

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：84431

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12996

研究課題名（和文）包装製品特有の共振現象解明と防振機能強化策の考案による緩衝材の高機能化

研究課題名（英文）Elucidation of Resonance Phenomenon Peculiar to Packaged Products and Improvement of Cushioning Materials by Devising Method to Enhance Damping Properties

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・主任研究員

研究者番号：40359435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：緩衝材の高機能化を図るために、衝撃に対する緩衝性能に加え、振動に対する防振性能を強化した緩衝材の作製指針の構築に取り組んだ。まず、代表的な緩衝材の物性値を調査し、現状の防振性能を把握するとともに、物性値に及ぼす静的応力の影響を確認した。次に、緩衝設計の諸条件と防振設計に重要な共振周波数との関係を調査し、両設計の関係性を明らかにするとともに、包装製品特有の共振現象が起きる一因を見出した。最後に、緩衝性能を維持したまま防振性能を強化できる、緩衝材の応力-ひずみ曲線の形状変更による共振周波数の調整方法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

緩衝材の物性値の調査で得られた知見は、防振設計に不可欠な物性値のデータベースの構築に利用できる。また、緩衝設計と防振設計との調査で明らかにされた関係性は、緩衝防振設計方法を確立していく上で大いに役立つ、学術的に意義深い。さらに、考案された共振周波数の調整方法は、緩衝性能を維持したまま防振性能を強化した緩衝材の作製指針の構築に活用できる。いずれも緩衝と防振を両立した緩衝材の設計および製造の実現性の向上に大きく貢献し、輸送中において包装製品にトラブルのない安全な物流社会の実現に寄与するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：To improve cushioning materials, we constructed a production guideline which was able to enhance a damping properties for vibration in addition to a cushioning properties for shock. First, we examined the physical properties of typical cushioning materials. We grasped the current damping properties, and confirmed the effect of static stress on the physical properties. Second, we investigated the relationship between various conditions of cushioning design and resonant frequencies which were important for damping design. We clarified the relationship between both designs, and found one cause that resonance phenomena peculiar to packaged products occurred. Finally, we devised a method to adjust the resonant frequency by changing the shape of the stress-strain curve of cushioning materials which was able to enhance the damping properties while maintaining the cushioning properties.

研究分野：輸送包装

キーワード：物流社会 緩衝材 緩衝 防振 共振

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

1. 研究開始当初の背景

輸送中、包装貨物に加わる衝撃や振動などの外力から、包装されている製品(以下、包装製品と呼ぶ)を保護するために、緩衝材が広く使用されている。緩衝材は包装製品と同様に設計され、包装製品の質量、強度や想定落下高さなどから、厚さおよび接触面積が適切に計算されている。このような緩衝材の設計は、機械、電気、医薬品および食品などの貨物輸送に関係している多くの業界で行われている。現在、緩衝材を設計する際には、厚さや使用量を最小化する設計手法(以下、現行法と呼ぶ)が用いられている。しかし、現行法で設計したにもかかわらず、輸送中に包装製品が損傷する事例が数多く報告されている。

この主な原因として、貨物に加わる外力には衝撃や振動などがあるにもかかわらず、現行法では衝撃のみに注目し、振動を考慮していない点が挙げられる。近年、一部の研究では衝撃だけでなく振動にも注目した緩衝防振設計が提唱されている。しかし専用のシミュレーションを行う必要があり、接触面積の調整による防振性能の向上には限界があるなどの課題もある。現在のところ、緩衝防振設計が行われている緩衝材は未だに少なく、現行法で設計されているものの多くは、適正な防振性能を有していないのが現状である。

これまでに研究代表者らはさまざまな貨物の振動試験に携わる中で、約 10 Hz ~ 30 Hz の特定の周波数帯で包装製品の共振が起きることを数多く経験してきた。このような損傷につながる“包装製品特有の共振現象”を防止するためには、特定の周波数帯での防振性能を強化した緩衝材を作製しなければならない。一方、緩衝と防振に有効な物性値は異なるため、均質材料の緩衝材で両立することは困難である。したがって、緩衝材の表面改良により物性値を変更し、共振周波数変更や減衰付与による防振性能強化策を考案しなければならない。

