データを解析する。また、文化財への蓄積疲労現象の発生を確認する。そして、輸送後の文化財へ輸送履歴を残すための輸送評価指標を策定する。

そのために、まず輸送環境データについては陸海空3種の輸送態様において振動と衝撃を計測し、各輸送態様の主な工程の特徴をとらえる。こうした輸送環境下における緩衝材の挙動を実験によって把握でき、その結果から緩衝設計の最適化が実現できることを検証する。また、文化財を構成する素材に蓄積疲労現象が発生することを実験によって確認できることを検証する。輸送環境データを解析することで、蓄積疲労を文化財へ履歴として残すための指標を策定する。

1. 3 本論文の構成

本論文を9つの章により構成する (Fig. 1-3-1)。第1章では本研究の目的を明確にするために研究の背景を説明し、目的と方針を提示する。第2章では既往研究を辿り、文化財関連分野だけでなく、広い範囲で理論の現状を調査する。第3章では輸送環境調査に用いる計測機器の仕様や調査手法およびデータの解析手法について、本論文で共通する事項を予めまとめて記載する。調査手法については、これまで実施した多くの調査¹⁶⁾によって、おおよその計測範囲が判明しており¹⁷⁾、それらを根拠としたものである。

第4章から第6章までは、輸送環境の計測と解析についての検証となり、第4章では陸上輸送、第5章では海上輸送、第6章では航空輸送について論じる。以上の3章については、国内外の陸上輸送¹⁸⁻²⁸⁾、国内の海上輸送^{1,29-34)}、海外との航空輸送¹⁶⁾に関して、筆者らがこれまで調査した内容を基に組み立てた内容である。

第7章では、第4章から第6章までで明らかとなった輸送環境下における、緩衝材特性の計測手法について実験データに基づく検証を行い³⁵⁾、緩衝設計の最適化を実現する工程について論じる。

第8章で、第4章から第6章までの輸送環境の解析結果を用いて輸送履歴の指標化を行うに際し、文化財の素材に蓄積疲労現象が発生するという考察の根拠を強化するために、供試体を用いた加振実験の結果を引用する。その上で、輸送履歴を表す新たな指標を提示する。

最後に第9章で本論文の結論を述べる。

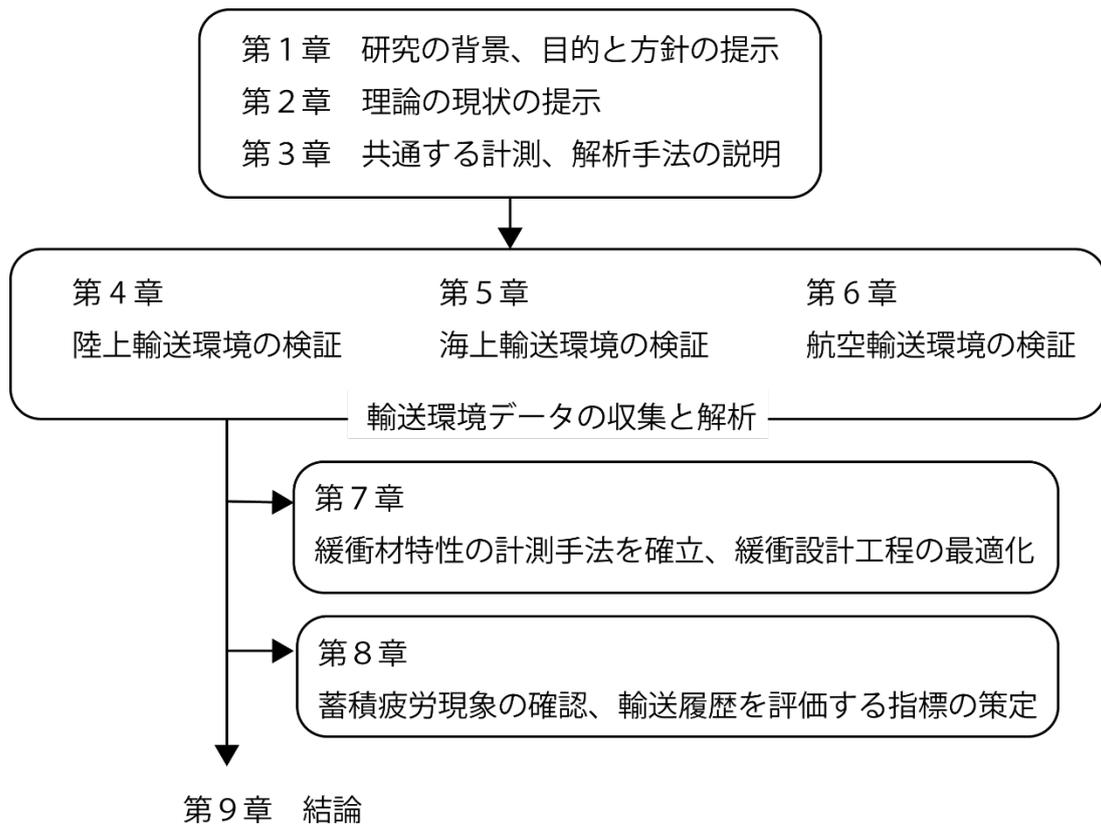


Fig. 1-3-1 本論文の構成

引用文献

- 1) 和田 浩, 遺物の保存環境, 考古学と自然科学, **71** pp.65-77 (2016)
- 2) 和田 浩, 神庭 信幸, 博物館環境のリスクアセスメント, MUSEUM, **600** pp.93-105 (2006)
- 3) 独立行政法人国立文化財機構 HP, <http://www.nich.go.jp/>, (アクセス日: 2018年5月4日)
- 4) 公益財団法人日本博物館協会, 平成25年度博物館総合調査に関する報告書, (2017)
- 5) 文化庁 HP, <http://www.bunka.go.jp/>, (アクセス日: 2018年5月4日)
- 6) Kracht Kerstin, Kletschkowski Thomas, From art to Engineering: A Technical Review on the Problem of Vibrating Canvas Part I: Excitation and Efforts of Vibration Reduction, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, **15** (1), pp.163-182 (2017)
- 7) 和田 浩, 文化財の梱包, 日本包装学会誌, **26** (6), pp.293-301 (2017)
- 8) 和田 浩, 美術品輸送専用車両, 日本包装学会誌, **26** (6), pp.382 (2017)
- 9) 日本通運 HP, <https://www.nittsu.co.jp/>, (アクセス日: 2018年10月2日)
- 10) 和田 浩, 美術品梱包輸送技能取得士, 日本包装学会誌, **26** (6), pp.383 (2017)
- 11) 公益財団法人日本博物館協会 HP, <https://www.j-muse.or.jp/>, (アクセス日: 2018年9月29日)
- 12) 博物館資料取扱いガイドブック, (日本博物館協会), ぎょうせい, 978-4-324-10159-9, (2016)
- 13) Temporary and Travelling Exhibitions, UNESCO, (1963)
- 14) Stolor Nathan, Conservation Standards for Works of Art in Transit and on Exhibition, UNESCO, 92-3-101628-8, (1979)
- 15) Art in Transit Studies in the Transport of Paintings, (Mecklenburg Marion F.), National Gallery of Art, 0-89468-163-X, (1991)
- 16) 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)
- 17) 和田 浩, 美術品輸送車両上で発生する振動周波数の解析, 日本文化財科学会第33回大会研究発表要旨集, 日本文化財科学会, pp.264-265 (2016)
- 18) 和田 浩, 首都高速道路走行時に美術品輸送車両上で発生する加速度の評価, 文化財保存修復学会第38回大会研究発表要旨集, 文化財保存修復学会, pp.144-145 (2016)
- 19) 和田 浩, 中国における美術品長距離輸送時の環境調査, 第54回全日本包装技術研究大会予稿集, 日本包装技術協会, pp.102-105 (2016)
- 20) 和田 浩, キトラ古墳壁画の輸送 輸送中に発生した加速度について, 月刊文化財, **649** pp.16 (2017)
- 21) 和田 浩, 星野 裕昭, 美術品輸送専用車両による輸送環境のシミュレーションに関する基礎的研究, 第55回全日本包装技術研究大会予稿集, 日本包装技術協会, pp.13-16 (2017)

- 22) 和田 浩,星野 裕昭, 文化財輸送環境の最適化に向けた基礎的研究, 日本機械学会 第 26 回交通・物流部門大会 講演論文集, 日本機械学会, (2017)
- 23) 和田 浩, 高妻 洋成, 他, キトラ古墳壁画輸送時に発生した加速度の解析, 文化財保存修復学会第 39 回大会研究発表要旨集, 文化財保存修復学会, pp.84-85 (2017)
- 24) 和田 浩, 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, 日本包装学会誌, **27** (4), pp.225-241 (2018)
- 25) 和田 浩, 美術品輸送専用車両の荷台上で発生する振動レベルの分布, 文化財保存修復学会第 40 回大会研究発表要旨集, 文化財保存修復学会, pp.72-73 (2018)
- 26) 和田 浩, 美術品輸送専用車両を用いた文化財の低速走行輸送時の環境について, 日本包装学会第 27 回年次大会研究発表会予稿集, 日本包装学会, pp.68-69 (2018)
- 27) 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)
- 28) Wada Hiroshi, The Investigation of Shock and Vibration of Tracks During Transport for Museum Objects, International Safe Transit Association European Packaging Symposium, Valencia, Spain, (2017)
- 29) Wada Hiroshi, A Case Study on Transport Environment of Cultural Properties by Ship, 東亜文化遺産保護学会第 6 次国際学術研討会, 上海復旦大学, (2017)
- 30) Wada Hiroshi, Saito Katsuhiko, Study on Transport Environment of Cultural Properties via Ship in Japan, 28th IAPRI Symposium on Packaging 2017 Proceedings, (Martine E., Wyser Y.), School of Engineering and Management Vaud (HEIG-VD), pp.163-167 (2017)
- 31) 和田 浩, 宮地 鼓, 文化財の国内長距離輸送時の各輸送工程において発生した加速度の評価, 日本文化財科学会第 34 回大会研究発表要旨集, 日本文化財科学会, pp.16-17 (2017)
- 32) 和田 浩, 宮地 鼓, 齋藤 勝彦, 海上輸送を経由する文化財輸送環境の評価, 日本包装学会第 26 回年次大会研究発表会予稿集, 日本包装学会, pp.60-61 (2017)
- 33) 和田 浩, 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, 日本包装学会誌, **27** (4), pp.243-254 (2018)
- 34) 和田 浩, RO-RO 船による文化財輸送における乗下船時の振動環境, 日本文化財科学会第 35 回大会研究発表要旨集, 日本文化財科学会, pp.78-79 (2018)
- 35) 和田 浩, 今北 憲, 他, 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), pp.339-346 (2018)

第2章 梱包と輸送に関する既往研究

輸送中に文化財が損傷する物理的な原因としては、静的応力による損傷、衝撃による損傷、振動による損傷が主なものとして挙げられる。静的応力は時間経過に伴い、文化財への負荷が増加し、その結果、変形などの危険性が高まる。衝撃は例えば落下衝撃のように作用時間は短いが非常に大きな負荷を文化財に与えることになる。振動は加速度は小さいが作用時間が長いため、文化財へ徐々に疲労が蓄積した結果、最終的に損傷を導く (Fig. 2-1-1)。輸送中に発生するこうした現象のレベルを計測し、それがどの程度まで到達した時に、何を予測することができるのかを明らかにして、包括的に文化財輸送をとらえるための方法論を体系化する必要がある。

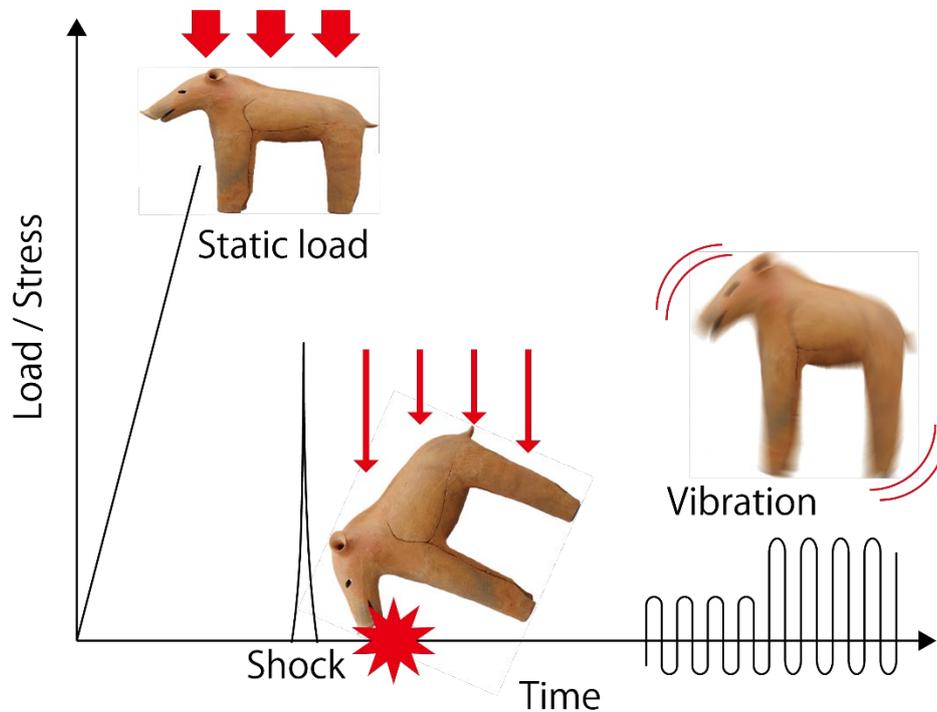


Fig. 2-1-1 文化財の損傷を導く物理的な力の種類 (Wei et al.(2011)¹⁾の図を基に作成)

そのための科学的アプローチを考えた場合、まず輸送中にどれだけの負荷が文化財に及ぶ危険性があるのかといった情報が必要である。次に、それを踏まえて、現状の文化財の強度に対してどれだけの梱包を行えば、輸送中のリスクから保護できるのか、そしてその安全余裕をどのように見積もることができるのかといった各要素についてデータを収集する。最後にそれらを有機的に結び付けるといった理論の組立てが求められる。本研究でこうした理論構築の一部を担う場合には既往研究による理論の現状を調査した上で、それらを活用する必要がある。そこで、以下に関連する既往研究による理論の現状について述べる。

2. 1 各種業界

まず、文化財以外を対象とする他分野の研究動向についてまとめると、青果物の梱包輸送に関する研究が非常に盛んであることが分かる。鮮度保持、損傷劣化予防、ブランド力向上といった様々な観点からの取り組みが行われている。古くは中馬らの研究²⁾があり、イチゴの長距離輸送において、温度、振動、衝撃の調査を行い、それらの値や車両上の積載位置がイチゴの保存状態へどう影響するかを報告している。同じ研究グループの岩元ら³⁾はレタスの振動伝達特性を調査し、蓄積疲労という観点からレタスのS-N曲線を導き出した。岩元ら⁴⁾はさらに、求めたレタスのS-N曲線から損傷度を定義し、室内で加振実験を行う際の実験の設計法について検討した。また、岩元ら⁵⁾はイチゴのS-N曲線を作成し、周波数成分の違いによる損傷への影響を考察した。こうした経緯を踏まえて、Lu⁶⁾はトラック輸送時の振動分析結果を解析し、その振動を受けたリンゴの劣化メカニズムに関する研究成果を発表した。北澤ら⁷⁾は、S-N曲線において扱われる、衝撃値と速度変化の組合せと損傷度との関係性を明らかにすべく、繰り返し衝撃による青果物の損傷発生を予測する理論の構築を行った。最先端の研究グループではこうした理論化が確実に進んでいる。他方、現在の各地域が実行可能な範囲での取り組み事例としては高島⁸⁾による容器の性能や物流条件によって導出できる一般的な安全率を地方における実際の物流へあてはめる方法論についての報告がある。馬場⁹⁾は、青果物が商品としての価値を維持するためには各地の農産物のブランド化が必要であり、輸送中の振動による損傷予防だけではなく、用途に応じて製品価値を高めるデザイン性や包装作業の効率性も重要な項目であると述べている。

医薬品は人間の生命に直結する製品であることから、輸送による損傷よりも誤飲防止のための視認性や開封などの操作性が重要視される分野である。例えば、溝口ら¹⁰⁾による、開性評価試験に関する報告は、薬剤師の視点から評価したものであり、調剤業務の作業効率など今後検討せねばならない項目を提示したのもでもある。

家電に関しては、大量生産される製品をある一定の基準で効率よく包装し、輸送することが強く求められる業界であり、喜本¹¹⁾は、大量に使うからこそ包材使用量も環境負荷を考慮せねばならないといった点が今後さらに重視されるようになると述べている。また、製品だけではなく段ボール外表面のこすれ傷のような外装の傷みも消費者からのクレームの対象となりうる分野である。

大型重量物は製品が試験台に積載できないため、そもそも全体を加振実験することができず、梱包設計がより困難となる。田村¹²⁾は製品の各部位の固有振動数を計測し、製品全体の緩衝設計につなげた事例を報告している。

軍事用品の梱包輸送に関しては、米国国防総省による文献¹³⁾が存在する。軍隊組織が武器などを任務地へ安全に輸送するためのレギュレーションであり、用途の性格上、極

めて明確に体系化されたものである。軍事用品以外の包装においても参考となる資料であり、実際に様々な文献で触れられている。

2. 2 陸上輸送

次に、陸上輸送に関連する既往研究についてまとめる。トラックを用いることで、ドアからドアまでの輸送が可能となり、その利便性という点からトラックは現在でも国内輸送の主流である。国毎に地理的条件の違いなどから差異はあるが、国際的に見てもトラック輸送は盛んである。したがって、トラックによる輸送環境に関しては多くの既往研究が存在する。研究対象とされたトラックの種別については、リーフサスペンション、エアサスペンション、小型トラック、中型トラック、大型トラックといった要素で分類可能である。また輸送環境データの解析時に、どの要素について重点的に振動レベルの評価をした研究であるかについては、荷台上の位置の差異、サスペンション種別、車両構造、振動の発生方向、車両の走行速度、積載質量および積込み方法、路面形状、計測機器の設定条件、車種、運転者の違い、という要素を抽出できる。

そこで、本研究の対象である文化財輸送で使用されるトラックや輸送態様を鑑みると、上記分類要素の内、エアサスペンション、小型トラック、中型トラック、荷台上の位置の差異、振動の発生方向、車両の走行速度、路面形状、車種、運転者の違い、の要素への重み付けが大きくなる。これらの要素に関する既往研究を以下にまとめる。

Pierce ら¹⁴⁾は、サスペンションによる差異を調査し、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ることを報告している。Singh ら¹⁵⁾はトラック輸送時において3方向別の振動レベルを比較し、通常、前後方向の振動レベルは垂直方向の振動レベルよりも非常に小さいことを報告している。Hinsch ら¹⁶⁾はトラック荷台上の幾つかの位置において振動レベルを計測し、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報告している。なお、振動の発生源についてはSingh ら¹⁷⁾は、典型的なものとしてサスペンション (1 Hz-4 Hz)、タイヤ (10 Hz-20 Hz)、荷台構造 (40 Hz-55 Hz) に起因するものに区分している。Lu ら¹⁸⁾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実効加速度が増加する現象が見られたことを報告している。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。路面状態の影響に関しては、Lu ら¹⁹⁾による、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。トラックの運転者の違いを評価した斎藤による研究²⁰⁾では、ベテラン運転者と新人運転者の差が特にリーフサスペンション車両で明瞭に現れている。小林²¹⁾は岩元ら⁴⁾が定義した損傷度の指標を、いちごの傷みの発生と振動特性の関係を明らかにした上で荷傷みを低減する車両の開発へ利用した実例を報告している。

文化財輸送に用いられる車両はエアサスペンションが装備された、小型あるいは中型車両に限定され、運転者は専門の技術者である。なお、この車両は美術品輸送専用車両（美専車）と呼ばれる²²⁾。以上のトラック輸送に関する既往研究を踏まえると、美術品輸送専用車両の特性を把握することが必要であり、どの車種でどの路面をどの程度の速度で走行した場合にどのような振動レベルになるのかを調査する必要がある。また、その際に荷台上での振動レベル分布を把握しておくことで文化財の積み込み方法の最適化にもつながると期待される。

2. 3 海上輸送

次に海上輸送時の環境についての既往研究をまとめる。海上輸送環境について古くはFoleyらの報告があり、そこでは、特に海上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予想されるとしている²³⁾。振動については、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、振動する構造も多岐に亘っておりやや複雑である²⁴⁾。この内、定常的振動現象について、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²⁵⁾。

船上で発生する振動計測の調査例として、Singhらはバナナ輸送用冷蔵船の航海中における輸送環境計測を実施している²⁶⁾。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²⁷⁾。安部らは、コンテナ船の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²⁸⁾。宮城は上海およびマレーシアからの2航路において、輸送環境計測結果から、航行中の非常に安定した状況を報告している²⁹⁾。胡らはコンテナ床面に加速度センサーを設置し、貨物が受ける振動の方向別（垂直・左右・前後）の分布を比較している³⁰⁾。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、8.5 Hzと13 Hzの振動が大きく現われることを報告している³¹⁾。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³²⁾。Böröcz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、航海中の振動レベルは低く、また上位の加速度値で見た場合、港でのハンドリング時に最大値が発生していたと報告している³³⁾。

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、コンテナ船による輸送中、輻射熱の影響でコンテナ内は60℃位まで上昇したという報告が存在する³⁴⁾。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であったという報告をしている³⁵⁾。

以上からは、海上輸送に関しては、航海中の振動レベルは非常に安定しており、荒天時など突発事象に遭遇した際でも加速度レベルとしては2G程度に収まる環境であるということが分かる。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。また、航海中に発生する振動の周波数はトラック輸送時に発生するものよりも低周波側に偏っている。そして、既往研究はほぼコンテナ船を対象としたものであることも分かった。

一方、文化財は国内では基本的に美術品輸送専用車両と呼ばれるトラックで輸送されるため、船舶を使用する区間は限定される。さらに船舶を使用する場合であっても、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船と呼ばれる船舶が原則用いられる。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。RO/RO船と陸岸との接続は、RO/RO船の舷外ランプウェイにより行われる³⁶⁾。運航については、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いる³⁷⁾。

こうした背景から、文化財輸送で使われる複数航路でRO/RO船による輸送を行った場合の環境に着目する必要がある、まず既往研究で着目されている航海中の環境についての要素を、RO/RO船輸送時に対して検証せねばならない。

2. 4 航空輸送

日本から海外へ物品を輸送する場合、必然的に船舶か航空機を使用することになる。船舶による海外輸送の場合は、輸送時間が長くなるため、物流の速さという点では航空機による輸送に大きな利点がある。文化財の輸送においても、輸送時間は保存環境の観点からも、また保安性の観点からも短い方が好ましく、現在行われている海外輸送では、ほぼ航空機が使用されている。海外輸送の増加に伴い、航空輸送環境も予め把握してお

かねばならない重要な環境である。

航空機による輸送環境については、金子によると、航空機の飛行中の振動成分は、エンジンによる振動や機体が空気の層を切り裂く際に発生する振動があるために、他の輸送機関よりも高い周波数成分まで含まれているが、振動レベルとしては小さく、衝撃は着陸時が最大で、1.2 G 程度の加速度が発生するとされている。一方で、荷役時のストレスとしては、ドーリーの連結部分がぶつかった際の衝撃、路面の継ぎ目からの衝撃などが大きく、10 G 程度の加速度が発生する場合があると報告している³⁸⁾。この点に関連した幾つかの検証報告が存在し、Saunders は、船舶の航海中と航空機の飛行中の振動レベルは非常に低く、絵画への影響はほとんど無いレベルであるとしているが、空港内での荷役作業においては、3 G から 8 G 程度の衝撃加速度が発生する危険性を指摘している³⁹⁾。また、中嶋は、航空コンテナ内で発生した振動加速度を計測したところ、上下方向で 1 G から 12 G の加速度を検出した。そのため、せっかくエアサスペンションを装備したトラックを使用して空港まで輸送しても、空港内作業で大幅に輸送環境が劣化してしまう可能性が危惧されるとして、脚部に発泡ポリエチレンと防振ゴムを設置した航空用防振パレットを開発してその効果を検証している⁴⁰⁾。Kamba らは筆者と共に文化財の国際輸送時に梱装箱内で発生した振動加速度を計測し、特に空港内のドーリー輸送工程においては、10 G を超える加速度が発生する現象が見られるため注意を要する工程であることを報告している⁴¹⁾。このドーリー輸送工程に関しては、さらに詳細な検証がなされており、高木らは、ダミー貨物を使用して、成田空港内の荷役時をより細かな工程に区分し、さらに作業者の注意レベルを数段階のパターンで分けて作業した上で、各工程において振動加速度を計測した。データ解析によって、ドーリーが路面上の段差を乗り越える際の加速度レベルは運転操作の注意レベルに大きく依存することを検証し、荷扱い注意レベルを適切に管理することで大幅に軽減できるとしている^{42, 43)}。また、Singh らは空港内の荷役作業時の内、特にドーリー輸送時の環境について調査を行い、50 Hz から 80 Hz の範囲に現れる、高いレベルの振動はトラック輸送時や飛行中には現れないものであり、貨物へのダメージを与える程度のレベルであると報告している⁴⁴⁾。

以上から、航空機を用いた輸送環境については、飛行中に発生する振動や衝撃は大きな問題ではないと考えられる。また、一般的に大きい衝撃が生じると思われがちな離着陸時においても、1 G 程度のレベルで収まっていることが分かる。危険性の観点からは、空港内の荷役作業中の環境、特にドーリーによる輸送工程時に路面上の段差を乗り越える際に 10 G あるいはそれ以上の加速度が発生する現象には注意せねばならないことが分かる。

2. 5 緩衝材

緩衝材による衝撃対策については古くから様々な緩衝材について検証されている。例えば、松本は緩衝材としても木毛、段ボールの効果を円筒状ガラス管を梱包した状態で落下試験し、それぞれの特性を鑑みた包装設計の必要性を述べている⁴⁵⁾。福尾らは、防振よりも落下衝撃に対する緩衝が重要だとした上で、緩衝材のばね定数が小さい程緩衝効果は大きい、一方で変形も考慮せねばならないため、ばね定数の選択には注意を要するとしている⁴⁶⁾。森位は木毛、ティッシュペーパー等の応力・ひずみ線図から緩衝特性を調査し、それぞれの最大加速度・静的応力線図を求め、適切な使用法を提案している⁴⁷⁾。森下は緩衝材の選択のポイントとして、復元性、耐水性、使用量を挙げ、ゴム発泡体、ポリウレタン発泡体、木毛、ラバーライズドヘアー（強靱な動植物繊維を螺旋状にカールさせてラテックスで連結固着したもの）の緩衝係数・応力線図を提示している⁴⁸⁾。様々な物質が合成されるようになると、小山は有機気泡体のもつ特性が防振・緩衝材として優れた要素に該当するとして今後の用途拡大の可能性を示唆している⁴⁹⁾。一方で巻口は緩衝材の変遷をまとめた上で、そうしたプラスチック資材の廃棄物問題にも言及している⁵⁰⁾。これについては別の観点から、赤澤らは、ポリエチレンフォーム材を緩衝材としてリサイクル使用した場合の性能への影響を検証している⁵¹⁾。緩衝材の比較に関して清水らは、防振ゴム、コイルばね、空気ばねの防振性能と振動減衰能力の2要素については空気ばねが最も優れているという報告をしている⁵²⁾。緩衝特性については、中嶋らは緩衝材の使用量を必要最小限に抑えるためには緩衝特性を正確に把握することが必要であるとした上で、動的特性（落下衝撃試験による）と静的特性（圧縮試験による）を用いて実際の落下で発生する最大加速度を予測したところ、動的特性の方が高い精度で予測できることを立証している⁵³⁾。これに関連してLiらはポリエチレンフォームについての静的特性および動的特性について論じている⁵⁴⁾。さらに中嶋らは、板厚、総使用量、材料費の観点からの最適緩衝設計手法の提案として、突起物を有する製品への応用として突起物の長さとの関係による検証⁵⁵⁾、段差を有する製品への適用に関する検証⁵⁶⁾、製品の重心位置が緩衝材の形状に及ぼす影響⁵⁷⁾、という観点から報告している。緩衝材の特性把握のためには多くの試験回数を要し、使用資材も膨大になるため、Burgess⁵⁸⁾、Sekら⁵⁹⁾、川原ら⁶⁰⁾の研究に見られるような、実物試験を省略化できるような手法の提案がなされている。近年実施した実物試験の事例として、Wangらによるハニカムペーパーボードへ低レベルの繰返し衝撃を与えた際の振動伝達率への影響の検証が存在する⁶¹⁾。

文化財の梱包に用いられる緩衝材には、天然素材を原材料とする材料、例えば、薄葉紙（商品例「弥勒®」等）や綿が頻繁に用いられる。文化財表面に直接接触、固定して用いられる、特に薄葉紙に代表される資材は、緩衝効果よりも、梱包資材とのこすれによ

る表面の損傷や埃の付着あるいは外気との直接的な接触を予防、緩和する目的で用いられることが多い。繊維が付着する等の危険性があるため、綿は直接文化財表面に接触させることはほとんどなく、薄葉紙で包んだ「綿布団」などの態様で用いられるのが大半である。梱包作業現場で綿の分量を短時間で適度に調節した上で空隙を充填する、あるいは内箱に文化財を固定するという用途に対しては非常に機能的な資材である。綿を緩衝材として用いる場合は文化財を内箱内で、外箱から「浮かした」状態を作り上げる目的が大部分を占める。

また、合成高分子系の緩衝材として、発泡ポリエチレン系緩衝材（商品例「サンテックフォーム®」、「エサフォーム®」、「メフボード®」、「ミラマット®」等）が挙げられる。また、発泡ポリスチレン系緩衝材（商品例「スタイロフォーム®」等）も用いられるが、現場で生じた微調整などの際に微細な塵埃が生じやすい製品もあることに注意を要する。上記発泡ポリエチレン、発泡ポリスチレンは内箱と外箱との間の緩衝材として使用される頻度が最も高く、次に天然素材系で内装梱包した作品を箱へ納める際の底に敷く用途が多い。その他、発泡ポリウレタンはその柔らかさから内装梱包の、作品表面に近い部分でよく使用されている。

こうした緩衝材の性能評価については、例えば JIS で定められた手法⁶²⁾によると、落下衝撃から梱包物をいかに保護するかが重点的に考えられている。もちろん緩衝包装設計では、梱包される製品の共振を回避する必要がある、各種の緩衝材の振動・衝撃特性⁶³⁾を把握した上で設計することになる。そこで緩衝材の振動特性試験⁶⁴⁾が行われるが、試験で想定している入力加速度範囲は文化財の輸送中に発生する加速度範囲よりも大きい。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）と板厚の二つのパラメータにより決まるものとされている⁶⁵⁾が、現状だと入力加速度が非常に小さい場合の緩衝材の固有振動数の挙動（変化など）を調査しておく必要がある。

以上の既往研究をまとめると、緩衝材に用いられる新たな素材が技術発展とともに登場し、その材料についての一定の手法による評価が報告されている。その中でも、落下衝撃から包装物をいかに保護するかにより重点が置かれており、したがって、緩衝材の特性については、最大加速度・静的応力線図を得るための実物を使った試験をいかに省力化でき、かつ再現性の高い手法を構築するかに焦点を当てた研究が比較的盛んである。ただし、包装物の脆弱性は緩衝材を評価する上でも、その評価を包装設計へ適用する上でも事前情報として極めて重要であるが、その取得の困難性も既往研究では共通認識となっている。この点については文化財も全く同様である。

2. 6 文化財

最後に、文化財輸送に関連する既往研究についてまとめる。古くから、輸送環境では振動や衝撃といった環境因子が非常に大きな影響を持ち、それらが損傷の直接的な原因となる危険性が高いことは指摘されている。例えば 1979 年にユネスコが出版したガイドブック⁶⁶⁾には、文化財輸送における注意点が列挙され、梱包箱の設計方法、梱包技術、輸送機関への積み込み方法等、現場で働く学芸員等のための実践的な内容が盛り込まれている。同書では、文化財輸送時の計測ではないものの、鉄道、トラック、船舶、航空機を用いた輸送中に発生する振動と衝撃についてのデータが示され、ハザードとしての具体的な認識が確立していたことが伺える。著者の Stolow はその後「Conservation and Exhibition」⁶⁷⁾を上梓し、梱包輸送を含む展覧会に関する作業における文化財保存の理論を体系化した。同書では振動と衝撃についての章立てがあり、文化財に発生する損傷とそれらの因果関係が明確ではないが、振動や衝撃の蓄積が将来的な損傷に結び付くという推定がなされている。また、振動、衝撃のモニタリング機器については、単発の加速度を検知するのみのショックインジケータ、やや大型ではあるが連続モニタリング可能なショックレコーダーといった初期の計測機器について紹介されている。

文化財を輸送中のハザードからいかに守るのかという視点に基づく研究は、1980 年代に欧州の博物館施設が先駆的に始めており、油彩画の輸送に用いる梱包箱としての適性評価試験に関する論文^{68) 69)}では、冷却試験、加熱試験、耐水試験、落下試験、振動試験を行い、専用の梱包箱を博物館が開発した過程が詳細に記述されている。こうした試験を経て、梱包ケースが備えるべき要件^{70) 71)}が検討された。これらは欧州の博物館にとって主要なコレクションであるキャンバスに描かれた油彩画の輸送に関する研究であり、輸送中の振動や衝撃を受けた木枠およびキャンバスの応答は非常に関心度の高いテーマであった⁷²⁾。同時期に Sitwell⁷³⁾はエアサスペンション仕様のトラックへ加速度データロガーを設置し、方向別の振動レベルの分布傾向を把握し、キャンバスの共振を回避するための絵画を積載する際の向きについて考察している。そうした背景の下、1991 年にロンドンで「Art in Transit」⁷⁴⁾というテーマで会議が開催され、文化財保存科学の専門家が集い、温度、相対湿度、振動、衝撃に対する油彩画の応答に関する研究および適切な梱包設計に関する研究が集中的に議論された。その中で、Michalski⁷⁵⁾は絵画の素材が温湿度変化に伴い変形することで亀裂、しわ、剥落といった損傷へと進行するメカニズムを調査し、変形回数と損傷との関係性を、彩色層の S-N 曲線理論として言及している。Mecklenburg は絵画の各素材の物理的因子を絞り、有限要素法を用いたモデル化を考察している⁷⁶⁾。また、同文献内では複数の大きさの油彩画サンプルを用いた実験を行い、損傷発生に対する振動レベルの閾値を検証している。Green はパステルによる彩色層の脆弱性を述べ、Tate Gallery が経験した 4 枚パステル絵画の輸送における彩色の剥落に

ついて実例を示し、内パネルに描かれた1枚の絵画のみ剥落が発生しなかったのは共振周波数が高く、輸送中に発生していた低い周波数の影響を受けなかったことが原因であると考察している⁷⁷⁾。同会議は以上のように当時の文化財輸送に関する先駆的な研究発表が集中したものであった。緩衝材に関する研究成果の一つとして、その後、梱包箱の設計を支援するソフトウェア PadCAD が CCI (Canadian Conservation Institute) で開発されている⁷⁸⁾。

その後、加速度データロガーが小型軽量化し、輸送時のモニタリングが進むにつれて多くの輸送環境データが輸送工程と紐づけられた形で報告されるようになった。ロンドンのナショナルギャラリーが実施した、船舶、トラック、航空機といった数種の輸送機関を組み合わせた文化財輸送時のモニタリング結果³⁹⁾では、船舶の航海中や航空機の飛行中では加速度レベルが非常に小さく、荷役や空港でのパレタイゼーションでは大きく検出されている。航空機輸送に関しては、飛行中、離陸、着陸のそれぞれの工程において、油彩画の積込み方向による影響が調査された際にも、積込み方向による差異は見られず、むしろ空港内での荷役と滑走路上での輸送環境に注意すべきと結論付けられている⁷⁹⁾。なお Kamba らの調査によって、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⁴¹⁾。Thickett は大英博物館のリニューアル工事中に発生した振動によって損傷したと推察される12の作品をリストアップし、それらの損傷は0.2 G から0.6 G の間で発生したと報告している⁸⁰⁾。この報告は振動レベルと損傷との具体的な因果関係について重要な情報を与えるものであり、また来館者による通常の振動であってもリスクとなりうる危険性があるという点で、展示における防振対策を検討するデータでもある。建築工事による振動の影響については Wei らの報告¹⁾もあり、オリジナルの作品を加振試験して損傷しないレベルで応答を確認した上で防振展示台を設計するという事例の貴重なデータが公表されている。

各種計測機器の進化にともない、新たな切り口による研究報告も行われ、例えば Lasyk らはトラック輸送中の油彩画のキャンバスが振動の影響で変形する様子を梱包箱内にレーザー距離計を設置して、キャンバスの変位を計測するといった微小な現象を正確に捉えて梱包設計に活用するための研究成果を報告した⁸¹⁾。Baschlin らは、現状使用され、広く防振材として適用されている資材や梱包技術を評価するために、トラック輸送時に発生する振動、梱包資材の振動応答特性および油彩画に取り付けられたガラスの影響を計測し、それらの組み合わせによる共振回避の試みを展開している⁸²⁾。同じ研究グループではその後、文化財輸送に用いられるいくつかの既成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。その結果、衝撃吸収に最適な静的荷重を選択すると、振動の減衰が効果的でなくなる場合があり、文化財を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を指摘している⁸³⁾。輸送とは異なるが、Wei らは音楽コンサー

トによる振動が作品へどのように影響するのかをレーザードップラー変位計測法で検証した内容を報告している⁸⁴⁾。こうした微振動であっても長期的に文化財へ作用することによる影響は懸念される点であり、Weiらは展示物に発生（あるいは未発生）した損傷情報を展示物が振動を受けていた期間の情報とともに欧州各地から収集し、それらを用いて S-N 曲線を表現する興味深い試みを行っている⁸⁵⁾。こうした蓄積疲労という観点からは、Chiribogaによる絵画の微細構造について有限要素モデルを作成および、それを用いたシミュレーションによって振動の影響を考察する研究の中でも考慮されている⁸⁶⁾。

引用文献

- 1) 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), International Council of Museums, (2011)
- 2) 中馬 豊, 村田 敏, 他, 冷蔵トラックによるイチゴの長距離輸送試験-とくに振動衝撃と品質劣化について-, 農業機械学会誌, **31** (4), pp.292-297 (1970)
- 3) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 早川 昭, 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第1報)-多段積載時の段ボール箱および内容レタスの振動特性ならびに損傷性-, 農業機械学会誌, **39** (3), pp.343-349 (1977)
- 4) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 早川 昭, 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第2報)-損傷度の定義と輸送シミュレーション時の加速度レベルの設計-, 農業機械学会誌, **40** (1), pp.61-67 (1978)
- 5) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 早川 昭, 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第3報)-損傷に影響する振動衝撃加速度パワースペクトルの評価-, 農業機械学会誌, **42** (3), pp.369-374 (1980)
- 6) Lu Fei, Analysis of Vibration and Shock Characteristics and Apple Damage Mechanism during Truck Transport, Doctoral Thesis, Tsukuba University (2009)
- 7) 北澤 裕明, 佐藤 達雄, 他, 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) -繰り返し衝撃によるイチゴの損傷発生-, 日本包装学会誌, **21** (2), pp.125-132 (2012)
- 8) 高島義英, 北海道の農産物輸送に適した「安全率」設定について (特集 第50回全日本包装技術研究大会優秀発表), 包装技術, **51** (3), pp.228-231 (2013)
- 9) 馬場 紀子, 農産物のブランド化を推進するパッケージ技術, 日本包装学会誌, **27** (1), pp.5-11 (2018)
- 10) 溝口 優, 村田 実希郎, 定本 清美, 錠剤医薬品の個装箱における開封性の検討, 日本包装学会誌, **24** (5), pp.265-277 (2015)
- 11) 喜本 誠, 家電品包装の最近の取り組みについて 2(4)環境対応包装の基準となる包装評価システム, 電機, **667** pp.50-54 (2004)
- 12) 田村祥, 大型重量物製品の包装改善: 各部位の共振周波数確認による緩衝材の適正化とコストダウン (特集 第50回全日本包装技術研究大会優秀発表), 包装技術, **51** (3), pp.208-211 (2013)
- 13) MIL-HDBK-304C Package Cushining Design, U.S. Department of Defense, (1997)
- 14) Pierce Charles D., Singh S. Paul, Burgess Gary, A comparison of leaf-spring with air cushion trailer suspensions in the transport environment, Packaging Technology and Science, **5** (1), pp.11-15 (1992)
- 15) Singh S. Paul, Antle John R., Burgess Gary G., Comparison between lateral, longitudinal, and vertical vibration levels in commercial truck shipments, Packaging Technology and Science, **5** (2),

pp.71-75 (1992)

16) Hinsch RT, Slaughter DC, 他, Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport, Transactions of the ASAE, **36** (4), pp.1039-1042 (1993)

17) Singh Jagjit, Singh S. Paul, Joneson Eric, 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), pp.309-323 (2006)

18) Lu Fei, Ishikawa Yutaka, 他, Effect of vehicle speed on shock and vibration levels in truck transport, Packaging Technology and Science, **23** (2), pp.101-109 (2010)

19) Lu Fei, Ishikawa Yutaka, 他, Effects of Sampling Intervals on Truck Transport Vibration Levels, 農業施設, **41** (3), pp.103-110 (2010)

20) 斎藤勝彦, 衝撃記録計を用いた荷台の簡易振動計測, 日本航海学会誌 NAVIGATION, **161** pp.65-68 (2004)

21) 小林こずえ, 輸送時の荷傷みを低減するトラックの開発--「いちご」の傷みと振動特性の関係 (特集 輸送包装の動向と事例), 包装技術, **48** (4), pp.344-348 (2010)

22) 和田 浩, 美術品輸送専用車両, 日本包装学会誌, **26** (6), pp.382 (2017)

23) 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, pp.35-44 (1972)

24) 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), pp.219-224 (2009)

25) 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, pp.163-171 (2009)

26) Singh S. Paul, Burgess Gary J., 他, Measuring the package shipping environment in refrigerated ocean vessels, Packaging Technology and Science, **6** (4), pp.175-181 (1993)

27) 笹島 洋, 水野 博介, 他, 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** pp.75-79 (1994)

28) 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** pp.26-31 (1996)

29) 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), pp.680-687 (2007)

30) 胡 紅鋼, 中野 公彦, 他, 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), **2011** pp._G180012-180011-_G180012-180014 (2011)

31) 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** pp.70-73 (2012)

32) 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)

- 33) 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), pp.45-60 (2015)
- 34) 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), pp.920-924 (2009)
- 35) Singh S. Paul, Saha K., 他, Measurement and Analysis of Vibration and Temperature Levels in Global Intermodal Container Shipments on Truck, Rail and Ship, *Packaging Technology and Science*, **25** (3), pp.149-160 (2012)
- 36) 鷲尾祐秀, RO/RO 船の種類と特徴 (< 特集> RO/RO 船), *日本造船学会誌*, **797** pp.799-809 (1995)
- 37) 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** pp.822-824 (1995)
- 38) 金子 武弘, 各種輸送方式とその環境条件, 輸送・工業包装の技術, フジ・テクノシステム, pp.571-588 (2002)
- 39) Saunders D., Monitoring Shock and Vibration During the Transportation of Paintings, *National Gallery Technical Bulletin*, **19** pp.64-73 (1998)
- 40) 中嶋 理志, 航空用防振パレットの導入による輸送品質の向上, *季刊輸送展望*, **246** pp.61-66 (1998)
- 41) Kamba Nobuyuki, Wada Hiroshi, 他, Measurement and Analysis of the Global Transport Environment for Packing Cases for Artifacts, *Studies in Conservation*, **53** (sup1), pp.60-63 (2008)
- 42) 高木 雅広, 遠山 一隆, 森松 長照, 空港内オペレーションで発生する振動・衝撃の計測と解析, *日本包装学会第 24 回年次大会研究発表会予稿集*, pp.70-71 (2015)
- 43) 高木 雅広, 文化財の国際輸送時における空港内荷役作業のリスク, *日本包装学会誌*, **26** (6), pp.313-319 (2017)
- 44) Singh Jay, Singh Paul, Saha Koushik, Evaluation of Vibration Profiles for ULD Dollies at Air-Cargo Sorting Hubs, *The Journal of Applied Packaging Research*, **7** (1), pp.15-26 (2015)
- 45) 松本政雄, 緩衝包装, *JIS*, **7** (6), pp.270-275 (1954)
- 46) 福尾信平, 小塚健, 包装の緩衝について, *日本機械学会誌*, **60** (462), pp.712-718 (1957)
- 47) 森位 正直, 緩衝材料について, *生産と技術*, **10** (3), pp.33-34 (1958)
- 48) 森下 基次, 包装貨物の振動衝撃と緩衝方法, *計量管理*, **8** (2), pp.21-23 (1959)
- 49) 小山 清, 防振・緩衝材としての有機気ほう体, *日本ゴム協会誌*, **48** (8), pp.487-493 (1975)
- 50) 巻口 浩, 包装材料, 高分子, **26** (9), pp.643-649 (1977)
- 51) 赤澤 正久, 大竹 望, 工藤 邦男, 気泡緩衝材の性能に及ぼすリサイクルの影響, *日本包装学会誌*, **10** (6), pp.289-295 (2001)
- 52) 清水一弥, 田中宏幸, 精密機器の防振装置 (信頼性, 安全性を高める最近の制振・衝撃吸収材料とその活用例< 特集>)--(活用例編), *工業材料*, **43** (11), pp.p52-56 (1995)

