

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

和田浩
WADA Hiroshi

1. はじめに

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。

2. 文化財輸送の現状と課題

(1) 理論の現状について

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 Stolorow 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。

(2) 梱包と輸送の現状について

文化財の梱包は内装梱包と外装梱包の 2 つの内容

に大きく分けられる¹⁷。内装梱包は文化財表面を保護し (Fig. 1) 安全に外装梱包へ固定する (Fig. 2) 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 (Fig. 3)、航空機、船舶 (Fig. 4) 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、「〇〇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〇〇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。

(3) 課題

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。



Fig. 1 文化財表面の保護



Fig. 2 梱包箱への固定



Fig. 3 美術品輸送専用車両



Fig. 4 海上輸送

3. 本論文の目的

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の重要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。

4. 文化財輸送環境の計測

(1) 計測手法

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。

(2) 陸上輸送

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)(Fig. 5)、一般道路走行時(約40 km/h)(Fig. 6)、高速道路走行時(約80 km/h)(Fig. 7)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(Fig. 8)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実効加速度が検出されるが、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影響を持つものと考えられる。

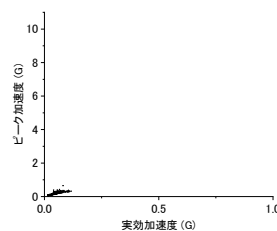


Fig. 5 低速走行時

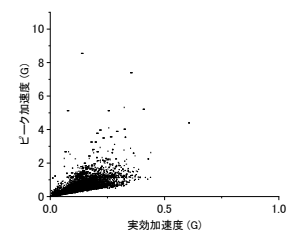


Fig. 6 一般道路走行時

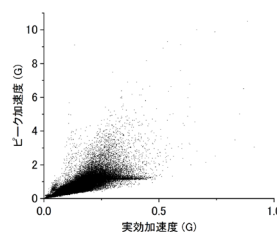


Fig. 7 高速道路走行時

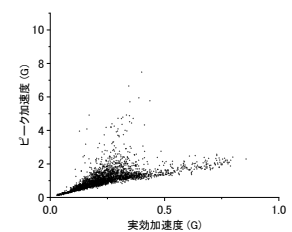


Fig. 8 継手路面走行時

(3) 海上輸送

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 (Fig. 9) と港での乗下船工程 (Fig. 10) 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の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。

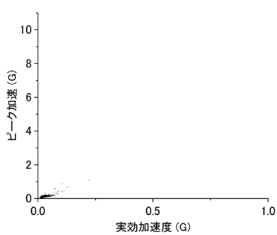


Fig. 9 海上航海中

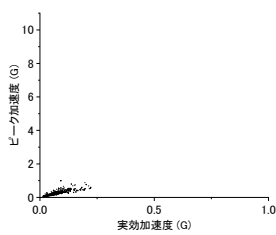


Fig. 10 乗下船工程

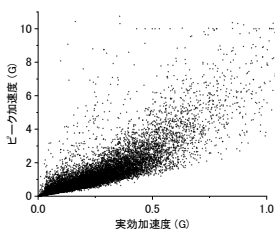


Fig. 11 空港内荷役作業時



Fig. 12 空港内荷役の一例

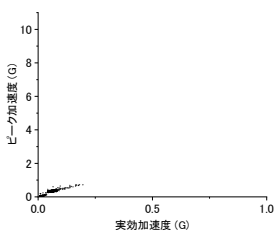


Fig. 13 飛行中

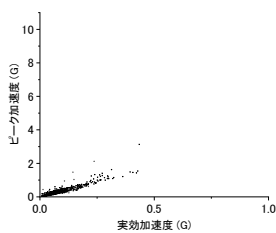


Fig. 14 離着陸時

(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。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 (Fig. 11)、空港内荷役 (Fig. 12) 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 (Fig. 13) 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 (Fig. 14) 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。

5. 緩衝設計の最適化

(1) 実験手法

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り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。

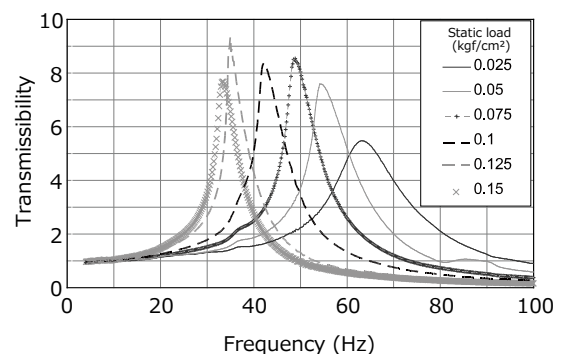


Fig. 15 荷重を変動させた場合の振動伝達率の変化

(2) 実験結果と最適化の提案

上記実験の結果をまとめると、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 (Fig. 15)、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。

6. 輸送履歴の指標化

(1) 蓄積疲労現象の確認

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る。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。

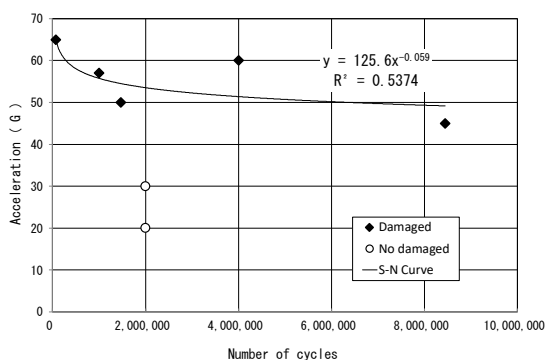


Fig. 16 蓄積疲労現象確認試験(振動試験)の結果

その結果、加速度が低くなるにつれて、繰返し回数が多くなる現象を確認した (Fig. 16)。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 SN 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。

(2) STAY Index 1.0 の提案

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 節までに、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。STAY Index 1.0 は次式のように表される。

$$S = \sum f(\text{Vib, Shock}) \cdot T - f(\text{Pack})$$

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

Eq. 1 STAY Index 1.0 の提案

おおよ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。

7. まとめ

本論文の内容は以下にまとめることができる。

- ・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。
- ・上記データに基づいた緩衝設計手法を構築した。

・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。

・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。

謝辞

蓄積疲労現象の確認試験では、東京都立産業技術研究センターのご協力を頂戴いたしました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 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) Stolor Nathan : Conservation Standards for Works of Art in Transit and on Exhibition、UNESCO、1979
- 5) Stolor 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 Lukasz, Lukowski 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