

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05022

研究課題名（和文）実輸送反映高精度試験のためのGPSとAIを用いた輸送振動の特徴量自動抽出法の開発

研究課題名（英文）Development of automatic method for extracting feature of transportation vibration using GPS and AI for high-precision testing by reflecting actual transportation

研究代表者

津田 和城（Tsuda, Kazuki）

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主幹研究員

研究者番号：40359435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：輸送環境調査の省力化と振動試験の高精度化を目指し、GPSとAIを用いた輸送振動の特徴量抽出法の開発に取り組んだ。正確なPSDを把握するために、GPSを用いて道路種別のPSDを算出した。さらに、PSDの妥当性を評価するために、疲労を用いた評価手法についても検討した。同時に、輸送振動のPSDを予測するために、簡易記録計を用いたPSDの計測方法を考案した。加えて、この方法に必要な既存データを用いた加速度実効値の推定方法も考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

輸送振動の計測データがある道路に対しては、GPSを用いて道路種別のPSDが算出できる。また、計測データがない道路に対しては、短時間の連続計測と長時間の間欠計測（既存データ）を組み合わせることでPSDが推定できる点に独自性があり、学術的にも意義深い。これらの研究成果は、輸送振動のPSDの正確な把握と予測に有効であり、振動試験の高精度化や輸送環境調査の省力化、ひいては、輸送事故防止と過剰包装削減の両立につながる事が期待される。

研究成果の概要（英文）：To save labor in transportation environment surveys and increase the accuracy of vibration tests, we developed a method for extracting features of transportation vibrations using GPS and AI. To grasp the accurate PSD, we calculated the PSD for each road type using GPS. Furthermore, to evaluate the validity of PSD, we also investigated an evaluation method using fatigue. Simultaneously, to predict the PSD of transport vibrations, we devised a PSD measurement method using a simple recorder. Furthermore, we devised a method for estimating the root-mean-square value of acceleration using existing data, which is necessary for this method.

研究分野：輸送包装

キーワード：振動試験 輸送振動 特徴量 GPS AI 予測 PSD 実効値

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

国内外で輸送される貨物の数は膨大で、国内の宅配便だけでもその数は年間 42 億個を超えている。通信販売の普及による Electronic Commerce 化が進み、その数は増加傾向にある。さらに、経済連携協定や外国人客により海外輸送も増え、輸送環境の多様化は進んでいる。一方で、持続可能な開発目標 Sustainable Development Goals の下、資材の脱プラスチック化や使用量削減が推進されている。このような情勢の中で、輸送企業は安全に貨物を輸送すると同時に、輸送事故防止と過剰包装削減を両立する必要がある。これらの実現には安全に輸送できる限界で設計した貨物を評価するため、輸送環境と同じ厳しさを持つ高精度な振動試験が不可欠である。

振動試験は機械、電気、食品など多くの業界で実施され、輸送中に工業製品や農水産物が損傷しないかどうかを事前評価している。試験条件は公的規格で規定されているが、レベル分けされた試験条件が書かれているのみで画一的である。そのため、試験条件は輸送環境の多様化に対応できておらず、輸送振動に合致した試験条件の作成は不十分である。現在でも試験に合格したにもかかわらず、輸送事故や潜在的な過剰包装が未だに存在する。

これまでに輸送環境と試験環境の差を埋めるために、記録計を用いた輸送環境調査が行われてきた。しかし、輸送全体の振動測定には時間と手間を要するため、調査された輸送環境は限られたものである。したがって、輸送環境に適した高精度な試験の実施には、輸送振動の特徴量を試験条件に反映させる必要があり、輸送振動の特徴量の抽出は必須である。

### 2. 研究の目的

輸送事故防止と過剰包装削減を両立するために、輸送環境調査の省力化と振動試験の高精度化を目指し、GPS と AI を用いた輸送振動の特徴量抽出法の開発に取り組んだ。

具体的には、輸送振動の計測データがある道路に対しては、GPS や疲労を用いた正確な PSD の算出手法を考案する。一方で、計測データがない道路に対しては、AI と一般指標や既存データを用いた PSD の予測手法を考案する。これらにより、輸送振動の PSD の正確な把握と予測を可能にし、輸送環境調査の省力化と振動試験の高精度化の実現可能性を高める。