- 53) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 包装用緩衝材の動的及び静的特性評価, 日本包装学会誌, **2** (2), pp.85-95 (1993)
- 54) Li Guang, Rouillard Vincent, Sek Michael A., Evaluation of Static and Dynamic Cushioning Properties of Polyethylene Foam for Determining Its Cushion Curves, Packaging Technology and Science, **28** (1), pp.47-57 (2015)
- 55) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 最適緩衝設計手法の応用 第 1 報: 突起物を有する製品への適応, 日本包装学会誌, **3** (3), pp.141-151 (1994)
- 56) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 最適緩衝設計手法の応用 第 2 報: 段差を有する製品への適応, 日本包装学会誌, **4** (2), pp.104-114 (1995)
- 57) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 貨物落下に対する最適緩衝設計手法の応用 第 3 報: 製品の重心位置が緩衝材の形状に及ぼす影響, 日本包装学会誌, **4** (4), pp.274-286 (1995)
- 58) Burgess Gary, Generation of cushion curves from one shock pulse, Packaging Technology and Science, **7** (4), pp.169-173 (1994)
- 59) Sek Michael A., Minett Merv, 他, A new method for the determination of cushion curves, Packaging Technology and Science, **13** (6), pp.249-255 (2000)
- 60) 川原 拓, 齋藤 勝彦, 瀬戸上 裕, 緩衝包装材の性能評価に関する研究, 日本包装学会誌, **17** (3), pp.179-183 (2008)
- 61) Wang Zhi-Wei, Wang Li-Jun, 他, Influence of Low-Intensity Repeated Impacts on Energy Absorption and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard, Packaging Technology and Science, **29** (11), pp.585-600 (2016)
- 62) JIS, 包装用緩衝材料-評価試験方法, JIS Z 0235 (2002)
- 63) 前沢 英一, 緩衝包装設計技法, 輸送・工業包装の技術, フジ・テクノシステム, pp.545-570 (2002)
- 64) 松田 考司, 材料試験方法, 輸送・工業包装の技術, フジ・テクノシステム, pp.737-756 (2002)
- 65) 長谷川 淳英, 包装設計, 輸送包装の基礎と実務, (齋藤 勝彦, 長谷川 淳英), 幸書房, pp.103-130 (2008)
- 66) Stolow Nathan, Conservation Standards for Works of Art in Transit and on Exhibition, UNESCO, 92-3-101628-8, (1979)
- 67) Stolow Nathan, Conservation and Exhibitions, Butterworth & Co. Ltd., 0-408-01434-2, (1987)
- 68) Green T, Hackney S, The Evaluation of a Packing Case for Paintings, ICOM-CC 7th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.84.12.81-84.12.86 (1984)
- 69) Staniforth S., The Testing of Packing Cases for the Transport of Paintings, ICOM-CC 7th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.84.12.87-84.12.16 (1984)
- 70) Staniforth S., Packing: A Case Study, National Gallery Technical Bulletin, **8** pp.53-62 (1984)
- 71) Stephenson-Wright Ann, White Raymond, Packing: An Updated Design, Reviewed and Tested,

- National Gallery Technical Bulletin, **11** pp.36-41 (1987)
- 72) Green Timothy, Shock and Vibration-Test Results for Framed Paintings on Canvas Supports, ICOM-CC 8th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.585-596 (1987)
- 73) Sitwell Christine Leback, Vibration Test Results on an Air Ride Suspension Vehicle and Design Considerations for a Racking System, ICOM-CC 8th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.601-606 (1987)
- 74) Art in Transit Studies in the Transport of Paintings, (Mecklenburg Marion F.), National Gallery of Art, 0-89468-163-X, (1991)
- 75) Michalski Stefan, Paintings-Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock, and Vibration, Art in transit: Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art, pp.223-248 (1991)
- 76) Mecklenburg Marion F, Tumosa Charles S, An Introduction Into the Mechanical Behavior of Paintings Under Rapid Loading Conditions, Art in transit: Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art, pp.137-171 (1991)
- 77) Green Timothy, Vibration Control: Paintings on Canvas Supports, Art in transit: Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art, pp.59-67 (1991)
- 78) Marcon P.J., Strang T.J.K., Padcad User Manual – Cushion Design Software,
- 79) Saunders D., The Effect of Painting Orientation During Air Transportation, ICOM-CC 14th Triennial Conference Preprints, (Verger I.), International Council of Museums, pp.700-707 (2005)
- 80) Thickett David, Vibration Damage Levels for Museum Objects, ICOM-CC 13th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.90-95 (2002)
- 81) Lasyk Łukasz, Łukomski Michał, 他, Vibration as a Hazard During the Transportation of Canvas Paintings, Studies in Conservation, **53** (sup1), pp.64-68 (2008)
- 82) 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), International Council of Museums, pp.12pp. (2011)
- 83) Lauchli M., Baschlin N., 他, Packing Systems for Paintings: Damping Capacity in Relation to Transport-Induced Shock and Vibration, ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, (Bridgland Janet), International Council of Museums, pp.9pp. (2014)
- 84) 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)
- 85) Wei William, Sauvage Leila, Wolk Jenny, Baseline Limits for Allowable Vibrations for Objects,

ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, (Bridgland Janet), International Council of Museums, pp.7pp. (2014)

86) Chiriboga Arroyo PG, Finite Element Modeling of Vibrations in Canvas Paintings, doctoral Thesis, Technische Universiteit Delft (2013)

第3章 測定原理

本章では第4章、第5章、第6章の実験で共通して用いる計測手順、計測機器の仕様と計測設定および測定した数値を解析する際に扱うグラフなどの形式について説明する。

3. 1 計測機器の仕様

3. 1. 1 加速度データロガー

加速度データロガーは Lansmont 社 (米国) の「SAVER3X90」を用いた (Fig. 3-1-1)。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し、手動あるいは予め設定した時刻に起動させることができる。この機種は輸送環境計測機器としての使用実績も豊富である¹⁻³⁾。仕様は Table 3-1-1 にまとめた。

Table 3-1-1 加速度データロガーの主要諸元

型番	SAVER 3X90
製造元	Lansmont Corporation (USA)
寸法	95 × 74 × 43 mm
重量	473g
加速度センサー	Tri-axial piezoelectric



Fig. 3-1-1 加速度データロガー

3. 1. 2 GPS データロガー

GPS データロガーは、Mobile Action Technology 社 (台湾) の「i-gotU GT-600」を用いた (Fig. 3-1-2)。現在、市場には多数の同種の機器が流通しているが、操作の簡便性から同機を選定した。仕様は Table 3-1-2 にまとめた。

Table 3-1-2 GPS データロガーの主要諸元

型番	i-gotU GT-600
製造元	Mobile Action Technology Inc. (Taiwan)
寸法	46 × 41.5 × 14 mm
重量	37 g
GPS	SiRF Star IV Low Power chipset



Fig. 3-1-2 GPS データロガー

3. 2 計測手順

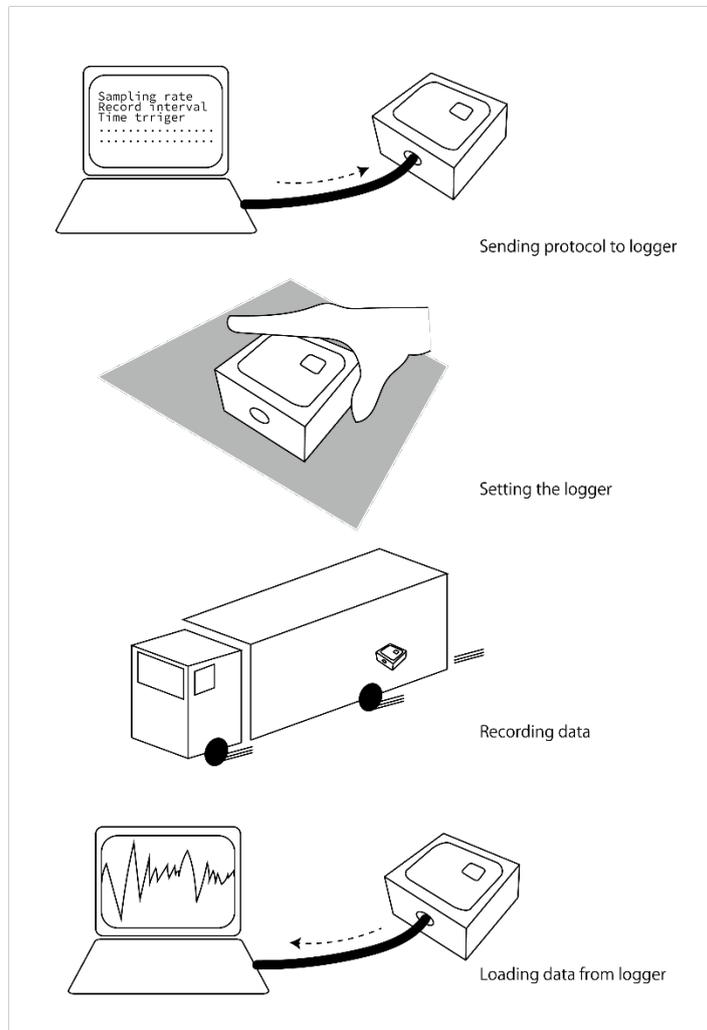


Fig. 3-2-1 計測手順。まず計測設定情報を機器へ送信する。次に機器を計測箇所へ設置し、輸送中に計測する。輸送後に機器からデータを回収した後、解析する。各種センサーは機器内部に内蔵されている。

Fig. 3-2-1 に本論文で用いる計測手順を示した。本節では、計測機器の設定からデータ回収までについて順を追って説明し、データ回収後に行うデータ解析で用いる各種の計算処理やフォーマットについては後節で取り扱う。

3. 2. 1 計測機器の設定

加速度データロガーの設定

文化財輸送の場合、梱包作業に費やす時間や道路交通状況などに不確定要素が多いため、日本の鉄道等の公共交通機関のように、輸送機関の出発時刻と到着時刻を厳密に管理できる場合は多くない。それらはいくまでも予定にすぎないため、輸送環境の計測を実施しようとする場合に、最も注意を要するのは計測する時間帯の設定である。加速度データロガーのメモリ容量にも当然一定の制限があるため、それを有効に消費できる設定を事前に入力しておく必要がある。つまり、なるべく輸送時間全体をカバーできるように、メモリ容量と記録精度のバランスの取れた計測設定を考えねばならない。

加速度データロガーの計測設定で特に重要となるのは、「サンプリング間隔」「計測インターバル」「1 イベントの時間」である。これらについては各章で設定を変えており、Table 3-2-1 にまとめた。

Table 3-2-1 各章における加速度データロガーの設定

設定項目	第4章	第5章・第6章
サンプリング間隔 (ms)	0.2	1.0
計測インターバル (s)	2.0	2.0
1 イベントの時間 (s)	1.6384	1.024
計測可能なイベント数	2,451	18,857
最大計測時間 (h)	1.4	10.5

加速度データロガーは定義された1イベントの時間内に発生した複数の加速度を連続的に記録する。例えば第4章の計測設定であれば、計測インターバルが2.0 s であるため、2.0 s 毎に加速度データロガーが起動した後、1.6384 s の間データを記録し続ける。その1.6384 s が1 イベントに該当する。記憶容量との兼ね合いで、この設定であれば、2,451 個のイベントを記録でき、1.4 時間で記憶容量が最大に到達して計測が停止する (Table 3-2-1)。

サンプリング間隔は加速度データ同士の間隔を意味し、0.2 ms であれば、1 s の間に5,000 個の加速度データをサンプリングすることになる。したがって、サンプリング間隔が小さいほど加速度波形を高精度で取得できる利点があるが、その分メモリ消費量が大きくなってしまい、最大計測時間が短くなる。一般的なパルス幅から考慮すると、通常は1.0 ms で十分とされている⁴⁾が、短距離の輸送など、計測する時間帯が短いと予想できる場合はより大きく設定した。

本論文における計測方針は、加速度値等にトリガーをかけて、ある一定以上の値を示

したデータを収集するのではなく、輸送全体を絶え間なくモニタリングすることにした。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なるためである。このような計測設定はベタ取りと通称されているが、ベタ取りとなっている Table 2-1-1 の設定でも、計測インターバルとの兼ね合いで、第4章の設定では2s毎に約0.36s、第5章および第6章の設定では2s毎に約0.97sの記録されない空白時間帯が生じてしまうことには留意せねばならない。

本論文では基本的に加速度データロガーは指定時刻に計測を開始するタイマー起動方式で計測を行った。

GPSデータロガーの設定

加速度データロガーは加速度の値と発生時刻を記録するのみであり、イベントが発生した場所の特定はできない。そこで、本論文における輸送環境計測ではGPSデータロガーを同時に作動させて、加速度データロガーの位置を記録し、解析時にどの輸送工程で発生したイベントであるのか特定できるようにした。近年はこうした手法が主流となっている⁵⁻⁸⁾。GPSデータロガーの設定は、ほぼサンプリング間隔にのみ注意して行うことになるが、加速度データロガーのサンプリング間隔と同期できるように設定するのが望ましい。ここでは当然、サンプリング間隔はメモリ容量の制限を受けることになる。本論文では基本的にGPSデータロガーは指定時刻に計測を開始するタイマー起動方式で計測を行った。

3. 2. 2 計測機器の設置および計測

計測機器はタイマー起動で計測を開始するため、本節では設置方法について説明する。

輸送機関への設置

美術品輸送専用車両の荷台上へ加速度データロガーを設置する場合は、両面テープを用いて直接荷台床面に貼り付けた。文化財輸送時に計測する場合は、通常は、先に文化財の積み込みを済ませた後に、最後に荷台後方部に生じた空きスペースへ加速度データロガーを固定した (Fig. 2-1-2 a)。荷台前方へ先に固定してしまうと、固定後に積み込まれた梱包箱が接触してしまい、危険であると同時に、梱包箱の干渉で計測対象ではない振動が記録される恐れがあり、それらを回避するためである。GPSデータロガーは衛星との通信を必要とするため、通常は美術品輸送専用車両の場合は荷台ではなく、運転

席付近に設置した (Fig. 2-1-2 b)。船舶輸送の場合は、美術品輸送専用車両は船内の駐車場に留め置かれ、衛星との通信が途絶えるため、添乗者が船室まで移動し、航海中は船室の窓際に設置した (Fig. 2-1-2 c)。



Fig. 2-1-2 計測機器の設置状況

梱包箱への設置

加速度データロガーを梱包箱へ設置する場合は、輸送中に文化財と接触することがないように最大の注意を払う必要がある。したがって、文化財と近接する箇所への設置を避けることが大前提となる。本論文では、できるだけ梱包箱が外部から受ける一次的な振動を計測することに主眼を置いたため、可能な限り梱包箱の底面で最も箱外からの距離が短い近い場所を選び、梱包箱内に敷かれた緩衝材の上への設置は避けた。梱包箱への設置も両面テープで直接、箱の資材に固定した。



Fig. 2-1-3 梱包箱底面に設置した加速度データロガー

3. 2. 3 データの回収

データの回収は、輸送終了直後に筆者が計測機器とPCを接続してデータを回収する場合と、添乗者に計測機器を取り外してもらった後に、それらを宅配便で筆者まで届けてもらい、到着後に筆者がデータ回収する場合の2通りが存在する。文化財輸送の場合は、借用作業等に関与する一次の関係者以外の立ち合いが制限されることもあるため、必然的に後者の方法を多用することとなった。その場合、計測機器を取り外した時刻等については後日、作業を依頼した添乗者に直接取材して不要なデータを除外する必要がある点に注意した。

3. 3 解析方法

本論文で解析に用いる形式やその際に扱う単位について説明する。

3. 3. 1 加速度

本論文で扱う加速度単位 G は重力加速度の単位であり、 $1\text{ G} \doteq 9.8\text{ m/s}^2$ に該当する。地球上で物体が自由落下する際の加速度が 1 G である。Fig. 2-3-1 は加速度データロガーが記録した 1 イベントの波形である。グラフ形式上では連続した波形に見えるが、実際には点でプロットされた加速度データを結んだ折れ線図である。加速度データロガーの設定におけるサンプリングレートは単位時間あたりの加速度データのプロットの密度であるため、サンプリングレートが大きいほど、1 イベント内の加速度データ数は多くなり、こうした波形を精度高く分解できる能力が高くなることを意味する。

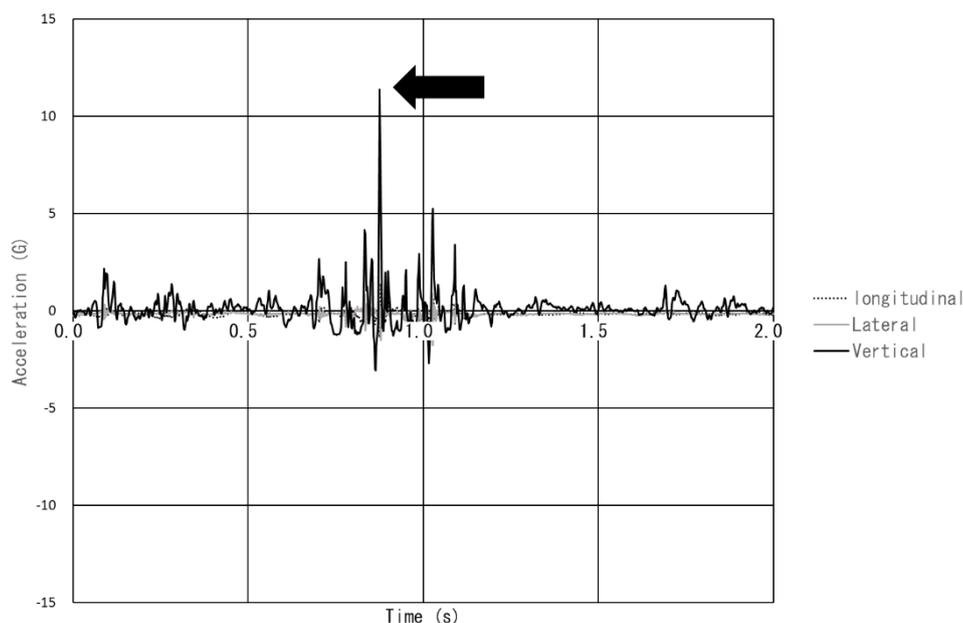


Fig. 2-3-1 1 イベントの加速度波形

3. 3. 2 ピーク加速度

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のことを通常、ピーク加速度と呼んでいる。Fig. 2-3-1 において最大の加速度を示す値がそれに該当する (Fig. 2-3-1 の矢印)。

ピーク加速度は時系列変化のプロットでその変動を評価することが多い。Fig. 2-2-2

にピーク加速度の時系列変化グラフの一例を示す。また、加速度センサーは3軸方向を同時計測できる仕様であるため、方向別のピーク加速度を抽出してプロットし、方向の差異を評価することもある。

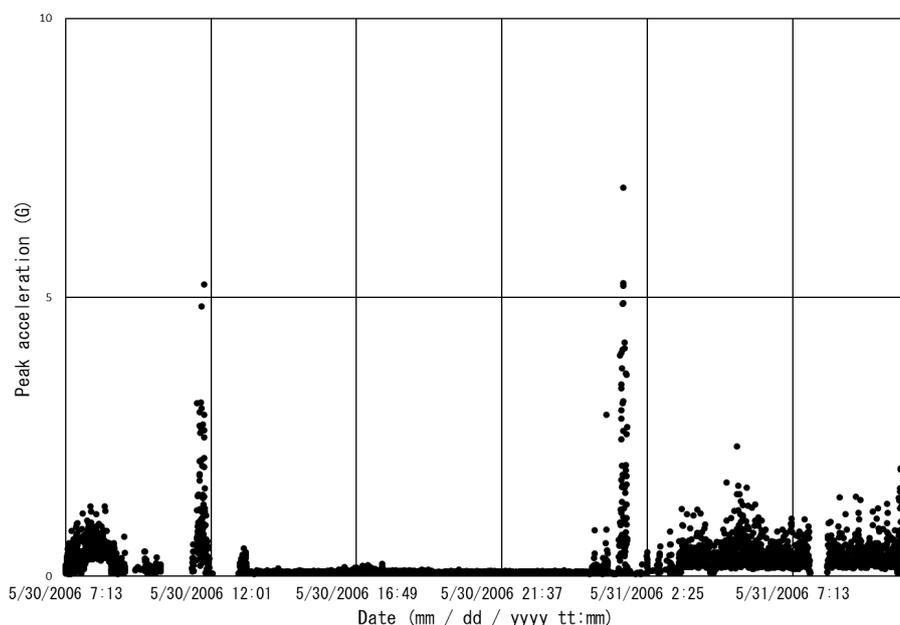


Fig. 2-3-2 輸送中のピーク加速度の時系列分布

3. 3. 3 実効加速度 (Grms)

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、加速度単位のGとroot mean squareの頭文字を取ってGrmsで表記される。加速度データロガーは1イベント内で様々な大きさの加速度を記録する。Grms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。Grms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、GrmsとGとの関係式は次式で表現される。

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

実効加速度についても、加速度と同様にピーク実効加速度を時系列変化に従ってプロットした上で変動を評価することが多いほか、各輸送工程の平均値や最大値を算出することもある。

本論文では実効加速度を以下、Grmsと表記し、本論文のGrmsの単位はGである。

3. 3. 4 パワースペクトル密度 (PSD)

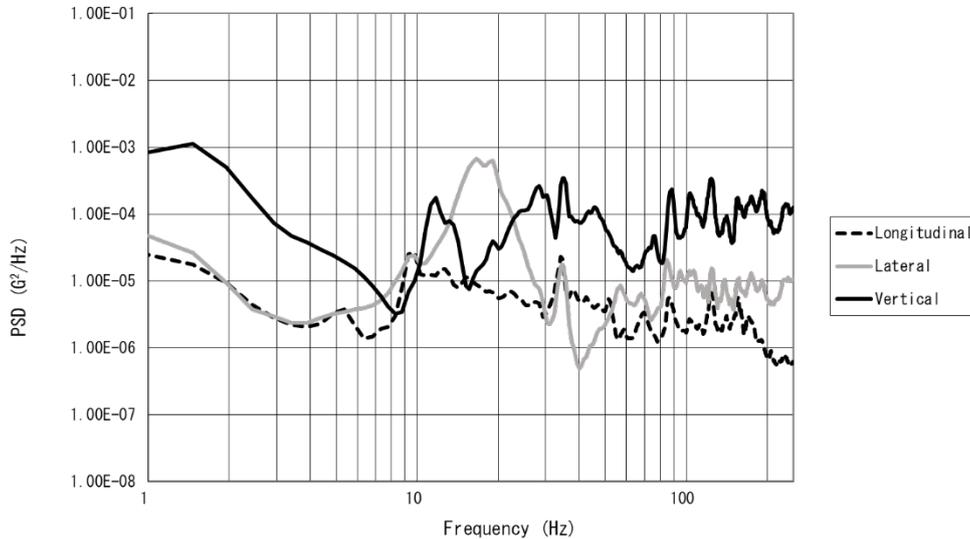


Fig. 2-3-3 パワースペクトル密度

上記の実効加速度値だけでは、どの周波数成分の振動が大きく影響した結果であるのかは分からない。そこで、計測された各イベントの加速度波形 (Fig. 2-3-1) を FFT (Fast Fourier Transform: 高速フーリエ変換) 解析すると、どの周波数成分が相対的に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パワースペクトル密度 (PSD: Power Spectral Density) と呼ばれる (Fig. 2-3-3)。本論文で取り扱うパワースペクトル密度は、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、パワースペクトル密度を積分した値の平方根が実効加速度という関係性である。

本論文ではパワースペクトル密度を以下、PSD と表記する。

引用文献

- 1) Singh S. P., Sandhu A. P. S., 他, Measurement and analysis of truck and rail shipping environment in India, *Packaging Technology and Science*, **20** (6), pp.381-392 (2007)
- 2) 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), pp.439-451 (2008)
- 3) Chonhenchob Vanee, Singh Sher Paul, 他, Measurement and Analysis of Vehicle Vibration for Delivering Packages in Small-Sized and Medium-Sized Trucks and Automobiles, *Packaging Technology and Science*, **25** (1), pp.31-38 (2012)
- 4) 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, pp.75-101 (2008)
- 5) 豊田 實, 黒田 知寛, 輸送環境計測の最近の傾向 (特集 輸送包装), *包装技術*, **43** (8), pp.616-624 (2005)
- 6) 柳原 俊二, 輸送環境の計測・解析・再現試験について, *ジャパンフードサイエンス*, **46** (7), pp.72-77 (2007)
- 7) 渡部大輔, 三明亮介, 百田大輔, 研究論文 R (審査付き論文) メコン地域の陸路輸送における輸送環境の評価に関する研究, *日本物流学会誌= Journal of Japan Logistics Society*, (21), pp.183-190 (2013)
- 8) 渡部 大輔, 松井 一, 他, 地理情報システムを用いた輸送環境調査～インド国内物流を事例として～, *日本包装学会誌*, **24** (6), pp.369-381 (2015)

第4章 文化財の輸送環境調査－陸上輸送時における振動と衝撃

4.1 はじめに

文化財の陸上輸送で最も多く用いられる輸送機関はトラックである。美術品輸送専用車両という専用の特殊車両が用いられることが影響し、実際の文化財輸送における環境データは多くが公開されていない。陸上輸送の全工程を考慮すると、トラックの走行中前後に生じる荷役作業も含まれるため、本章ではまず荷役作業における振動と衝撃の実態を検証する。トラックの走行中の輸送環境に関しては、走行速度および走行路面が振動と衝撃にどのように影響するかを次に検証する。また、使用するトラックの車種や荷台上的積載位置に差異によって振動と衝撃がどのような違いを見せるのかについても検証する。以上の検証から、低速走行から高速走行、一般道路、高速道路といった陸上輸送全体のバリエーションが揃うことになり、本章の最後で陸上輸送全体の輸送環境についてまとめる。

4.2 計測

本章に関する計測は2期に分けて実施したものである。実施日と内容の概略についてはTable 4-2-1にまとめた。これまで筆者が収集したデータは低速走行した際の輸送環境データが不足していた。実際の文化財（壁画）を低速輸送する機会を計測することができ、実験Aはその計測に該当する。実験Aでは、加速度データロガーは車両荷台上（Fig. 4-2-2）と梱包箱底面（Fig. 4-2-3）に両面テープで貼り付けて設置した。Fig. 4-2-4は加速度データロガーの設置位置と梱包箱および輸送対象である文化財（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（ポリエチレンフォーム）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。

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を目的とした。

実験Bは、トラックの走行路面状態と輸送環境との関係を検証するために実施したも

のである。実際の文化財輸送時ではなく、実験のために美術品輸送専用車両を用意して文化財を積載しない状態で実施した。積載物が無いために荷台上をより詳細に計測することができ、実験 B 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. 4-2-7, Fig. 4-2-8)。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。

Table 4-2-1 実験の概要

	実験 A	実験 B
目的	低速輸送時および荷役作業時の輸送環境データの計測	輸送経路の路面による影響を検証
実施日	2016 年 8 月 24 日 2016 年 12 月 7 日	2017 年 12 月 22 日 (4t 車) 2017 年 12 月 23 日 (2t 車)
車両	2t 車	2t 車、4t 車
走行速度	15 km/h	50 km/h 以上 (首都高速道路) 70 km/h 以上 (東名高速道路)
走行距離 (各回)	1.7 km	126 km (片道約 63 km)
経路	奈良県内一般道路 (片道)	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 (往復)
加速度データロガー設置位置	荷台上 1 箇所 梱包箱内 1 箇所	荷台上 9 箇所

なお、次節以降の解析結果と考察の記載については、4. 3. 1 節および 4. 3. 2 節は実験 A から、4. 3. 3 節、4. 3. 4 節、4. 3. 5 節は実験 B から得られた結果についての検証となる。



Fig. 4-2-1 実験 A に用いた美術品輸送専用車両

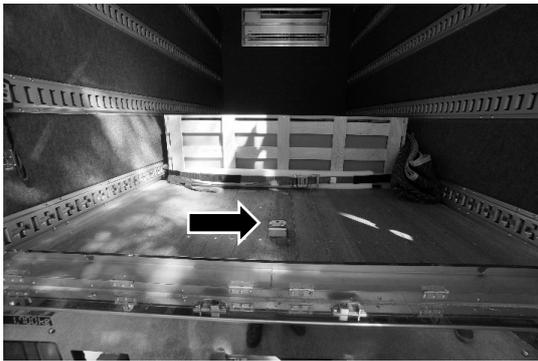


Fig. 4-2-2 荷台上に設置した加速度データロガー (矢印)

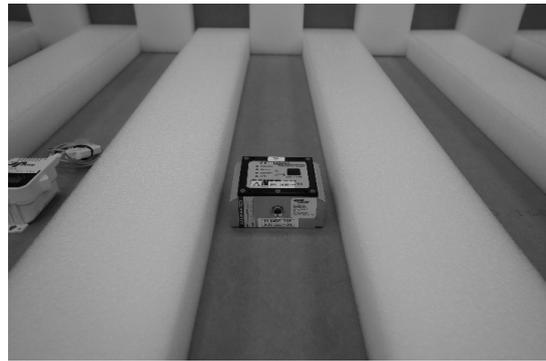


Fig. 4-2-3 梱包箱底部に設置した加速度データロガー

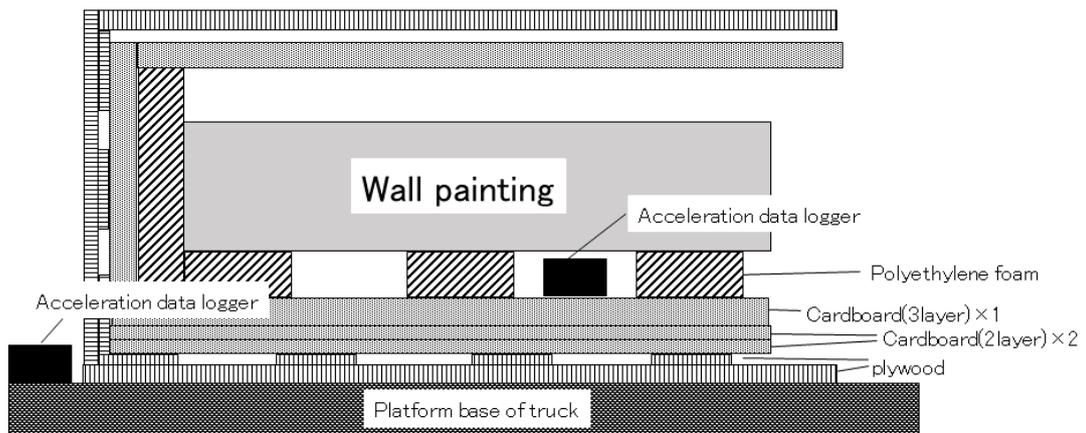


Fig. 4-2-4 梱包の断面図と加速度データロガーの位置



Fig. 4-2-5 実験Bに用いた4t車



Fig. 4-2-6 実験Bに用いた2t車

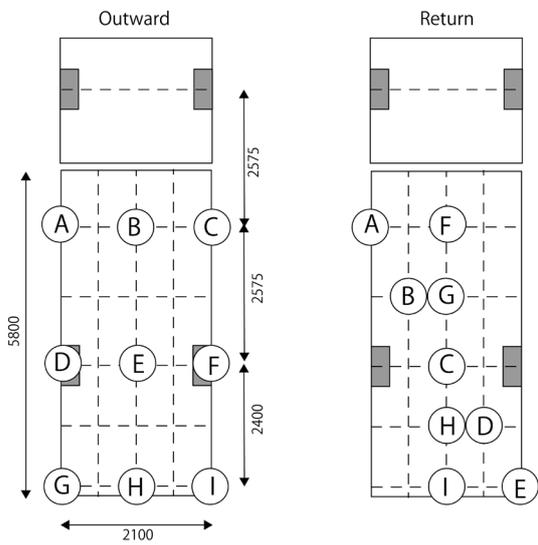


Fig. 4-2-7 荷台上における加速度データロガーの配置 (4t車)

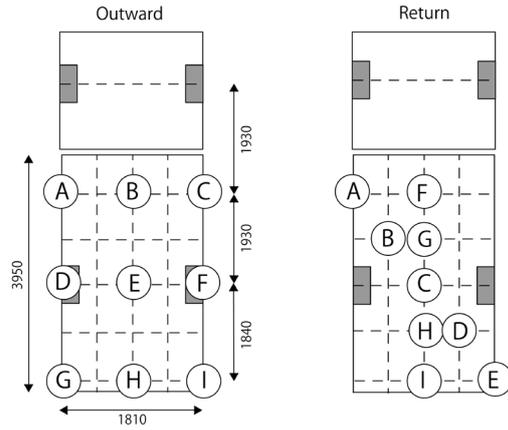


Fig. 4-2-8 荷台上における加速度データロガーの配置 (2t車)

4. 3 解析結果と考察

4. 3. 1 荷役作業時における振動と衝撃

Table 4-3-1 は、実験 A における、各便の荷台上と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（ピーク加速度）の内、全イベントを通した最大の値（ピーク加速度の最大値）を、3 軸方向別に分けてまとめたものである（1: 前後方向、2: 左右方向、3: 垂直方向）。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特定された輸送工程を合わせて記載した。

トラック走行中よりもむしろ荷役作業時における計測値が概ね大きいことが分かる。全便を通した最大値は第 4 便（No. 4）の梱包箱内で発生した 1.67 G でありトラックへの積載時に該当する。これらの発生源となる荷役作業内容を詳細に解析することが重要であると考え、特に、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、詳細に解析した。

Table 4-3-1 実験 A における各輸送便における荷台上と梱包箱内の方向別の加速度最大値

	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

Grms の時系列分布を用いた荷役作業工程の区分

Fig. 4-3-1 は第 4 便の梱包箱内において記録された Grms の時系列分布を車両の走行速度とともにプロットしたものである。Grms は、垂直 (vertical) 方向の値である。Fig. 4-3-1 において実効加速度値の変化が全く見られない時間帯 (11:30 から 13:20 頃の間) 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の温湿度と外気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、車両の走行速度がプロットされた時間帯は走行中を意味する (Fig. 4-3-1 中 R)。これらのシーズニングと走行中以外の時間帯においてもいくつかの時間帯にあるレベルを持った Grms 値が集中して検出されており、Fig. 4-3-1 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 4-3-2 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 Grms の時系列分布 (Fig. 4-3-1) から作業工程を区分し、作業工程の内容を追跡 (Table 4-3-2) 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行った。

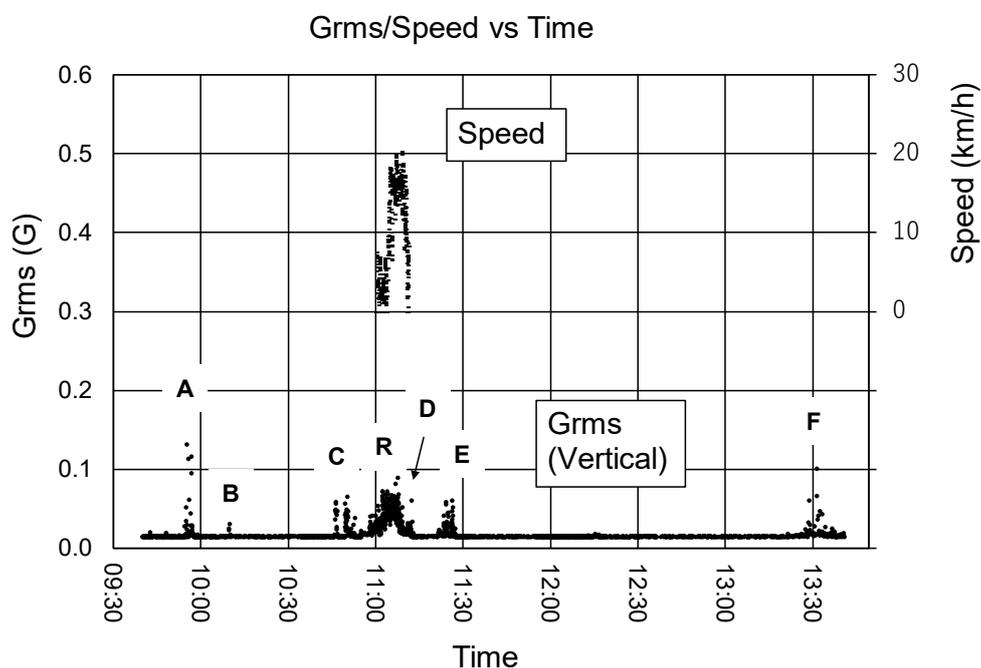


Fig. 4-3-1 Grms (垂直方向) の時系列変化と走行速度

Table 4-3-2 荷役作業区分の時間帯とその内容

工程	作業時間帯	作業内容
A	09:58:20-10:00:08	梱包箱の組立て
B	10:21:12-10:21:28	トラックへ積載するための、梱包箱の方向転換
C	10:50:08-10:53:27	梱包箱を修復工房から搬出口前室までの移動後、トラックへの積み込み
D	11:15:24-11:16:02	到着後、トラックからの梱包箱の荷降ろし
E	11:26:04-11:29:34	梱包箱を展示室へ移動し、床へ設置
F	13:37:18-13:38:28	開梱作業
R	11:00:00-11:11:24	トラック走行中

各荷役作業工程の PSD

Fig. 4-3-2 から Fig. 4-3-7 は各荷役作業工程に対して求めた 3 方向別（前後 (longitudinal)、左右 (lateral)、垂直 (vertical)）の PSD であり、各方向の PSD から算出した平均実効加速度が Table 4-3-3 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。

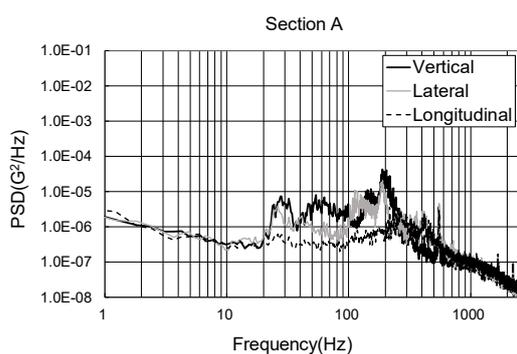


Fig. 4-3-2 工程 A
(梱包箱の組立て) の PSD

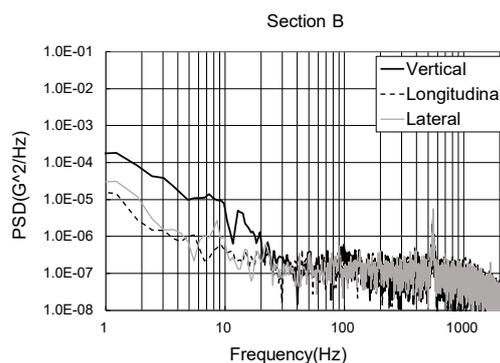


Fig. 4-3-3 工程 B
(梱包箱の方向転換) の PSD

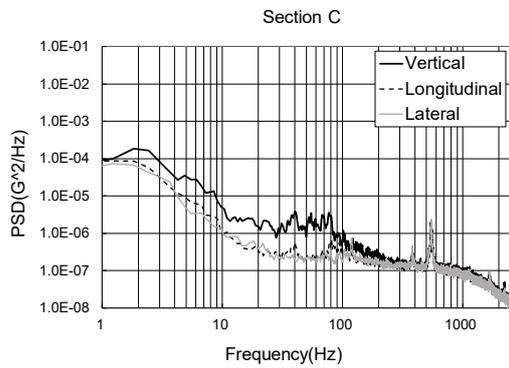


Fig. 4-3-4 工程 C
(トラックへの積み) の PSD

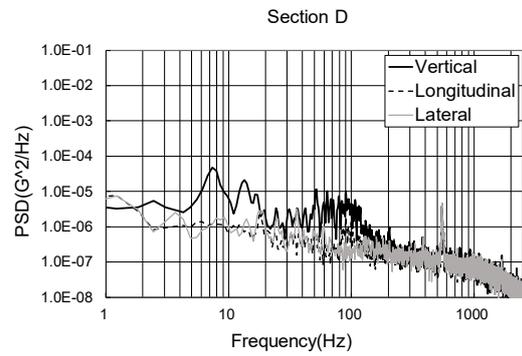


Fig. 4-3-5 工程 D
(トラックからの荷降ろし) の PSD

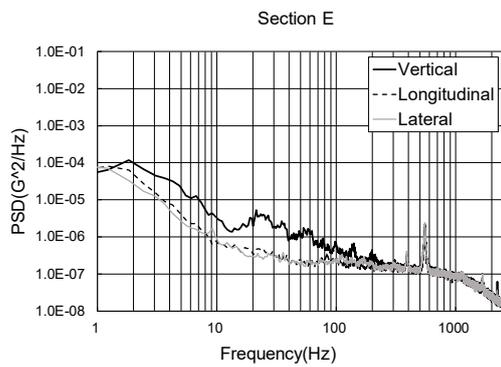


Fig. 4-3-6 工程 E
(展示室への移動) の PSD

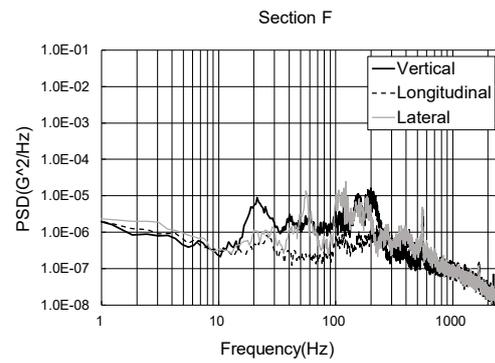


Fig. 4-3-7 工程 F
(開梱作業) の PSD

Table 4-3-3 各工程における方向別の平均 Grms

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

工程 A、工程 F の特性

これらは箱の組立て（工程 A）と開梱作業（工程 F）という組み合わせである。10 Hz 以下の領域は小さく、20 から 200 Hz 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。100-200 Hz には例えば、ドリルのびびり振動¹⁾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。

工程 B、工程 C、工程 D、工程 E の特性

これらは作業員が梱包箱を手で持ち上げた後に歩行する、美専車への積込み（工程 C）と美専車からの荷降ろし（工程 D）など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 20 Hz 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、荷役作業時において検出されたデータ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 Grms 値は後述する走行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走行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走行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、荷役作業時においては、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²⁾。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。

4. 3. 2 走行中における振動と衝撃－走行速度との関係

低速走行時と通常走行時における Grms の時系列分布の比較

次に、荷台に設置した加速度データロガーの記録から、低速走行時に荷台上で発生した加速度についての解析を行った。Fig. 4-3-8 は低速走行時 (Sec. R) に検出された Grms (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、通常走行時とを比較する必要があるため、計測機器の設置位置と設定をほぼ同条件に合わせ、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 4-3-4)。この内、Ref. 6 の一般道路走行時 (Fig. 4-3-9) と Ref. 2 の高速道路走行時 (Fig. 4-3-10) については、低速走行時のデータ同様に Grms (垂直方向) と走行速度の時系列分布を示す。これらの Grms の時系列分布と比較すると、低速走行時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。さらに、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、PSD を用いた評価を行うこととした。

Table 4-3-4 比較対象とした輸送データのリスト。各輸送には美術品輸送専用車両が用いられている。なお、得られたデータ数が十分ではなかったため、Ref.1 の高速道路走行時データと Ref.5 の一般道路走行時データは比較対象から除外した。

ID	経路		輸送日	高速道路 走行データ	一般道路 走行データ
	発地	着地			
Ref.1	東京	東京	2016/12/21	—	●
Ref.2	東京	京都	2017/3/8	●	●
Ref.3	京都	鳥取	2017/3/9	●	●
Ref.4	東京	京都	2017/6/29	●	●
Ref.5	京都	長崎	2017/6/30	●	—
Ref.6	東京	千葉	2017/6/29	●	●