2. 研究の目的

輸送中において包装製品にトラブルのない安全な物流社会を実現するために、多くの包装貨物で保護材として使用されている緩衝材の高機能化を目指す。現在のような衝撃に対する緩衝性能に加え、振動に対する防振性能を強化した緩衝材の作製指針の構築を目的とする。そのために、代表的な緩衝材を対象に緩衝係数や減衰比などの物性値を調査する。次に、包装製品が特定の周波数帯で共振するという包装製品特有の共振現象発生メカニズムを明らかにする。最後に、その対策として緩衝材表面の形状変化や異材積層を行い、共振周波数変更や減衰付与による防振性能強化策を考案する。これらにより、緩衝性能を維持したまま防振性能を強化した緩衝材の作製を可能にし、長年の課題であった緩衝と防振を両立した緩衝材の設計および製造の実現性を大きく高める。

3. 研究の方法

代表的な緩衝材の防振性能を把握するために、バネ定数や減衰比などの物性値を調査する。次に、包装製品特有の共振現象発生メカニズムを解明するために、緩衝設計と防振設計との関係調査を行う。最後に、緩衝材の緩衝性能を維持したまま防振性能を強化するために、共振周波数の調整方法を考案する。

(1) 防振性能に関する物性値の調査

代表的な緩衝材の防振性能を把握するために、共振周波数や伝達率に関係するバネ定数や減衰比などの物性値を調査する。緩衝材として発泡倍率が 15、50 および 100 倍の発泡ポリスチレンを用いる。具体的には、振動試験機の振動テーブル上に緩衝材を設置し、その上に錘をのせて正弦波掃引振動実験を行う。加速度センサーを用いて掃引中の振動テーブルおよび錘の加速度を測定し、伝達関数を調べる。図 1 に実験の様子を示す。次に、錘の質量を変更し、静的応力を変えながら同様の実験を繰り返し、さまざまな静的応力における伝達関数を調べる。なお、伝達関数から物性値を算出するために、実験の緩衝材 - 錘系を 1 自由度バネ - マス - ダンパー系と仮定する。得られた伝達関数から共振周波数および伝達率の最大値を求め、1 自由度系の共振周波数および伝達率の算出式を用いてバネ定数と減衰比を求める。

さらに、物性値の調査結果から、任意の静的応力における伝達関数の推定が可能かどうかを実測との比較により検討する。上記の実験で得られたさまざまな静的応力における物性値の調査結果から、物性値 - 静的応力の近似曲線を導出する。その近似曲線を用いて任意の静的応力におけるバネ定数と減衰比を求め、得られた値から伝達関数を推定する。推定した伝達関数と実測した伝達関数とを比較し、伝達関数の推定精度を調べる。

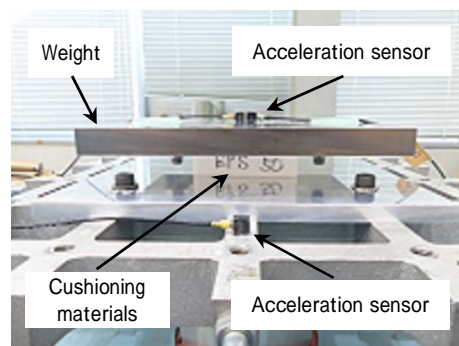


図 1 振動実験の様子

(2) 緩衝設計と防振設計との関係調査

包装製品特有の共振現象発生メカニズムを解明するために、緩衝設計と防振設計との関係調査を行う。調査では、緩衝設計の諸条件と防振設計に重要な共振周波数との関係を調べる。例として、緩衝材として厚さや発泡倍率が異なる発泡ポリエチレンを用い、諸条件として包装製品の質量と許容加速度、緩衝材の厚さと発泡倍率を取り上げる。ここでは、緩衝材の技術資料に記載された最大加速度 - 静的応力曲線やヤング率を用いて、緩衝設計された緩衝材の剛性を求め、緩衝材 - 包装製品系の共振周波数を算出する。具体的には、まず、最大加速度 - 静的応力曲線を用いて許容加速度以下になる静的応力の範囲を求める(図2参照)。次に、得られた静的応力の範囲と質量から緩衝材の接触面積の範囲を計算し、得られた接触面積の範囲とヤング率から緩衝材のバネ定数の範囲を求める。最後に、得られたバネ定数の範囲と質量から、系の共振周波数帯を算出する。諸条件を変えながら一連の計算を繰り返し、諸条件と共振周波数帯との関係を調べる。