### 3. 研究の方法

輸送振動の基礎データとして、輸送中におけるトラックの荷台振動の加速度データを取得した。次に、正確な PSD を把握するために、GPS を用いて道路種別の PSD を算出した。さらに、PSD の妥当性を評価するために、疲労を用いた評価手法についても検討した。同時に、輸送振動の PSD を予測するために、簡易記録計を用いた PSD の計測方法を考案した。加えて、この方法に必要な既存データを用いた加速度実効値の推定方法も考案した。

#### (1) 輸送振動データの取得と GPS を用いた道路種別の PSD 算出

道路の種類別に荷台の振動を調査するために、トラックを用いて研究所近郊のさまざまな道路を走行した。図 1 にトラックと荷台の様子を、図 2 にトラックの走行経路と道路の種類を示す。荷台の並進方向および回転方向の振動を計測するために、トラックの荷台に GPS、加速度および角速度の各センサーを設置した(図 1 参照)。GPS でトラックの位置情報と速度を、加速度で並進方向の振動を、角速度で回転方向の振動を計測した。なお、サンプリング周波数は GPS で 1Hz、加速度で 1280Hz、角速度で 1000Hz に設定した。次に、位置情報を用いて道路の種類別に計測データを分けて、種類別に解析した。道路の種類による違いを明らかにするために、加速度および角速度の実効値や PSD を求めて比較した。さらに、PSD 形状の類似性を評価するために、各道路の PSD どうしの相関係数も求めた。



図 1 トラックと荷台の様子

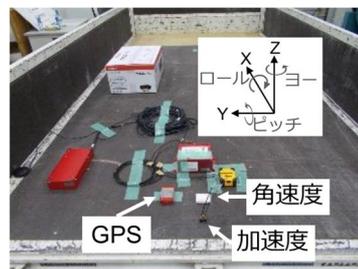


図 2 走行経路と道路の種類

#### (2) 疲労を用いた評価手法の検討：疲労（ピーク）と周波数の関係調査

ピークに及ぼす周波数の影響を調査するために、輸送と試験で得られたランダム波を使用した。ここでは、ランダム波の基本的な形状を比較するために、PSD の値(各周波数の正弦波の振幅)を 1 に設定した位相波を使用し、ランダム波を構成する主要な周波数であった 1Hz ~ 20Hz に絞ったものを対象にした。また、ピークとしては、正方向のピーク(他ではピークと表記)に注

目し、図3にランダム波のピークの値を横軸に、頻度を縦軸にとったヒストグラムを示す。

次に、ランダム波を1Hz～20Hzの各周波数の正弦波に分解し、ピークにおける各周波数の正弦波の値を計算した(図4参照)。なお、振幅が1のため、値の範囲は-1から1になり、値が1に近づくほど、その周波数はピークに及ぼす寄与が大きいことを意味している。さらに、周波数の影響について全体の傾向を把握するために、複数のピークに対して同様に求めた各周波数の正弦波の値を総和した。ここでは、複数のピークとして、輸送と試験での全てのピーク各約14500個に加え、図3のヒストグラムに示す、ピークの値の大きさ別に大中小各1000個のピークを抽出して使用した。