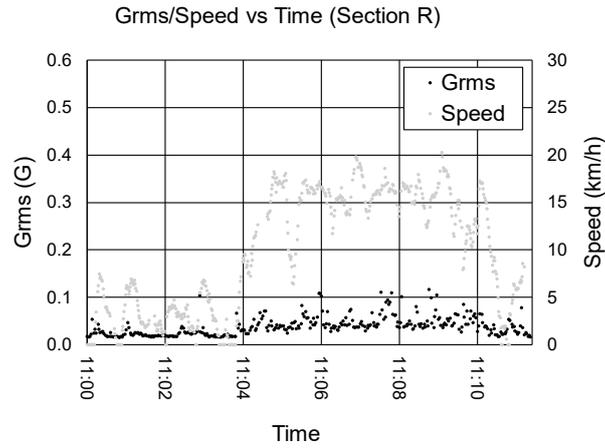


Fig. 4-3-8 低速走行時 (Sec.R) における Grms (垂直方向) と走行速度の時間変化

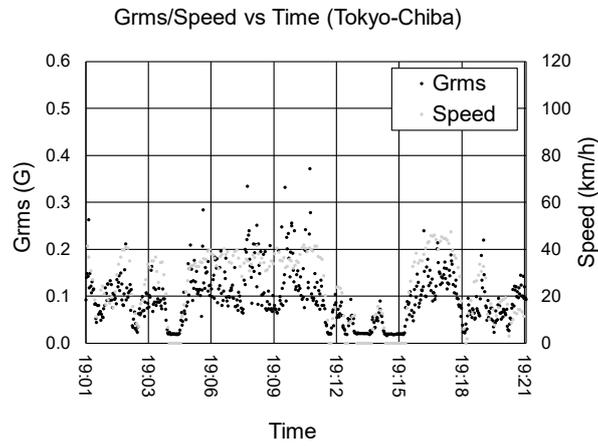


Fig. 4-3-9 Ref.6 における Grms (垂直方向) と走行速度の時間変化

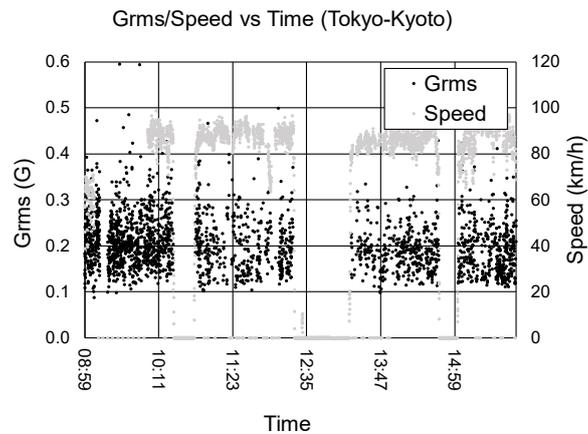


Fig. 4-3-10 Ref.2 における Grms (垂直方向) と走行速度の時間変化

低速走行時と通常走行時における PSD の比較

Fig. 4-3-11 から Fig. 4-3-16 は低速走行時に発生した方向別の振動に対する PSD と Table 3-3-4 にリストアップした通常走行時において、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。低速走行時の PSD は実線で、その他の通常走行時の PSD は薄いグレーで表示した。また、Table 4-3-5 は PSD から算出した各輸送における方向別の平均 Grms をまとめたものである。

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³⁾、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、低速走行時の PSD では 500 Hz 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、低速走行時、通常走行時（一般道路および高速道路）の PSD に共通する 1-3 Hz 領域はほぼ差異が無く、4 Hz 以上の領域で低速走行時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、低速走行時のデータが際立って低いレベルを示したものではない。左右方向に関しては、基本的には低速走行時の PSD は前後方向と同様の減衰傾向を示している。特に通常走行時では際立っている 20 Hz 付近のピークが低速走行時では大きく減衰し、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。低速走行時の 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 Hz - 200 Hz 付近までの領域において、大きく減衰している。

Table 4-3-5 から今回計測したデータ内で相対比較すると、低速走行時の Grms 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 20 Hz 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、低速走行時には共に最大で 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⁴⁾。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 Grms 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 が増加する現象が報告されている⁵⁾。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。実験 A における低速走行中 mトラックは約 15 km/h で走行しており、他の PSD と比較した際に Grms 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。

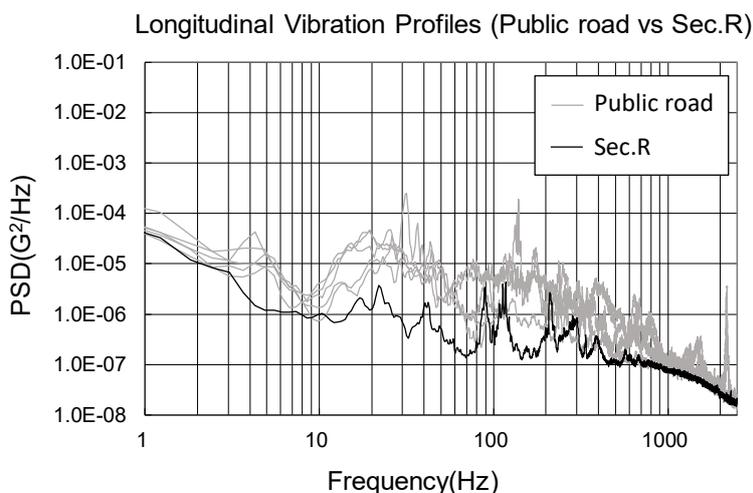


Fig. 4-3-11 低速走行時 (Sec.R) と一般道路走行時 (Ref. 1,2,3,4,6) に計測された前後方向の PSD の比較。

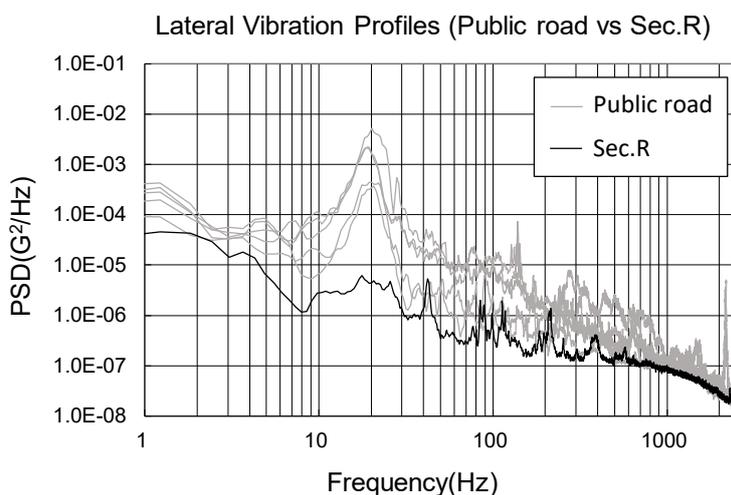


Fig. 4-3-12 低速走行時 (Sec.R) と一般道路走行時 (Ref. 1,2,3,4,6) に計測された左右方向の PSD の比較。

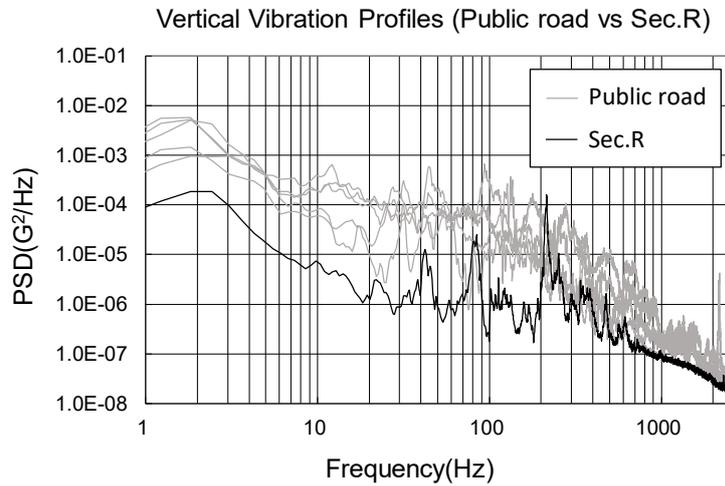


Fig. 4-3-13 低速走行時 (Sec.R) と一般道路走行時 (Ref. 1,2,3,4,6) に計測された垂直方向の PSD の比較。

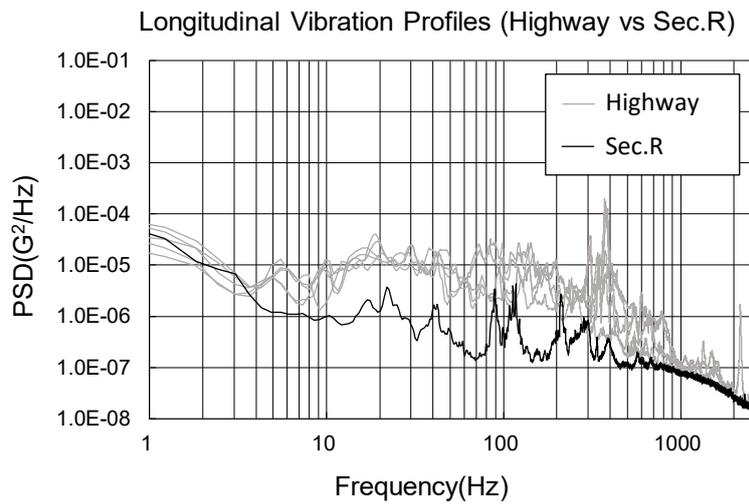


Fig. 4-3-14 低速走行時 (Sec.R) と高速道路走行時 (Ref. 2,3,4,5,6) に計測された前後方向の PSD の比較。

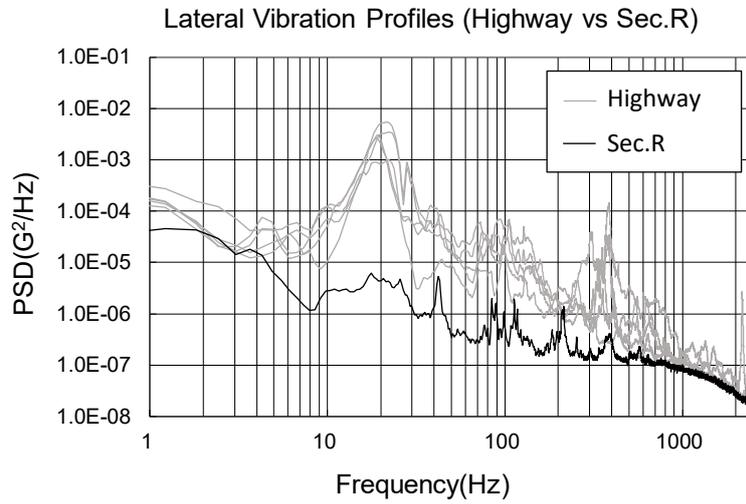


Fig. 4-3-15 低速走行時 (Sec.R) と高速道路走行時 (Ref. 2,3,4,5,6) に計測された左右方向の PSD の比較。

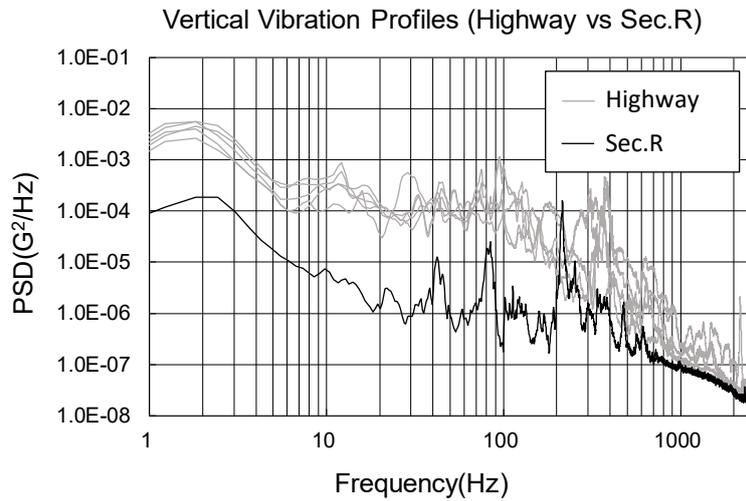


Fig. 4-3-16 低速走行時 (Sec.R) と高速道路走行時 (Ref. 2,3,4,5,6) に計測された垂直方向の PSD の比較。

Table 4-3-5 低速輸送時 (Sec. R)、一般道路走行時、高速道路走行時の各 PSD より算出した方向別の平均 Grms

	Longitudinal	Lateral	Vertical
Sec.R	0.020	0.022	0.048
Ref.1(public road)	0.040	0.056	0.100
Ref.2(public road)	0.052	0.123	0.175
Ref.3(public road)	0.049	0.119	0.173
Ref.4(public road)	0.059	0.183	0.189
Ref.6(public road)	0.030	0.066	0.107
Ref.2(high way)	0.078	0.152	0.213
Ref.3(high way)	0.081	0.134	0.229
Ref.4(high way)	0.048	0.173	0.202
Ref.5(high way)	0.050	0.214	0.232
Ref.6(high way)	0.037	0.098	0.164

4. 3. 3 走行中における振動と衝撃－走行路面との関係

解析対象区間の抽出

本節からは実験 B による検証結果を取扱う。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。走行路面の影響を検証するために、凹凸が激しい箇所として、首都高橋梁部の伸縮継手 (Fig. 4-3-17) に着目した。その上で、上記の速度条件を満たし、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 以上での安定走行区間については「通常路面 (Normal expwy)」、首都高速道路の 50 km/h 以上での橋梁部伸縮継手の高密度区間については、「継手路面 (Joint frequent section)」と表記する。



Fig. 4-3-17 首都高速道路橋梁部に見られる伸縮継手

ここで、本節で路面凹凸の顕著な一例として着目した伸縮継手についての既往研究の内容を辿っておく。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通過時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⁶⁾。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⁷⁾。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1mから3m離れた地点で20mmから40mm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⁸⁾。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する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⁹⁾。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ケースが多く、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¹⁰⁾。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エアサスペンション車両は0.4G程度であるのに対し、リーフサスペンション車両では約1Gの加速度の計測値が報告されている¹¹⁾。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¹²⁾。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¹³⁾。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¹⁴⁾。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¹⁵⁾。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¹⁶⁾。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。

Grms から見た走行路面の影響について

上記抽出条件に従った、通常路面および継手路面における、測定位置毎の方向別の Grms を算出した。Table 4-3-6 は 2t 車の各位置で計測された Grms 値とその相対的なレベルをグラフ化したものである。3 方向全ての Grms 値は、継手路面が通常路面を上回り、この傾向は往路、復路ともに共通している。垂直方向の Grms 値は通常路面、継手路面の双方において他の方向よりも大きく出ており、特に復路の測定位置 D で 0.658 G と極めて大きい値が検出され、これは同位置の通常路面での約 2 倍に該当する。全計測位置の垂直方向 Grms の平均値で比較した場合、継手路面は通常路面と比べて往路で約 1 割、復路で約 3 割程度高く検出された。首都高橋梁部の伸縮継手の荷台上への振動に対する影響は確実に存在すると考えられる。

Table 4-3-6 2t 車の荷台上で計測された Grms 値と相対的レベルを示したグラフ。“Normal expwy”が東名高速道路を速度 70 km/h 以上で安定走行した区間（通常路面）を、“Joint frequent section”が首都高速道路を 50km/h 以上で走行した橋梁部伸縮継手の高密度区間（継手路面）を示す。“Logger position”の詳細は Fig. 4-2-8 に示した通り。

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
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		

ピーク加速度の時系列変化から見た走行路面の影響について

Table 4-3-6によると、2t車については、往路で測定位置 G、復路で測定位置 D が最大の Grms を示した計測点となる。これら、往路の測定位置 G、復路の測定位置 D で計測されたピーク加速度を時系列にプロットしたものが Fig. 4-3-18 と Fig. 4-3-19 である。各図の上部に付記した番号 (1) から (8) は、往路についての (1) 一般道路、(2) 首都高速道路の継手路面、(3) その他の首都高速道路、(4) 東名高速道路、の区間と、復路についての (5) 東名高速道路、(6) その他の首都高速道路、(7) 首都高速道路の継手路面、(8) 一般道路、を示したものである。したがって、継手路面を意味する区間 (2) (Fig. 4-3-18) と区間 (7) (Fig. 4-3-19) が着目すべき区間となるが、ピーク加速度としての最大値がそれらの区間に存在するわけではないことが分かる。単発の衝撃加速度としては、基本的に高速走行時の方が発生確率としては上がるといふことと、高速走行時の走行時間が圧倒的に長いために結果的に大きな加速度も多発したといふ現象として考察している。

しかし、継手路面には高い加速度が密集していることも明かな現象として表れている。この傾向は特に復路において顕著であり、復路の区間 (3) (Fig. 4-3-19) は 2 G 付近に加速度が集中して検出されている (Fig. 4-3-19 中の点線円枠部分)。このような傾向が、平均的に継手路面全体の加速度レベルを上げている要因と考えられる。したがって、ピーク加速度の時系列変化から見た場合においても、走行路面の影響の存在は確認できる。

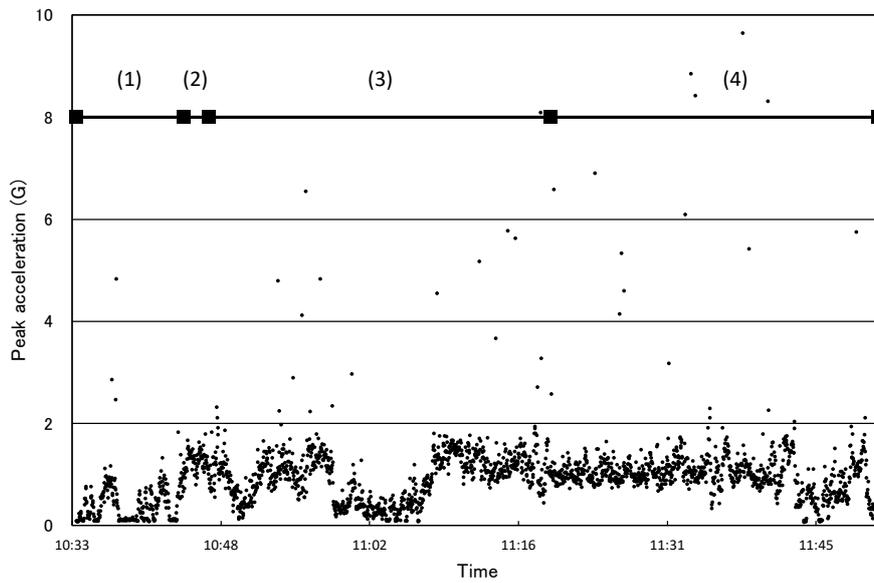


Fig. 4-3-18 2t車の測定位置G（往路）におけるピーク加速度の時系列変化。図中の番号は、（1）一般道路、（2）首都高速道路の継手路面、（3）その他の首都高速道路、（4）東名高速道路、の区間を示す。

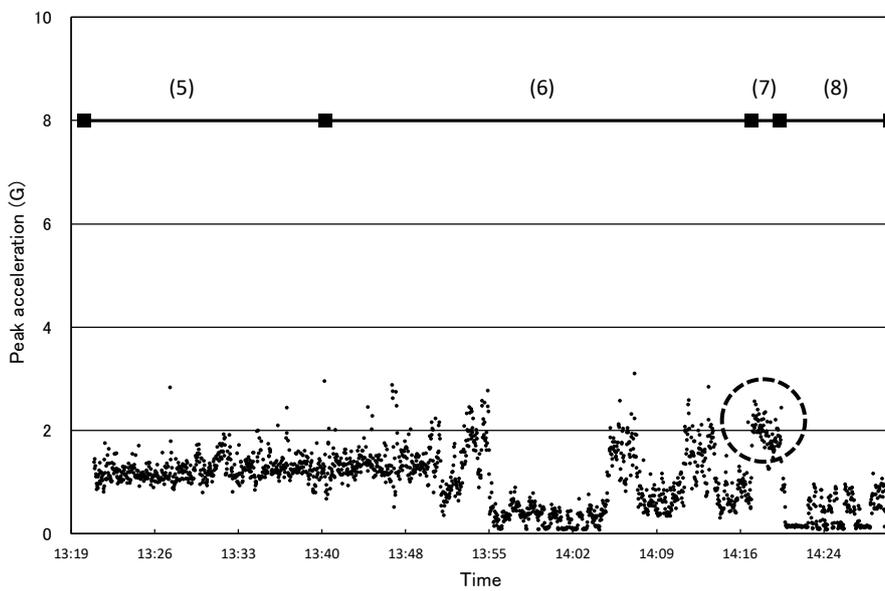


Fig. 4-3-19 2t車の測定位置D（復路）におけるピーク加速度の時系列変化。図中の番号は、（5）東名高速道路、（6）その他の首都高速道路、（7）首都高速道路の継手路面、（8）一般道路、を示す。

PSD から見た継手走行時の特徴について

2t 車の垂直方向の振動に関して、往路において最大の Grms を示した測定位置 G の通常路面および継手路面、最小の Grms を示した測定位置 F の通常路面および継手路面の PSD を作成した。復路においては、最大の Grms を示した測定位置 D の通常路面および継手路面、最小の Grms を示した測定位置 A の通常路面および継手路面の PSD を作成した。以上 8 つの PSD は、Fig. 4-3-20 にまとめた。

継手路面では 2 Hz から 4 Hz において増加する傾向が認められ、Fig. 4-3-20 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、復路の継手路面 (6) では、通常路面 (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 2t 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。

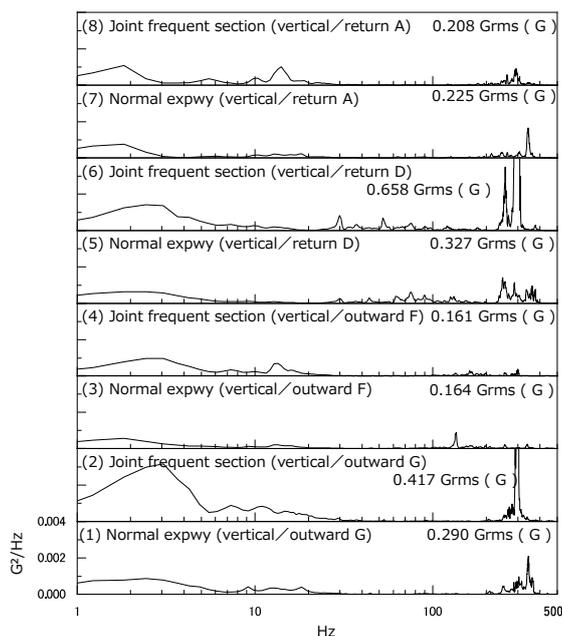


Fig. 4-3-20 2t 車の垂直方向の PSD。(1) 往路・通常路面・計測位置 G、(2) 往路・継手路面・計測位置 G、(3) 往路・通常路面・計測位置 F、(4) 往路・継手路面・計測位置 F、(5) 復路・通常路面・計測位置 D、(6) 復路・継手路面・計測位置 D、(7) 復路・通常路面・計測位置 A、(8) 復路・継手路面・計測位置 A、を示す。

4. 3. 4 その他の考慮すべき因子－車種による差異

4t 車でも 2t 車と同一経路を同様に走行した際の計測結果を得ており、Table 4-3-7 は Table 4-3-6 と同様に、4t 車の各位置で計測された Grms 値とその相対的なレベルをグラフ化したものである。まず、全体的な Grms 値が 2t 車のそれと比較すると非常に低いことが分かる。また、通常路面と継手路面との差については、各方向の平均 Grms で見ると大きな差が存在せず、逆に通常路面の方が継手路面を上回る場合も存在することが分かる。

Table 4-3-7 4t 車の荷台上で計測された Grms 値と相対的レベルを示したグラフ。各項目については、Table 4-3-6 と同様。

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	

ピーク加速度についても、最大の Grms を示した、往路の測定位置 E、復路の測定位置 H について、各測定位置におけるピーク加速度を時系列にプロットしたものが Fig. 4-3-21 と Fig. 4-3-22 である。復路 (Fig. 4-3-22) において若干ではあるが、区間 (7) で 2G をやや下回る付近に加速度が集中して検出される傾向が見受けられる (Fig. 4-3-22 中の点線円枠部分)。全体的なピーク加速度としては、4t 車では低レベルに収まっていた。

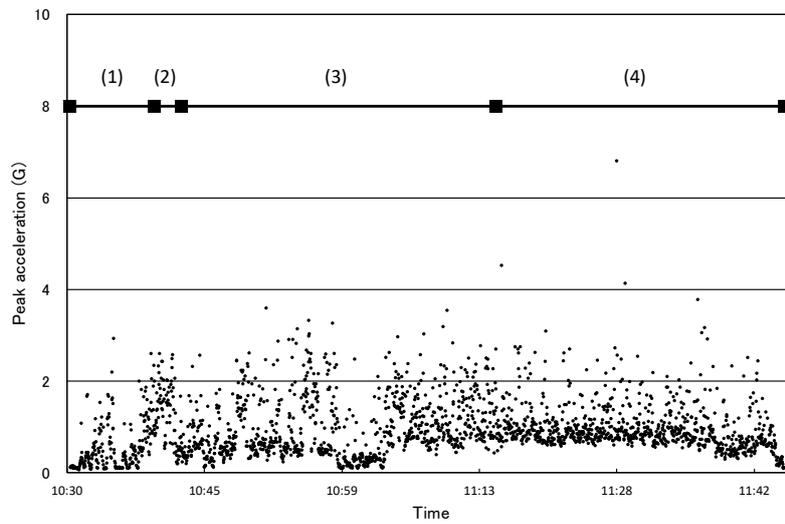


Fig. 4-3-21 4t 車の測定位置 E (往路) におけるピーク加速度の時系列変化。図中の番号は、(1) 一般道路、(2) 首都高速道路の継手路面、(3) その他の首都高速道路、(4) 東名高速道路、の区間を示す。

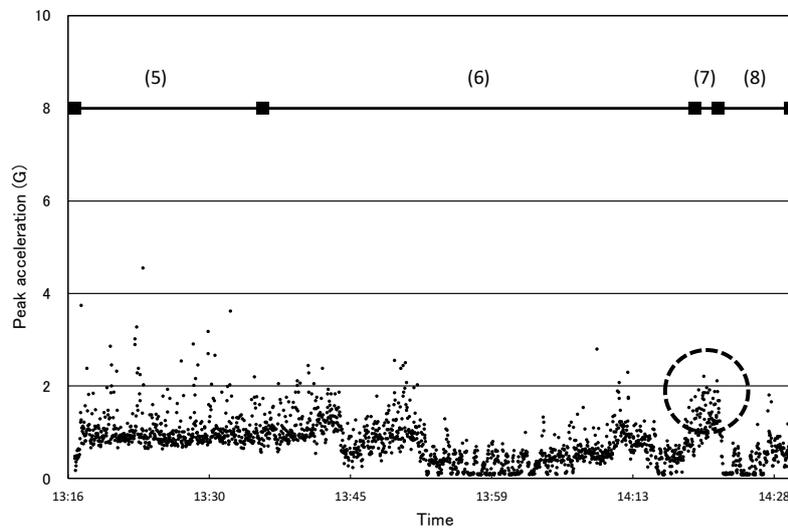


Fig. 4-3-22 4t 車の測定位置 H (復路) におけるピーク加速度の時系列変化。図中の番号は、(5) 東名高速道路、(6) その他の首都高速道路、(7) 首都高速道路の継手路面、(8) 一般道路、を示す。

次に、PSDについても車種による差異がどの周波数に現れるのかを検証した。2t車での検証と同様に、往路において Grms の最大を示した計測位置 E、最小を示した計測位置 C、および復路において Grms の最大を示した計測位置 H、最小を示した計測位置 A のそれぞれについて、通常路面および継手路面の PSD を作成した (Fig. 4-3-23)。いずれも垂直方向成分についてのものである。同一の計測位置においては、概ね継手路面と通常路面の傾向は一致していると考えられ、継手路面 (偶数番号) では 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¹⁷⁾、その傾向は荷台上の Grms が大きい計測位置ほど顕著である。また、(1)、(2)、(5)、(6) といった Grms が最大であった計測位置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、復路の継手路面(6)では、通常路面(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 付近の周波数は先述した 2t 車 (Fig. 4-3-20) では見られず、4t 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られる。

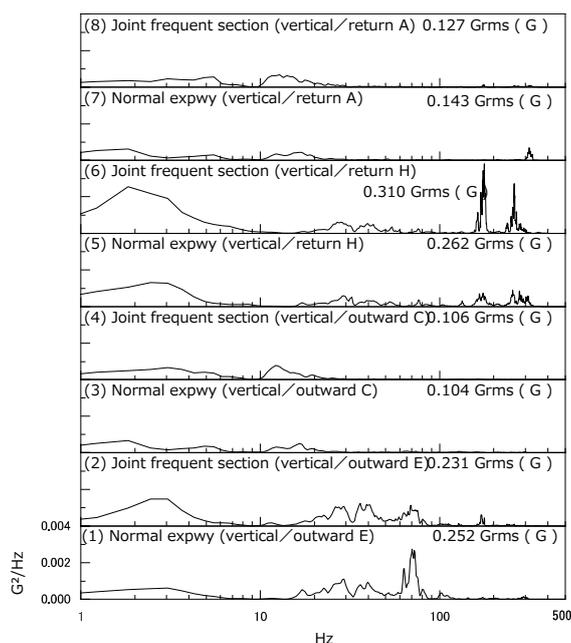


Fig. 4-3-23 4t 車の垂直方向の PSD。(1) 往路・通常路面・計測位置 E、(2) 往路・継手路面・計測位置 E、(3) 往路・通常路面・計測位置 C、(4) 往路・継手路面・計測位置 C、(5) 復路・通常路面・計測位置 H、(6) 復路・継手路面・計測位置 H、(7) 復路・通常路面・計測位置 A、(8) 復路・継手路面・計測位置 A、を示す。

4. 3. 5 その他の考慮すべき因子－荷台上の位置による差異

荷台上の位置による差異は、積載位置の最適化にもつながる因子である。過去に、Hinsch ら¹⁸⁾はトラック荷台上の幾つかの位置において振動レベルを計測し、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報告している。Sitwell¹⁹⁾も文化財の輸送に用いる予定であるエアサスペンション仕様のトラックへ加速度データロガーを設置し、荷台位置の差異による影響を検証しており、同様に荷台後部のレベルがやや高いことを報告している。

そこで、各測定点の、通常路面と継手路面における Grms (Table 4-3-1) 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。それらを Fig. 4-3-24 と Fig. 4-3-25 に示す。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。4t 車荷台上での Grms の分布 (Fig. 4-3-24) についてみた場合、垂直方向については、往路も復路も通常路面と継手路面の分布には共通した傾向が見られた。その傾向とは、後輪車軸上のほぼ左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くというものである。この傾向から、前軸と後軸との中間地点、すなわちホイールベースの中央箇所が振動レベルとして比較的安定した環境になっているものと考えられる。

左右方向についても、往路と復路ともに通常路面と継手路面の分布傾向は同様であるが、継手路面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かった。分布傾向としては、荷台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。荷台後方がより左右に揺れやすい環境になっているものと考えられる。

以上のような Grms 値の分布傾向が見られ、継手路面にはその値がある特定位置のみ上昇するのではなく、分布傾向を維持したまま、荷台全体的に振動レベルが上がる現象を示した。

一方、2t 車の Grms 分布を見ると、垂直方向の分布傾向としては、往路も復路も継手路面で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、復路の方が継手路面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従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。

以上のような Grms 値の傾向が見られ、継手路面の影響としては、2t 車では 4t 車のように全体的に振動レベルが上昇しつつも、荷台後方の上昇度合いが特に顕著であるという点に特徴が見られた。ただし、振動レベルの分布傾向としては、4t 車の方が、往路復路ともに明確であった。いずれの車種においても、荷台上の振動レベルは全体として均一ではないことを示す結果であった。

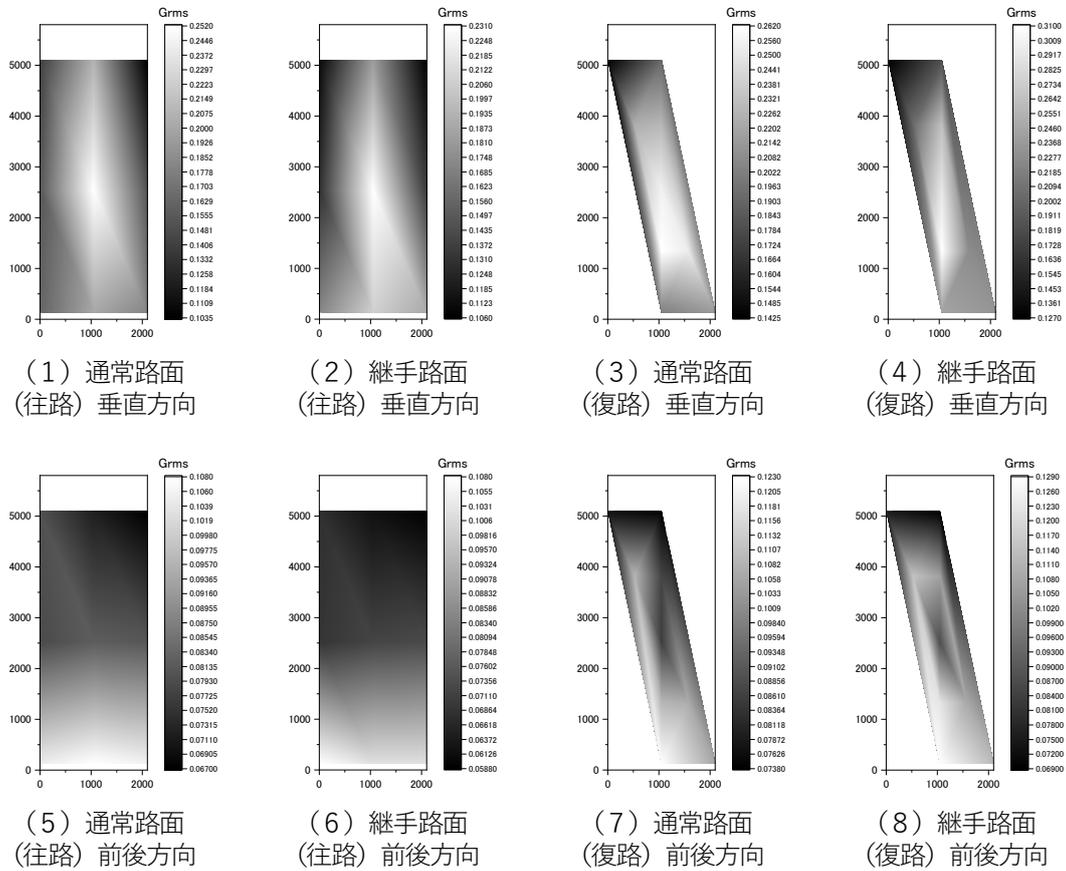


Fig. 4-3-24 荷台上における Grms の分布 (4t 車)。なお、分布を強調するために(1)から(8)それぞれにおいてグレートーンレベルの最大値・最小値を変えている。

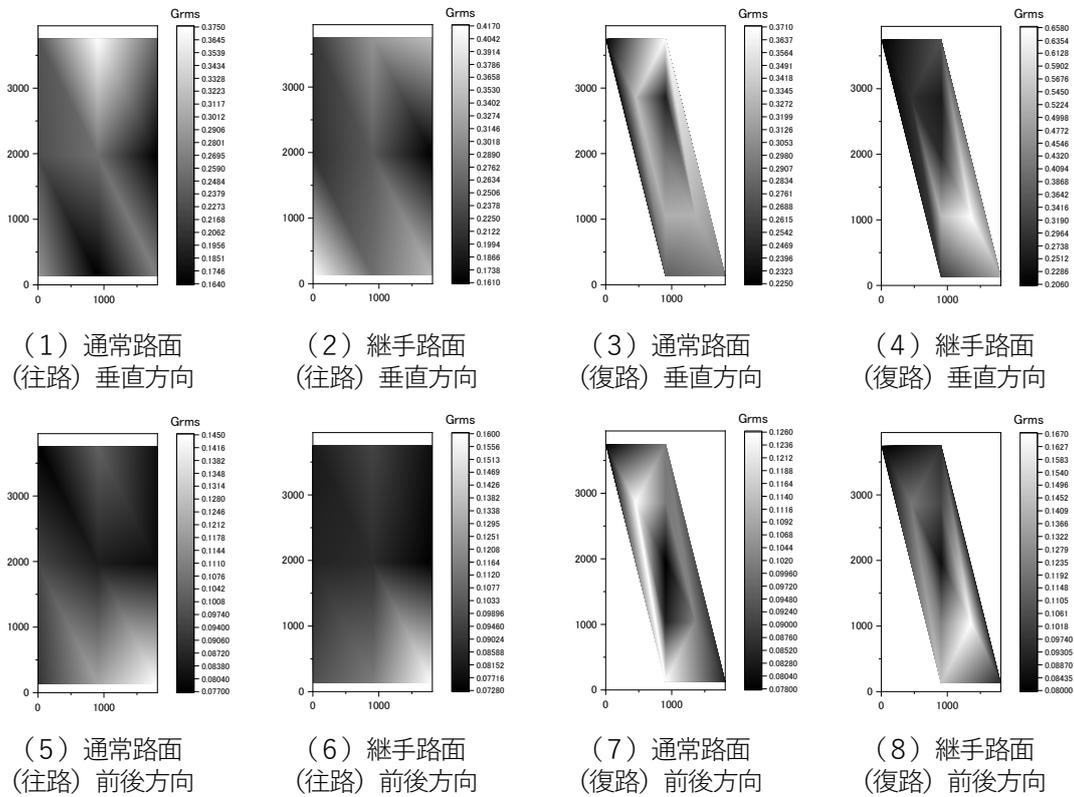


Fig. 4-3-25 荷台上における Grms の分布 (2t 車)。なお、分布を強調するために(1)から(8)それぞれにおいてグレートーンレベルの最大値・最小値を変えている。

4. 4 文化財の陸上輸送環境のまとめ

本章での検証によって、文化財の陸上輸送環境は工程内で生じる振動および衝撃の程度から、いくつかの区分に分類できることが分かる (Table 4-4-1)。この分類に沿って、筆者が過去に計測した輸送環境データの解析を加えて、上記区分をより詳細に定性することで、文化財の陸上輸送環境のまとめとしたい。具体的には、輸送環境計測によって、各イベントの Grms およびピーク加速度が得られるが、これらはそれぞれ振動レベルと衝撃レベルを表現するものである。そこで、得られたデータを Table 4-4-1 の区分で切り分け、Grms とピーク加速度の座標上にプロットすることでそれを評価する。座標の右上になるほど、振動と衝撃の双方のレベルが高いエリアとなり、それだけ危険性も高まる。また、常時定期的な振動が生じているが、突発的な衝撃が少ない工程は、Grms は高いがピーク加速度は低いエリアにプロットされる。あるいは常時振動は無いが、大きな衝撃が生じてしまうような工程は Grms が低く、ピーク加速度が高いエリアにプロットが集中すると予測される。

この解析によって振動と衝撃の要素を含めた輸送環境の評価が可能となると考え、Table 4-4-2 に列挙した輸送で得られたデータを解析して上述した形式のプロットに出力したものが、Fig. 4-4-1 から Fig. 4-4-4 である。なお、低速走行のデータ (Fig. 4-4-1) は実験 A、継手路面走行のデータ (Fig. 4-4-3) は実験 B によって得られたものである。なお、Table 4-4-2 の表記対応は、低速：低速走行、一般：一般道路、継手：継手路面、高速：高速道路、を表しており、各区間のデータを抽出した輸送に●印を付した。

Table 4-4-1 文化財の陸上輸送環境における振動と衝撃のレベル

輸送工程	Grms (G)	ピーク加速度 (G)
低速走行	0.08 以下	0.3 以下
一般道路	0.21 以下にほぼ収まるが、 0.40 程度までのリスクを要考慮	0.8 以下にほぼ収まるが、 2.0 程度までのリスクを要考慮
継手路面	0.52 以下にほぼ収まるが、 0.70 程度までのリスクを要考慮	2.4 以下にほぼ収まるが、 3.0 程度までのリスクを要考慮
高速道路	0.24 以下にほぼ収まるが、 0.50 程度までのリスクを要考慮	1.0 以下にほぼ収まるが、 5.0 程度までのリスクを要考慮

Table 4-4-2 解析対象とした陸上輸送

低速	一般	継手	高速	輸送開始日	出発地	到着地
			●	2005年10月22日	兵庫県内倉庫	長崎歴史文化博物館
	●		●	2006年5月3日	東京国立博物館	成田空港
			●	2006年11月5日	向源寺	東京国立博物館
	●		●	2008年2月29日	薬師寺	東京国立博物館
	●		●	2008年3月9日	薬師寺	東京国立博物館
	●		●	2009年3月21日	興福寺	東京国立博物館
	●		●	2009年4月21日	東京国立博物館	興福寺
	●		●	2009年6月15日	東京国立博物館	興福寺
	●		●	2009年6月18日	東京国立博物館	九州国立博物館
	●		●	2009年10月04日	九州国立博物館	興福寺
	●		●	2011年6月17日	東京国立博物館	奈良国立博物館
			●	2011年11月28日	金沢能楽美術館	東京国立博物館
			●	2014年11月08日	山形美術館	東京国立博物館
	●		●	2015年3月21日	京都国立博物館	東京国立博物館
			●	2015年8月28日	国立歴史民俗博物館	北海道博物館
	●		●	2015年9月17日	都内倉庫	観峰館
	●		●	2016年3月12日	京都国立博物館	東京国立博物館
	●		●	2016年5月23日	東京国立博物館	京都国立博物館
	●		●	2016年5月23日	東京国立博物館	京都国立博物館
	●		●	2016年5月23日	東京国立博物館	京都国立博物館
●				2016年8月24日	高松塚修理施設	キトラ四神の館
	●		●	2016年11月6日	苫小牧市美術博物館	東京国立博物館
●				2016年12月7日	高松塚修理施設	キトラ四神の館
	●		●	2017年3月8日	東京国立博物館	岡山県立博物館
	●		●	2017年6月29日	東京国立博物館	長崎歴史文化博物館
	●		●	2017年6月29日	東京国立博物館	国立歴史民俗博物館
	●		●	2017年7月20日	東京国立博物館	九州国立博物館
	●		●	2017年8月9日	横浜みなと博物館	苫小牧市美術博物館
	●			2017年10月4日	九州国立博物館	峰町歴史博物館
			●	2017年12月25日	札幌芸術の森美術館	国立民族学博物館
			●	2017年11月7日	峰町歴史博物館	九州国立博物館
		●		2018年2月22日	東京国立博物館	東京国立博物館

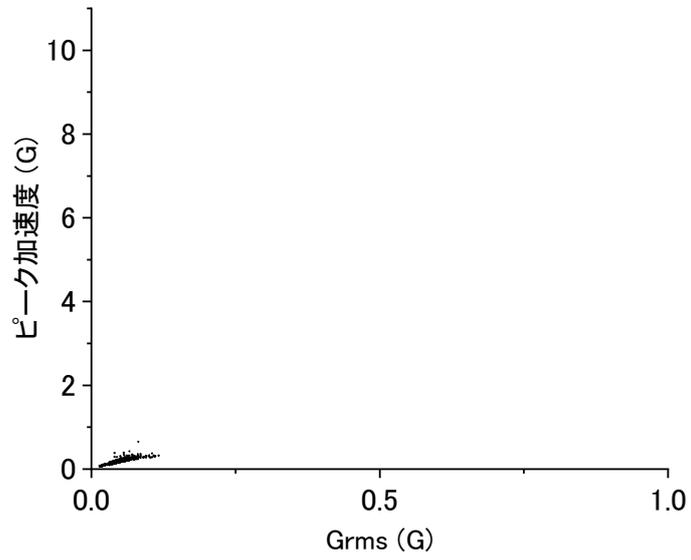


Fig. 4-4-1 低速走行時の振動と衝撃のレベル

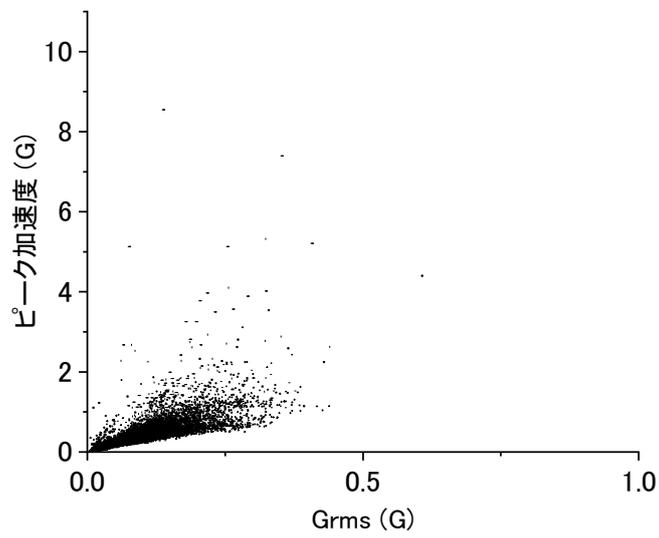


Fig. 4-4-2 一般道路走行時の振動と衝撃のレベル

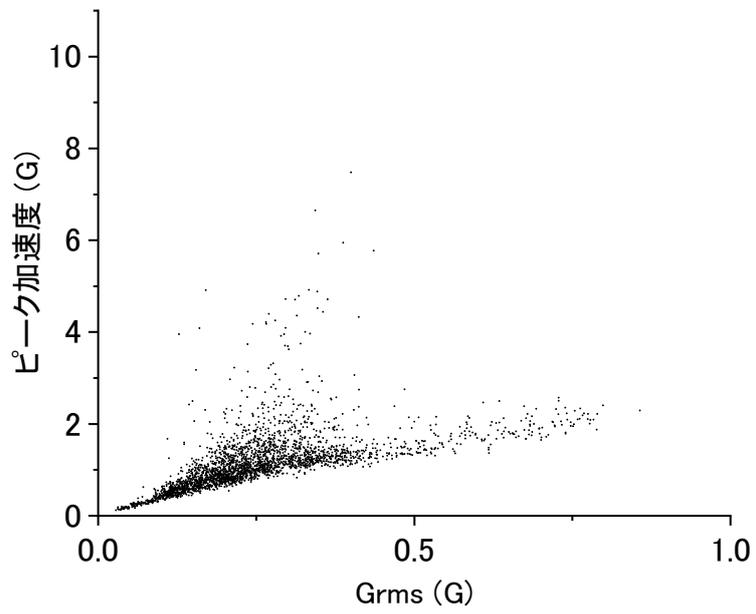


Fig. 4-4-3 継手路面走行時振動と衝撃のレベル

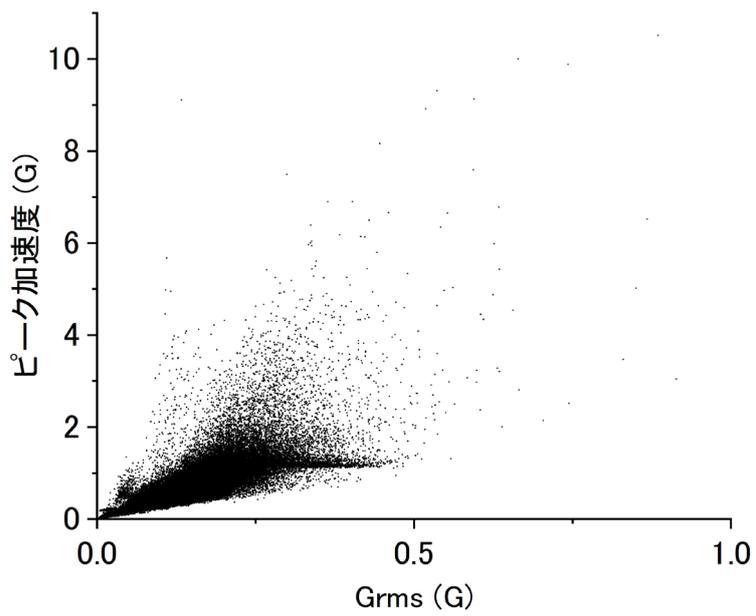


Fig. 4-4-4 高速道路走行時の振動と衝撃のレベル

Table 4-4-1 にまとめた通り、文化財の陸上輸送の輸送環境データを収集し解析することで必要な輸送工程上の区分を策定でき、各工程において発生する振動と衝撃のレベルの範囲を提示することができた。例えば高速道路走行時に発生するピーク加速度レベルを「1.0 以下にほぼ収まるが、5.0 程度までのリスクを要考慮」と表現した。多くの輸送環境データを収集した場合に低い加速度値が分布として圧倒的に多くなり、全体を平均化すると高い加速度値が意味するリスクが埋もれてしまう。そこで、統計的にほとんどのデータが 1.0 G 以下に収まるが、場合によっては 5.0 G レベルのピーク加速度が生じるリスクが潜むことを注意喚起する意味で上記の表現で記載したものである。この表現は続く第 5 章および第 6 章においても同様である。また、このようにある程度の幅を持つ輸送環境データの評価についての検討は陸上輸送以外を含めた文化財輸送全体の評価指標について論じた第 8 章のまとめの節で行う。

本章では陸上輸送に関して、トラックの走行中前後に生じる荷役作業も含めた輸送環境の実態の検証から行った。専門の作業による荷役作業は非常に安定した環境を示し、問題となる現象は見られなかった。トラックの走行中の輸送環境に関しては、走行速度がどのように影響するのかを検証した。低速走行時（約 15 km/h）、一般道路走行時（約 40 km/h）、高速道路走行時（約 80 km/h）で比較した場合、速度上昇とともに、Grms とピーク加速度の双方が上昇することから、トラック荷台上の輸送環境は走行速度と相関性が高いと考えられた。また、走行路面の輸送環境への影響について、日常的に走行頻度の高い、かつ路面起伏の大きい代表例として、首都高速道路のような高架道路に見られる伸縮継手部分の走行時を抽出して比較した。その結果、継手路面では通常的高速道路路面よりも大きな Grms が検出されるが、ピーク加速度としては通常的高速道路路面の方が高く検出されることが分かった。連続した路面起伏は衝撃よりも振動のレベルを高める効果を持つものと考えられる。また、車種や荷台上の位置によっても輸送環境に若干の差異が生じており、本章で実施した実験では、車両が小型であるほど、そして相対的に荷台後方になるほど振動と衝撃レベルは上昇する傾向を推測できた。これらは一般的傾向と断定できないが、車両毎の特性を予め把握することで輸送環境をある程度予測できる可能性を示唆する結果と捉えられる。

引用文献

- 1) 藤井 洋, 丸井 悦男, 江馬 諭, 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 (1985)
- 2) 斎藤 勝彦, 久保 雅義, 劉 剛, 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), pp.1 (1998)
- 3) Singh S. Paul, Antle John R., Burgess Gary G., Comparison between lateral, longitudinal, and vertical vibration levels in commercial truck shipments, *Packaging Technology and Science*, **5** (2), pp.71-75 (1992)
- 4) 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), 幸書房, pp.98-101 (2008)
- 5) Lu Fei, Ishikawa Yutaka, 他, Effect of vehicle speed on shock and vibration levels in truck transport, *Packaging Technology and Science*, **23** (2), pp.101-109 (2010)
- 6) 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, **324** pp.173-176 (1982)
- 7) 横山功一, 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, A, **35** pp.757-764 (1989)
- 8) 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), pp.501-509 (1998)
- 9) 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), pp.79-87 (2000)
- 10) 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, **47** pp.999-1008 (2001)
- 11) 梶川康男, 深田宰史, 他, 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, **50** pp.413-420 (2004)
- 12) 室井智文, 薄井王尚, 他, 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 A, **54** pp.171-180 (2008)
- 13) 広井智, 深田宰史, 他, 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, **14** pp.179-187 (2009)
- 14) 長船寿一, 中村俊一, 他, 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 A, **56** pp.237-250 (2010)
- 15) 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, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), **67** (3), pp.I_59-I_64 (2011)
- 16) 深田宰史, 松本剛也, 他, 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, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), **68** (3), pp.I_45-I_53 (2012)

- 17) Singh Jagjit, Singh S. Paul, Joneson Eric, 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), pp.309-323 (2006)
- 18) Hinsch RT, Slaughter DC, 他, Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport, *Transactions of the ASAE*, **36** (4), pp.1039-1042 (1993)
- 19) Sitwell Christine Leback, Vibration Test Results on an Air Ride Suspension Vehicle and Design Considerations for a Racking System, ICOM committee for conservation: 8th triennial meeting, Sydney, Australia, 6-11 September, 1987. Preprints, Getty Conservation Institute, pp.601-606 (1987)

第5章 文化財の輸送環境調査－海上輸送時における振動と衝撃

5.1 はじめに

現在は長距離、長期間におよぶ文化財の海上輸送は行われておらず、例えば日本国内での陸上輸送手段が存在しない一部の経路でのみ実施されているような状況である。文化財の海上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船と呼ばれる船が原則用いられている。本論文では船舶による輸送環境はRO/RO船内に駐車した美専車の荷台上のものを指す。当然、RO/RO船による輸送環境を把握する必要はあるが、公開されたデータはほぼ存在しない。また、港での乗船、下船工程 (Fig. 5-1-1) などの荷役作業についても輸送環境データが存在しない。

そこで、本章ではRO/RO船の航海中および港での乗下船時に発生する振動および衝撃の実態を検証する。そして、本章の最後で船舶輸送全体の輸送環境についてまとめる。



Fig. 5-1-1 港における下船工程

5. 2 計測

計測対象とした輸送に関して海上の航路を抜粋したものを、Fig. 5-2-1 に示し、陸路を含めた工程については Table 5-2-1 から Table 5-2-8 にまとめた。全てトラックに文化財を積載した状態での輸送である。工程には要所となるターミナルおよび発着地を記載し、途中の休憩や借用地、返却地に関する情報は一部省略した。また、輸送環境データが取得できた区間のみを掲載した。計測は第3章で示した通りの手法で、加速度データロガーをトラックの荷台上に設置し (Fig. 5-2-2)、GPS データロガーは航海中は船室内 (Fig. 5-2-3)、陸上輸送中はトラック内に設置して計測したものである。



Fig. 5-2-1 計測対象とした海上航路 (番号は本章で用いる通番)

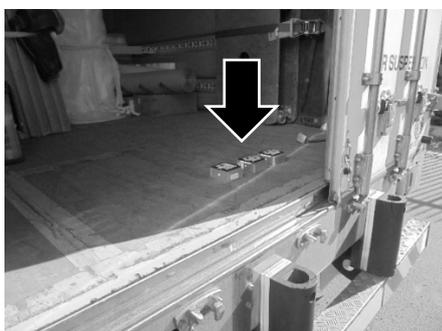


Fig.5-2-2 トラック荷台への加速度データロガーの設置状況



Fig.5-2-3 船室内に設置した GPS データロガーの状況

Table 5-2-1 仙台港から苫小牧港への船舶輸送を含む工程 (No.1)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2015年8月28日	09:00:00	from: 国立歴史民俗博物館	一般道路	5
	09:23:18	to: 佐倉IC		
	09:23:23	from: 佐倉IC	高速道路	384
	15:01:01	to: 仙台港北IC		
	15:01:06	from: 仙台港北IC	一般道路	2
15:19:41	to: 仙台港			
2015年8月29日	19:40:29	from: 仙台港	船舶	560
	11:02:28	to: 苫小牧港		
	11:12:14	from: 苫小牧港	一般道路	10
	11:37:12	to: 沼ノ端西IC		
	11:37:17	from: 沼ノ端西IC	高速道路	44
	13:09:55	to: 札幌南IC		
13:10:00	from: 札幌南IC	一般道路	8	
13:30:03	to: 北海道博物館			

Table 5-2-2 苫小牧港から仙台港への船舶輸送を含む工程 (No.2)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)	
2016年11月6日	17:31:06	from: 苫小牧市美術博物館	一般道路	3	
	17:54:47	to: 苫小牧港			
2016年11月7日	19:00:00	from: 苫小牧港	船舶	560	
	09:50:00	to: 仙台港			
	09:51:00	from: 仙台港	一般道路	4	
	10:15:11	to: 仙台港IC			
	10:15:16	from: 仙台港IC	高速道路	233	
	13:43:02	to: 那珂IC			
	13:43:08	from: 那珂IC	一般道路	12	
	14:05:39	to: 茨城県立歴史館			
	2016年11月8日	08:02:00	from: 茨城県立歴史館	一般道路	15
		08:23:23	to: 水戸IC		
08:23:28		from: 水戸IC	高速道路	78	
09:19:08		to: 神崎IC			
09:19:13		from: 神崎IC	一般道路	13	
09:52:48		to: 伊能忠敬記念館			
10:24:28		from: 伊能忠敬記念館	一般道路	4	
10:44:53		to: 佐原香取IC			
10:44:58		from: 佐原香取IC	高速道路	87	
12:51:58		to: 箱崎JCT			
12:52:03	from: 箱崎JCT	一般道路	5		
14:12:09	to: 東京国立博物館				

Table 5-2-3 苫小牧港から大洗港への船舶輸送を含む工程 (No.3)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2017年12月14日	22:31:05	from: 苫小牧市美術博物館	一般道路	3
	22:39:52	to: 苫小牧港		
2017年12月15日	01:24:59	from: 苫小牧港	船舶	754
	19:46:35	to: 大洗港		
	19:49:52	from: 大洗港	一般道路	5
	20:00:52	to: 水戸大洗IC		
20:00:53	from: 水戸大洗IC	高速道路	47	
20:30:00	to: 桜川筑西IC			

Table 5-2-4 大洗港から苫小牧港への船舶輸送を含む工程 (No.4)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2018年3月18日	14:00:00	from: 東京国立博物館	一般道路	118
	18:00:00	to: 水戸大洗IC	高速道路	
	19:45:00	from: 大洗港	船舶	
2018年3月19日	13:30:00	to: 苫小牧港		
2018年3月19日	13:30:00	from: 苫小牧港	一般道路	70
	16:00:00	to: 札幌芸術の森美術館	高速道路	

Table 5-2-5 博多港から厳原港への船舶輸送を含む工程 (No.5)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2017年10月4日	08:26:23	from: 九州国立博物館	一般道路	8.2
	08:56:39	to: 水城IC		
	08:56:39	from: 水城IC	高速道路	14.6
	09:09:16	to: 築港IC		
	09:09:16	from: 築港IC	一般道路	0.2
	09:09:43	to: 博多港		
	10:01:36	from: 博多港	船舶	73.8
	12:19:13	to: 郷ノ浦港 (壱岐)		
	12:36:32	from: 郷ノ浦港 (壱岐)	船舶	65.2
	14:50:41	to: 厳原港 (対馬)		
	14:52:02	from: 厳原港 (対馬)	一般道路	1
	14:56:43	to: 対馬歴史民俗資料館		
	15:13:11	from: 対馬歴史民俗資料館	一般道路	45.2
	16:23:59	to: 峰町歴史民俗資料館		

Table 5-2-6 厳原港から博多港への船舶輸送を含む工程 (No.6)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2017年11月7日	10:35:00	from: 峰町歴史民俗資料館	一般道路	45.2
	11:51:00	to: 対馬歴史民俗資料館		
	13:54:00	from: 対馬歴史民俗資料館	一般道路	1
	14:00:00	to: 厳原港 (対馬)		
	15:00:00	from: 厳原港 (対馬)	船舶	138
	19:14:00	to: 博多港		
	19:17:50	from: 博多港	一般道路	0.2
	19:22:24	to: 築港IC		
	19:22:25	from: 築港IC	高速道路	14.6
	19:35:19	to: 水城IC		
19:35:20	from: 水城IC	一般道路	8.2	
19:50:14	to: 九州国立博物館			

Table 5-2-7 苫小牧港から八戸港への船舶輸送を含む工程 (No.7)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2017年12月25日	18:28:40	from: 札幌芸術の森美術館	一般道路	70
	22:44:34	to: 苫小牧港	高速道路	
	23:59:00	from: 苫小牧港	船舶	242
2017年12月26日	07:48:21	to: 八戸港	高速道路	726
	10:01:08	from: 西根IC		
	20:29:52	to: 新静岡IC		

Table 5-2-8 青森港から函館港への船舶輸送を含む工程 (No.8)

日付	時刻	経路	種別	距離 (km)
2017年8月9日	14:31:26	from: 横浜みなと博物館	一般道路	0.7
	14:42:07	to: みなとみらいIC		
	14:42:13	from: みなとみらいIC	高速道路	432
	20:51:31	to: 大和IC		
	20:51:32	from: 大和IC	一般道路	4.8
	21:43:26	to: 大和IC		
21:43:27	from: 大和IC	高速道路	26.3	
22:01:16	to: 仙台港北IC			
2017年8月10日	06:03:05	from: 仙台港北IC	高速道路	351
	10:30:24	to: 青森IC		
	10:30:29	from: 青森IC	一般道路	10
	11:07:52	to: 青森港		
	11:23:00	from: 青森港	船舶	110
	15:35:00	to: 函館港		
	15:35:24	from: 函館港	一般道路	27.3
	16:19:31	to: 大沼公園IC		
	16:19:32	from: 大沼公園IC	高速道路	253
18:44:54	to: 苫小牧西IC			
18:44:55	from: 苫小牧西IC	一般道路	43.5	
19:06:39	to: 苫小牧市美術博物館			

5. 3 解析結果と考察

5. 3. 1 航海中における振動と衝撃

計測対象とした8つの輸送について、陸上輸送含めた全工程の Grms の時系列変化を Fig. 5-3-1 から Fig. 5-3-8 に示す。なお、これらは最も振動レベルの高い垂直方向の Grms をプロットしたものである。

船舶輸送中の振動レベルについては、全ての輸送における Grms の時系列変化 (Fig. 5-3-1 から Fig. 5-3-8) において、航海中 (各図中「Ship」と表記) が最も低いレベルを維持していたことが非常に明瞭である。

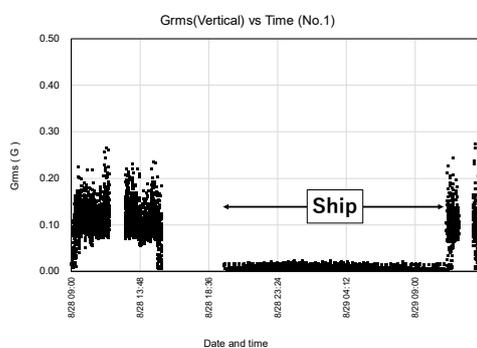


Fig. 5-3-1 Grms (垂直方向) の時系列変化 (No.1)

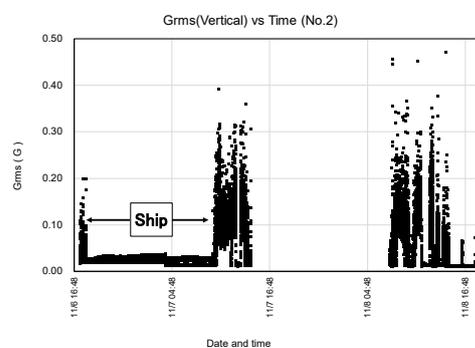


Fig. 5-3-2 Grms (垂直方向) の時系列変化 (No.2)

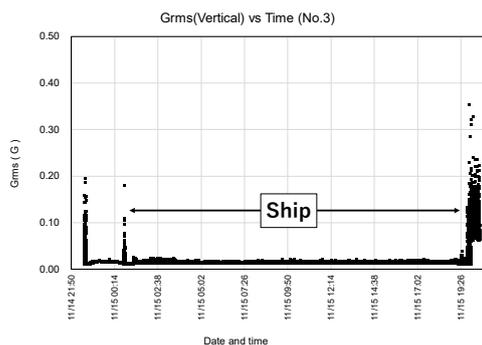


Fig. 5-3-3 Grms (垂直方向) の時系列変化 (No.3)

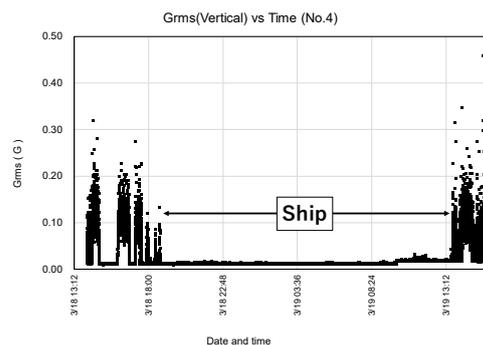


Fig. 5-3-4 Grms (垂直方向) の時系列変化 (No.4)

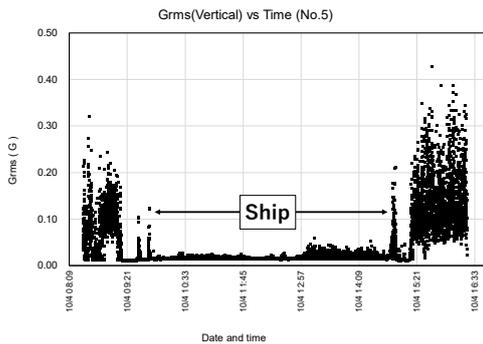


Fig. 5-3-5 Grms（垂直方向）の時系列変化（No.5）

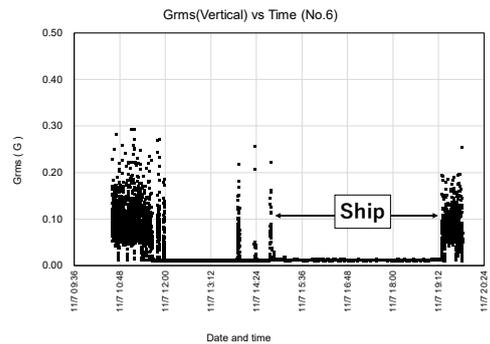


Fig. 5-3-6 Grms（垂直方向）の時系列変化（No.6）

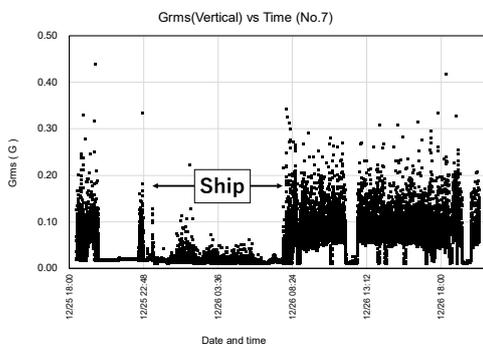


Fig. 5-3-7 Grms（垂直方向）の時系列変化（No.7）

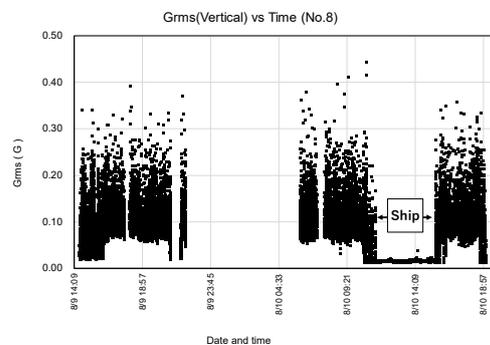


Fig. 5-3-8 Grms（垂直方向）の時系列変化（No.8）

また、上記8つの輸送において、添乗者からより詳細な情報を得ることができた No.2 の輸送（Table 5-2-2）については輸送工程を正確に区分することができたため、輸送工程毎に、ピーク加速度と Grms を方向別に計算し、それぞれの最大値、平均値を Table 5-3-1 にまとめた。Table 5-3-1 からは、全ての輸送工程において、ピーク加速度と Grms の最大値および平均値が最小を示したのは船舶による輸送工程であったことが明瞭である。

ちなみに、No.2 に関して、全方向のピーク加速度と移動速度を並列してプロットしたものが Fig. 5-3-9 となる。Fig. 5-3-9 において、約 40 km/h で移動している区間が海上輸送に該当するが、加速度のレベルは（停車中を除く）他の工程と比較して非常に低いことがこの図からも明らかである。また、輸送全体では垂直方向の振動が他の方向と比べて高いレベルとなっていた。船舶と同速度で陸上を美術品輸送専用車両で輸送した場合と比較しても、船舶による輸送は圧倒的に安定していると言える。なお、同図の右半分を占める空白の領域は夜間の車両留置きの時間帯を示している。

Table 5-3-1 輸送 No.2 で検出されたピーク加速度と Grms の最大値を 3 方向（CH1:前後、CH2:左右、CH3:垂直）別にその平均値を輸送工程毎に解析したもの。表中の数値が太字の部分には各方向において最大あるいは最小値を示した工程を示す。

経路	種別	G (max)			G (ave)			Grms (max)			Grms (ave)		
		CH1	CH2	CH3									
from: 苫小牧市美術博物館 to: 苫小牧港	一般道路	0.236	0.524	0.646	0.095	0.112	0.131	0.091	0.115	0.200	0.023	0.027	0.035
from: 苫小牧港 to: 仙台港	船舶	0.153	0.143	0.188	0.078	0.078	0.092	0.023	0.024	0.038	0.017	0.017	0.022
from: 仙台港 to: 仙台港IC	一般道路	0.279	1.285	2.188	0.083	0.098	0.147	0.068	0.282	0.243	0.021	0.025	0.039
from: 仙台港IC to: 那珂IC	高速道路	0.842	1.960	3.548	0.149	0.269	0.403	0.136	0.441	0.393	0.040	0.073	0.109
from: 那珂IC to: 茨城県立歴史館	一般道路	0.491	1.128	1.535	0.104	0.188	0.249	0.098	0.242	0.360	0.027	0.051	0.069
from: 茨城県立歴史館 to: 水戸IC	一般道路	0.652	1.869	2.253	0.129	0.176	0.254	0.125	0.352	0.343	0.027	0.045	0.070
from: 水戸IC to: 神崎IC	高速道路	0.586	1.877	2.653	0.165	0.297	0.411	0.100	0.358	0.341	0.043	0.075	0.111
from: 神崎IC to: 伊能忠敬記念館	一般道路	0.794	1.512	2.042	0.120	0.229	0.314	0.164	0.290	0.366	0.029	0.055	0.088
from: 伊能忠敬記念館 to: 佐原香取IC	一般道路	0.369	0.889	1.026	0.093	0.160	0.179	0.102	0.174	0.227	0.021	0.037	0.049
from: 佐原香取IC to: 箱崎JCT	高速道路	0.962	2.797	2.879	0.123	0.244	0.296	0.153	0.449	0.451	0.028	0.055	0.073
from: 箱崎JCT to: 東京国立博物館	一般道路	0.411	1.070	1.934	0.083	0.121	0.123	0.103	0.244	0.377	0.018	0.024	0.032

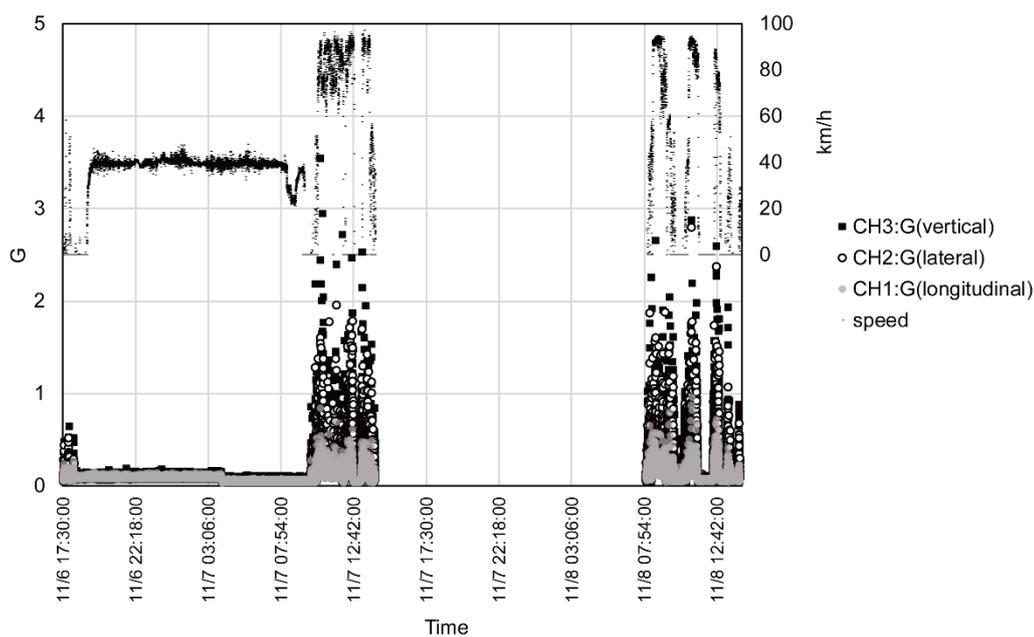


Fig. 5-3-9 輸送 No.2 で計測された全方向のピーク加速度と速度の時系列変化

さらに、No.2 の輸送について、高速道路走行時、一般道路走行時、海上輸送時の3種の輸送工程における PSD を計算した結果を Fig. 5-3-10 に示した。

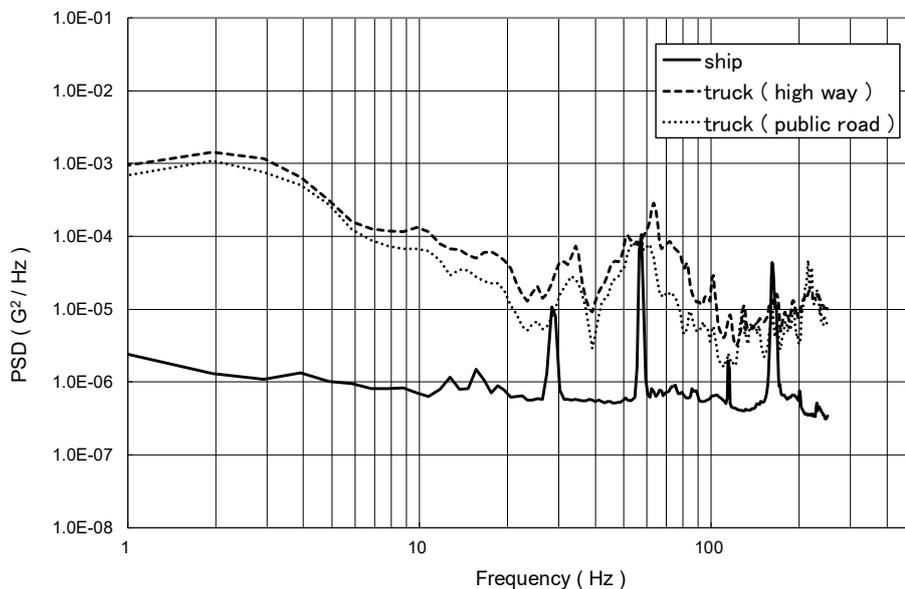


Fig. 5-3-10 輸送 No.2 の工程の内、高速道路走行時、一般道路走行時、船舶輸送時の工程から得られた PSD

Fig. 5-3-10 からは、高速道路走行時の特性は一般道路走行時と一致するが、全周波数域において振動レベルが高かったことがうかがえる。海上輸送時はそれら陸上輸送時と比較すると圧倒的に振動レベルが低く、例えば 10 Hz までの周波数域においては、約 1,000 倍の差を示す部分も存在する（縦軸は対数軸となっている）。なお、約 30 Hz、60 Hz、120 Hz、160 Hz といった周波数帯に局所的なピークが現れており、周波数のパターンから何らかの倍音振動が生じているものと考えられる。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、振動する構造も多岐に亘っておりやや複雑である¹⁾。この内、定常的振動現象について、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²⁾。上記周波数は船舶構造に起因するものと推定しているが、振動源については現在のところ明確ではない。

以上から、総合的に評価すると、船舶による海上輸送中に発生する加速度レベルは非常に低いものであり、輸送環境としては非常に安定したものである。

5. 3. 2 乗船時および下船時における振動と衝撃

前節までの検証によって、文化財の海上輸送環境において、残された課題は RO/RO 船の乗下船工程における環境の把握のみとなった。そこで本節では前節で解析対象とした全 8 回の輸送における、港で行われる乗下船の間にトラック荷台上がどのような輸送環境となるのかを検証する。輸送番号は前節から引き続き同じものを用いるが、No.1 から No.8 の輸送時に収集した GPS データ、添乗者の撮影画像あるいは、その後の補充として各フェリー会社への聞き取り調査によって得られた情報から、各輸送における乗下船工程に該当する時間帯の特定を行った。

まず振動レベルを把握するために、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、さらにそのイベントから PSD を算出した。それらを Fig. 5-3-11 から Fig. 5-3-18 に示す。

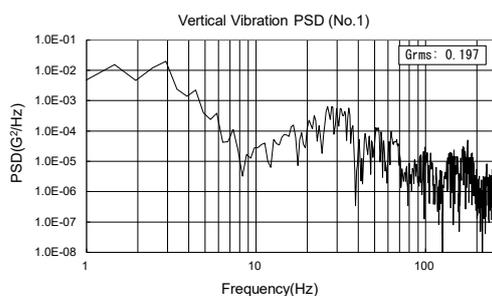


Fig. 5-3-11 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.1)。Grms は 0.197 G。

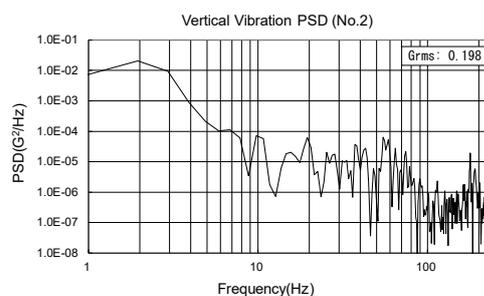


Fig. 5-3-12 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.2)。Grms は 0.198 G。

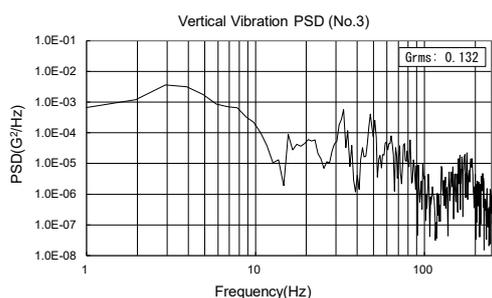


Fig. 5-3-13 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.3)。Grms は 0.132 G。

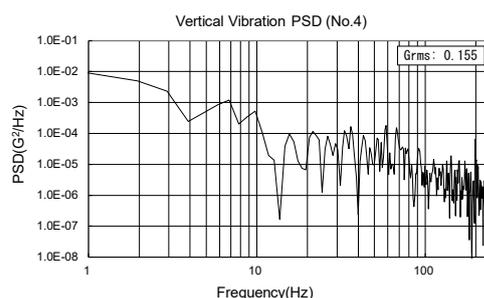


Fig. 5-3-14 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.4)。Grms は 0.155 G。

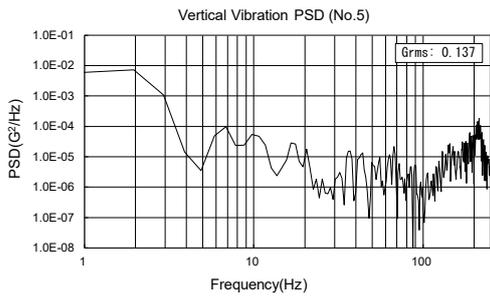


Fig. 5-3-15 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.5)。Grms は 0.137 G。

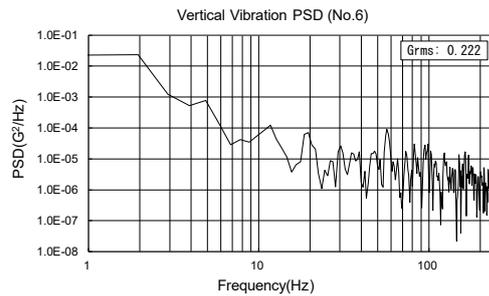


Fig. 5-3-16 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.6)。Grms は 0.222 G。

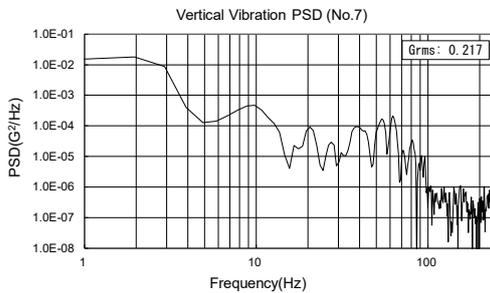


Fig. 5-3-17 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.7)。Grms は 0.217 G。

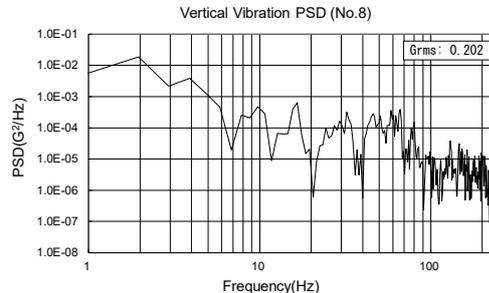


Fig. 5-3-18 Grms (垂直方向) の最大値と PSD (No.8)。Grms は 0.202 G。

前節で示した Fig. 5-3-10 中の海上航海中の PSD と波形を比較すると、あきらかに上記の乗下船工程の方が大きな振動レベルと持つことが分かり、特に 30 Hz 以下の周波数領域において大きく検出されていた。PSD のレベルで見た場合には、乗下船工程はトラックによる一般道路および高速道路走行時と大差のないものであると言える。

次に衝撃のレベルとしてピーク加速度の観点から検証した。同様に 8 回の輸送における乗下船工程の中で最大の加速度を示した波形を抽出し、Fig. 5-3-19 から Fig. 5-3-26 に示す。また、Fig. 5-3-27 は比較対象として抽出した輸送 No.6 において船舶で海上を航海中に検出された加速度波形の一例である。航海中は衝撃加速度のようなピークはほぼ見られず、非常に安定した環境であることが伺える。

以上の計測結果から、港における乗下船工程では海上航海中では現れないレベルの振動と衝撃が生じる可能性が非常に高いということを検証できた。

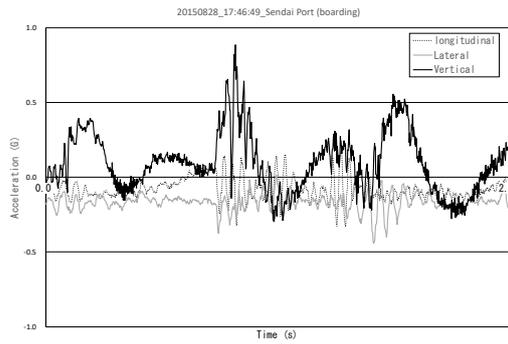


Fig. 5-3-19 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.1)

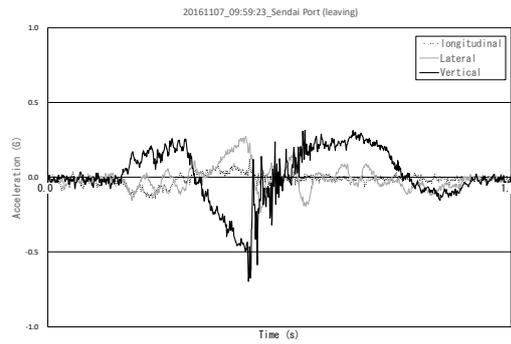


Fig. 5-3-20 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.2)

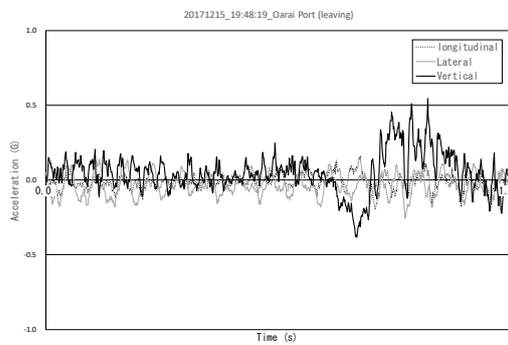


Fig. 5-3-21 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.3)

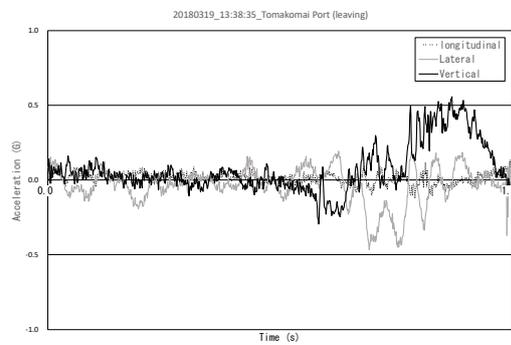


Fig. 5-3-22 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.4)

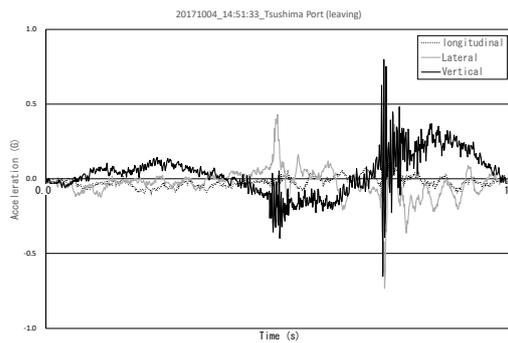


Fig. 5-3-23 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.5)

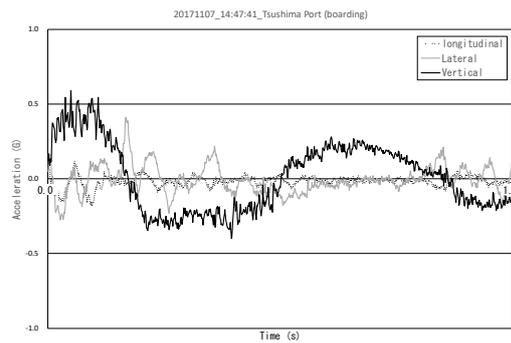


Fig. 5-3-24 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.6)

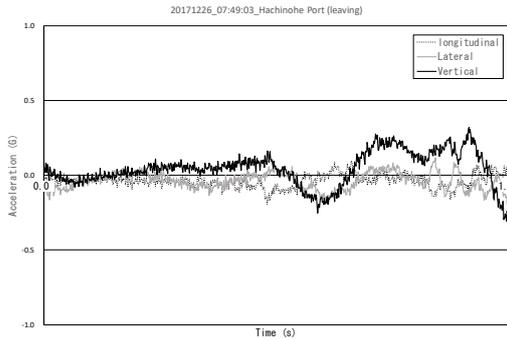


Fig. 5-3-25 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.7)

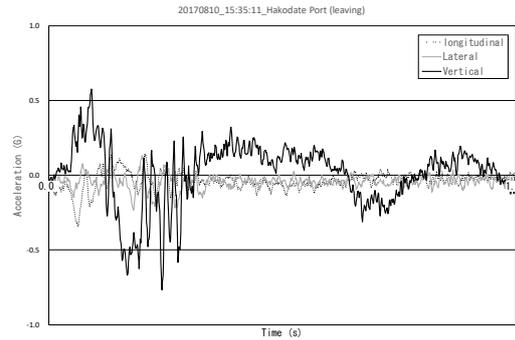


Fig. 5-3-26 乗下船工程で検出された最大の加速度波形 (No.8)

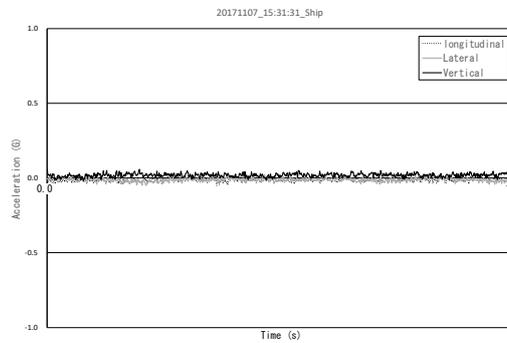


Fig. 5-3-27 船舶で海上航海中の加速度波形の一例 (No.6)

最後に、こうした乗下船工程で生じるやや激しい振動や衝撃はどのような周辺環境に起因するものであるのか調査しておく必要がある。フェリー会社の協力を得て、乗下船時の車両周辺の状況を調査したところ、床面には、船内の駐車場 (Fig. 5-3-28) で車両が床面に固定される場合に用いる金具 (Fig. 5-3-29) の比較的高い密度での分布 (Fig. 5-3-30)、床面に平滑でない部分の存在 (Fig. 5-3-31)、ランプウェイにより生じる段差 (Fig. 5-3-32) あるいはランプウェイ表面の凹凸 (Fig. 5-3-33) 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。こうした状況は美術品輸送専用車両に乗車した状態ではなかなか気が付きにくい。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、これらの走行路面状態の要素が大きく影響していることは確かであると推察している。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。したがって、美術品輸送専用車両のみ、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、こうした路面状態であることは予め想定しておくことは必要である。