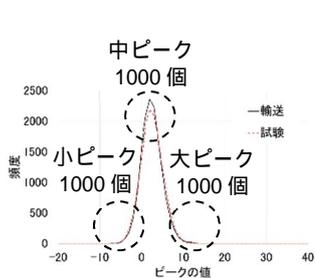


図3 ピークのヒストグラム

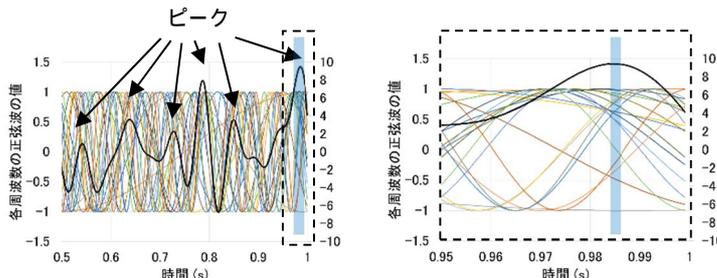


図4 ランダム波を各周波数の正弦波に分解

### (3) 簡易記録計を用いた PSD の計測方法の考案

取得した「一定時間ごとの加速度実効値」と「5分間の加速度波形」を用いて、図5の手順にて輸送全体の荷台振動のPSDを推定した。まず、「一定時間ごとの加速度実効値」から停車部分などを除き、二乗平均平方根により輸送全体の加速度実効値を算出した。次に、「5分間の加速度波形」からPSDを求めて実効値1 m/s<sup>2</sup>で規格化することでPSDの形状を求めた。輸送全体の荷台振動のPSDは、規格化したPSDを輸送全体の加速度実効値で補正して推定した。これらにより、取得するデータ量を減らすことで、データの取り扱いが容易な簡易加速度計測口ガー(簡易口ガー)を実現可能である。

本検証ではIMV製タフログガー(TR-1000)によりサンプリングレート1280Hzで取得した輸送全体の垂直方向の加速度波形(以下、全データ)を用いた。検証の手順は図6に示す。まず、簡易口ガーの計測データを模擬的に作成するために、タフログガーの全データから1分ごとの加速度実効値を計算し、5分間の加速度波形を切り出した。作成した簡易口ガーの模擬データを用いて、前節で提案した方法により輸送全体のPSDを推定した。推定したPSDを全データから得られるPSDと比較することで推定精度を検証した。

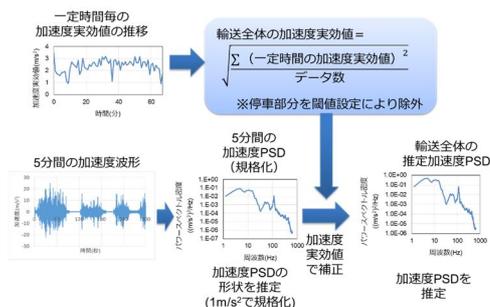


図5 輸送全体の荷台振動のPSDの推定方法

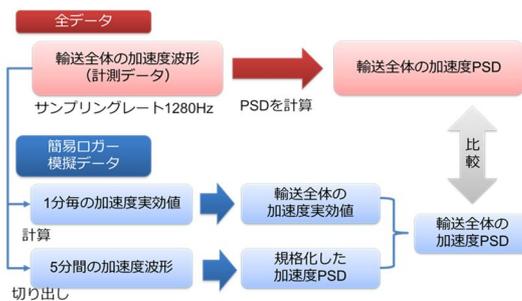


図6 取得データの加工

### (4) 既存データを用いた加速度実効値の推定方法の考案

近年、加速度を取得できるデジタルタコグラフ(デジタコ)が普及しており、非常に多くの車両の加速度がビッグデータとして蓄積されている。しかし、デジタコで収集されている加速度データは図7に示す様に1Hz～2Hz程度の非常に粗いサンプリングレートで加速度値を記録している。そのため、周波数特性を得ることはできず、輸送環境を如実に反映しているとは言い難い。そこで、このビッグデータを用いて多くの車両の加速度を統合することでサンプリングレートの粗さを補うことを検討した。本検証ではデジタコによりサンプリングレート1Hzで取得された加速度、GPS、走行速度のデータを用いた。

解析手順を図8に示す。まず、デジタコの1秒ごとに取得された加速度を計測区間全体の車両ごとの加速度実効値で割ることで規格化した。次に、規格化した加速度の絶対値から1秒ごとの規格化された加速度実効値を算出した(以下、規格化加速度実効値とする)。さらに、規格化加速度実効値を車両別に経度0.001度ごとのグループとして二乗平均平方根により算出した。最