Fig. 5-3-28 船舶内での駐車場



Fig. 5-3-29 床面に車両を固定するための金具



Fig. 5-3-30 床面には車両固定用の金具が
密に設置されている



Fig. 5-3-31 床面のやや激しい凹凸の様子



Fig. 5-3-32 ランプウェイと港湾施設
との間の段差



Fig. 5-3-33 ランプウェイ表面の凹凸

5. 4 文化財の海上輸送環境のまとめ

本章では文化財の海上輸送において、RO/RO 船の乗下船工程を含め、輸送中に発生する振動および衝撃レベルについての計測を実施し、輸送環境を検証した。

海上輸送環境について古くは Foley らの報告があり、そこでは、特に海上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予想されるとしていた³⁾。現在においても、海上輸送環境に関する検証報告は陸上輸送と比較して非常に少なく、近年の調査例として、Singh らはバナナ輸送用冷蔵船の航海中における輸送環境計測⁴⁾や、安部らによる調査報告⁵⁾、宮城による調査報告⁶⁾など僅かである。しかもそれらはコンテナ船による輸送環境の調査であり、RO/RO 船に関するものではない。参考までに、上記阿部らによる報告では、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 2 G 弱を示したデータが計測されており、また荷役時には大きな加速度が出現するとしている。また、宮城によると上海およびマレーシアからの 2 航路においては航行中の非常に安定した状況であったとしている。船舶の形式は異なるものの、海上航海中の振動および衝撃については基本的に安定したものであることは、本章による検証と一致する。海上では天候に左右されやすいため、気象条件次第では非常に激しい環境もあり得ると推定されるが、その点については、運航については、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いる⁷⁾。筆者が運航会社へ直接伺ったところ、予め定められた波高を上回った状態であれば、船長判断で運行を中止する規定が順守されていることが分かった。RO/RO 船は突発的な気象変化でない限り、相当の注意を払って運航されている。

また、コンテナ船では特に、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。例えば、Böröcz 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、航海中の振動レベルは低い一方で、港でのハンドリング時に大きな値が発生していたと報告している⁸⁾。この懸念については、RO/RO 船は該当しないが、コンテナの港でのハンドリングに該当するものとして、本章では乗下船時の環境について検証を行った。海上輸送における振動および衝撃のリスクとしては、コンテナ船であっても RO/RO 船であっても、航海中よりもむしろ港での作業に多くが含まれることは共通すると言える。

ちなみに、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、コンテナ船による輸送中、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⁹⁾。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であったという報告をしている

10)。

こうした本章での検証によって、文化財の海上輸送環境は工程内で生じる振動および衝撃の程度から、いくつかの区分に分類できることが分かる (Table 5-4-1)。この分類に沿って、上記区分をより詳細に定性することで、文化財の海上輸送環境のまとめとした。定性に用いる手法は第4章と同様である。Fig. 5-4-1 および Fig. 5-4-2 にまとめた。

Table 5-4-1 文化財の海上輸送環境における振動と衝撃のレベル

輸送工程	Grms (G)	ピーク加速度 (G)
海上航海	0.02 以下にほぼ収まるが、 0.05 程度までの可能性を要考慮	0.1 以下
乗下船	0.16 以下	0.6 以下にほぼ収まるが、 0.75 程度までのリスクを要考慮

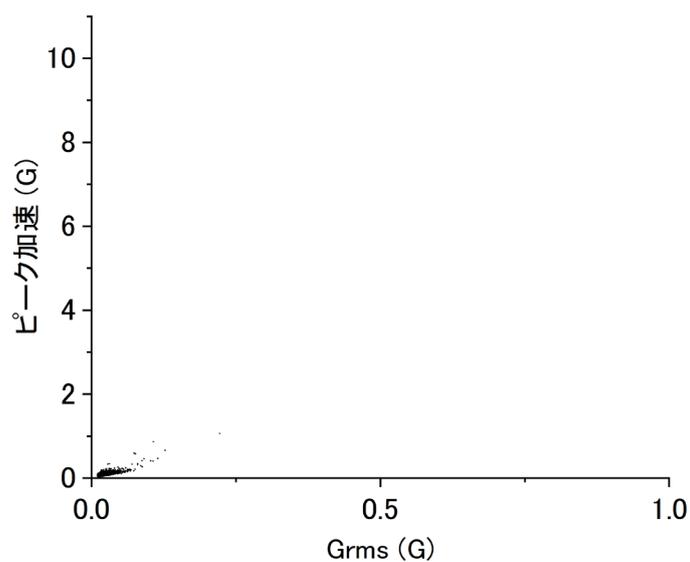


Fig. 5-4-1 海上航海中の振動と衝撃のレベル

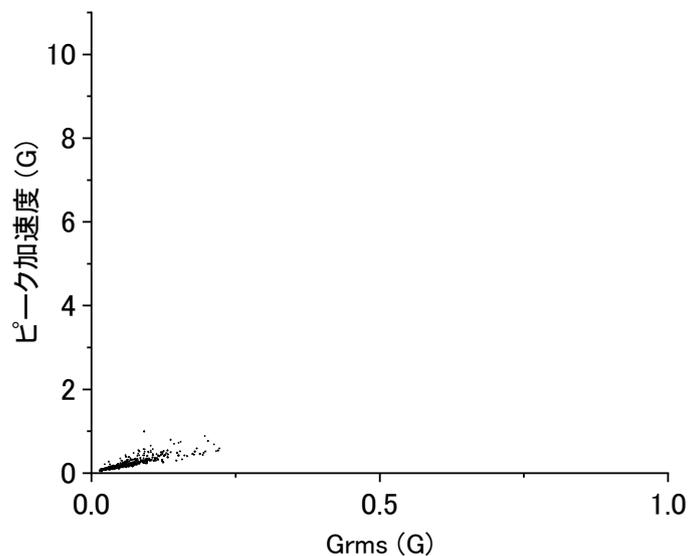


Fig. 5-4-2 乗下船時の振動と衝撃のレベル

以上の通り、本章では海上輸送環境を検証した。具体的には船舶による輸送環境を、RO/RO 船内に駐車した美専車の荷台上のものと限定した上で、海上航海中および港での乗下船時に発生する振動および衝撃の実態を検証した。その結果、海上輸送では、海上航海中と港での乗下船工程の2つの工程の区分必要性がまず見いだされた。その工程区分に沿って、計測された振動と衝撃の範囲を特定したところ、海上航海中は極めて安定しており、突発的な気象変化が生じない限りは安全な環境であると判断できるものであった。なお、RO/RO 船の運航は各社厳格な規定を持って実施しており、基本的に出港時の気象条件が良好でなければそもそも輸送はおこなわれない。一方、乗下船工程では海上輸送中では検出されることのないレベルの振動と衝撃が発生することが判明した。陸上輸送時と比較すると相対的に小さいレベルに収まり、工程にかかる時間も短い。海上航海中のみが海上輸送の環境を示すものという誤解には注意を要するレベルである。こうした乗下船時の輸送環境の原因を調査したところ、船内の床面や港施設との接続部の路面凹凸がその発生源であると推測できた。

引用文献

- 1) 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), pp.219-224 (2009)
- 2) 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, pp.163-171 (2009)
- 3) 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, pp.35-44 (1972)
- 4) Singh S. Paul, Burgess Gary J., 他, Measuring the package shipping environment in refrigerated ocean vessels, Packaging Technology and Science, **6** (4), pp.175-181 (1993)
- 5) 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** pp.26-31 (1996)
- 6) 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), pp.680-687 (2007)
- 7) 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** pp.822-824 (1995)
- 8) 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), pp.45-60 (2015)
- 9) 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), pp.920-924 (2009)
- 10) Singh S. Paul, Saha K., 他, Measurement and Analysis of Vibration and Temperature Levels in Global Intermodal Container Shipments on Truck, Rail and Ship, Packaging Technology and Science, **25** (3), pp.149-160 (2012)

第6章 文化財の輸送環境調査－航空輸送時における振動と衝撃

6.1 はじめに

日本から海外へ物品を輸送する場合、必然的に船舶か航空機を使用することになる。船舶による海外輸送の場合は、輸送時間が長くなるため、物流の速さという点では航空機による輸送に大きな利点がある。文化財の輸送においても、輸送時間は保存環境の観点からも、また保安性の観点からも短い方が好ましく、現在行われている海外輸送では、ほぼ航空機が使用されている。海外輸送の増加に伴い、航空輸送環境も予め把握しておかねばならない重要な環境である。

航空輸送による輸送環境について、一般的に飛行中の振動成分は他の輸送機関よりも高い周波数成分まで含まれているが、振動レベルとしては小さく、衝撃は着陸時が最大で、1.2 G 程度の加速度が発生するとされている。一方で、荷役時には、ドーリーの連結部分がぶつかった際の衝撃、路面の継ぎ目からの衝撃などが大きく、10 G 程度の加速度が発生するとして報告がある¹⁾。こうした状況から、エアサスペンションを装備したトラックを使用して空港まで輸送しても、空港内作業で大幅に輸送環境が低下する可能性が危惧されるため、航空用防振パレットを開発してその効果を検証した事例も存在する²⁾。文化財の航空輸送に関しても、幾つかの検証報告が存在し、例えば Saunders は、飛行中の振動レベルは非常に低く、絵画への影響はほぼ無いが、空港内での荷役作業においては、3 G から 8 G 程度の衝撃加速度が発生する危険性を指摘している³⁾。Kamba らは文化財の国際輸送時に梱包箱内で発生した振動加速度を計測し、特に空港内のドーリー輸送工程においては、10 G を超える加速度が発生する現象が見られるため注意を要する工程であることを報告している⁴⁾。Kamba らの検証を契機として、国内ではさらに詳細な検証がなされており、高木らは、ダミー貨物を使用して走行試験を実施し、ドーリーが路面上の段差を乗り越える際の加速度レベルは運転操作の注意レベルに大きく依存することを検証し、荷扱い注意レベルを適切に管理することで大幅に軽減できると報告している^{5,6)}。また、ドーリー輸送時の振動周波数については、50 Hz から 80 Hz の範囲に高いレベルの振動が現れるといった報告がある⁷⁾。

本章では海外の博物館施設との間で実施された輸送における航空輸送中に発生する振動および衝撃の実態を検証する。そして、本章の最後で航空輸送全体の輸送環境についてまとめる。

6. 2 計測

Table 6-2-1 はこれまで筆者が計測に関わった文化財の国際輸送の一覧である。本章では既に詳細を報告したデータ⁸⁾に、近年収集したものを追加してデータの母体数を増やした上で検証する。航空輸送を計測する場合、加速度データロガーは航空機の機体へ直接設置することができないため、本章で取り扱うデータは全て、第3章で解説した梱包箱内へ設置した機器で計測されたものである。

Table 6-2-1 解析対象とした航空輸送

No.	飛行	着陸	空港	輸送開始日	出発地	経由地	到着地
1		●	●	2005年10月5日	成田空港	仁川国際空港(韓国)	国立中央博物館(韓国)
2		●	●	2006年2月19日	東京国立博物館	成田空港→オークランド国際空港(ニュージーランド)	テ・ハバトンガレワ(ニュージーランド)
3		●	●	2006年5月30日	東京国立博物館	成田空港→フランクフルト国際空港(ドイツ)	ベルリン国立美術館(ドイツ)
4			●	2006年10月6日	ベルリン国立美術館(ドイツ)	フランクフルト国際空港(ドイツ)→成田空港	東京国立博物館
5		●	●	2006年10月23日	ポワンタ・カリエール考古学歴史博物館(カナダ)	モントリオール・ピエール・エリオット・トルドー国際空港(カナダ)→トロント・ピアソン国際空港(カナダ)→成田空港	東京国立博物館
6			●	2006年10月24日	ポワンタ・カリエール考古学歴史博物館(カナダ)	モントリオール・ピエール・エリオット・トルドー国際空港(カナダ)→トロント・ピアソン国際空港(カナダ)→成田空港	東京国立博物館
7		●	●	2007年6月8日	東京国立博物館	成田空港→ワシントン・ダレス国際空港(アメリカ)	フリーア美術館(アメリカ)
8		●	●	2007年10月14日	東京藝術大学大学美術館	成田空港→シャルル・ド・ゴール空港(フランス)	パリ日本文化会館(フランス)
9		●	●	2007年10月20日	国立中央博物館(韓国)	仁川国際空港(韓国)→成田空港	東京国立博物館
10			●	2007年10月20日	国立中央博物館(韓国)	仁川国際空港(韓国)→成田空港	東京国立博物館
11			●	2008年1月31日	パリ日本文化会館(フランス)	シャルル・ド・ゴール空港(フランス)→成田空港	東京藝術大学大学美術館
12			●	2008年7月26日	クレムリン博物館(ロシア)	シェレメーテエヴォ国際空港(ロシア)→成田空港	東京国立博物館
13	●	●		2010年7月01日	東京国立博物館	成田空港→シャルル・ド・ゴール空港(フランス)	グリマルディフォーラム(モナコ)
14	●	●	●	2011年12月19日	故宮博物院(中国)	北京首都国際空港(中国)→羽田空港	東京国立博物館
15	●	●	●	2012年3月01日	東京国立博物館	羽田空港→北京首都国際空港(中国)	故宮博物院(中国)
16			●	2014年2月04日	成田空港	シカゴ・オヘア国際空港(アメリカ)	クリーブランド美術館(アメリカ)
17			●	2014年5月16日	クリーブランド美術館(アメリカ)	シカゴ・オヘア国際空港(アメリカ)→成田空港	東京国立博物館
18			●	2015年6月18日	都内倉庫	成田空港→仁川国際空港(韓国)	Leeum(韓国)

6. 3 解析結果と考察

本章冒頭で述べたように、航空輸送に関しては、既往研究によって輸送工程の定性はほぼ完了している。すなわち、飛行、離着陸、空港内荷役作業の3工程の分類が既に確立していると考えてよい。また、飛行中の輸送環境は非常に安定しており、離着陸時はやや大きな加速度値が検出されるものの、それほど大きな危険性は存在せず、むしろ空港内荷役作業時に最も不安定な環境になることも分かっている。本節では、既往研究のこうした成果を踏まえた上で、本研究で計測した、各工程における振動および衝撃の実データをいくつか提示しつつ、事実関係を改めて検証する。

Fig. 6-3-1 から Fig. 6-3-4 に示したのは No. 5, No. 13, No. 16, No. 18 における輸送全体のピーク加速度の時系列変化である。図中に飛行、離陸、着陸、荷役（空港内荷役）、陸上（陸上輸送）のラベルを記入している。これらから明らかなように、飛行中のピーク加速度は他の工程と比較して明らかに低く、低い状態で安定している。離陸、着陸で発生する加速度も輸送全体で相对比较するとそれほど大きなものではない。しかし、荷役時に発生する加速度と陸上輸送中に発生する加速度はそれらと比較するとレベルが大きい。この内、陸上輸送中に関しては、第4章で検証した通りである。こうした前提を踏まえた上で以下に、飛行、離着陸、空港内荷役作業の3工程について詳細に検証する。

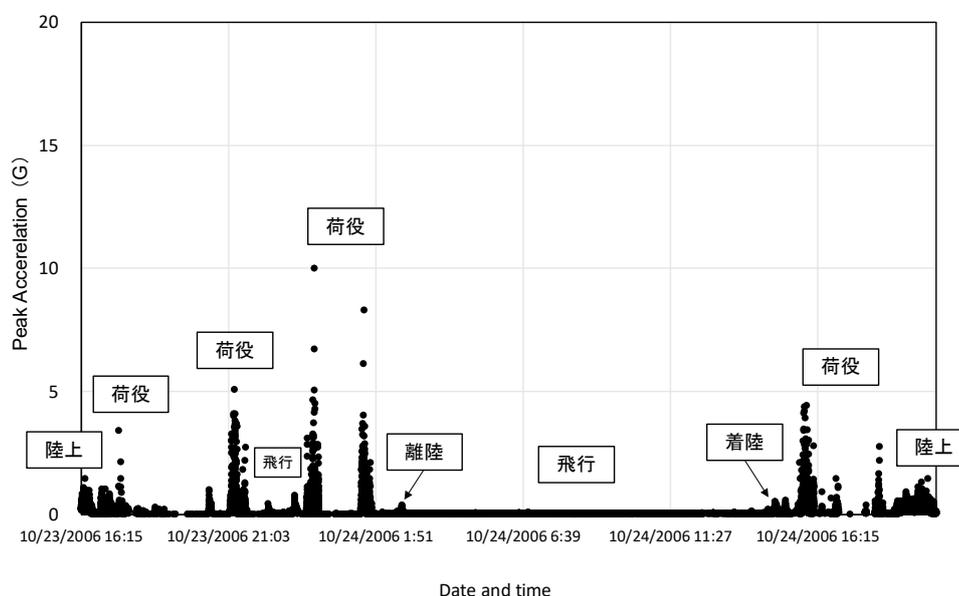


Fig. 6-3-1 No. 5 の輸送工程全体のピーク加速度の時系列変化。

この輸送では2回の航空輸送が行われた。

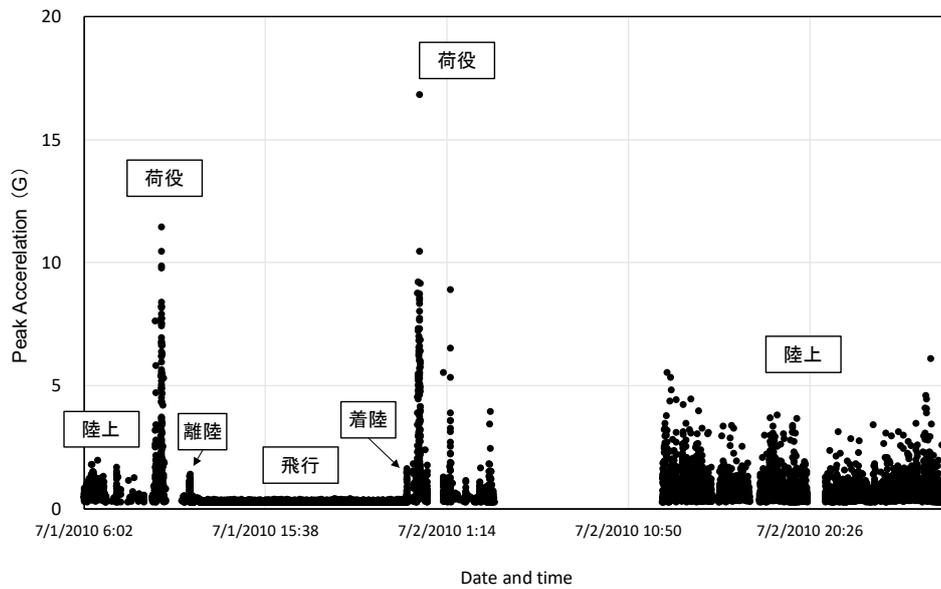


Fig. 6-3-2 No. 13 の輸送工程全体のピーク加速度の時系列変化

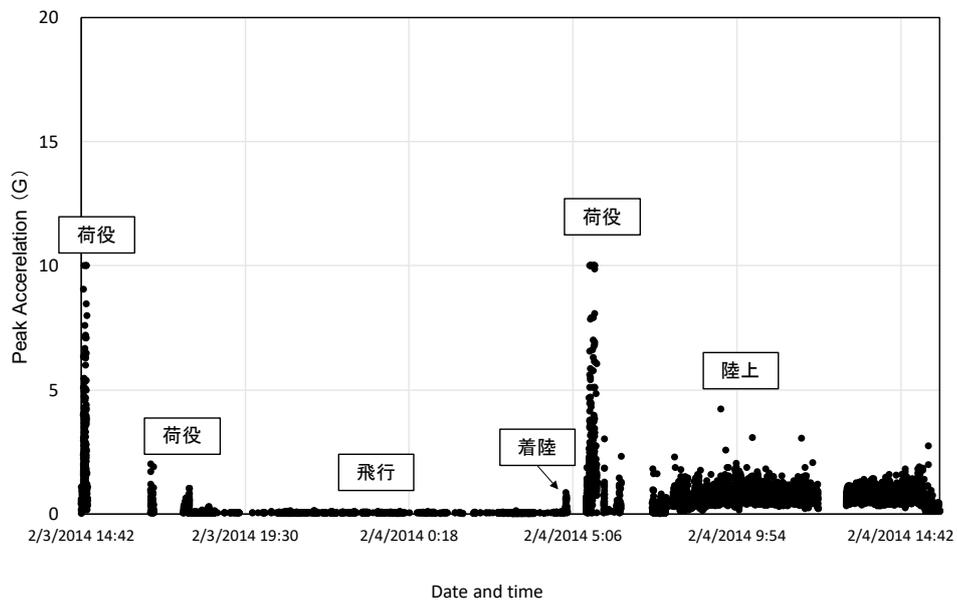


Fig. 6-3-3 No. 16 の輸送工程全体のピーク加速度の時系列変化。なお、加速度データロガーの記録開始時刻の設定の関係で、空港内荷役作業時からプロットが始まっている。

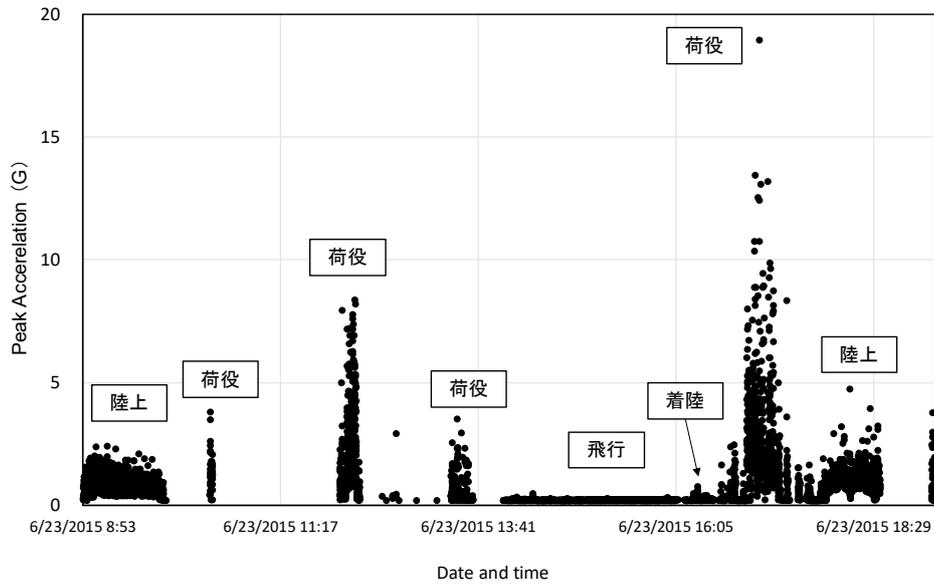


Fig. 6-3-4 No. 18 の輸送工程全体のピーク加速度の時系列変化

6. 3. 1 飛行中の振動と衝撃

No. 13, No. 14, No. 15 における飛行中の PSD を算出し Fig. 6-3-5 から Fig. 6-3-7 に示す。飛行中で生じる振動のレベルと周波数についてはどの輸送も同様のパターンを示した。各図中の凡例には Grms 値を並記した。航空輸送では梱包箱の方向を厳密に固定することができない。したがって、方向が確実な垂直方向のデータのみ掲載する（以下本節において同様）。PSD からは全周波数帯において振動レベルが低く、特徴的な振動が見受けられず、Grms も低い。Fig. 6-3-1 から Fig. 6-3-4 で明らかな通り、大きな衝撃加速度も発生していない。以上からも飛行中に大きな輸送リスクが存在することは無いと考えられる。

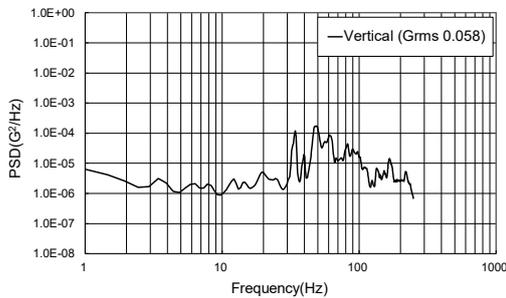


Fig. 6-3-5 飛行中の PSD (No. 13)

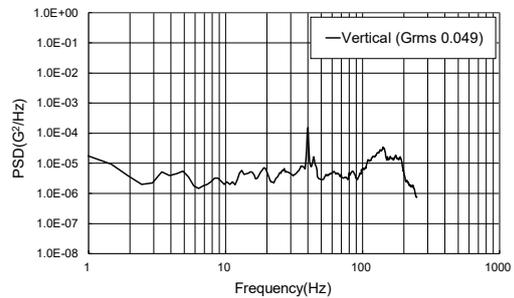


Fig. 6-3-6 飛行中の PSD (No. 14)

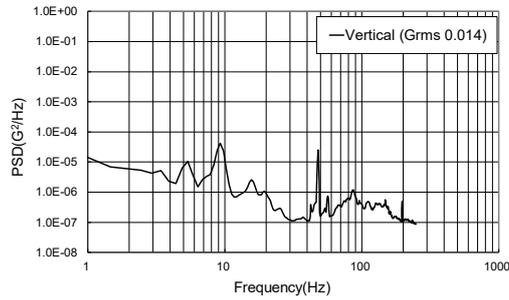


Fig. 6-3-7 飛行中の PSD (No. 15)

6. 3. 2 離着陸時の振動と衝撃

次に、離陸および着陸時に関する解析を行う。旅客機の座席上では着陸時に大きな音を体感することがあるため、衝撃を意識することがあるが、ピーク加速度で見た場合には相対的に小さいことは先述の通りである。Fig. 6-3-8 から Fig. 6-3-15 は、No. 1, No. 5, No. 13, No. 15 における着陸時の加速度波形とその PSD である。衝撃レベルは飛行中よりも高く、最大で 3G 程度の加速度が発生する。振動についても飛行中より約 10 倍程度はレベルが上がり、特に 10 Hz 付近のピークが顕著である。ただし、この工程は大体数十秒で終わることから、輸送トータルで考えた場合の影響としては小さくなると考えられる。

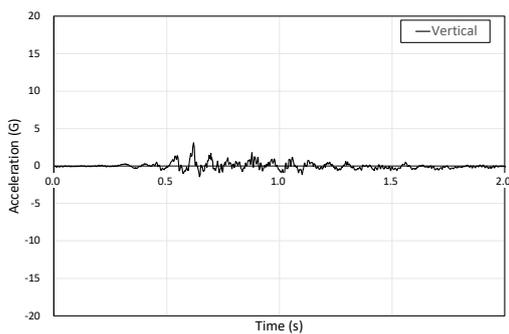


Fig. 6-3-8 着陸時の加速度波形 (No.1)

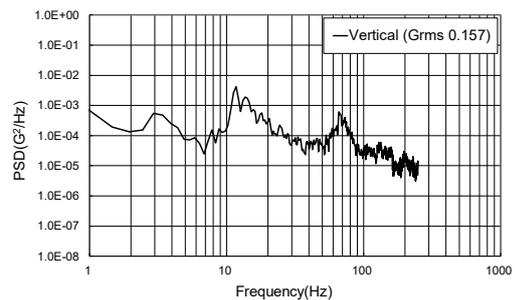


Fig. 6-3-9 着陸時の PSD (No.1)

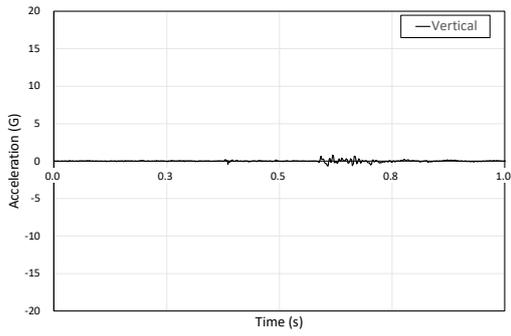


Fig. 6-3-10 着陸時の加速度波形 (No. 5)

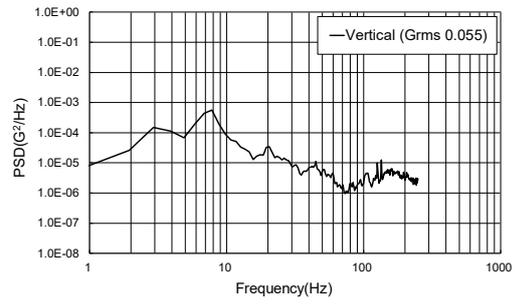


Fig. 6-3-11 着陸時の PSD (No. 5)

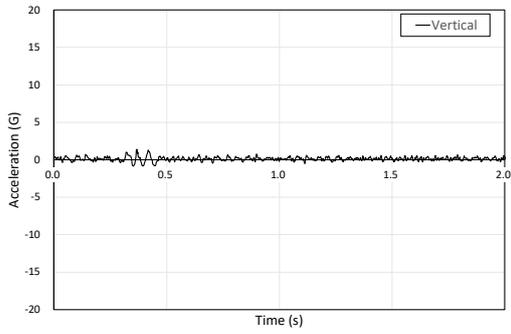


Fig. 6-3-12 着陸時の加速度波形 (No. 13)

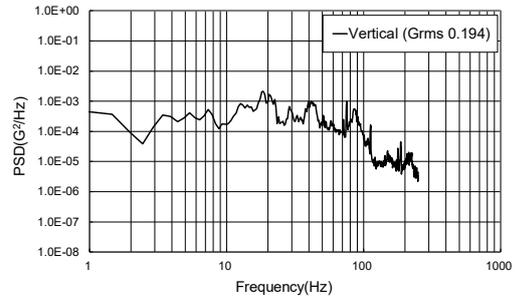


Fig. 6-3-13 着陸時の PSD (No. 13)

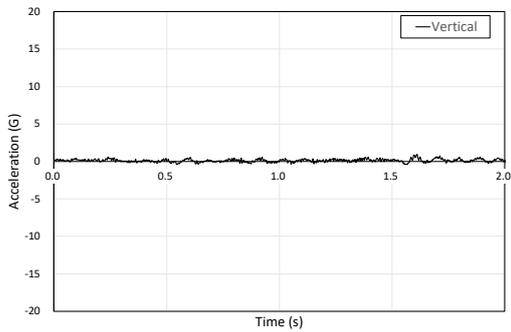


Fig. 6-3-14 着陸時の加速度波形 (No. 15)

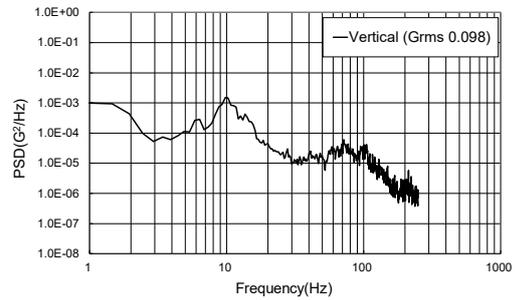


Fig. 6-3-15 着陸時の PSD (No. 15)

6. 3. 3 空港内荷役作業時の振動と衝撃

最後に空港内荷役作業時に関するデータを解析する。Fig. 6-3-16 から Fig. 6-3-23 は、No. 13, No. 16, No. 17, No. 18 における空港内荷役作業時の加速度波形とその PSD である。加速度レベルは 10 G 超が頻発しており、しかも 1 イベント内で連続して発生している。加速度データロガーの計測範囲の制限を解くと、15 G まで到達するものもあった。Grms を見ると、1 イベントで 1 G を超えるのは非常に激しい振動レベルという評価になる。中には 2 G 程度を示すものもあった。これらは前掲したドーリー (Dolly) と呼ばれる滑走路上で貨物を牽引する車両 (Fig. 6-3-24) で輸送している間に生じたものであることが分かっている。空港内荷役作業は本論文で対象とした全ての輸送工程の中で最も振動および衝撃レベルが高い工程であった。また、梱包箱内のデータである事を考慮するとドーリーで引かれる台車の荷台表面ではより大きなレベルとなっていることが推測される。

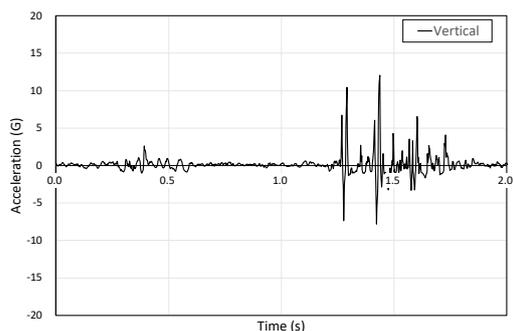


Fig. 6-3-16 空港内荷役作業時の加速度波形
(No. 13)

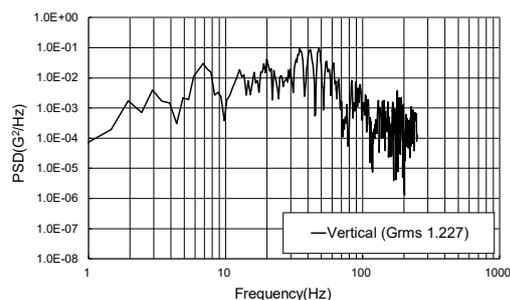


Fig. 6-3-17 空港内荷役作業時の PSD
(No. 13)

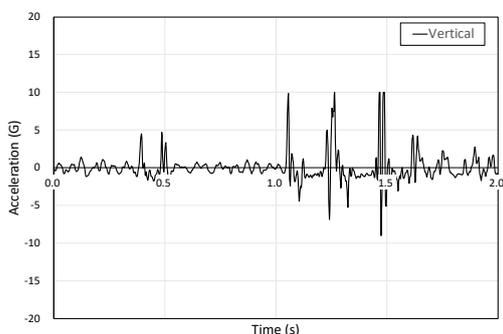


Fig. 6-3-18 空港内荷役作業時の加速度波形
(No. 16)

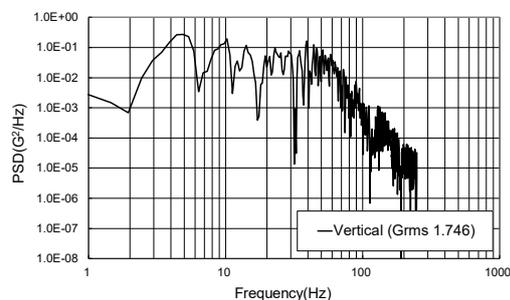


Fig. 6-3-19 空港内荷役作業時の PSD
(No. 16)

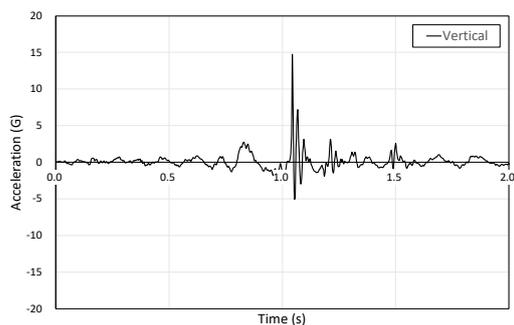


Fig. 6-3-20 空港内荷役作業時の加速度波形
(No. 17)

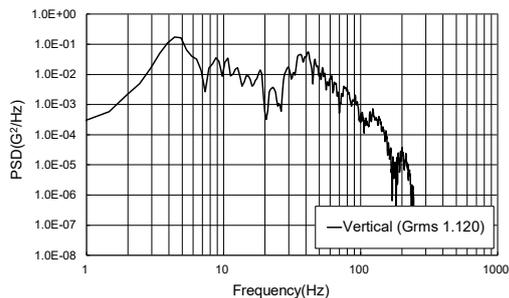


Fig. 6-3-21 空港内荷役作業時の PSD
(No. 17)

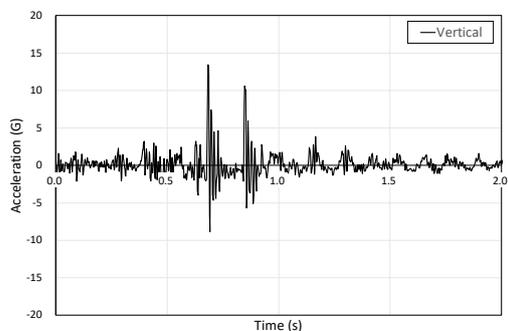


Fig. 6-3-22 空港内荷役作業時の加速度波形
(No. 18)

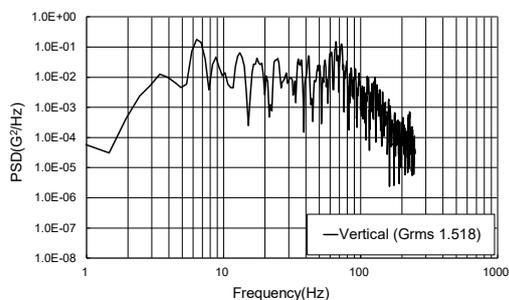


Fig. 6-3-23 空港内荷役作業時の PSD
(No. 18)



Fig. 6-3-24 トレー

6. 4 文化財の航空輸送環境のまとめ

本章では、既往研究による成果を踏まえ、上記区分をより詳細に定性することで、文化財の航空輸送環境のまとめをしたい。定性に用いる手法は第 4 章と同様である。Fig. 6-4-1 から Fig. 6-4-3 にまとめた。

Table 6-4-1 文化財の航空輸送環境における振動と衝撃のレベル

輸送工程	Grms (G)	ピーク加速度 (G)
飛行中	0.08 以下	0.4 以下にほぼ収まるが、 0.5 程度までのリスクを要考慮
離着陸	0.18 以下にほぼ収まるが、 0.25 程度までのリスクを要考慮	0.7 以下にほぼ収まるが、 1.5 程度までのリスクを要考慮
空港内荷役	0.62 以下にほぼ収まるが、 1.25 程度までのリスクを要考慮	2.7 以下にほぼ収まるが、 10.0 程度までのリスクを要考慮

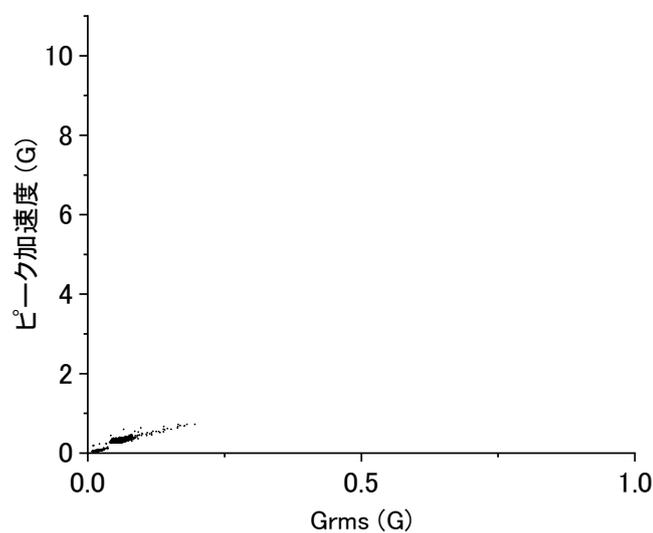


Fig. 6-4-1 飛行中の振動と衝撃のレベル

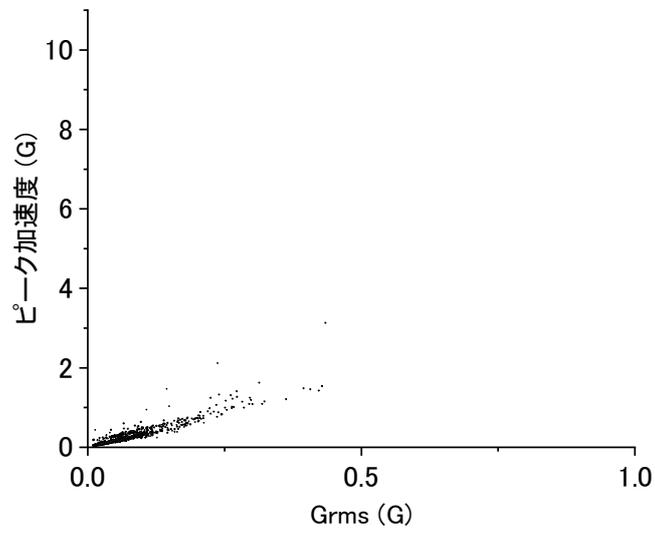


Fig. 6-4-2 離着陸時の振動と衝撃のレベル

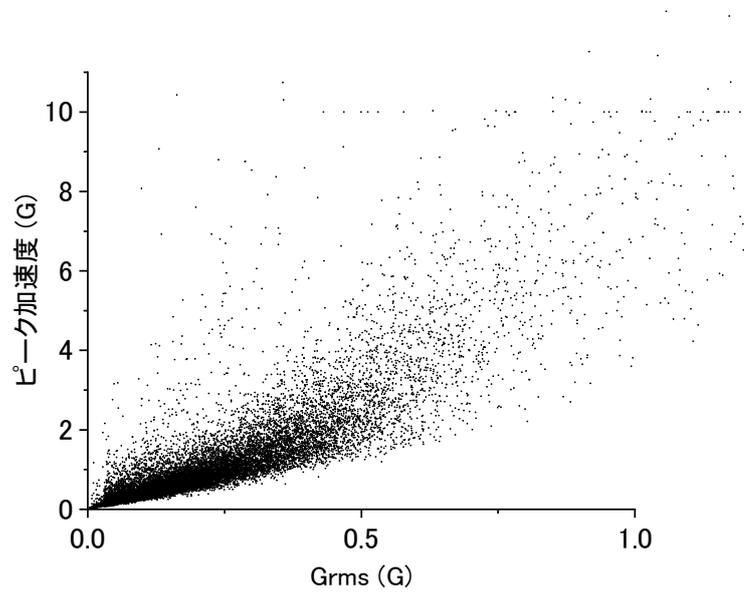


Fig. 6-4-3 空港内荷役作業時の振動と衝撃のレベル

Table 6-4-1 にまとめた通り、空港内荷役時の輸送環境が最も激しく、高いリスクを含むものであった。飛行中は陸上輸送の低速走行時や海上輸送の海上航海中の輸送環境とレベルは近い。また、離着陸時の輸送環境は航空輸送全体と比較すると空港内荷役が突出しているため非常に小さく見えるが、本節で検証したようにデータの母数を増やして解析した場合に、ピーク加速度として1 G を超える計測値も多く見られ、無視できるレベルとはいいがたい。空港内荷役時を示す Fig. 6-4-3 の縦軸 10 G 辺りに横軸に平行な点群がプロットされているが、これらは過去に加速度データロガーの上限値を 10 G と設定した際に予想を上回るデータが入力されてしまったため、最大値止まりで記録されたデータ群である。空港内荷役では 10 G レベルの加速度の発生可能性は見込んでおく必要があることを意味するものと考えている。

引用文献

- 1) 金子 武弘, 各種輸送方式とその環境条件, 輸送・工業包装の技術, フジ・テクノシステム, pp.571-588 (2002)
- 2) 中嶋 理志, 航空用防振パレットの導入による輸送品質の向上, 季刊輸送展望, **246** pp.61-66 (1998)
- 3) Saunders D., Monitoring Shock and Vibration During the Transportation of Paintings, National Gallery Technical Bulletin, **19** pp.64-73 (1998)
- 4) Kamba Nobuyuki, Wada Hiroshi, 他, Measurement and Analysis of the Global Transport Environment for Packing Cases for Artifacts, Studies in Conservation, **53** (sup1), pp.60-63 (2008)
- 5) 高木 雅広, 遠山 一隆, 森松 長照, 空港内オペレーションで発生する振動・衝撃の計測と解析, 日本包装学会第 24 回年次大会研究発表会予稿集, pp.70-71 (2015)
- 6) 高木 雅広, 文化財の国際輸送時における空港内荷役作業のリスク, 日本包装学会誌, **26** (6), pp.313-319 (2017)
- 7) Singh Jay, Singh Paul, Saha Koushik, Evaluation of Vibration Profiles for ULD Dollies at Air-Cargo Sorting Hubs, The Journal of Applied Packaging Research, **7** (1), pp.15-26 (2015)
- 8) 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)

第7章 文化財の輸送環境調査結果を反映した緩衝設計の最適化

7.1 はじめに

緩衝材の特性は、基本的には市場に出ている緩衝材の公開されている製品情報から把握するものであり、その情報を基にしてどの製品をどのように使用するかを設計するプロセスに必要なものである。したがって、緩衝材のメーカーは開発段階で、一定の条件下で示す緩衝能力について、定められた方法に基づいて試験を行っている。例えば日本国内では、JIS Z 0235 が包装用緩衝材材料の試験方法を定めたものであり、そこには衝撃荷重試験の記録図として最大加速度・静的応力線図の例が掲載されている (Fig. 7-1-1) ¹⁾。緩衝材にかける荷重を変えながら一定の高さから落下させ、荷重に対する落下時の衝撃加速度をプロットしたものであり、衝撃から内容物を保護するための包装設計には非常に有用な線図である。内容物の重量および許容最大加速度と想定される落下高さがおおよそ定まっていることが前提となるが、緩衝材の単位面積あたりにどれだけの荷重をかけた状態であれば、どの厚みの緩衝材を用いれば、仮に指定高さから落下した場合に衝撃加速度が最小限 (Fig. 7-1-1 各曲線における極小点に該当する条件) に収まるように設計することができる。

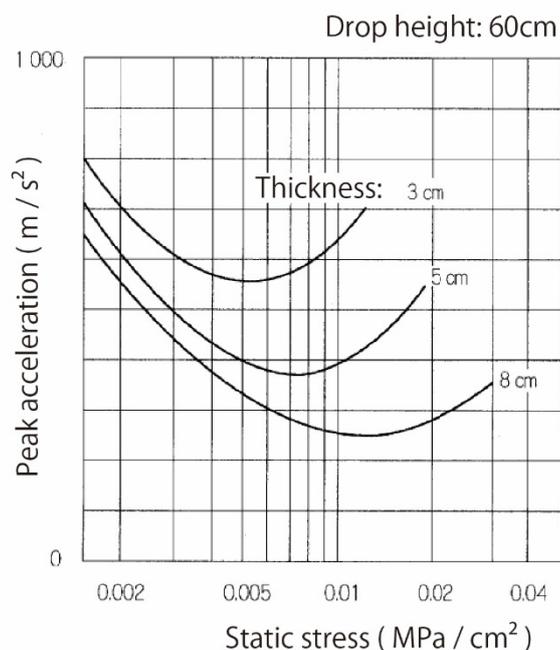


Fig. 7-1-1 最大加速度・静的応力線図の例 ¹⁾

また、上記プロセスで包装設計を行うことで、内容物の許容加速度を大幅に下回るような過剰梱包も回避することができる。つまり、落下衝撃に対する保護については、衝撃加速度をどれだけ吸収できるかを性能とコストの両側面から考慮して緩衝材を選択することになる。

こうした緩衝材による衝撃対策については古くから様々な緩衝材について検証されている。例えば、松本は緩衝材としても木毛、段ボールの効果を円筒状ガラス管を梱包した状態で落下試験し、それぞれの特性を鑑みた包装設計の必要性を述べている²⁾。福尾らは、防振よりも落下衝撃に対する緩衝が重要だとした上で、緩衝材のばね定数が小さい程緩衝効果は大きい、一方で変形も考慮せねばならないため、ばね定数の選択には注意を要するとしている³⁾。森位は木毛、ティッシュペーパー等の応力・ひずみ線図から緩衝特性を調査し、それぞれの最大加速度・静的応力線図を求め、適切な使用法を提案している⁴⁾。森下は緩衝材の選択のポイントとして、復元性、耐水性、使用量を挙げ、ゴム発泡体、ポリウレタン発泡体、木毛、ラバーライズドヘアー（強靱な動植物繊維を螺旋状にカールさせてラテックスで連結固着したもの）の緩衝係数・応力線図を提示している⁵⁾。様々な物質が合成されるようになると、小山は有機気泡体のもつ特性が防振・緩衝材として優れた要素に該当するとして今後の用途拡大の可能性を示唆している⁶⁾。一方で巻口は緩衝材の変遷をまとめた上で、そうしたプラスチック資材の廃棄物問題にも言及している⁷⁾。これについては別の観点から、赤澤らは、ポリエチレンフォーム材を緩衝材としてリサイクル使用した場合の性能への影響を検証し、リサイクル3回までは影響ないものと報告している⁸⁾。緩衝材の比較に関して清水らは、防振ゴム、コイルばね、空気ばねの防振性能と振動減衰能力の2要素については空気ばねが最も優れているという報告をしている⁹⁾。緩衝特性については、中嶋らは緩衝材の使用量を必要最小限に抑えるためには緩衝特性を正確に把握することが必要であるとした上で、動的特性（落下衝撃試験による）と静的特性（圧縮試験による）を用いて実際の落下で発生する最大加速度を予測したところ、動的特性の方が高い精度で予測できることを立証している¹⁰⁾。これに関連してLiらはポリエチレンフォームについての静的特性および動的特性について論じている¹¹⁾。さらに中嶋らは、板厚、総使用量、材料費の観点からの最適緩衝設計手法の提案として、突起物を有する製品への応用として突起物の長さとの関係による検証¹²⁾、段差を有する製品への適用に関する検証¹²⁾、製品の重心位置が緩衝材の形状に及ぼす影響¹³⁾、という観点から報告している。緩衝材の特性把握のためには多くの試験回数を要し、使用資材も膨大になるため、Burgess¹⁴⁾、Sekら¹⁵⁾、川原ら¹⁶⁾の研究に見られるような、実物試験を省略化できるような手法の提案がなされている。近年実施した実物試験の事例として、Wangらによるハニカムペーパーボードへ低レベルの繰返し衝撃を与えた際の振動伝達率への影響の検証が存在する¹⁷⁾。

既往研究をまとめると、緩衝材に用いられる新たな素材が技術発展とともに登場し、その材料についての一定の手法による評価が報告されている。その中でも、落下衝撃か

ら包装物をいかに保護するかにより重点が置かれており、したがって、緩衝材の特性については、最大加速度・静的応力線図を得るための実物を使った試験をいかに省力化でき、かつ再現性の高い手法を構築するかに焦点を当てた研究が比較的盛んである。ただし、包装物の脆弱性は緩衝材を評価する上でも、その評価を包装設計へ適用する上でも事前情報として極めて重要であるが、その取得の困難性も既往研究では共通認識となっている。この点については文化財も全く同様である。

そして、緩衝材の振動に対する応答特性を評価しようとした場合、国内には振動についての緩衝材の評価方法としての JIS 規格は存在しない。振動特性試験方法としては通常行われている手法として、静的荷重をうけた状態の緩衝材に対して、振動試験機で一定の加速度の振動周波数を変化させて加えた際、緩衝材上の振動の伝達率を計測する方法が存在する¹⁸⁾。それによって、得られるのが、Fig. 7-1-2 のような伝達係数・周波数線図¹⁹⁾である。横軸方向に周波数が変化した場合に現れる伝達率の変化を縦軸にプロットしたものであり、ピークに該当する周波数が緩衝材の共振周波数になる（A: 増幅点、B: 共振点、C: 減衰点）。先ほど述べた落下衝撃への保護の検討で緩衝材への単位面積当たりの静的荷重が決まるが、その状態で緩衝材の共振周波数が内容物の共振周波数と一致してしまうと共振現象が発生してしまう。それを回避するために確認すべき特性という位置づけになる。試験方法から明らかな通り、通常、この特性（緩衝材の共振周波数）は緩衝材の板厚、静的荷重によって定まる²⁰⁾。

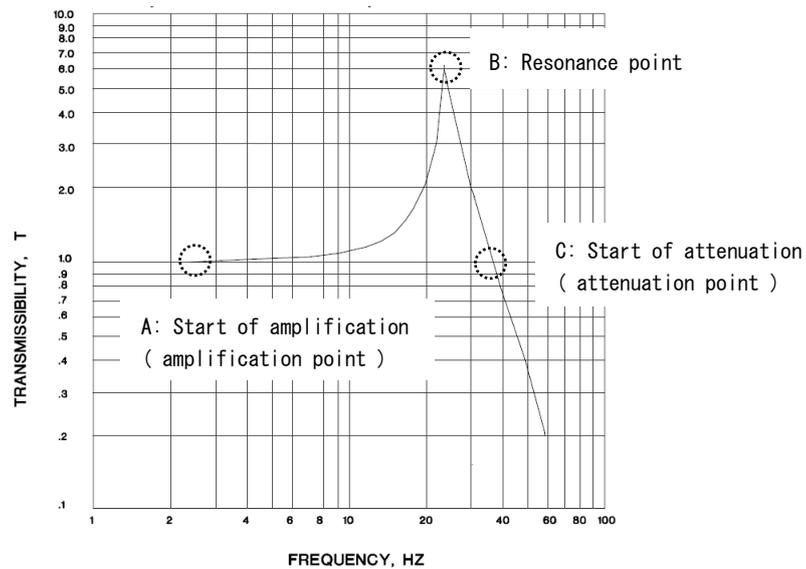


Fig. 7-1-2 伝達率・周波数線図の例¹⁹⁾

こうしたプロセスを経て最終的には静的荷重、緩衝材種類を調整した包装設計が実現する。これは科学的根拠に基づいて確立された方法論であるといえる。

しかしながら、輸送包装分野における上記プロセスでは、想定する落下高さ、すなわち想定している加速度は文化財輸送時に発生する加速度と比較するとあまりに大きい。例えば、Table 7-1-1 に示すような家電製品の（暫定）許容加速度基準²¹⁾を参照すると、前章までに登場した加速度レベルよりもはるかに大きいことが明確である。

Table 7-1-1 家電製品の（暫定）許容加速度基準の一例²¹⁾

Acceptable acceleration (G)	Products
25	Oil heater
30	Refrigator, System computer, Vending machine, Water heater
35	Printer
40	Monitor, Fax, Copy machine, Battery
45	Compact fluorescent lamp
50	Air conditioner, TV, Dehumidifier, Microwave machine, Clothes dryer
60	Laundry machine, Laptop PC
70	Fluorescent lamp equipment
80	Heat retaining pot, heat retention kettle, kotatsu, Torster, Mixer, Fan
over 100	Hear dryer, Iron, Cleaner, Hot carpet, Mobile phone, Ventilation fan, Light bulb, Fluorescent lamp, Button battery

文化財輸送において、落下衝撃に対してだけでなく、振動への対策も同時に行う場合には今回のように、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細かく把握しておくことは重要であると考えます。

そうした観点からの研究も少しずつ進んでおり、文化財の中でも特にキャンバスに描かれた絵画作品については、1980年代頃から梱包技術や輸送環境に関する研究が比較的盛んに行われている²²⁻²⁷⁾。近年、Lauchili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試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た場合、例えば、衝撃吸収に最適な静的荷重を選択すると、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²⁸⁾。また、輸送関連ではないが、文化財近傍で音楽コンサート²⁹⁾や大規模な工事³⁰⁾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、ワイヤーロープ防振器を組み込んだ展示台の提案も論じられている。文化財は置かれている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³¹⁾。

しかし、輸送包装の分野では比較的、落下衝撃への対策が重視されている傾向があり、緩衝材の振動特性把握はユーザー側が自主的に試験をせねば必要なデータが揃わないという背景がある²⁰⁾。そして上記の通り、文化財の梱包においては落下衝撃だけでなく、同時に共振対策も正確に行わねばならない。

本章では、まず文化財梱包に使用される緩衝材について、文化財輸送環境の加速度レベル範囲の時に、その特性がどのように変化するかを把握するための手法の構築について検証する。そして、得られた緩衝材の特性を梱包設計へ適用するための方法を提案する。

7. 2 計測

7. 2. 1 緩衝材

緩衝材の特性把握のために加振試験を行うこととした。一例として選択した緩衝材の詳細については Table 7-2-1 に示す通りである。

Table 7-2-1 緩衝材の主要諸元

品名	サンテック®フォーム 35
製造者	旭化成株式会社
主原料	発泡ポリエチレン
密度	0.032 g/cm ³
板厚	40, 50, 60 mm

サンテック®フォームは特に緩衝材用に開発された発泡ポリエチレン（押出し発泡体）である³²⁾。そのうち、サンテック®フォーム 35 は軟質の緩衝材に分類され、文化財の梱包に幅広く用いられている（Fig. 7-2-1 から Fig. 7-2-4）。技術資料³³⁾に掲載されている最大加速度・静的応力線図によると、最適加速度値が得られる静的応力範囲が比較的広く、また高応力側でなだらかな曲線となっており（Fig. 7-2-5）、この性質は緩衝材使用量を削減できる（支持面積を小さくできる）効果も持つことを意味する³²⁾。



Fig. 7-2-1 仏像梱包の担架と内箱の間の緩衝材として設置されたポリエチレンフォーム



Fig. 7-2-2 寝かした仏像の下に緩衝材として重ねて設置されたポリエチレンフォーム

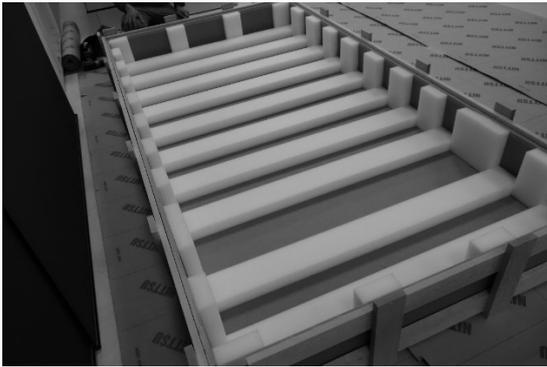


Fig. 7-2-3 木箱の底面に敷かれたポリエチレンフォーム



Fig. 7-2-4 外箱と内箱（木枠）との間に設置されたポリエチレンフォーム

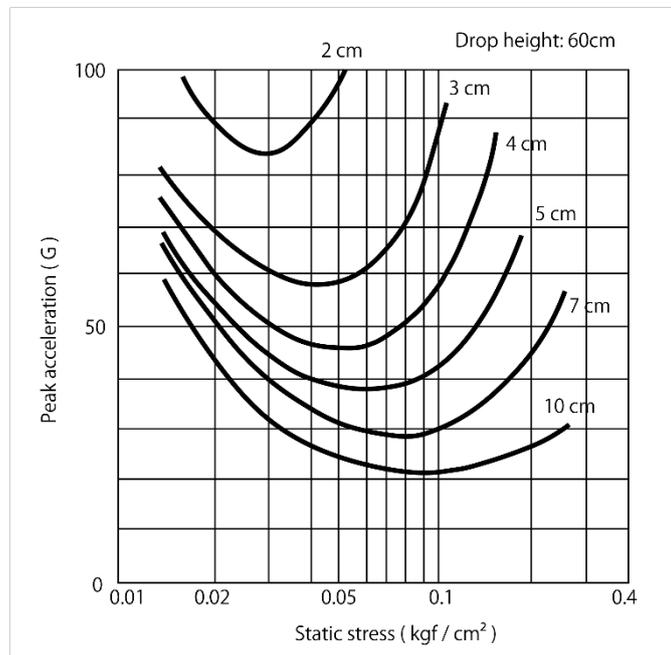


Fig. 7-2-5 サンテック®フォーム 35 の最大加速度・静的応力線図（製品カタログ掲載の線図をトレースしたもの）³³⁾

7. 2. 2 試験仕様

使用設備と加振条件

Table 7-2-2 試験に使用した設備の主要諸元

振動試験装置	株式会社振研 G-8210-1LT-112
デジタル振動コントローラ	株式会社振研 D-57 シリーズ
加速度センサー	Bruel & Kjaer 社 Model 4393

Table 7-2-2 に使用設備の詳細を、Fig. 7-2-6 に試験治具の略図を、Fig. 7-2-7 に外観を示す。静的応力は Table 7-2-3、加振条件は Table 7-2-4 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³³⁾を参照し、緩衝包装に適性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回の加振試験を行うこととなる。全ての入力加速度条件は1G未満と低く、文化財輸送環境の特徴を反映した範囲に設定した。

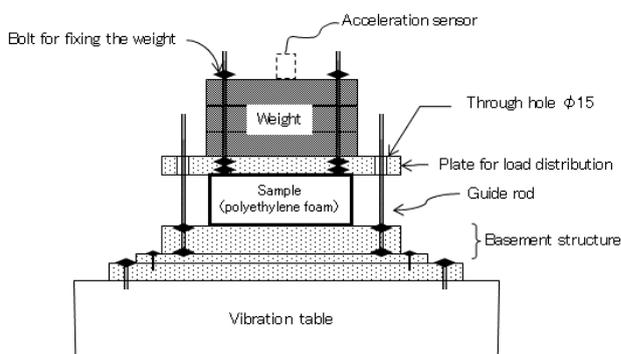


Fig. 7-2-6 試験治具の略図



Fig. 7-2-7 試験現場の概況

Table 7-2-3 試験に用いた静的応力

重量 (kg)	緩衝面積 (cm ²)	静的応力 (kgf/cm ²)
10	400	0.025
20		0.050
30		0.075
40		0.100
50		0.125
60		0.150

Table 7-2-4 加振条件

加振方向	垂直方向
加振周波数範囲	4 Hz - 100 Hz
掃引速度	0.5 Hz/s
掃引回数	1 回 (片道)
入力加速度	0.1 G, 0.2 G, 0.5 G, 0.8 G

7. 3 解析結果と考察

本章では緩衝材の共振周波数の変化を調査するため、まずは加振試験の結果を周波数と伝達率の座標上に静的応力、入力加速度、板厚のバリエーション毎のプロットを行った。代表的なプロットを抽出して Fig. 7-3-1 から Fig. 7-3-3 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 回の加振試験のデータは 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. 7-3-4 として示す。それを 2D プロットに加工して、伝達率をカラーチャートで表現したものが Fig. 7-3-5 となる。

Fig. 7-1-2 で伝達率の増幅が始まる増幅点および減衰が始まる減衰点を示したが、それらと共振点との関係をプロットしたものが、Fig. 7-3-6 から Fig. 7-3-8 であり、計測結果全体について、静的応力、入力加速度、板厚の変化に伴う周波数伝達率の変化を示す。

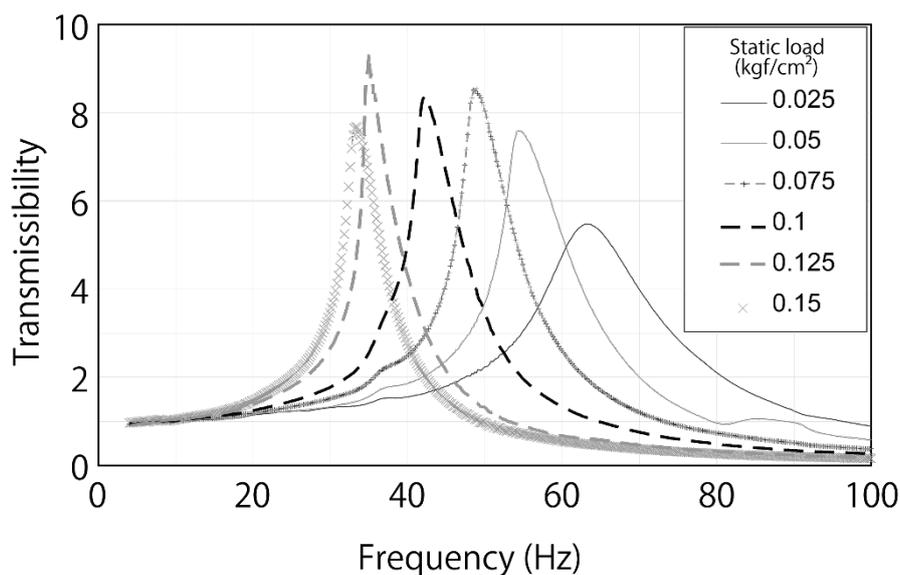


Fig.7-3-1 静的応力毎の周波数変化に伴う伝達率の変化 (板厚 40 mm, 入力加速度 0.1 G)

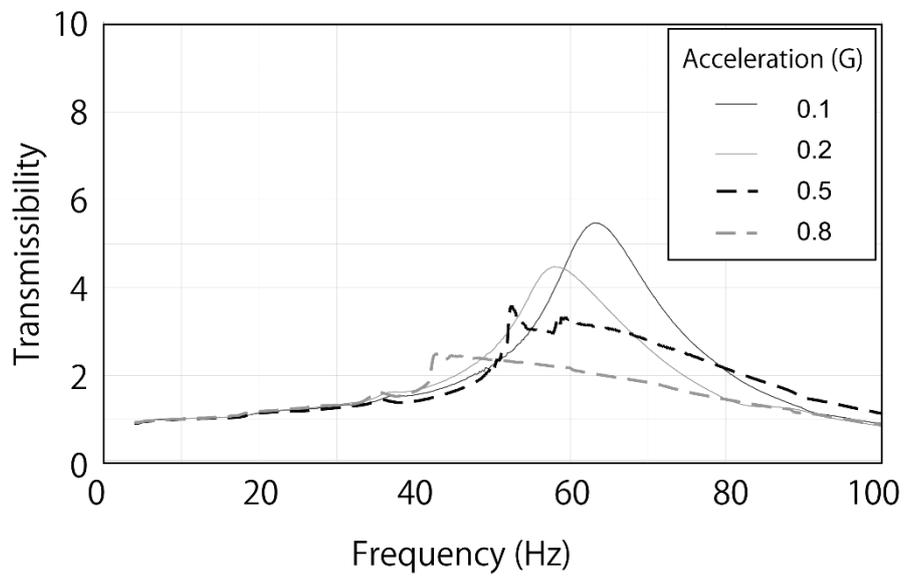


Fig.7-3-2 入力加速度毎の周波数変化に伴う伝達率の変化 (板厚 40 mm, 静的応力 0.025 kgf/cm²)

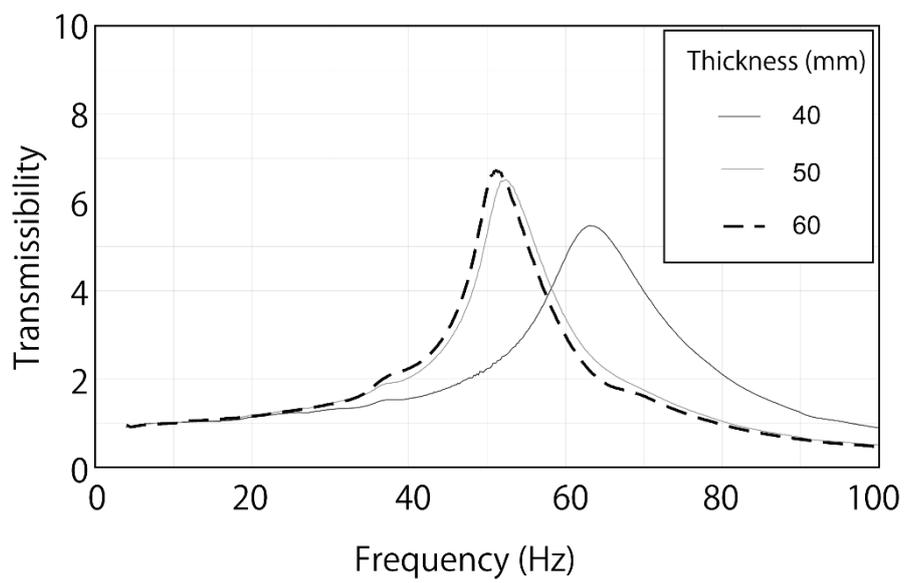


Fig. 7-3-3 板厚毎の周波数変化に伴う伝達率の変化 (入力加速度 0.1G, 静的応力 0.025 kgf/cm²)

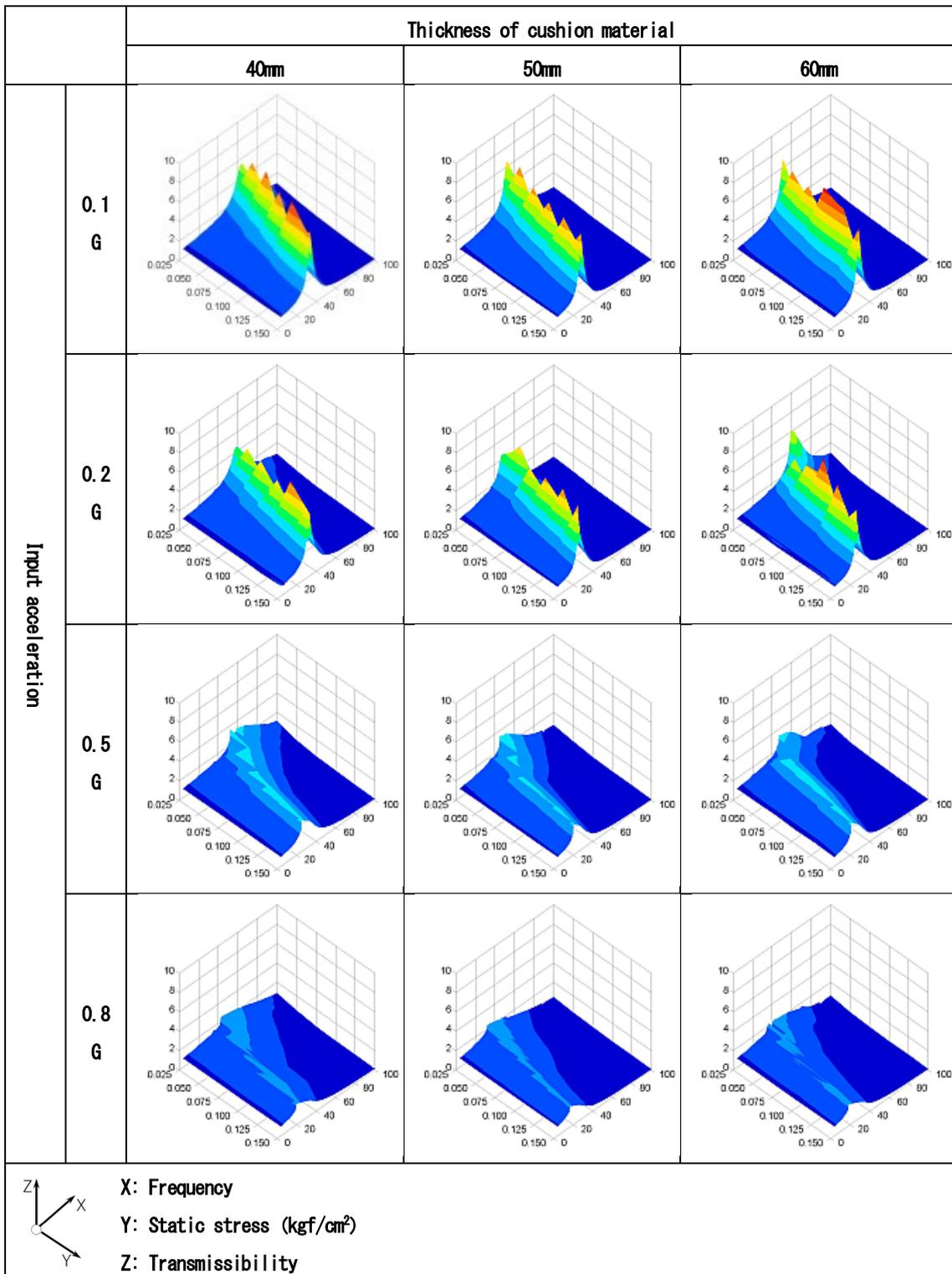


Fig. 7-3-4 試験結果を周波数 (X 軸)、静的応力 (Y 軸)、伝達率 (Z 軸) の 3D 座標上にプロットしてまとめたもの。

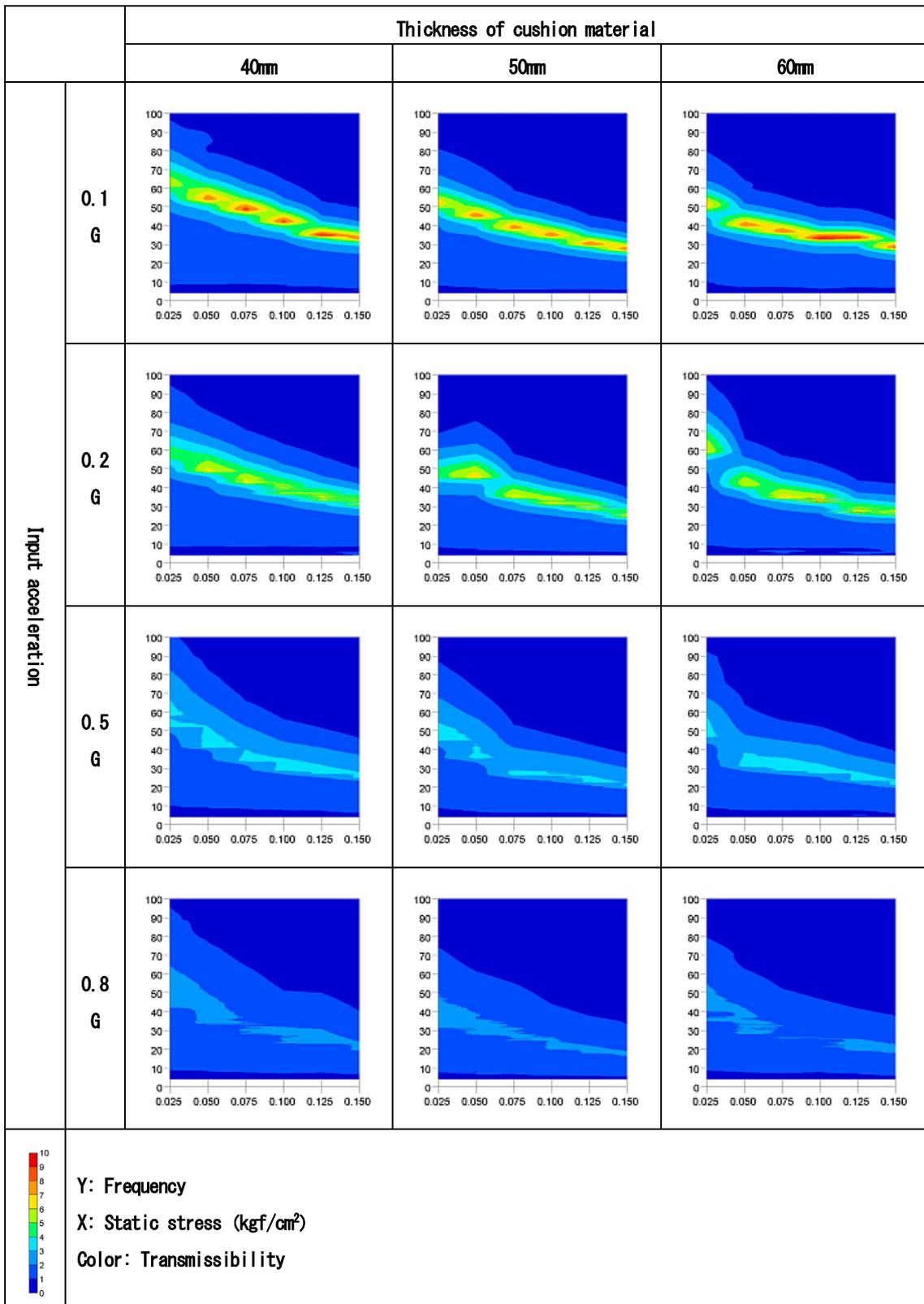


Fig. 7-3-5 試験結果を、静的応力 (X 軸)、伝達率 (Y 軸) の 2D 座標上にプロットし、伝達率の高低をカラーチャートで表現したもの。

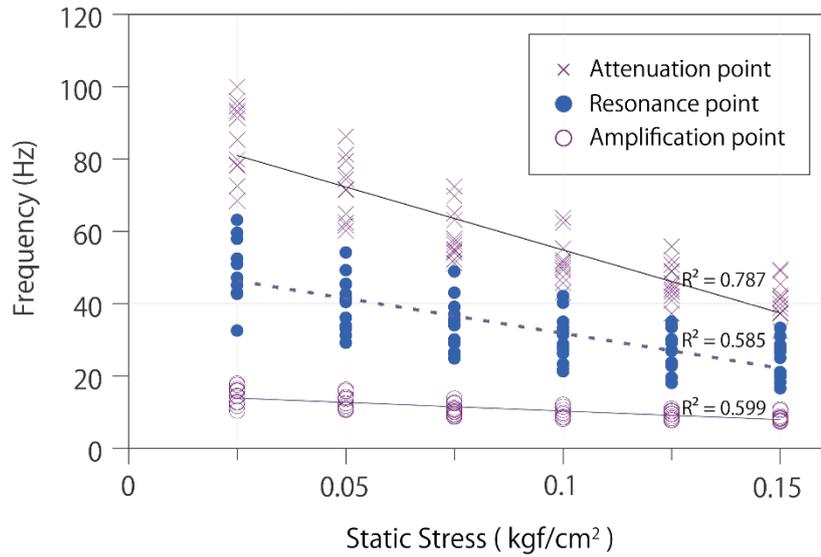


Fig. 7-3-6 ポリエチレンフォームの各静的応力下における増幅点、共振点、減衰点の分布。概ね 30 Hz から 60 Hz に分布する共振点は静的応力の増加に伴い、低周波数側へシフトし、減衰点も同様に変化する。

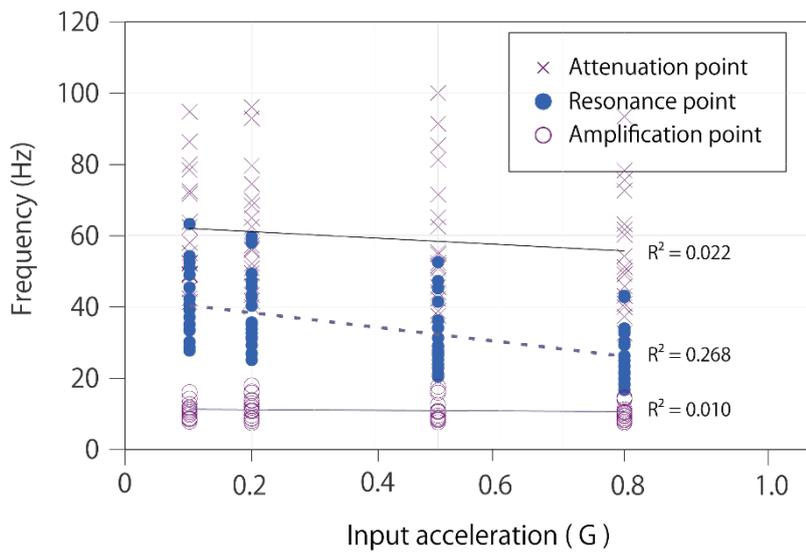


Fig. 7-3-7 ポリエチレンフォームの各入力加速度下における増幅点、共振点、減衰点の分布。共振点は入力加速度の増加に伴い、低周波数側へシフトすることが分かる。

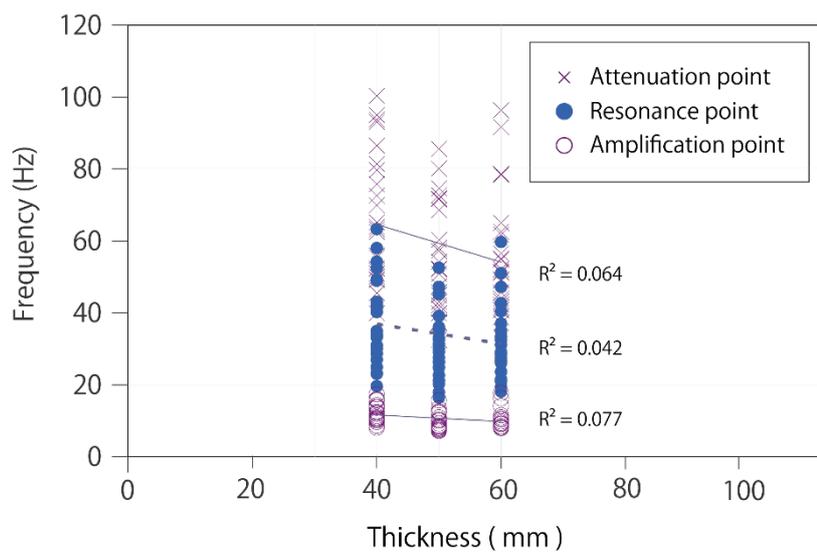


Fig. 7-3-8 ポリエチレンフォームの各板厚における増幅点、共振点、減衰点の分布。板厚の影響はそれほど大きくない。

Fig. 7-3-1 から Fig. 7-3-3 を見ると、既往研究の通り静的応力や板厚が変化することにより、共振周波数の変動を確認できる。今回特に着目している入力加速度についてもその変化に伴って共振周波数が変化することが分かった。どの試験条件においても入力加速度が小さくなるほど共振周波数は高くシフトしていた。また Fig. 7-3-2 に関して、伝達率の変化で見た場合、入力加速度が大きくなると、それに応じて共振周波数における伝達率が急激に低下する現象が見られた。その一方で静的応力 (Fig. 7-3-1) や板厚 (Fig. 7-3-3) が変化しても、共振周波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。伝達率への影響は入力加速度が最も大きいと考えられる。

次に、Fig. 7-3-4 および Fig. 7-3-5 のような切り口で試験結果を見た場合、静的応力が大きく変化するに伴い、なだらかな曲線状に共振周波数が徐々に小さく変化する効果が全体的に共通していることが明確にわかる。ただし、伝達率の変化は静的応力の影響をほぼ受けず、入力加速度が大きくなるにつれて低下するといった先述した傾向であることに変わりはない。

そして、増幅点、共振点、減衰点が各要素から受ける影響について解析するために作図した、Fig. 7-3-6 から Fig. 7-3-8 について考察する。増幅点については、静的応力、入力加速度、板厚ともにあまり影響なくおおむね 10 Hz 付近であった。共振点および減衰点についてはやや特徴ある傾向が見られ、3 要素の中では静的応力がやはり最も大きく影響しており、静的応力の増加に伴い、共振点だけでなく、減衰点も低周波数側へシフトする現象が見られた。入力加速度については、増加に伴い、共振点のみが低周波数側へややシフトする現象が見られ、板厚については顕著な傾向は見られない。基本的には、入力加速度が大きいほど共振周波数は小さい領域へシフトする。ただし、周波数の変動範囲は静的応力の増加に伴い低周波領域へシフトする。また、静的応力が大きい方が減衰点は低周波数側へシフトすることが分かった。

7. 4 緩衝設計の最適化に関するまとめ

前章までによって検証できた文化財の輸送環境データを反映した緩衝材の特性評価試験の手法は本章によって確立できた。本章のまとめとして、試験によって得られた緩衝材特性を用いた梱包設計手法について提案する。

従来通りの基本的な緩衝設計を踏まえて、落下衝撃のような大きな衝撃による損傷を回避するために、最適な静的応力を算出する³⁴⁾。この計算には、緩衝材の最大加速度・静的応力線図を用いる。例えば、仮に最大許容加速度が40 Gであると分かっているものを梱包する際に、前節までの供試体であるポリエチレンフォームの最大加速度・静的応力線図を用いると、板厚5 cmのものだと0.04 kgf/cm²から0.085 kgf/cm²の間で静的応力を調整せねばならない (Fig. 7-4-1)。また、同図から板厚が7 cm、10 cm と大きくなるにしたがって、静的応力の調整幅は広がり、曲線の極小点はより低い加速度を示すようになることも分かる。つまり、板厚が大きいほど緩衝効果は高まる。ただし、梱包箱のサイズを無限に大きくすることもできないため、現実的に使用可能な板厚の範囲内で有利なものを選び、選ばれた板厚の緩衝材へ最適な静的荷重となるように梱包設計を工夫することになる。

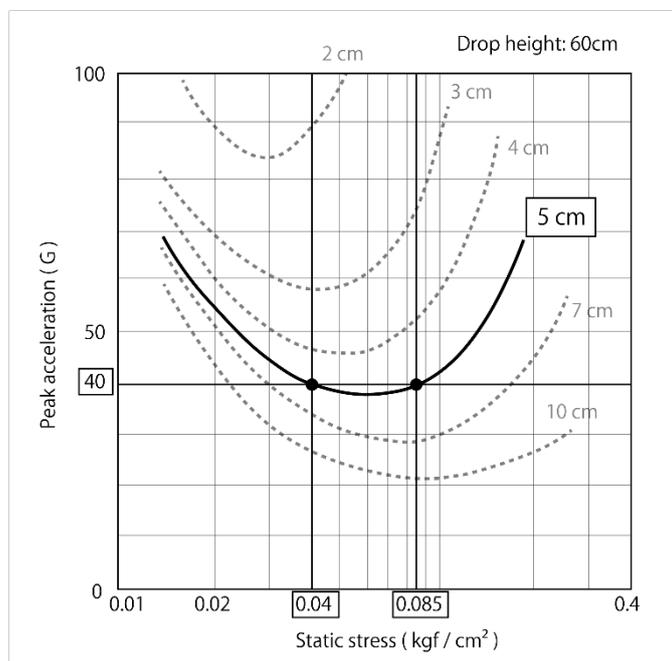


Fig. 7-4-1 サンテック®フォーム 35 の最大加速度・静的応力線図 (製品カタログ掲載の線図³³⁾をトレースしたもの)。許容加速度40 Gとした場合、板厚5 cmの製品を用いた時のそれを下回るための静的応力の範囲。

一方、振動対策として防振効果をより発揮させるためには、別の情報が必要となる。それらの求め方については前節までの試験によって方法論を提示したが、周波数毎の伝達率が梱包条件に伴いどのような変化を見せるのかといった情報を把握しておく必要がある。例えば、Fig. 7-4-2 をある緩衝材の伝達率・周波数線図とする。伝達率が1を上回る周波数域では入力した振動が増幅してしまい、特に共振点では最大の伝達率に到達してしまう。このような伝達率が1を超える範囲を本論文では共振域と呼ぶこととする。共振点で最大の伝達率を示した後は周波数の推移に従って、伝達率は徐々に低下し、やがて1を下回る。伝達率が1を下回ると、入力した振動は減衰し、緩衝材は防振効果を発揮することになる。このような伝達率が1を下回る範囲を本論文では防振域と呼ぶこととする。以上から、効果的に防振するためには、輸送機関上で生じる振動を緩衝材の防振域で受けて減衰させることが必要である。また、梱包する文化財も緩衝材同様、物質であるため振動特性を持っており、文化財の共振点も存在する。したがって、輸送機関上で発生する振動の減衰と同時に、緩衝材の共振点が文化財の共振点と重複することによる共振も回避せねばならない。つまり、文化財の共振周波数も緩衝材の防振域に収まるような緩衝設計が望ましい (Fig. 7-4-3)。しかし、文化財の共振周波数を計測するのは非常に困難である。そこで、緩衝材の防振域がより大きくなる、すなわち、より広い周波数範囲で伝達率が1を下回るような条件に整えるのが現状の最適解であると考えられる (Fig. 7-4-4)。

上記の緩衝設計工程においては、本章で検証した緩衝材の試験法によって緩衝材の特性を得ることが大きな意味を持つ。そこで、本章で一例として供試体に採用したポリエチレンフォームの試験結果を引用して具体的な緩衝設計工程を検討する。様々な加振条件を全て含めて試験結果をまとめると、供試体の共振周波数は概ね 30 Hz から 60 Hz の範囲内で変動することが分かっている (Fig. 7-4-5)。仮に、梱包対象とする文化財の共振周波数や輸送機関上で卓越した振動発生がこの周波数範囲であることが明らかな場合、この緩衝材の使用を止めて他の緩衝材を採用するか、別の特性を持つ緩衝材を組み合わせるかのいずれかの選択肢を取らざるを得ない。現実的には、この緩衝材を予定通り使用する場合には上述した通り、防振域が最大化する条件を導き出すことになる。これについても、試験結果から緩衝材への静的荷重が大きいほど共振点が低周波数側へシフトし、すなわち防振域が広がることが分かっているため、静的荷重はなるべく大きい条件を選択する方が有利に作用する。ここで再度、最大加速度・静的応力線図 (Fig. 7-4-1)を確認すると、なるべく大きい静的荷重条件を選択しつつ、衝撃吸収効果も維持するためには、各線図の極小点の静的荷重が大きい板厚の緩衝材がより有利と分かる。したがって、この場合、静的荷重と板厚の双方が大きい条件が最適となるが、静的荷重を大きくしすぎると、最大加速度・静的応力線図の最大加速度（最大加速度・静的応力線図の縦軸の数値）も上昇するため、ある程度の区切りは必要である。後は、梱包箱のサイズ

の制限を考慮して、使用可能な最大板厚の緩衝材に、制限内で最大の静的荷重がかかるような緩衝設計を行えばよい。静的荷重の調整は、例えば緩衝材の使用量を調整、すなわち受け面積を調整することでも容易に実現できる。