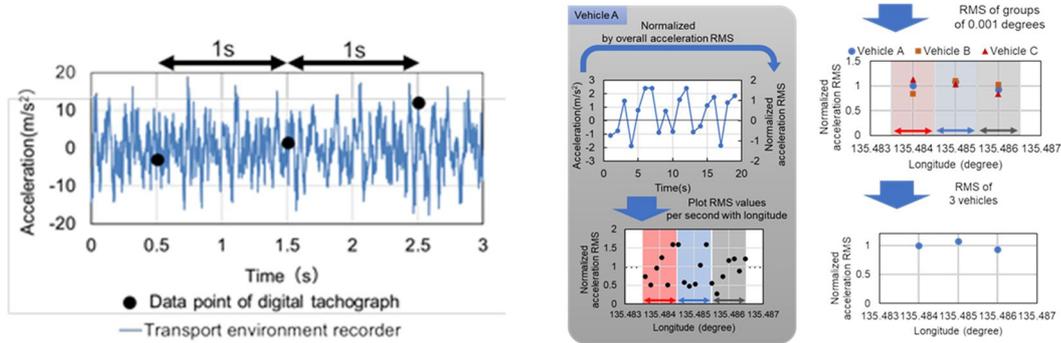


図7 デジタコで取得された加速度データ（イメージ図） 図8 デジタコの解析方法

後に、対象とするすべての車両の規格化加速度実効値を経路ごとに二乗平均平方根することで算出する。以上により多くの車両の加速度ビッグデータを規格化して統合した。

#### 4. 研究成果

輸送振動の基礎データとして、輸送中におけるトラックの荷台振動の加速度データを取得した。次に、正確な PSD を把握するために、GPS を用いて道路種別に PSD を算出した。さらに、PSD の妥当性を評価するために、疲労を用いた評価手法についても検討した。同時に、輸送振動の PSD を予測するために、簡易記録計を用いた PSD の計測方法を考案した。加えて、この方法に必要な既存データを用いた加速度実効値の推定方法も考案した。

##### (1) 輸送振動データの取得と GPS を用いた道路種別の PSD 算出

Z 方向の加速度およびヨー方向の角速度に注目し、周波数解析を行った。ここでは、Z 方向の加速度を取り上げ、図 9 に各道路の PSD を示す。また、各道路の Z 方向の加速度実効値と各道路の PSD どうしの相関係数を表 1 ならびに表 2 に示す。図表より、各道路の卓越周波数は近く、PSD どうしの相関係数も高いため、各道路の PSD の形状は似ていることがわかる。この傾向は、加速度と角速度のどちらの PSD でも同様にみられた。また、道路の種類により加速度実効値は変化するが、PSD の形状は類似した。これらの結果から、道路の種類に関係なく PSD の形状が把握できるため、輸送環境調査の省力化につながると考えられる。

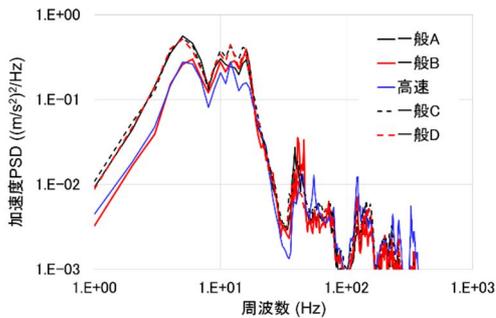


図9 各道路の PSD

表1 各道路の Z 方向の加速度実効値

	一般 A	一般 B	高速	一般 C	一般 D
実効値	2.3	2.1	2.0	2.5	2.4

表2 各道路の PSD どうしの相関係数

加速度	一般 A	一般 B	高速	一般 C	一般 D
一般 A	-	0.92	0.96	0.98	0.98

##### (2) 疲労を用いた評価手法の検討：疲労（ピーク）と周波数の関係調査

図 10 に輸送と試験での加速度波形にある各約 14500 個の全てのピークにおける各周波数の値の総和を示す。高周波の値の総和は低周波よりも大きく、曲線は右肩上がりになった。これより、

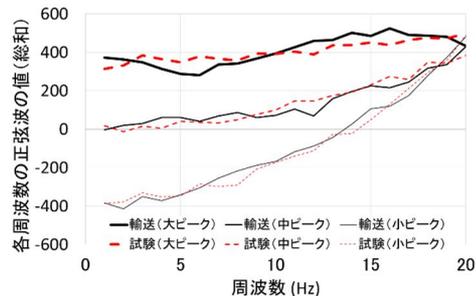
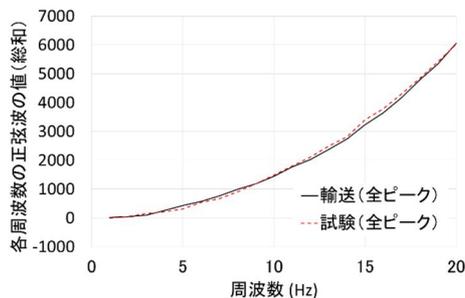