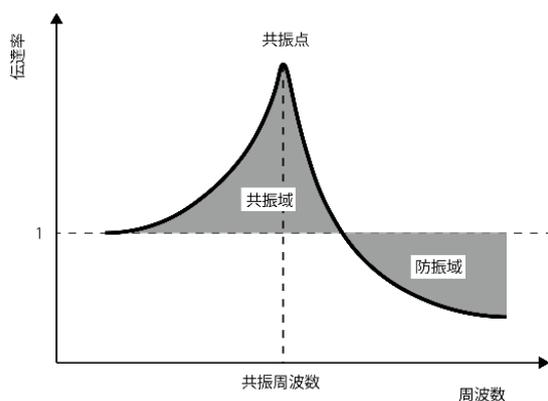


Fig. 7-4-2 ある緩衝材の振動伝達率の入力される振動周波数に対する変化を示した伝達率・周波数線図。

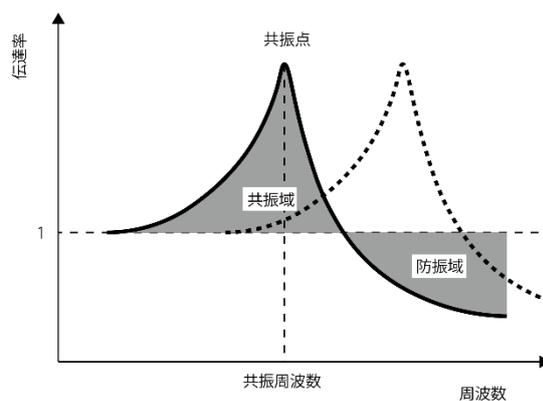


Fig. 7-4-3 仮に点線を梱包する文化財の特性とした場合、その共振点（極大点）は緩衝材の防振域に収まるのが望ましい。

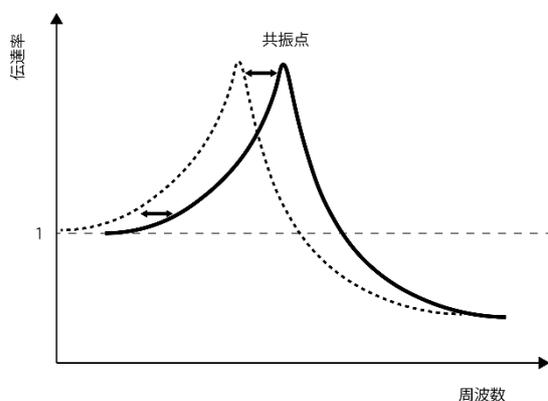


Fig. 7-4-4 緩衝材の防振域をより広い周波数範囲とするためには、特性が左側の点線にシフトする条件に整える必要がある。

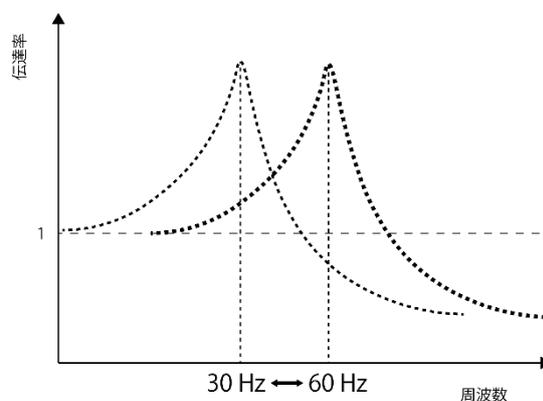


Fig. 7-4-5 供試体の共振周波数は、前節の試験から概ね 30 Hz から 60 Hz の範囲内で変動することが判明した。

本章では、文化財の梱包に現在最も高い頻度で使用されていると考えられるポリエチレンフォーム製の緩衝材について、振動応答特性を把握するための方法論の構築を行なった。通常の文化財輸送環境中で発生する加速度レベルはおおむね1 G以下であり、その範囲の加速度で緩衝材の加振試験を実施した。その結果、静的応力、板厚、入力加速度の3要素を変化させた際の、緩衝材の共振周波数の変化の様子をとらえることができた。既往研究の通り静的応力や板厚が変化することにより、共振周波数の変動が確認されたほか、入力加速度の変化に伴っても共振周波数が変化することが分かった。文化財輸送において、落下衝撃に対してだけでなく、振動への対策も同時に行う場合には今回のように、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細かく把握しておくことは重要であると考えられる。本章で採用した手法によって様々な緩衝材の特性把握が可能である。そして把握できた緩衝材の特性を梱包設計に取り入れることで科学的な理論を伴う梱包が実現できる。

引用文献

- 1) JIS, 包装用緩衝材料-評価試験方法, JIS Z 0235 (2002)
- 2) 松本政雄, 緩衝包装, JIS, **7** (6), pp.270-275 (1954)
- 3) 福尾信平,小塚健, 包装の緩衝について, 日本機械学会誌, **60** (462), pp.712-718 (1957)
- 4) 森位 正直, 緩衝材料について, 生産と技術, **10** (3), pp.33-34 (1958)
- 5) 森下 基次, 包装貨物の振動衝撃と緩衝方法, 計量管理, **8** (2), pp.21-23 (1959)
- 6) 小山 清, 防振・緩衝材としての有機気ほう体, 日本ゴム協会誌, **48** (8), pp.487-493 (1975)
- 7) 巻口 浩, 包装材料, 高分子, **26** (9), pp.643-649 (1977)
- 8) 赤澤 正久, 大竹 望,工藤 邦男, 気泡緩衝材の性能に及ぼすリサイクルの影響, 日本包装学会誌, **10** (6), pp.289-295 (2001)
- 9) 清水一弥,田中宏幸, 精密機器の防振装置 (信頼性, 安全性を高める最近の制振・衝撃吸収材料とその活用例< 特集>)--(活用例編), 工業材料, **43** (11), pp.p52-56 (1995)
- 10) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 包装用緩衝材の動的及び静的特性評価, 日本包装学会誌, **2** (2), pp.85-95 (1993)
- 11) Li Guang, Rouillard Vincent, Sek Michael A., Evaluation of Static and Dynamic Cushioning Properties of Polyethylene Foam for Determining Its Cushion Curves, Packaging Technology and Science, **28** (1), pp.47-57 (2015)
- 12) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 最適緩衝設計手法の応用 第 1 報: 突起物を有する製品への適応, 日本包装学会誌, **3** (3), pp.141-151 (1994)
- 13) 中嶋 隆勝, 寺岸 義春, 他, 貨物落下に対する最適緩衝設計手法の応用 第 3 報: 製品の重心位置が緩衝材の形状に及ぼす影響, 日本包装学会誌, **4** (4), pp.274-286 (1995)
- 14) Burgess Gary, Generation of cushion curves from one shock pulse, Packaging Technology and Science, **7** (4), pp.169-173 (1994)
- 15) Sek Michael A., Minett Merv, 他, A new method for the determination of cushion curves, Packaging Technology and Science, **13** (6), pp.249-255 (2000)
- 16) 川原 拓, 斎藤 勝彦,瀬戸上 裕, 緩衝包装材料の性能評価に関する研究, 日本包装学会誌, **17** (3), pp.179-183 (2008)
- 17) Wang Zhi-Wei, Wang Li-Jun, 他, Influence of Low-Intensity Repeated Impacts on Energy Absorption and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard, Packaging Technology and Science, **29** (11), pp.585-600 (2016)
- 18) 松田 考司, 材料試験方法, 輸送・工業包装の技術, フジ・テクノシステム, pp.737-756 (2002)
- 19) MIL-HDBK-304C Package Cushining Design, U.S. Department of Defense, (1997)
- 20) 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)

- 21) 喜本 誠, 家電品包装の最近の取り組みについて 2(4)環境対応包装の基準となる包装評価システム, 電機, **667** pp.50-54 (2004)
- 22) 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)
- 23) Staniforth S., Packing: A Case Study, National Gallery Technical Bulletin, **8** pp.53-62 (1984)
- 24) Green Timothy, Shock and Vibration-Test Results for Framed Paintings on Canvas Supports, ICOM committee for conservation: 8th triennial meeting, Sydney, Australia, 6-11 September, 1987. Preprints, Getty Conservation Institute, pp.585-596 (1987)
- 25) Art in Transit Studies in the Transport of Paintings, (Mecklenburg Marion F.), National Gallery of Art, 0-89468-163-X, (1991)
- 26) Lasyk Łukasz, Łukomski Michał, 他, Vibration as a Hazard During the Transportation of Canvas Paintings, Studies in Conservation, **53** (sup1), pp.64-68 (2008)
- 27) 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)
- 28) 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)
- 29) 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)
- 30) 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)
- 31) Thickett David, Vibration Damage Levels for Museum Objects, pp.90-95 (2002)
- 32) 東レリサーチセンター, 発泡ポリエチレン緩衝材の開発動向と展望 (A)旭化成工業の「サンテックフォーム」, 輸送包装技術と材料, (東レリサーチセンター調査研究部門), pp.208-212 (1998)
- 33) 旭化成株式会社, サンテックフォーム技術資料, <https://www.asahikasei.co.jp/infofoam/suntecfoam/feature/flexible.html>, (アクセス日: 2018年5月1日)
- 34) Richard Mervin, Foam Cushioning Materials: Techniques for Their Proper Use, Art in transit: Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art, pp.269-278 (1991)

第8章 文化財の輸送履歴を評価するための指標

8.1 はじめに

輸送によって文化財には大小の疲労が蓄積していると考えられる。例えば、1回の輸送で文化財が損傷しなかった場合に、それと同一の輸送環境で100回輸送しても損傷しないとは言い切れない。もしも、100回目に損傷してしまった場合は、過去99回の輸送が影響していることが推測される。現実的には、近年、文化財輸送の頻度は上昇傾向にあり、輸送に伴い文化財への蓄積疲労もより一層考慮せねばならない時代へ突入しており、文化財への蓄積疲労を現象として認識しておくこともまた重要である。

したがって、蓄積疲労が発生しているのであれば、少なくとも輸送された際の輸送環境をその文化財へ履歴として残しておかねばならない。しかし、現状では輸送環境データを使った輸送履歴を表現できる指標が存在しない。仮に、このような指標が存在すれば、将来的に蓄積疲労の算出法が完成した際に、そこへ指標を代入することで、例えば損傷発現までの残り輸送回数などを推定できる、すなわち、今後の輸送による損傷リスクを見積もることができる。

輸送履歴を評価する指標が重要な意味をもつためには、文化財へ疲労が蓄積する現象の存在が前提となるため、蓄積疲労現象を確認しておく必要がある。本章ではまず、文化財への蓄積疲労現象の発生を確認する。文化財の素材に蓄積疲労現象が発生するという考察の根拠を強化するために、供試体を用いた加振試験の結果を引用し、文化財輸送の解析結果と合わせて、輸送後の文化財へ輸送履歴を残すための指標を策定する。

前章でも触れたが、工業製品については衝撃加速度に関する耐性に関するある程度の目安が存在する¹⁾(Table 8-1-1)。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。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。前節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取り扱う。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(Fig. 8-1-1)。

Table 8-1-1 軍用設備と工業製品の脆弱性指標としての最大許容加速度¹⁾

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



Fig. 8-1-1 輸送によって前脚部分を損傷した埴輪

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ーリーによる牽引工程 (Fig. 8-1-2) において非常に大きな加速度が検知されており²⁾、加速度変化の波形 (Fig. 8-1-3) から、ピーク加速度で 10 G 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 Grms は、1.605 G であった。



Fig. 8-1-2 カナダの空港内でのドーリーによる牽引工程

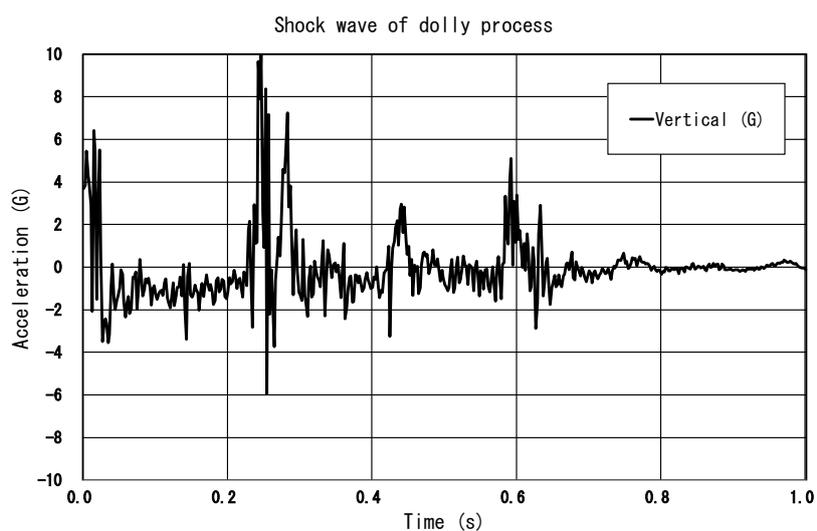


Fig. 8-1-3 空港内のドーリー輸送工程で生じた最大加速度を含むイベントの加速度波形 (垂直方向)

非常に具体的かつ貴重な事例であるが、この事例から直接的に当該文化財の脆弱性を評価するには未だ検討せねばならない項目が多く、極めて難しい。

まず、どの瞬間に文化財が破損したかが実際のところ不明確である。輸送完了後にデータを解析したところ、最大の振動が発生した工程がドーリーによる牽引時であったことは確かであり、現状では可能性としてはその工程が最も損傷しやすい輸送環境であったという表現にとどまる。では、ドーリーによる牽引時に破損したことが事実であれば、この時の振動が損傷を引き起こすレベルという評価に繋がる。その場合の適用範囲としては、あくまでも当該埴輪に関して同一の梱包を行った際の評価にとどまる。輸送される文化財の素材や構造が異なれば当然強度も変わるため、事例から得られた計測値から脆弱性評価の方法論の一般化を試みる場合には、個々の実輸送で得られる数値だけでは方法論構築のための情報として圧倒的に不足している。

また、埴輪の損傷を正確に診断すると、破片接合部が再剥離した症状であり、埴輪の主要素材である、焼成土自体の強度の問題とは異なる。埴輪のこの保存状態であれば、当然断続的に受け続けた振動の影響も無視できない要因である。ただし、現状、文化財の輸送は開梱時点での結果論で適否が評価されており、その過程が評価対象となることはない。文化財の輸送はエンドユーザーに届けられて完了する商品輸送とは異なり、ある文化財が存在する限り同じ文化財が何度も輸送を経験する可能性がある、という点で特殊性を持つものである。この特殊性を鑑みると、活用（輸送）の度に文化財の寿命を僅かずつ（損傷した場合には急激に）消化（劣化）しているという見方もできる。あるいは、輸送による劣化進行に関しては輸送環境において閾値が存在し、それを越えなければ影響はないと考えるべきなのか。これは非常に重要な課題であり、文化財を永久的に保存せねばならない使命を持つ博物館はこの課題とどう向き合うべきかを考えておかねばならない。上記埴輪の事例では、不幸にして損傷が発生したのはカナダからの復路輸送中であったが、往路輸送中に受け続けた振動は埴輪の前脚接合部に何らかの疲労を与えていなかったのかどうかは検討せねばならない。

以上の事例から、今後同様の損傷発生を予防するためにも、輸送された際の輸送環境をその文化財へ履歴として残す必要性と、そのための指標の策定が必要であると言える。まずは、指標の根拠となる蓄積疲労現象を確認するための試験について次節で検証する。

8. 2 蓄積疲労現象の確認試験

蓄積疲労現象の確認を行うためには、輸送包装分野における、工業製品の脆弱性評価手法を参考にする必要がある。以下で詳説する振動試験と衝撃試験はその手法に使われている試験方法である。

8. 2. 1 振動試験

一般的な試験としては、製品を振動試験機に固定して加振し、入力振動に対する応答を計測する手法が用いられる。本来は、輸送中に発生する振動を受けた製品が損傷するのを回避するために、まず製品の共振周波数を明確にして、輸送中に共振を生じないように梱包設計するための試験である。本章では、この試験方法を、繰り返し振動によって損傷するかどうかを調査する目的に叶うようにアレンジした。したがって、上記のような通常の振動試験ではなく、損傷が発生するまで加振を続けるといった手法を供試体に適用する。この手法は振動を加えた製品には疲労が蓄積しており、その蓄積がある閾値を超えた際に損傷が発生するという、蓄積疲労に起因する損傷という概念に基づくものである。試験規格としては材料の疲労特性を把握するための疲労試験に関する「金属系生体材料の疲労試験方法 (JIS T 0309:2009)」³⁾に定義などが記載されている。この規格自体は輸送包装に用いるものとは異なるが、この考えを応用した輸送包装分野における蓄積疲労に関する既往研究が存在するので、まず以下にその現状を述べる。

輸送包装分野における蓄積疲労を考慮した包装設計に関する研究は特に青果物輸送について盛んに行われている。古くは岩元らによるレタスの振動特性と損傷の関係性に着目した報告^{4) 5)}があり、イチゴ⁶⁾、二十世紀梨⁷⁾についても研究されている。それらは金属疲労を評価する際に、疲労破壊が発生する条件に用いられる関係式、

$$N_i \cdot S_i^\alpha = \beta \quad (\text{Eq. 8-2-1})$$

N_i : 回数、 S_i : 応力、 α と β は試験体固有の数値

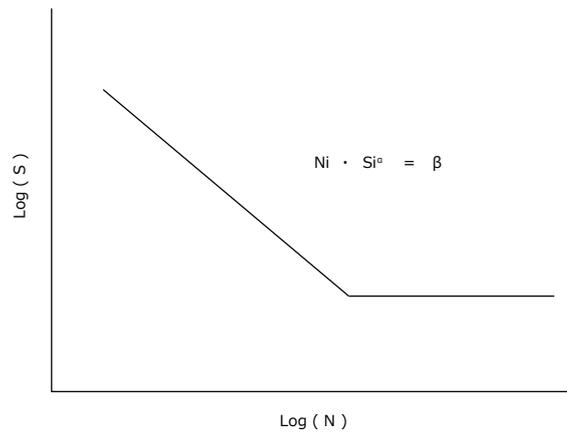


Fig. 8-2-1 S-N 曲線⁸⁾

から得られる S-N 曲線 (Fig. 8-2-1) は、式 (Eq. 8-2-1) 中の応力 S_i を、加速度 G に置き換えれば、輸送する青果物毎に振動試験を行い、その結果損傷の有無を判定していくことで、描くことができるという考え方に着目したものである。この理論に従って河野らは試験を行い、イチゴ、レタス、ブドウ、モモ、梨の S-N 曲線を描くのに必要な定数である α と β がまとめられている⁸⁾。その後、打田⁹⁾、白田ら¹⁰⁾によってイチゴの輸送に関する研究成果が公表されている。これらは振動試験を行った状態（青果物は包装された状態）における S-N 曲線に関する報告であり、包装形態が変われば、それに伴い S-N 曲線も変化するため、改めて検証が必要である点には注意せねばならない。ただし、青果物については 1 点毎に包装を変えることはあり得ないため、新たな包装形態が登場してもその形態で試験を実施すればまとまった数量の青果物輸送に対する評価が可能であると考えられる。

こうした S-N 曲線を用いた理論については、中嶋らは、Grms と時間 (T) の積が輸送貨物に蓄積された疲労であるという前提から、

$$T \times \text{Grms}^\alpha = \beta \quad (\text{Eq. 8-2-2})$$

によって蓄積疲労の目安を立てることが可能であるとしている¹¹⁾。その後、劉らは手押し台車による輸送環境を、電気部品で一般的に用いられる $\alpha=4$ を代入して蓄積疲労で評価している¹²⁾。

蓄積疲労の概念は、徐々に劣化していく文化財あるいは何度も輸送を繰り返すことで劣化が進む文化財の現状の保存状態を評価するのに適している。したがって、本章では供試体の加振試験を行い、それによって S-N 曲線が獲得できることの確認を目的とする。

8. 2. 2 衝撃試験

「包装および製品設計のための製品衝撃強さ試験方法 (JIS Z 0119)」¹³⁾には、緩衝包装設計のための製品が許容できる加速度を決定するための評価試験についての記載がある。その際に製品へ加える衝撃パルスは Fig. 8-2-2 に示す台形波であり、再現可能な衝撃試験機が用いられる。縦軸が加速度、横軸が時間を示しているため、台形波を積分して得られる面積が速度変化に該当する。測定器によって計測された加速度が滑らかな波形となるように平準線を引いて整形化した加速度 (Adjustment acceleration) のうち、最大のもは最大整形加速度 (Maximum adjustment acceleration) と呼ばれる。衝撃試験では、製品に台形波を加える毎にその時の速度変化と最大整形加速度を記録し、その都度製品に損傷が発生したか否かを判定する。その結果、速度変化と最大整形加速度からなる座標上に非損傷領域と損傷領域の境界線を引くことができ、それを損傷境界曲線 (DBC: Damage Boundary Curve) と呼んでいる (Fig. 8-2-3)。損傷境界曲線の内側が損傷領域となるため、文化財へ到達する衝撃波の加速度値と速度変化値が損傷領域にプロットされぬような緩衝の工夫を施すことになる。

つまり、損傷境界曲線を得ることによって、製品を包装する際の目標値が定まり、無駄のない緩衝設計を実現することにつながる。この手法はそのまま供試体に適用可能であるため、本章では既存の規格に則り実施することとした。

なお、近年、北澤が中心となって、青果物に対して繰返し衝撃による S-N 曲線による評価が可能であることが確認され、さらに、従来は振動試験による S-N 曲線では、入力したピーク加速度値 (PAcc) とその回数 (N) のみが構成要素となっていたところ、繰返し衝撃による評価では、各衝撃波パルスの速度変化 (Vc) 要素を加えた、PAcc、N、Vc の 3 要素を考慮せねばならないという理論が構築された¹⁴⁻¹⁷⁾。つまり、先述した衝撃試験仕様では、単発の衝撃波を入力した際に損傷する条件を求めるに過ぎなかったが、そこに繰返しという概念を導入すると衝撃試験においても蓄積疲労との関連性を検討できることになる。この理論については、本章での衝撃試験を実施した結果の解析段階に適用して評価に用いることとした。

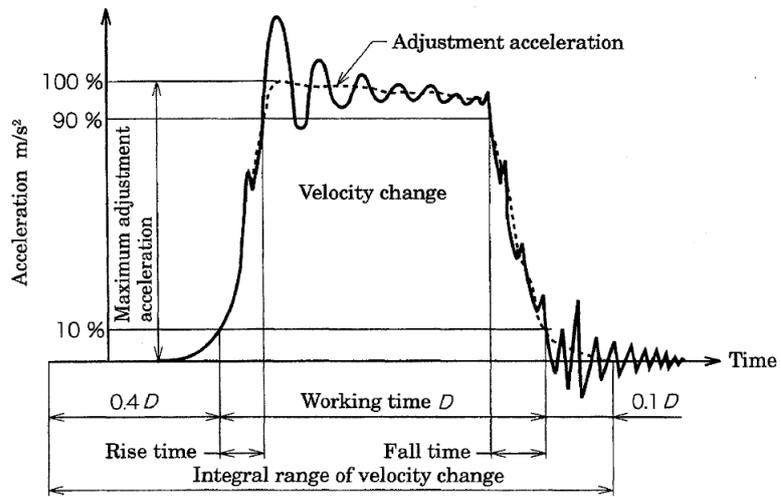


Fig. 8-2-2 衝撃試験に用いられる台形波の衝撃パルス¹³⁾

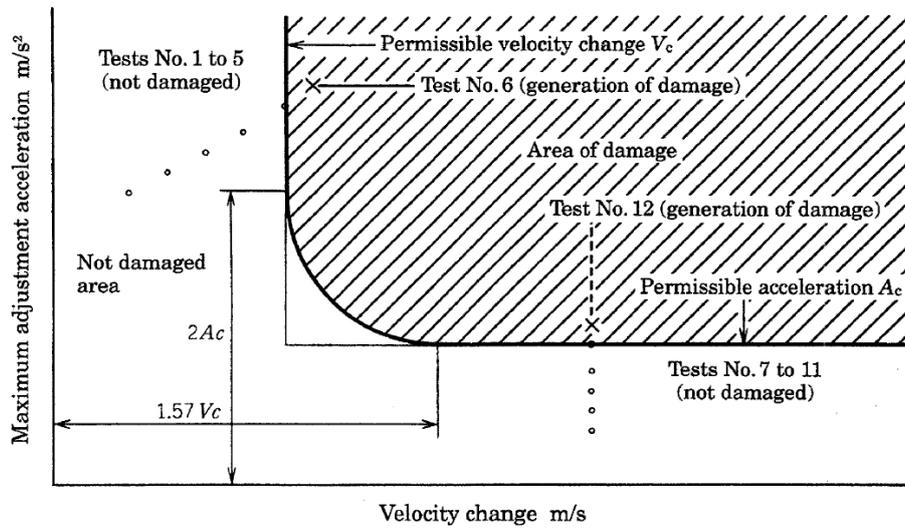


Fig. 8-2-3 損傷境界曲線¹³⁾

8. 2. 3 試験設備

供試体として選択した素材は Fig. 8-2-4 に示す凝灰岩(大谷石 / 栃木県宇都宮市大谷町産)である。加工性に優れる反面、岩石の中では比較的脆弱であるため表面の剥落など輸送において慎重さを求められる素材である。文化財の素材としても用いられる。供試体として比較的均質なものが多く入手できる状況であったことから供試体として選択した。供試体は円柱状をしており、サイズは径が 31.5 mm で長さが 60 mm である。

Fig. 8-2-5 は供試体を各種試験装置へ固定するための治具である。治具は鉄製で、上蓋に該当する部分の重量は 7 kg である。振動試験と衝撃試験では供試体にある程度の応力を掛けておく必要があり、本試験では上蓋重量が供試体上面へ均一に荷重されるように固定した。



Fig. 8-2-4 凝灰岩供試体
(直径: 31.5 mm, 長さ: 60 mm)

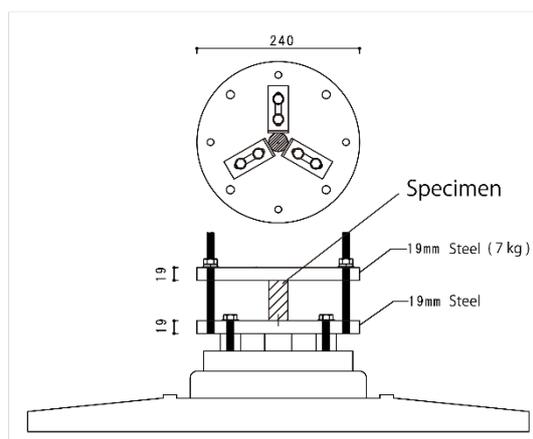
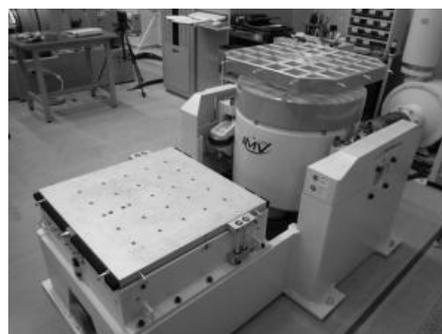


Fig. 8-2-5 治具の略図

Fig. 8-2-6 は使用した試験装置の外観図である。Table 8-2-1 は各装置の主要諸元をまとめたものである。これらの装置は振動試験および衝撃試験の両方に共通して使用した。なお、供試体への入力は、振動試験では正弦波（垂直方向）を、衝撃試験では台形波（垂直方向）を用いた。



(a) 大型加振試験機



(b) 中型加振試験機

Fig. 8-2-6 試験に使用した機器

Table 8-2-1 機器の主要諸元

		(a)	(b)
Max vibration force (kN)	Sine	35	16
	Random	28	11.2
	Shock	87.5	32
Frequency range (Hz)		3 - 2200	3 - 3000
Max acceleration (m/s ²)		1060	1250
Max velocity (m/s)		2	2.2
Max displacement (mm)		60	51
Load weight (kg)		350	300

8. 2. 4 解析結果と考察

振動試験では加速度を一定に保ち、供試体に対して垂直方法に正弦波を加振し続けた。供試体が破損した際に加振を停止し、破損までの振動の繰返し回数を記録する作業により、最終的に加振に用いた加速度と破損するまでの加振回数の組合せが得られる。加振試験においては、供試体の破損についての判断は目視により行ったが、繰返し回数が 200×10^4 回まで加振しても破損が発生しない場合は、破損条件ではないと判断し、加振を終了した。得られた結果を Table 8-2-2 にまとめた。

Table 8-2-2 供試体の加振試験結果

No.	Acceleration (G)	Number of cycles	Observations
(1)	65	7×10^4	Damaged
(2)	60	400×10^4	Damaged
(3)	57	100×10^4	Damaged
(4)	50	147×10^4	Damaged
(5)	45	844×10^4	Damaged
(6)	30	200×10^4	No damaged
(7)	20	200×10^4	No damaged

この結果をプロットした結果が Fig. 8-2-7 であり、繰返し回数と入力加速度の関係が曲線状に表現される、S-N 曲線が得られた。振動による蓄積疲労現象の結果、損傷に至ることを確認することができた。

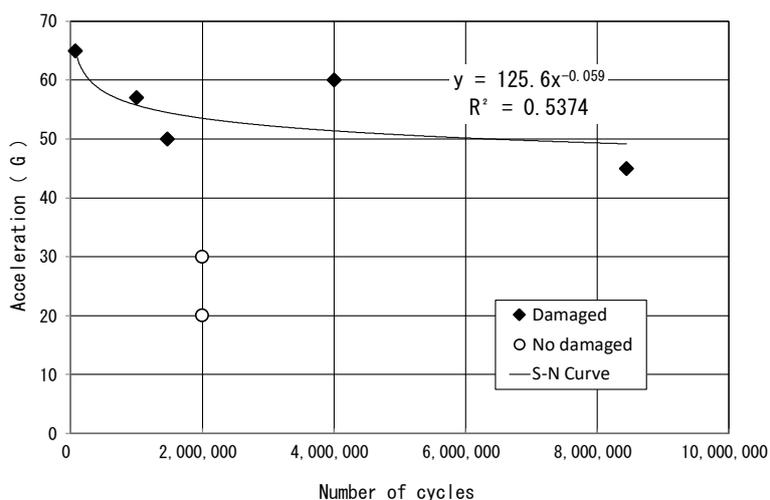


Fig. 8-2-7 振動試験で得られた供試体の S-N 曲線

衝撃試験では、供試体に対して垂直方向の台形波の衝撃波を加えて行った。衝撃波においても蓄積疲労の結果、損傷に至ることを確認するため、一部の条件においては損傷するまで衝撃波を連続して加えた。その場合、繰返し回数が 10^3 まで試験して損傷が見られない場合は、損傷条件ではないと判断し、試験を終了とした。また、衝撃波を繰返す間は 1 s のインターバルを設けた。得られた結果を Table 8-2-3 に示す。

Table 8-2-3 供試体の衝撃試験結果

(a)	(b)	(c) = $0.9 \cdot (a) \cdot (b) \times 10^{-3}$	(d)	(e) = (c) · (d)	(f)
Peak Acceleration (G)	Working time	Velocity change (m/s)	Number of cycles	Vc	Observations
73.4	5	3.24	1	3.24	Damaged
20.4	18	3.24	1	3.24	Damaged
28.0	11	2.72	400	1089	Damaged
28.0	6	1.49	100	149	Damaged
25.5	6	1.35	500	675	Damaged
20.4	11	1.98	100	198	Damaged
58.6	5	2.59	1	2.59	No damaged
51.0	5	2.25	1	2.25	No damaged
36.7	5	1.62	1	1.62	No damaged

台形波における横軸の速度変化については、JIS C 60068-2-27¹⁸⁾ により、ピーク加速度と作用時間から、下記の式 (Eq. 8-2-3) によって 1 衝撃当たりの速度変化 (を算出したものである)。

$$\Delta V = 0.9GD \times 10^{-3} \quad (\text{Eq. 8-2-3})$$

ΔV : 速度変化 (m/s)、G : ピーク加速度 (G)、D : 作用時間

蓄積疲労現象確認のため、式 (Eq. 8-2-3) で算出した速度変化 ΔV に繰返し回数 (N) を要素に含める必要があり¹⁷⁾、本論文では、下記のように Vc を新たに定義した。

$$Vc = \Delta V \cdot N \quad (\text{Eq. 8-2-4})$$

その結果、ピーク加速度と Vc との関係が得られた (Fig. 8-2-8)。

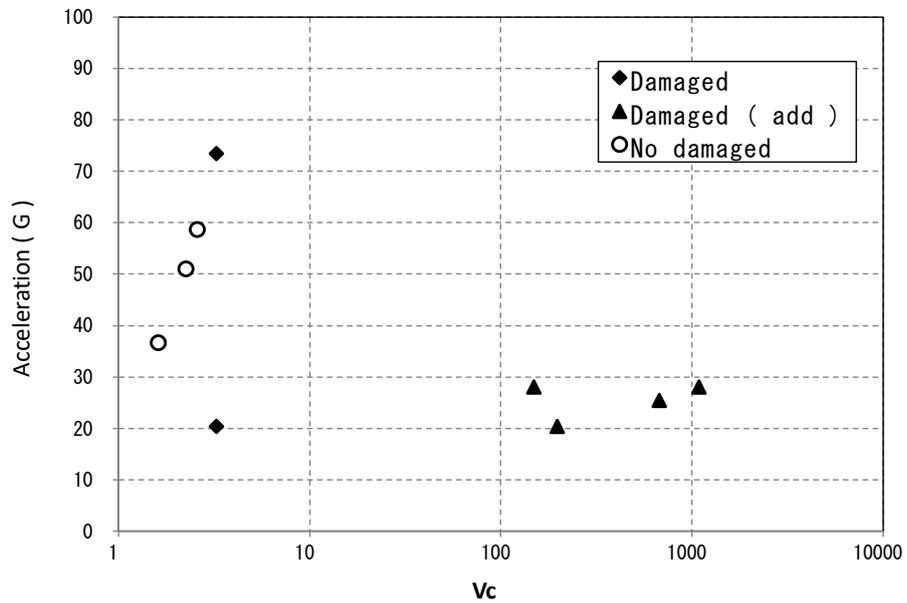


Fig. 8-2-8 衝撃試験によるピーク加速度と Vc のプロット。Damaged は 1 回の衝撃による損傷条件、Damaged (add) は繰り返し衝撃による損傷条件を示す。

Fig. 8-2-8 のプロットによって繰り返し回数を考慮した Vc を用いれば、全ての結果を単発の衝撃試験結果と並記しても矛盾しないことを確認することができた。これは、衝撃波の繰り返しによっても供試体に蓄積疲労が発生していたことを裏付けるデータである。

以上から素材への蓄積疲労現象の存在を振動および衝撃の両側面から確認することができた。指標化の検討に進む前に、指標化とは別に、これらの結果から輸送する文化財の脆弱性を推定する方法論も導き出せることについて言及しておきたい。

本章で供試体として用いた石材についても、その圧縮強度を調査する研究テーマとして、S-N 曲線についての報告例が存在する。半世紀ほど前の文献としては、堀部らの砂岩に関する研究¹⁹⁾、鈴木らの稲田花崗岩に関する研究²⁰⁾があり、各種岩石をターゲットとした疲労試験を行っている。石塚らは、三城目安山岩、稲川花崗岩、稲田花崗岩、そして本章で供試体として扱った大谷石について、応力速度を変化させた静的試験と繰返し疲労試験を行っている。報告では、試験した岩石ではその種類によらず、10万回の繰返し範囲内では、

$$S = g - h \log N \quad (\text{Eq. 8-2-5})$$

(S: 応力、g: 実験定数、h: 実験定数、N: 破壊に至る繰返し回数)

と表現できると結論付けている²¹⁾。この式 (Eq. 8-2-5) は Wöhler 曲線と呼ばれる S-N 曲線の式として採用されることの多い式の一つに該当する²²⁾。その後、鴨志田らによる白浜砂岩の疲労破壊過程に関する研究報告²³⁾が存在する。

こうした供試体を用いた試験において、共通する課題は、実物大の対象物へどのように適用するのかという点である。例えば、地質学においては、実験室内で得られた数値を地球内部の巨大な範囲に適用しようとする場合²⁴⁾にどの因子が大きく影響するのかは大きな意味を持つ。そこで、寸法効果を考慮して適用する手法が用いられた研究事例が幾つか報告されており、そこに着目する。

寸法効果とは、部材の寸法が大きくなるにつれてその強度が低下する現象のことであり、実験的には 1900 年代の初期から知られている。コンクリートについても寸法効果が存在するが、部材の強度試験を行った結果を基に、建物を建設する都合上、構造物の安全性に関わるため、関連分野では非常に重要な現象であり、コンクリートの寸法効果については比較的研究報告が多い²⁵⁻²⁸⁾。

石材の寸法効果についても研究報告が存在し、Bieniawski による石炭の試験報告²⁹⁾、Pratt らによる石英閃緑岩の試験報告³⁰⁾では、cm 単位から m 単位まで広範囲の供試体サイズを揃えて破壊強度を計測しており、両者の結果は非常に一致している。報告内では、サイズ効果のメカニズムは、供試体のサイズが大きくなるほど潜在する微小クラックの存在確立の体積依存性によって強度が落ちるといふものであると考察している。また、ある一定以下のサイズになると強度は不変になるといふ現象も観測されている。概ね、cm 単位から m 単位になると強度は 10 分の 1 に低下する。一般的には、寸法効果は、

$$S = S_0 \cdot V^{-1/m} \quad (\text{Eq. 8-2-6})$$

(S: 強度、 S_0 : 初期強度、V: 体積、m: 定数)

で表現され、Weibull 分布の関係を表した Weibull の式³¹⁾と呼ばれている。体積 V の時の強度 S_m が $V^{-1/m}$ と比例関係にあり、別の表現としては、

$$S_m \propto V^{-1/m} \quad (\text{Eq. 8-2-7})$$

(S_m : 体積 V の時の強度)

あるいは、

$$m \log (S_1/S_2) = \log (V_2/V_1) \quad (\text{Eq. 8-2-8})$$

(m: 定数、 S_1 : 体積が V_1 の時の強度、 S_2 : 体積が V_2 の時の強度)

とも表現される。北岡らは大谷石について試験を行い、 $m = 15.8$ という数値を得ている³²⁾。他に、小暮らによって琉球石灰岩の一軸圧縮試験による寸法効果の確認が報告されている³³⁾。

以上の既往研究から、まず各種の素材についての S-N 曲線情報が公表されており、いずれかの供試体で得られた強度に関する情報は実際のサイズへ適用する場合には、寸法効果によって強度を低下させて見積もる必要があると判断できる。その一例として、石材については上記のように関係式を使うことである程度の予想が可能であることを示した。

それでは、以上の考え方を模式図上に示しながら、文化財の梱包へどのように応用するのかを具体的に考えてみたい。Fig. 8-2-9 にある文化財あるいはそのレプリカまたは構成素材の一部の理論上の S-N 曲線を示した (Fig. 8-2-9 の①)。その S-N 曲線 (Fig. 8-2-9 の①) の下に、寸法効果 (Fig. 8-2-9 の②) を考慮することによって、新たな S-N 曲線 (Fig. 8-2-9 の③、点線で示した曲線) を推定することができる。

輸送中に文化財にかかる応力は第 4 章、第 5 章、第 6 章の検証によって輸送環境中に生じる加速度範囲とその頻度を導き出せるので、どの程度の応力 (F_1) が文化財に何回 (N) 及ぶのかを S-N 曲線と同じ座標上にプロットすることができる (Fig. 8-2-9 の④)。

そのプロット (Fig. 8-2-9 の④) が、新たな新たな S-N 曲線 (Fig. 8-2-9 の③) よりも上の領域の場合、現状の梱包計画では輸送によって損傷する危険性が高い。そこで、第 7 章で明らかとしたような緩衝材の特性を基に、適切な緩衝材を選択することで、輸送中に文化財に及ぶ応力 F_1 を F_2 にまで減らすことができる (Fig. 8-2-9 の⑤)。その結果、応力 F_2 を新たな S-N 曲線 (Fig. 8-2-9 の③) よりも下の領域 (Fig. 8-2-9 の

⑥、グレーで着色した領域) まで下げられれば、理論的な安全性は確保される。

この手法は Fig. 8-2-9 の S-N 曲線を損傷境界曲線に置き換えても同様の流れで文化財の梱包設計に応用することができると思われる。

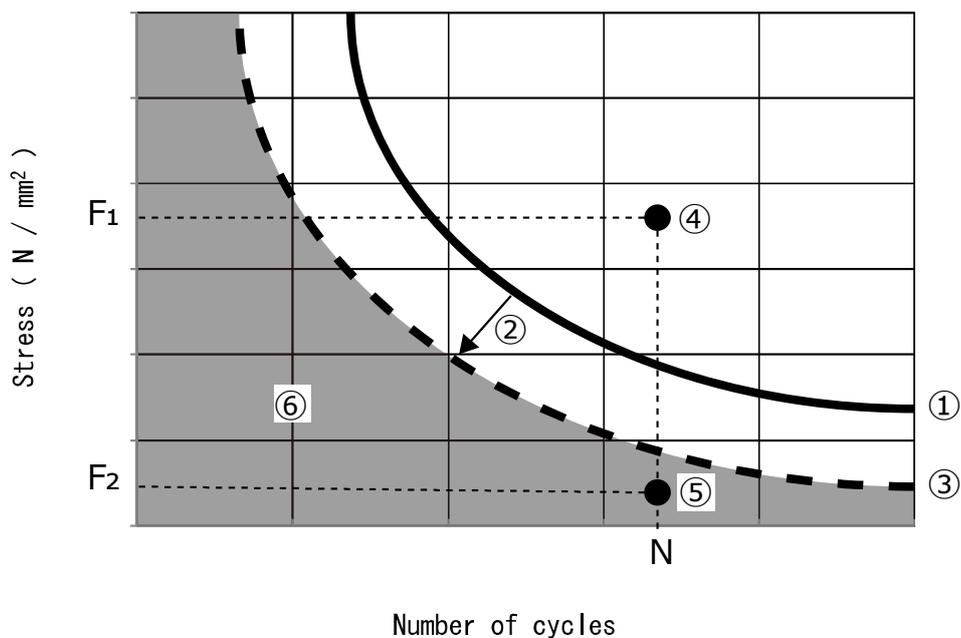


Fig. 8-2-9 供試体などを加振試験することで得られる S-N 曲線を用いた文化財の梱包設計の理論化

8. 3 文化財の輸送履歴を評価するための指標

本章では、まず過去に経験した輸送中の文化財の損傷事例で計測されたデータから文化財の脆弱性推定の困難性について述べた。次に供試体を用いた振動試験および衝撃試験によって、素材への蓄積疲労現象の存在を振動および衝撃の両側面から確認することができた。前節ではさらに、こうした試験方法で得られた結果を実際の文化財の梱包設計への適用可能性についても考察した。輸送によって文化財に蓄積疲労が発生するのであれば、輸送履歴を管理する必要がある。輸送履歴の管理には、輸送履歴を評価する指標が必要であると考え、その指標について検討する。

ここで再び、第4章から第6章でまとめた、陸上、海上、航空の各輸送における輸送環境を列挙する (Fig. 8-3-1 から Fig. 8-3-9)。これらのデータを基に、振動と衝撃の双方を加味した指標を考える。文化財の素材や構造によって蓄積疲労の発生機構は異なるため、どのような輸送環境にどれだけの時間接すれば損傷に至るのかは文化財個別に検証する必要がある。その検証が進めば、輸送によってその文化財の寿命がどれだけ消費されたのかを評価することが可能となる。一方で、輸送手段によって輸送環境は決まるため、輸送履歴は文化財の素材や構造に依存せずに残すことができる。将来的に個別の文化財の蓄積疲労機構が関数化された際に、そこへ輸送履歴を代入することで現状の状態把握と今後直面するリスクを見積もることができる。また、梱包設計の改善へのインセンティブともなる。つまり、輸送履歴が文化財の梱包および輸送の全てに関連する基礎情報となる。

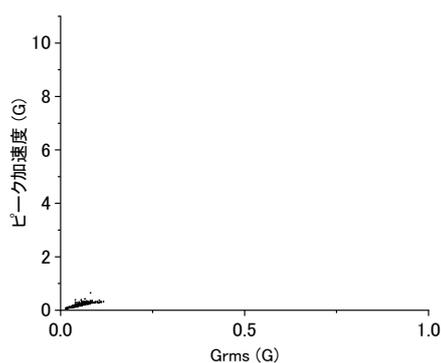


Fig. 8-3-1 低速走行時の輸送環境

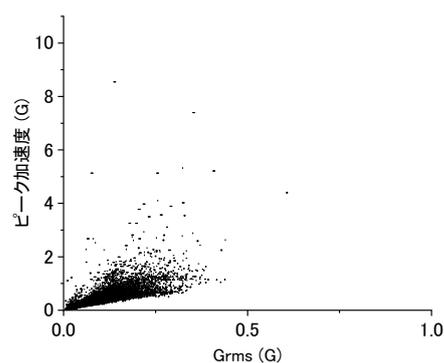


Fig. 8-3-2 一般道路走行時の輸送環境

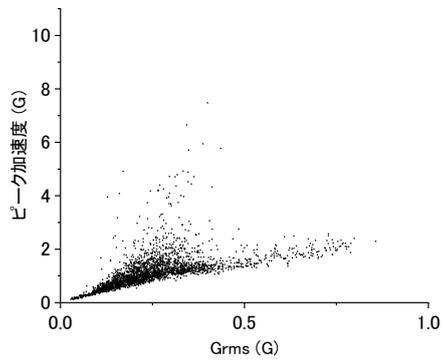


Fig. 8-3-3 継手路面走行時の輸送環境

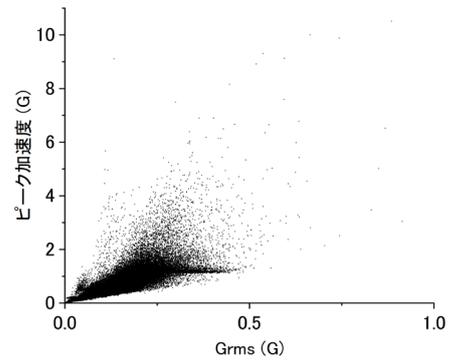


Fig. 8-3-4 高速道路走行時の輸送環境

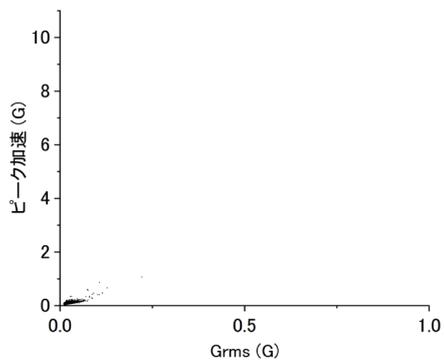


Fig. 8-3-5 海上航海時の輸送環境

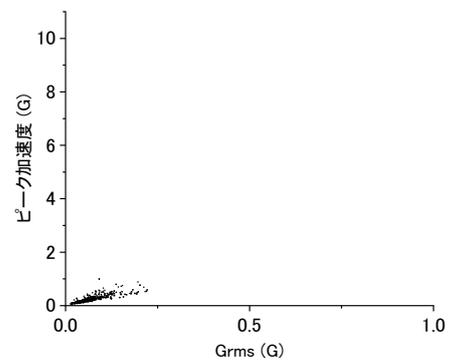


Fig. 8-3-6 乗下船時の輸送環境

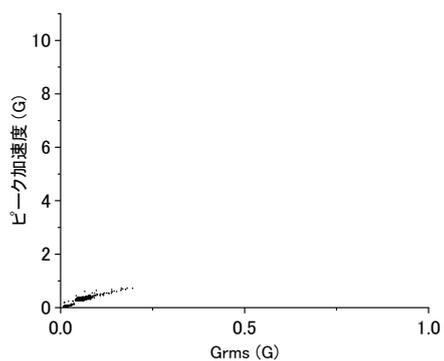


Fig. 8-3-7 飛行中の輸送環境

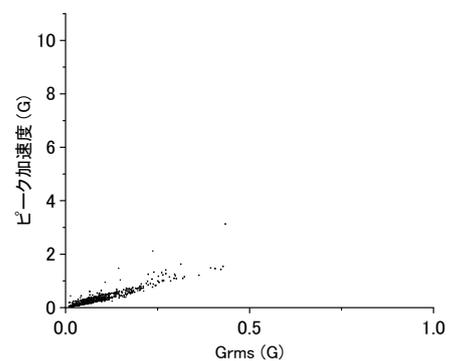


Fig. 8-3-8 離着陸時の輸送環境

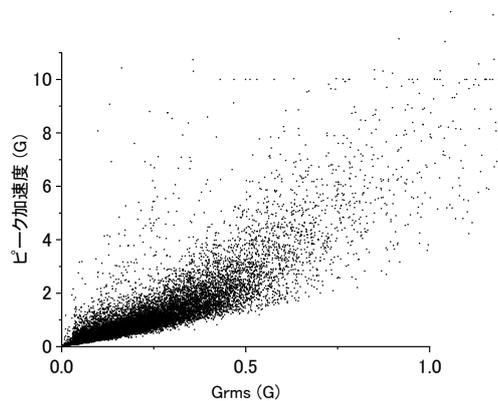


Fig. 8-3-9 空港内荷役作業時の輸送環境

そこで、Fig. 8-3-1 から Fig. 8-3-9 の情報をどのように加工して輸送履歴の指標に用いるかが重要となる。幾つかの手法が考えられるため、それぞれについて以下に検討する。

まず、平均値や中間値での評価は、計測値を取扱う上で感覚的に指標として結び付きやすい。これらはデータの母集団が広範囲に分散していない場合であればそのデータをひとまとまりとして評価する目的に叶い、かつ簡便に算出できる。しかし、加速度レベルの大きい計測値は、小さい計測値と比較して絶対数が少なく、かつ大きい加速度レベルが計測される輸送工程は小さい加速度レベルも含んでおり、データの母集団が広範囲に分散している。したがって、平均化することで危険性の高いデータの持つ意味が大幅に薄れてしまうことに注意を要する。

次に、データの分布を統計処理して評価する場合の一例を Fig. 8-3-10 に示した。どちらも空港内荷役作業時の計測データ（ピーク加速度）であり、左右異なる空港で計測されたものを、外れ値表示による箱ひげ図で処理したものである。こうした処理は、全てのデータを規格にしたがって一律に取り扱うことができ、ある程度のばらつきを考慮しながら、例えばエラー値のように極端に外れた値は除外するといった正味の分散を把握するのに優れている。しかし、Fig. 8-3-10 右側のプロットのように、外れ値がある程度のデータ数を持ちながら幅もある時は、これらを一律に評価外として取り扱う処理に適正さを欠く場合もある点に注意を要する。

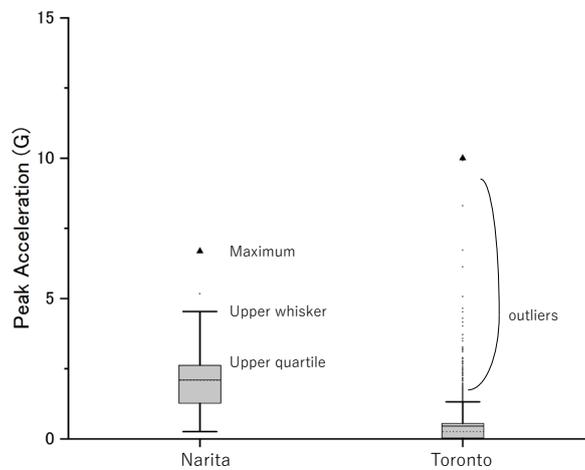


Fig. 8-3-10 2 空港での荷役作業時に計測されたピーク加速度の分布を統計処理した一例

最後に、文化財の輸送環境データはよりレベルの大きい加速度が生じる環境ほど散布図は広範囲に広がる傾向が判明したため、散布図内のデータプロット範囲の面積での比較について検討する (Fig. 8-3-11)。面積比較では分散範囲の比で輸送環境を表現できるため、平均や外れ値、およびデータ密度にも依存せずに、計測データ全体を活用できる利点がある。しかし、データ群に外接する線分で囲うため、最大値あるいは最小値の座標の影響が非常に大きくなるため、採用する座標点が周囲と大きく離れている場合には現実的な評価から遠ざかる点に注意を要する。

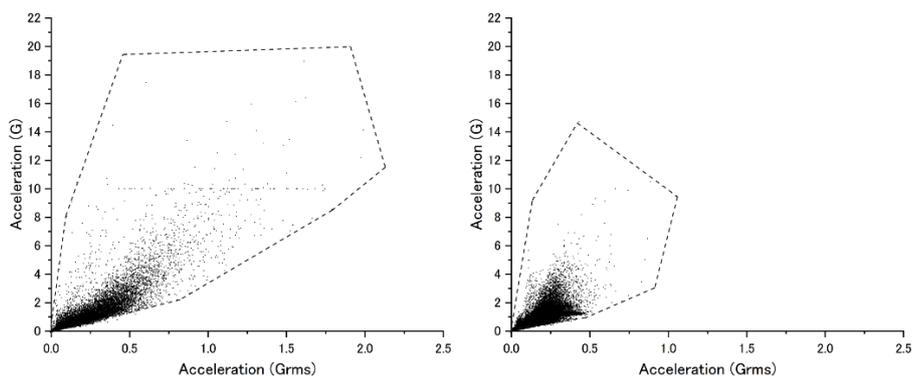


Fig. 8-3-11 空港内荷役作業時 (左) と高速道路走行時 (右) のデータプロット範囲を比較したもの

以上のように、振動と衝撃の双方を加味した指標化については、各手法ともメリットデメリットは存在するものの、振動と衝撃双方の要素を含む一つの関数を用いて、輸送環境の履歴は下記のような指標によって表現することが可能である。

STAY Index 1.0

$$S = \sum f(\text{Vib, Shock}) \cdot T - f(\text{Pack}) \quad (\text{Eq. 8-3-1})$$

S : STAY Index 1.0

f(Vib, Shock) : 輸送工程の振動、衝撃レベル

T : 輸送工程の時間

f(Pack) : 梱包による緩衝効果

通常、輸送環境中で生じる振動や衝撃を受けても破損することが無い程度に、輸送対象物（文化財）は梱包される（Fig. 8-3-12 左図）。これが梱包の効果である。

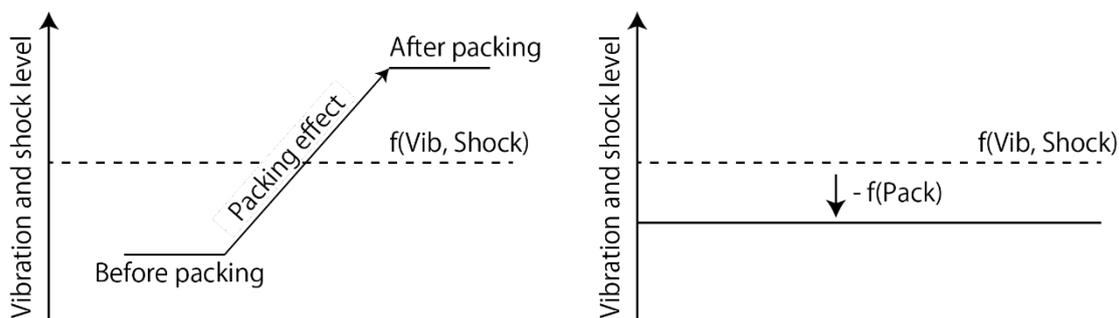


Fig. 8-3-12 梱包効果の2通りの表現方法。左図は梱包によって文化財が強化されることで輸送中に生じる振動と衝撃（ $f(\text{Vib, Shock})$ ）を受けても損傷しないという理論を示したもの。右図は梱包によって輸送中に生じる振動と衝撃が文化財へ伝達しにくくなる効果を示したもの。

この関係を輸送環境中で生じた振動や衝撃の文化財への伝わり方という視点で見た場合、梱包の効果は輸送環境中で生じた振動や衝撃を軽減することに現れるという見方ができる（Fig. 8-3-12 右図）。この効果は第7章で実施した試験結果から明らかな通り、梱包資材とその使用法によって変動すると予想されるため、式（Eq. 8-3-1）では、関数 $f(\text{Pack})$ と表現した。

上記の指標は、輸送に伴う蓄積疲労によってやがては文化財が損傷してしまうことを未然に予防するという趣旨を受けた、輸送履歴を管理するための指標である。つまり、

文化財が損傷破壊に至る前の段階における輸送の安全性についての評価指標という意味から、**Safe Transport Assessment before Yield** の頭文字を取りその初期バージョンとして本論文では、**STAY Index 1.0** と命名する。

STAY Index 1.0 は輸送先と輸送回数の情報さえ存在すれば、推定できる平均的な輸送工程時間を輸送環境との積に代入すればよいので、既に輸送が完了した文化財についても輸送履歴の概算を作成可能である。また、将来新たに登場する輸送機関については、関数 $f(\text{Vib}, \text{Shock})$ 内に取り込み、STAY Index 1.0 をアップデートして対応可能であると考え。指標としての STAY Index 1.0 は、現在文化財の管理基準として広く用いられている積算照度³⁴⁾とその取扱いが類似する。文化財の活用は推進しつつ、無制限な活用とならないための文化財の総合的マネジメントの1理論として位置付けたい。

引用文献

- 1) MIL-HDBK-304C Package Cushining Design, U.S. Department of Defense, (1997)
- 2) Kamba Nobuyuki, Wada Hiroshi, 他, Measurement and Analysis of the Global Transport Environment for Packing Cases for Artifacts, Studies in Conservation, **53** (sup1), pp.60-63 (2008)
- 3) JIS, 金属系生体材料の疲労試験方法, JIS T 0309 (2009)
- 4) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 早川 昭, 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第 1 報)-多段積載時の段ボール箱および内容レタスの振動特性ならびに損傷性-, 農業機械学会誌, **39** (3), pp.343-349 (1977)
- 5) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 早川 昭, 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第 2 報)-損傷度の定義と輸送シミュレーション時の加速度レベルの設計-, 農業機械学会誌, **40** (1), pp.61-67 (1978)
- 6) 岩元 睦夫, 河野 澄夫, 早川 昭, 青果物輸送の等価再現化に関する研究 (第 3 報)-損傷に影響する振動衝撃加速度パワースペクトルの評価-, 農業機械学会誌, **42** (3), pp.369-374 (1980)
- 7) 河野 澄夫, 岩元 睦夫, 早川 昭, 小型振動衝撃計を用いた青果物輸送損傷の評価とその応用, 食品総合研究所研究報告, **45** pp.92-96 (1984)
- 8) 河野 澄夫, 岩元 睦夫, 他, 二十世紀ナシの力学的特性と損傷性, 農業機械学会誌, **46** (1), pp.627-632 (1984)
- 9) 打田宏, 野菜果実の品質における振動衝撃の影響 (第 2 報) イチゴの輸送振動による損傷について (第 44 回全日本包装技術研究大会)--(輸送包装部会), 全日本包装技術研究大会・日本 MH 協会年次大会, **44** pp.48-51 (2006)
- 10) 白田 浩幸, 椎名 武夫, 他, 青果物の損傷性を考慮したランダム振動試験法の開発, 農業施設, **37** (1), pp.3-9 (2006)
- 11) 中嶋 隆勝, 津田 和城, 他, 蓄積疲労評価型振動試験システムの提案, 日本包装学会誌, **16** (1), pp.41-51 (2007)
- 12) 劉 建楠, 斎藤 勝彦, 手押し台車配送による包装貨物の蓄積疲労, 日本包装学会誌, **19** (4), pp.297-303 (2010)
- 13) JIS, 包装および製品設計のための製品衝撃強さ試験方法, JIS Z 0119 (2002)
- 14) 北澤 裕明, 佐藤 達雄, 他, 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) -繰り返し衝撃によるイチゴの損傷発生-, 日本包装学会誌, **21** (2), pp.125-132 (2012)
- 15) 北澤 裕明, 斎藤 勝彦, 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 2 報) -多段積み包装されたイチゴ果実の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響-, 日本包装学会誌, **23** (4), pp.277-285 (2014)

- 16) 北澤 裕明, 繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に関する研究, doctoral Thesis, 神戸大学 (2015)
- 17) 北澤 裕明, 繰り返し衝撃による成果物の蓄積疲労損傷の評価と対策, 日本包装学会誌, **27** (1), pp.29-43 (2018)
- 18) JIS, 環境試験方法-電気・電子-第 2-27 部: 衝撃試験方法, JIS C 60068-2-27 (2011)
- 19) 堀部 富男, 小林 良二, 池見 保紘, 砂岩の疲労試験, 材料, **17** (181), pp.914-918 (1968)
- 20) 鈴木 光, 西松 裕一, ヘルセオヨ R., 岩石の疲労寿命の分布特性と S-N 線図
岩石の疲労破壊に関する研究 (第 1 報), 日本鉱業会誌, **86** (986), pp.353-358 (1970)
- 21) 石塚 与志雄, 安部 透, 他, 載荷速度, 周波数が岩石の疲労強度に与える影響, 土木学会論文集, **1993** (469), pp.15-24 (1993)
- 22) 中川 隆夫, 疲れ試験結果の統計的処理と安全率, 金属の疲れと設計, (河本 実), コロナ社, pp.43-54 (1972)
- 23) 鴨志田 直人, 杉本 文男, 他, 疲労破壊過程における白浜砂岩の劣化, 資源と素材, **117** (9), pp.711-717 (2001)
- 24) 島田充彦, 長秋雄, 封圧下の岩石の破壊強度に及ぼす寸法効果の推定, 地震 第 2 輯, **39** (2), pp.313-317 (1986)
- 25) Bažant Zdeněk P, Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, Journal of Engineering Mechanics, **110** (4), pp.518-535 (1984)
- 26) Marti P., American Concrete Institute, SIZE EFFECT IN DOUBLE-PUNCH TESTS ON CONCRETE CYLINDERS, ACI Materials Journal, **86** pp.p. 597-601 (1989)
- 27) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽, コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, (442), pp.101-107 (1992)
- 28) 塩屋 俊幸, 長谷川 俊昭, コンクリート構造物の寸法効果, コンクリート工学, **30** (8), pp.5-15 (1992)
- 29) Bieniawski Z. T., The effect of specimen size on compressive strength of coal, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **5** (4), pp.325-335 (1968)
- 30) Pratt H. R., Black A. D., 他, The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **9** (4), pp.513-516 (1972)
- 31) Weibull Waloddi, A statistical distribution function of wide applicability, Journal of applied mechanics, **18** (3), pp.293-297 (1951)
- 32) 北岡 宗洋, 田中 清治, 他, 大谷凝灰岩に関する力学特性
岩石試料と原位置との対応性および岩石組織からみた一考察, 日本鉱業会誌, **93** (1067), pp.1-6,32 (1977)
- 33) 小暮哲也, 青木久, 他, 琉球石灰岩の一軸圧縮強度に与える寸法効果と岩石物性の影響, 応

用地質, **46** (1), pp.2-8 (2005)

34) 日本照明委員会, 博物館展示物の光放射による損傷の抑制 (CIE 157 2004: 日本語訳), (2005)

第9章 結論

博物館施設における文化財の活用形態の中で最も活発なものは展示である。収蔵品を常設展示等で用いる場合には、収蔵庫から展示室までの間、文化財が輸送される。特別展覧会等で外部の保管先から借用する場合にも、国内外の経路を辿る長距離輸送が発生する。いずれにせよ、文化財がどこかで展示される場合には文化財の輸送が必ず伴うことになる。

東京国立博物館を例に挙げると、2016年度は国内の博物館等103機関に750件、海外の博物館等4機関に34件の作品を貸与しており、さらに海外交流展として2機関に162件を出品している¹⁾。展示活動の活発な状況が分かる。国際的にも、例えばドイツでは年間約9,000回の特別展覧会開催がここ20年間続き、入場者数は延べ8,000万人に届く勢いであることが統計として出ており²⁾、特別展覧会の開催に伴う文化財輸送回数は相当な数であることが伺える。国内の制度面では2018年に文化庁が「国宝・重要文化財の公開に関する取扱要項」を改訂し、国指定文化財の最大公開日数が従来の延べ60日から、材質や保存状態によっては100日あるいは150日まで延長される指針となった³⁾。文化財輸送は制度的あるいは社会的要求という点からも今後も増えていく傾向にあると考えられ、輸送環境をいかに安全に保つかは、文化財を長期的に安定した状態で活用するための大きな鍵となる。本論文は、こうした背景を受けて、文化財が輸送される際に置かれる環境について、輸送時に生じる振動と衝撃に着目し、それを評価する手法を提案するものである。輸送環境の評価が定まれば、将来的に輸送が文化財へ与える負荷を見積もることが可能となり、科学的な根拠を持った安全性を確保しながら、より効果的な文化財の活用を実現できるものとする。

第1章では、上記の背景の下で文化財の梱包と輸送の現状から、課題を抽出し、本論文の目的と方針を定めた。第2章で既往研究のとりまとめを行うことで理論の現状について述べた。第1章と第2章の双方を合わせ、まずは現状について論じる。

理論の現状については、輸送環境では振動や衝撃といった環境因子が非常に大きな意味を持ち、それらが損傷の直接的な原因となる危険性が高いことは古くから指摘されている。1979年のユネスコの出版物⁴⁾には、文化財輸送における注意点、梱包箱の設計、梱包技術等についての言及がある。著者のStolowはその後、梱包輸送を含む展覧会に関する作業における文化財保存の理論を体系化している⁵⁾。

文化財を輸送中の危険性から保護するという視点に基づく研究は、1980年代に欧州の博物館施設が先駆的に始めている。油彩画の輸送に用いる梱包箱の適性評価試験^{6),7)}、梱包ケースが具備する要件の提案^{8),9)}、輸送中の振動や衝撃を受けた木枠およびキャンバスの応答計測¹⁰⁾等はその代表例である。その後、ロンドンで美術品輸送をテーマとした国際会議が開催され、梱包と輸送に関する研究が集中的に議論された¹¹⁾。

計測機器の進化に伴い、詳細な検証も可能となった。例えば、荷役や空港内作業で生じる

加速度レベルの解明¹²⁾、航空輸送時の油彩画の積込み方向による影響の比較調査¹³⁾、トラック輸送中の油彩画のキャンバスの変位計測¹⁴⁾、梱包資材と額縁ガラスの組み合わせによる共振回避の試み¹⁵⁾、梱包資材の組み合わせによる緩衝効果の検証¹⁶⁾等は代表例である。

近年はこれらの研究結果を受けてより高次元な梱包設計を目指した研究へと向かっている途中である。既往研究はキャンバスに描かれた油彩画が主な対象となっており、対象としては一部の文化財にとどまる。また、輸送環境の包括的な評価は行われておらず、振動や衝撃のリスク認識は共通するものであるが、他の環境因子のような指標も存在しない。

次に、文化財の梱包と輸送の現状について把握しておく。まず文化財の梱包については内装梱包と外装梱包の2つの内容に大きく分けられる¹⁷⁾。内装梱包は文化財表面を保護し安全に外装梱包へ固定するための準備として行われるものである。具体的には、文化財表面の保存状態に注意しながら、柔軟性の高い資材を用いて表面を保護する、可動箇所を固定する、構造上強度が低い箇所を補強するといった作業である。

内装梱包を行った後、頑丈な資材に固定する作業、あるいは梱包箱の組み立てそのものである外装梱包へと進む。外装梱包では、落下や接触によって梱包箱表面が容易に変形して内部の文化財に影響を及ぼさない程度、あるいはトラックの荷台や航空機の貨物室床面等の輸送機関上へのラッシングベルト等による締め付け時に生じる外力に対抗できる程度の、高い強度を持つ資材が用いられる。

文化財の輸送で用いられる輸送機関としては、台車、トラック、航空機、船舶が挙げられる。船舶は近年海外輸送で用いられることは皆無に等しく、本州・北海道間など国内輸送で用いられる。また、列車による輸送はターミナル駅における荷役作業分が追加発生することと、輸送時刻の調整自由度が低いことからほとんど用いられていない。

上記のような文化財の梱包と輸送に関する現状の技術については、国内では、各輸送会社内での訓練や、実地作業を通じた訓練といった他に、近年創設された美術品梱包輸送技能取得士認定試験という資格制度も大きな役割を担っている¹⁸⁾。こうした現状からは、梱包を前提とした文化財の安全な取り扱い、梱包作業の丁寧さや仕上がりの美しさ、梱包資材の加工技術といった点については確立された技術が存在し、その維持継承システムも整いつつあると判断できる。一方で、輸送機関との間の緩衝設計については未だ改善の余地が残る。例えば、梱包についてのレギュレーションは「丸めた薄葉紙や綿などを軽く詰めて緩衝材とし…」¹⁹⁾といった抽象的な表現にとどまっているが、「○○という緩衝材を使用する場合は、単位面積当たりの荷重が○○kg となるように梱包すると最適な緩衝効果が得られる」と表現することで初めて具体的な梱包設計が成立するが、現状は到達できていない。

以上から見出される課題をまとめると、まず内装梱包および外装梱包における緩衝設計に関しては、より安全性を高められる余地を有している。緩衝設計とは、梱包資材の選択と用法を輸送手段に応じて最適化することである。つまり、予め主に振動や衝撃のレベルを示

す輸送環境データと緩衝材の特性データの双方が揃っており、予定される輸送手段に対して、最適な緩衝効果が得られる緩衝材と使用法を導き出すといった工程による緩衝設計である。こうした内容は個人技術への依存のみでは実現できず、科学的な技術構築が求められる。

また、輸送によって文化財には大小の疲労が蓄積していると考えられる。例えば、1回の輸送で文化財が損傷しなかった場合に、それと同一の輸送環境で100回輸送しても損傷しないとは言い切れない。もしも、100回目に損傷してしまった場合は、過去99回の輸送が影響していることも推測される。現実的には、第1節で述べたように近年、文化財輸送の頻度は上昇傾向にある。輸送に伴い文化財への蓄積疲労もより一層考慮せねばならない時代へ突入しており、文化財への蓄積疲労を現象として認識しておくこともまた重要である。

したがって、蓄積疲労が発生しているのであれば、少なくとも輸送時の環境を文化財へ履歴として残さねばならない。しかし、現状では輸送環境データを使った輸送履歴を表現する指標が存在しない。

上記の通り、緩衝設計に関する課題と、輸送履歴に関する課題を現状の重要課題として抽出できた。双方の課題に共通するのは、輸送環境データの活用であり、課題解決のためには整理された輸送環境データの存在が前提となる。そして、緩衝設計においては緩衝材特性の計測手法を確立する必要がある。また、輸送履歴については、文化財へ疲労が蓄積する現象の存在も前提となるため、蓄積疲労現象を確認しておく必要がある。

以上を踏まえて、本論文の目的を以下のように設定した。①文化財輸送の輸送環境を計測し、解析する。また、緩衝材特性の計測手法を確立する。そして、双方を利用した最適な緩衝設計を実現するための工程を策定する。②文化財輸送の輸送環境データを解析する。また、文化財への蓄積疲労現象の発生を確認する。そして、輸送後の文化財へ輸送履歴を残すための輸送評価指標を策定する。

そのために、まず輸送環境データについては陸海空3種の輸送態様において振動と衝撃を計測し、各輸送態様の主な工程の特徴をとらえる。こうした輸送環境下における緩衝材の挙動を実験によって把握でき、その結果から緩衝設計の最適化が実現できることを検証する。続いて、文化財を構成する素材に蓄積疲労現象が発生することを実験によって確認できることを検証する。最後に輸送環境データを解析することで、蓄積疲労を文化財へ履歴として残すための指標を策定する。

第3章に振動と衝撃の計測手法、評価に用いる単位、解析手法についての説明を付した。輸送中に生じた振動と衝撃の計測は、3軸方向の圧電型加速度センサーを内蔵する加速度データロガーを各輸送機関上に設置し、輸送終了後にデータを回収する手法で実施した。ただし、加速度値と発生場所や輸送工程を関連付けるために、一部の計測ではGPSデータロガーを併用した。解析に用いた加速度の単位はGであり、 $1G \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ に該当する。衝撃

は継続性の無いイレギュラーなものであり、一般的に単発の大きな加速度が発生するため、その加速度値で評価する。解析においては、1 イベント内の最大値である「ピーク加速度」を用いた。一方で振動は加速度値は小さいが常時発生するものである。解析においては、複数加速度値の実効値（2乗平均平方根）である「実効加速度」を用いた。双方とも単位はGである。

第4章では、陸上輸送環境の検証を行った。文化財の陸上輸送で最も多く用いられる輸送機関はトラックである。美術品輸送専用車両²⁰⁾という専用の特殊車両が用いられることが影響し、実際の文化財輸送における環境データは多くが公開されていない。トラックの走行中の輸送環境に関しては、走行速度と走行路面がどのように影響するのかを検証した。ピーク加速度（縦軸）と実効加速度（横軸）による座標系への散布図によると、低速走行時（約15 km/h）、一般道路走行時（約40 km/h）、高速道路走行時（約80 km/h）で比較した場合、速度上昇とともに、実効加速度とピーク加速度の双方が上昇することから、トラック荷台上の輸送環境は走行速度と相関性が高いと考えられた。また、走行路面の輸送環境への影響について、首都高速道路のような高架道路に見られる伸縮継手部分の走行時を抽出して比較した。その結果、継手路面では通常の高速道路路面よりも大きな実効加速度が検出されるが、ピーク加速度としては通常の高速道路路面の方が高く検出されることが分かった。連続した路面起伏は衝撃よりも振動のレベルを高める影響を持つものと考えられた。

第5章では、海上輸送環境の検証を行った。現在は長距離、長期間におよぶ文化財の海上輸送は行われておらず、例えば陸上輸送手段が存在しない日本国内の一部経路でのみ実施されている。文化財の海上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船と呼ばれる船が原則用いられている。RO/RO船による輸送環境を把握する必要はあるが、公開されたデータはほぼ存在しない。また、港での乗船、下船工程などの荷役作業についても輸送環境データが存在しない。そこで、RO/RO船の航海中および港での乗下船時に発生する振動および衝撃の実態を検証した。その結果、海上輸送では、海上航海中と港での乗下船工程の2つの工程の区分必要性がまず見いだされた。その工程区分に沿って、計測された振動と衝撃の範囲を解析したところ、海上航海中は極めて安定しており、突発的な気象変化が生じない限りは安全な環境であると判断できるものであった。一方、乗下船工程では海上航海中では検出されることがないレベルの振動と衝撃が発生することが判明した。こうした乗下船時の輸送環境の原因を調査したところ、船内の床面や港施設との接続部の路面凹凸がその発生源であると確認できた。

第6章では、航空輸送環境の検証を行った。日本から海外へ物品を輸送する場合、必然的に船舶か航空機を使用することになる。しかし、船舶による海外輸送の場合は、輸送時間が極めて長くなるため、文化財輸送では、ほぼ航空輸送が採用される。海外輸送の増加に伴い、

航空輸送環境も予め把握しておかねばならない重要な環境である。計測結果は、空港内荷役時の輸送環境が最も激しく、空港内荷役では 10 G レベルの加速度の発生可能性は見込んでおく必要があると考えられた。飛行中は陸上輸送の低速走行時や海上輸送の海上航海中の輸送環境とレベルは近似する。また、離着陸時の輸送環境は航空輸送全体と比較すると空港内荷役が突出しているため非常に小さく見えるが、データの母数をある程度増やして解析した場合に、ピーク加速度として 1 G を超える計測値も多く見られ、無視できるレベルとはいえないと判断できた。

第 7 章では、第 6 章までに特定できた輸送環境下における緩衝設計を最適化する手法を提案した。一般的には衝撃対策のために、あるウェイトをある高さから緩衝材に落下させて加速度を計測するという落下衝撃試験を行う。ウェイトと緩衝材の厚みを変えて繰返し試験することで、緩衝材の厚み毎にウェイトの重さと計測される加速度の関係が得られ、それは最大加速度静的応力線図と呼ばれる。この線図によって衝撃を緩衝するのに最適な荷重範囲を算出することができる。こうした情報は、限られた条件ではあるが、緩衝材のメーカーが公表したものを利用できる場合がある。

一方、緩衝材の振動特性については別の試験を必要とし、緩衝材への荷重、与える振動の周波数、その振動の加速度の 3 要素の条件を変えながら緩衝材へ振動を入力し、緩衝材がどのような応答を見せるのか、を確認せねばならない。こうした情報は一般には公表されておらず、本論文で実施することとした。試験対象として選択したものは文化財梱包に多く用いられているポリエチレンフォームである。

上記実験による結果をまとめると、緩衝材への荷重増加に伴い、共振周波数が低周波側へシフトする現象、および加速度の増加に伴い共振周波数が低周波側へシフトする現象の大きく 2 つの現象が確認された。なお、実験に用いた緩衝材の共振周波数は約 30 Hz から 60 Hz の間で変動した。

この結果から、緩衝材の使用法についてのフローを提案することができる。陸、海、空の輸送手段で発生する実効加速度とピーク加速度の範囲については、前節までに検証が済んでおり、その輸送環境に対して適切な緩衝材の使用法を提案するためには、先述した振動特性を把握するための試験を行い、共振点の変動範囲を確認する必要がある。例えば、ポリエチレンフォームの結果によると、積載する文化財が低周波数で著しく共振する可能性が高い場合を除けば、荷重が大きい方が振動を減衰する周波数範囲が広がるため、防振には有利に働く。したがって緩衝材の受け面積を小さくし、なるべく板厚の大きな緩衝材を用いるのが有利ということになる。このフローは、用いる緩衝材を他のものに置き換えれば、その都度最適な使用法を導き出せるので、一般化についての方法論、すなわち緩衝設計の最適化を提案できた。

第 8 章では、蓄積疲労現象の確認をした上で、文化財の輸送履歴を評価するための指標

を提案した。まずは蓄積疲労現象の発生確認のための実験が必要であり、実験によって蓄積疲労発生を確認できれば、各輸送工程で生じる振動と衝撃の大きさと輸送回数、つまりそれらの外力が加わった時間との積が文化財へ与える疲労として見積もることができる。

そこで、文化財素材の一例として石材供試体を用意し、供試体に与えた加速度の大きさと破損に至るまでその加速度を与えた回数との関係を調査した。

その結果、加速度が低くなるにつれて、繰返し回数が増える現象を確認した。つまりこの現象は、低い加速度でも繰返し受け続けることで損傷することを示した結果であり、その関係曲線である S-N 曲線が取得できることを検証できたことになる。以上から振動による素材への蓄積疲労の発生を検証できた。

蓄積疲労現象の存在が前提として確認できれば、振動と衝撃の値と輸送時間との積が輸送履歴を表現する指標となり得る。振動と衝撃の値については、第 4 章から第 6 章の検証によって、輸送工程毎の実効加速度とピーク加速度の範囲を数値として表現することができている。そこで、一つの輸送工程の振動、衝撃レベルを関数と置き、その輸送工程に要した時間との積を、輸送工程全てについての和を取ったものから、梱包による緩衝効果を差し引いたものが現実的な指標に該当すると導くことができる。本論文ではこの指標を STAY Index 1.0 と命名した。

おおよそその輸送時間は海外輸送や国内輸送の事例に照らして算出可能であるため、STAY Index 1.0 は過去の輸送にも遡って適用可能である。将来的に文化財の脆弱性情報が得られれば、その文化財に過去の輸送でどれだけの損傷度を与えたのかが求まるため、逆算して今後の許容輸送回数の提示といったことも可能となる。あるいは、今後も頻繁に輸送したいのであれば行うべき梱包についての指標にもなり得る。そして、関連分野の試験結果が蓄積されることで、現状の初期バージョンから、振動、衝撃関数や梱包効果関数のアップデートを重ね、将来対応も可能になるものとする。

本論文の成果を簡潔にまとめると次の通りである。①陸、海、空の文化財輸送環境データの収集と解析を行い、実効加速度とピーク加速度の範囲をとらえることに成功した。②上記データに基づいた緩衝設計手法を構築した。③蓄積疲労現象の発生を確認し、輸送履歴の指標化を提案した。④文化財の活用を無制限に行うのではなく、科学的な根拠を持って活用を管理するための、輸送環境の側面から見た考え方を提示できた。

今後の展望として、まず緩衝設計については緩衝材の振動特性データの母体数を上げていく必要がある。様々な緩衝材に対し本論文で提示した試験を行うことで緩衝材の選択肢を拡張できればより効果的な緩衝設計の提案に繋がる。また、その際に複数の緩衝材を組み合わせた場合の特性についても同様に調査が必要である。現実の文化財梱包では複数種の緩衝材を結果的に組み合わせる状況も見られ、そうした場合の最適化をどのように構築していくかは取り組むべき必要がある。

あるいは、既存の緩衝材の定性とは別に、必要とする特性を持つ緩衝材そのものを設計す

るというアプローチも考えられる。3D プリンターの登場によって樹脂の立体成型が容易となり、樹脂の種類ではなく、成型（構造）で緩衝材としての特性を制御可能であれば、輸送対象文化財に応じた梱包が実現できる。

そして、輸送履歴については、文化財の構造や材質に関する幾つかの要素が、どのような重み付けで輸送履歴に対する影響を持つことになるのかを検証せねばならない。例えば、素材の硬度であれば、高いほど衝撃関数への重み付けを増し、低く柔軟なものほど振動関数の重み付けが増す、といった傾向の把握である。こうした検証によって STAY Index 1.0 は文化財のいずれかの要素毎に応じて分化され、STAY Index 2.0 以降へと成長することになる。こうした修正を継続した結果、現在までの輸送履歴を鑑みて、今後の輸送による損傷リスクが高いと評価されるのであれば、文化財の修理による補強や梱包設計などの見直し、あるいは輸送を一旦取りやめることによって損傷リスクを事前に回避することにつながると考えている。文化財を保存するための環境基準の一つとして位置付けられる日が来るように、今後もこうした検証を進めたいと考えている。

引用文献

- 1) 独立行政法人国立文化財機構 HP, <http://www.nich.go.jp/>
- 2) Kracht Kerstin, Kletschkowski Thomas, From art to Engineering: A Technical Review on the Problem of Vibrating Canvas Part I: Excitation and Efforts of Vibration Reduction, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 15(1), pp.163-182 (2017)
- 3) 文化庁 HP, <http://www.bunka.go.jp/>
- 4) Stolow Nathan, Conservation Standards for Works of Art in Transit and on Exhibition, UNESCO (1979)
- 5) Stolow Nathan, Conservation and Exhibitions, Butterworth & Co. Ltd. (1987)
- 6) Green T, Hackney S, The Evaluation of a Packing Case for Paintings, ICOM-CC 7th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.84.12.81-84.12.86 (1984)
- 7) Staniforth S., The Testing of Packing Cases for the Transport of Paintings, ICOM-CC 7th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.84.12.87-84.12.16 (1984)
- 8) Staniforth S., Packing: A Case Study, National Gallery Technical Bulletin, 8, pp.53-62 (1984)
- 9) Stephenson-Wright Ann, White Raymond, Packing: An Updated Design, Reviewed and Tested, National Gallery Technical Bulletin, 11, pp.36-41 (1987)
- 10) Green Timothy, Shock and Vibration-Test Results for Framed Paintings on Canvas Supports, ICOM-CC 8th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.585-596 (1987)
- 11) Art in Transit Studies in the Transport of Paintings, National Gallery of Art (1991)
- 12) Saunders D., Monitoring Shock and Vibration During the Transportation of Paintings, National Gallery Technical Bulletin, 19, pp.64-73 (1998)
- 13) Saunders D., The Effect of Painting Orientation During Air Transportation, ICOM-CC 14th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, pp.700-707 (2005)
- 14) Lasyk Łukasz, Łukowski Michał, 他, Vibration as a Hazard During the Transportation of Canvas Paintings, *Studies in Conservation*, 53(sup1), pp.64-68 (2008)
- 15) 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, International Council of Museums, 12pp. (2011)
- 16) Lauchli M., Baschlin N., 他, Packing Systems for Paintings: Damping Capacity in Relation to Transport-Induced Shock and Vibration, ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, International Council of Museums, 9pp. (2014)

- 17) 和田 浩, 文化財の梱包、日本包装学会誌, 26(6), pp.293-301 (2017)
- 18) 和田 浩, 美術品梱包輸送技能取得士, 日本包装学会誌, 26(6), pp.383 (2017)
- 19) 博物館資料取扱いガイドブック, ぎょうせい (2016)
- 20) 和田 浩, 美術品輸送専用車両, 日本包装学会誌, 26(6), pp.382 (2017)

本研究に関する発表論文等の一覧

論文

1. 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 pp.59-74 (2018)
2. 和田浩, 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, 日本包装学会誌, 27 (4), pp.225-241 (2018)
3. 和田浩, 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, 日本包装学会誌, 27 (4), pp.243-254 (2018)
4. 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), pp.339-346 (2018)

国際会議

1. Wada Hiroshi, The Investigation of Shock and Vibration of Trucks During Transport for Museum Objects, International Safe Transit Association European Packaging Symposium, ITENE, Valencia, Spain, 2017年3月9日
2. Wada Hiroshi, Saito Katsuhiko, Study On Transport Environment of Cultural Properties Via Ship In Japan, 28th IAPRI Symposium on Packaging 2017, Olympic Museum, Lausanne, Switzerland, 2017年5月10日
3. Wada Hiroshi, A Case Study on Transport Environment of Cultural Properties by Ship, The 6th Symposium of the Society for Conservation of Cultural Heritage in East Asia, Fudan University, Shanghai, China, 2017年8月25日
4. Wada Hiroshi, Proposal of New Index for the Transport History of Museum Objects, AICCM PSIG-SCC Conference: 'Managing Risks to Collections', Deakin Downtown, Melbourne, Australia, 2019年2月18日

国内会議

1. 和田浩, 美術品輸送車両上で発生する振動周波数の解析, 日本文化財科学会第 33 回大会, 日本文化財科学会, 奈良大学, 2016 年 6 月 4・5 日
2. 和田浩, 首都高速道路走行時に美術品輸送車両上で発生する加速度の評価, 文化財保存修復学会第 38 回大会, 文化財保存修復学会, 東海大学, 2016 年 6 月 25 日
3. 和田浩, 美術品輸送用トラックの荷台で計測された加速度の評価, 日本包装学会第 25 回年次大会, 日本包装学会, 神戸大学, 2016 年 7 月 7 日
4. 和田浩, 中国における美術品長距離輸送時の環境調査, 第 54 回全日本包装技術研究大会, 日本包装技術協会, 国立京都国際会館, 2016 年 11 月 29 日
5. 和田浩, 文化財の国内長距離輸送時の各輸送工程において発生した加速度の評価, 日本文化財科学会第 34 回大会, 日本文化財科学会, 東北芸術工科大学, 2017 年 6 月 10 日
6. 和田 浩, 高妻 洋成, 脇谷 草一郎, 宇田川 滋正, 建石 徹, キトラ古墳壁画輸送時に発生した加速度の解析, 文化財保存修復学会第 39 回大会, 文化財保存修復学会, 金沢歌劇座, 2017 年 7 月 1 日
7. 和田 浩, 宮地 鼓, 斎藤 勝彦, 海上輸送を経由する文化財輸送環境の評価, 日本包装学会第 26 回年次大会, 日本包装学会, 東京大学, 2017 年 7 月 11 日
8. 和田 浩, 星野 裕昭, 美術品輸送専用車両による輸送環境のシミュレーションに関する基礎的研究, 第 55 回全日本包装技術研究大会, 日本包装技術協会, 名古屋国際会議場, 2017 年 11 月 16 日
9. 和田 浩, 星野 裕昭, 文化財輸送環境の最適化に向けた基礎的研究, 日本機械学会第 26 回交通・物流部門大会, 大阪府立大学, 2017 年 12 月 4 日
10. 和田 浩, 美術品輸送専用車両の荷台上で発生する振動レベルの分布, 文化財保存修復学会第 40 回大会, 文化財保存修復学会, 高知市文化プラザかるぽーと, 2018 年 6 月 17 日

- 1 1. 和田浩, RO-RO 船による文化財輸送における乗下船時の振動環境, 日本文化財科学会第 35 回大会, 日本文化財科学会, 奈良女子大学, 2018 年 7 月 8 日
- 1 2. 和田 浩, 美術品輸送専用車両を用いた文化財の低速走行輸送時の環境について, 日本包装学会第 27 回年次大会, 日本包装学会, 東京大学, 2018 年 7 月 12 日

謝辞

本研究を遂行し学位論文としてまとめるにあたり、多大なるご指導とご助言を賜りました、筑波大学教授 松井敏也博士に心から感謝の意を表し厚く御礼申し上げます。松井先生と出会ってから20余年の間、様々な調査研究をご一緒させていただきました。松井先生が私の考えを隅々までご理解くださり、学位論文としてのまとまりを作る作業を支えていただいたからこそ本研究を完結できました。

秋田大学教授 川村洋平博士には学位論文の審査のみならず日々の研究に関して私が抱いた様々な疑問や悩みをいつでも親身になって聞いていただきました。川村先生のおかげで技術的にも精神的にも研究を遂行する力が付きました。心より深く感謝申し上げます。

学位論文審査において審査委員として貴重なご指導とご助言を賜りました、筑波大学教授 上北恭史博士、同教授 八木春生博士に心より深く感謝申し上げます。

東京国立博物館（当時）の神庭信幸博士による文化財輸送環境に関する研究に参加させていただき、多くの貴重な経験を積むことができました。心より深く感謝申し上げます。

輸送環境計測を通じ、エクサーチ株式会社 高木雅広氏、今北憲氏に専門的な知見をご提供いただきました。心より深く感謝申し上げます。

東京都立産業技術研究センター 小西毅氏より、蓄積疲労現象確認のための振動試験等について多大なるご協力を賜りました。心より深く感謝申し上げます。

東京国立博物館が関わった多くの展覧会で文化財の梱包を手掛けてきた、東京国立博物館（当時） 岩淵建夫氏、日本通運株式会社（当時） 海老名和明氏、日本通運株式会社 佐々木正人氏からは、梱包技術と輸送技術について、懇切丁寧にご教示いただきました。心より深く感謝申し上げます。

私が文化財の保存に関する研究に携わるようになったきっかけは、京都大学大学院人間・環境学研究科への進学に遡ります。当時私の指導教授であった澤田正昭博士のお導きがなければ今の研究者としての私は成立していません。文化財の保存に関わる多くの貴重な経験をさせていただきました。心より深く感謝申し上げます。

奈良国立文化財研究所（当時） 肥塚隆保博士、奈良国立文化財研究所 高妻洋成博士より学生時代にご指導を受けたことが今日の私の心の支えとなっております。心より深く感謝申し上げます。

本研究の一部は JSPS 科研費 16H03109 の助成を受けて実施したものです。心より深く感謝申し上げます。

最後に、人生の全ての局面において常に支え続けてくれた父 和田章、母 和田範子、そして博士後期課程進学について理解いただき、学位論文執筆の日々も支え、励ましてくれた妻 和田玲花、娘 和田珠凜に心より深く感謝申し上げます。