図10 各周波数の影響（全てのピーク） 図11 各周波数の影響（ピークの大きさ別）

高周波における正弦波の重ね合わせがピークの形成に寄与していることがわかった。また、輸送と試験で同様の傾向となった。図 11 に輸送と試験での大きき別に大中小各 1000 個のピークにおける各周波数の値の総和を示す。ピークが大きくなるとともに、低周波の値の総和も大きくなり、曲線は右肩上がりからフラットになった。すなわち、高周波に加えて低周波における正弦波の重ね合わせがピークの形成に寄与している。さらに、輸送と試験で僅かに差異がみられるが、同様の傾向を示した。このようにピークと周波数の関係調査は、疲労と周波数の関係を理解する上で役立ち、周波数を考慮した疲労評価手法の考案につながると考えられる。

### (3) 簡易記録計を用いた PSD の計測方法の考案

写真 1 の 2t トラックを用いて図 12 に示す大阪府南部の舗装道路を走行して取得した加速度データ(全データ)から PSD の推定精度を検証した。～ の区間の 5 分間の加速度波形から PSD を算出し、簡易ロガーの模擬データから求めた輸送全体の加速度実効値  $2.4 \text{ m/s}^2$  で補正した。4 つの区間で推定した PSD と全データの PSD を図 13 に示す。推定した PSD と全データの PSD はほぼ同様の結果が得られた。また、全データと推定した PSD の相関係数はいずれも 0.95 以上と非常に高い相関を示した。これらの結果から、提案する簡易加速度計測ロガーにより高い精度で輸送全体の PSD を推定可能である。

このように短時間の連続計測と長時間の間欠計測を組み合わせ、輸送全体の PSD を計測する方法を考案した。これにより、輸送全体を連続計測することなく、輸送全体の PSD を計測することが可能になる。また、これまで使用していた高価な輸送環境記録計が不要になるため、この方法は安価で簡単な PSD の計測につながると考えられる。



図 12 本検証における計測経路

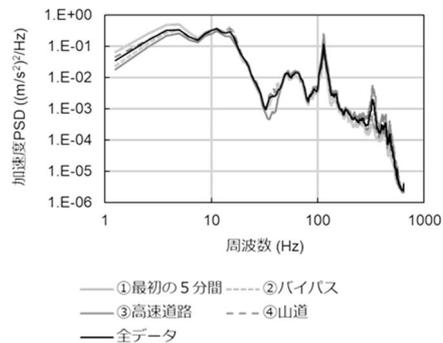


図 13 全データによる PSD と推定した PSD の比較

### (4) 既存データを用いた加速度実効値の推定方法の考案

図 14 に示す大阪府南部の一般道の直線区間(約 5.7 km: 唐国南交差点～豊田橋北交差点)を解析対象とした。この区間の北緯 34.5 度では経度 0.001 度は約 90 m である。デジタコは 24 台の 1 日間のデータを用いた。また、輸送環境記録計は 2 日間(内 1 日はデジタコと同じ日)で合計 4 回(各日 2 回)の計測結果を用いた。図 15 にはデジタコと輸送環境記録計の規格化加速度実効値の比較を示す。の場所を除きよく一致しており、相関係数は 0.79 であった。

デジタコの加速度ビックデータから輸送経路中の規格化した加速度実効値の推移を推定し、輸送環境記録計による結果との比較により評価した。高速道路に加えて一般道路走行時のデジタコのビックデータを用いて加速度実効値の推移を推定した結果、一定の精度で推定できた。

これらの結果から、デジタコを利用した場合、規格化した加速度実効値の推移をよく推定でき、走行速度や走行する車線によるバラツキを抑制した平均的な走行における規格化加速度実効値を示していると考えられる。

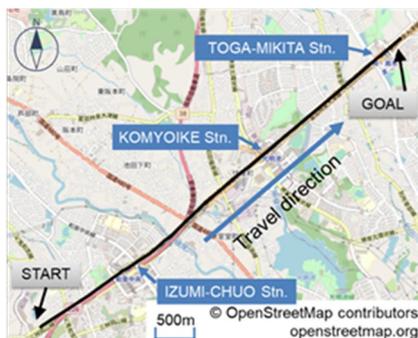


図 14 一般道における検証区間

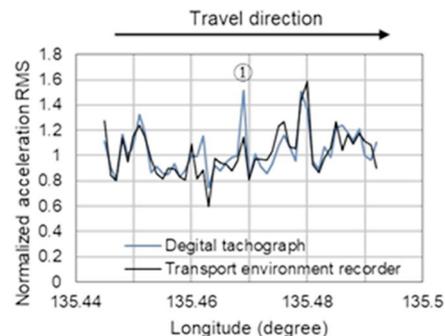


図 15 デジタコと記録計の規格化加速度実効値の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔	4. 巻 9月号
2. 論文標題 輸送振動の加速度PSDを取得するための簡易加速度計測口ガーの提案	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 包装技術	6. 最初と最後の頁 598,602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔	4. 巻 Vol.32, No.1
2. 論文標題 荷台振動の簡易加速度PSD推定手法の精度検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本包装学会誌	6. 最初と最後の頁 63,74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Win, T. K., Watanabe, D. and Hyodo, T.	4. 巻 8
2. 論文標題 Data Analysis of High Capacity Vehicles by Machine Learning for Sustainable Logistics in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Toros University FEASS Journal of Social Sciences	6. 最初と最後の頁 51-69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Win, T. K., Watanabe, D. and Hyodo, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 A Study on the Driving Characteristics of High Capacity Vehicles in Japan by K-Means Clustering Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Scheduling 2021	6. 最初と最後の頁 86-91
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔
2. 発表標題 異なる車種の荷台の振動測定による加速度実効値の推定
3. 学会等名 第60回全日本包装技術研究大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍、渡部大輔
2. 発表標題 輸送振動調査の省力化を目指して - 道路種別の振動特性に着目した効率的な振動調査 -
3. 学会等名 産業技術支援フェア in KANSAI 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔
2. 発表標題 デジタルタコグラフの加速度ピックデータを活用した高速道路における加速度実効値の推定の取得
3. 学会等名 日本包装学会第32回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 周波数を考慮した疲労評価に向けたランダム振動の疲労に及ぼす周波数の影響調査
2. 発表標題 津田和城、堀口翔伍、細山亮
3. 学会等名 日本包装学会第32回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔
2. 発表標題 輸送振動の加速度PSDを取得するための簡易加速度ロガーの提案
3. 学会等名 日本包装技術協会第59回全日本包装技術研究大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔
2. 発表標題 簡易加速度記録計による最大加速度と走行速度を用いた荷台振動の加速度実効値予測の検討
3. 学会等名 日本包装学会第31回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍
2. 発表標題 各周波数の正弦波の重ね合わせがランダム波のピークの形成に及ぼす影響
3. 学会等名 日本包装学会第31回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍、渡部大輔
2. 発表標題 道路の種類が荷台の並進方向および回転方向の振動に及ぼす影響
3. 学会等名 日本包装学会第30回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔
2. 発表標題 輸送環境調査の簡易化を目指したデジタルタコグラフの加速度ビッグデータ活用方法の検討
3. 学会等名 日本包装技術協会第61回全日本包装技術研究大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍
2. 発表標題 輸送中におけるトラック荷台振動の非正常性と疲労評価への影響
3. 学会等名 日本包装学会第33回年次大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 輸送振動データ取得方法及びデータロガー	発明者 堀口翔伍、津田和城、細山亮、渡部大輔	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、191757	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	細山 亮 (Hosoyama Akira) (10530074)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任 研究員  (84431)	
研究分担者	堀口 翔伍 (Horiguchi Shogo) (20736300)	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・研究 員  (84431)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	渡部 大輔  (Watanabe Daisuke)  (30435771)	東京海洋大学・学術研究院・教授     (12614)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関