さらに、約 10 Hz ~ 30 Hz の特定の周波数帯で包装製品が共振する包装製品特有の共振現象がみられる原因についても検討する。

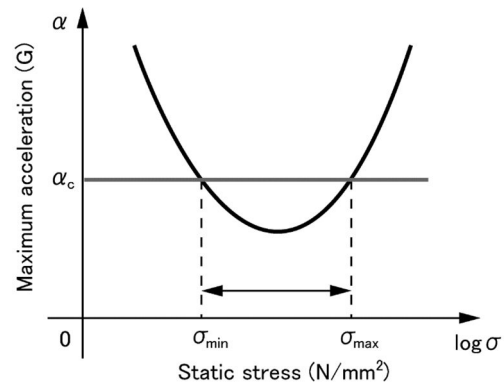


図2 静的応力 - 最大加速度曲線を用いた緩衝設計手順

(3) 共振周波数の調整方法の考案

緩衝材の緩衝性能を維持したまま防振性能を強化するために、共振周波数の調整方法を考案する。これまで、緩衝材の緩衝性能を表す指標として落下時の包装製品の最大加速度が、防振性能では加振時の包装製品の加速度実効値が用いられている。緩衝性能を維持したまま防振性能を強化するには、落下時の最大加速度を増大させずに加振時の加速度実効値を小さくする必要がある。落下時の最大加速度は落下による最大ひずみまでに生じる最大応力と比例関係にあるため、最大加速度には最大応力が重要になる。一方、加振時の加速度実効値は包装貨物の共振周波数と荷台振動の卓越周波数帯とが一致すると大きくなるため、加速度実効値には共振周波数(初期ひずみでの傾き)が重要になる。したがって、応力 - ひずみ曲線において最大応力を増大させずに初期ひずみでの傾きを調整できれば、落下時の最大加速度を増大させずに加振時の共振周波数を調整できる。

そこで、初期ひずみでの傾きを大きくし、共振周波数を上げるために、緩衝材の応力 - ひずみ曲線の立ち上がりをさらに急峻な形状に変更する方法を提案する。ここでは、応力 - ひずみ曲線の形状変更の一例として、図3に示すような形状変更について検討する。さらに、提案した共振周波数の調整方法の効果を明らかにするために、緩衝材の応力 - ひずみ曲線の形状変更が、落下時の最大加速度および加振時の加速度実効値の低減に及ぼす影響を調査する。

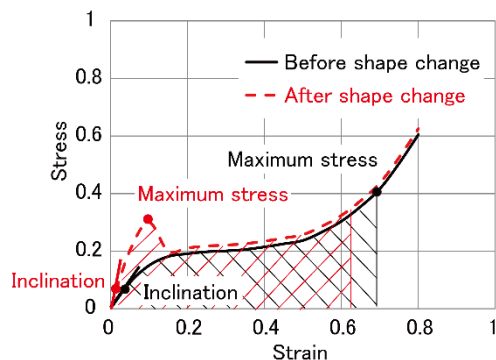


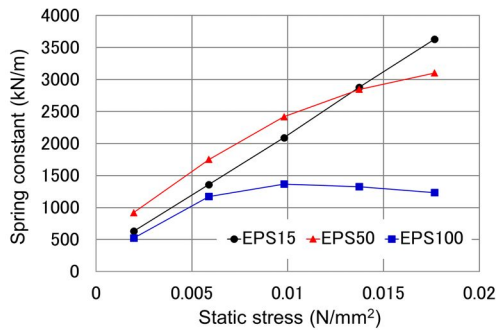
図3 緩衝材の応力 - ひずみ曲線の形状変更

4. 研究成果

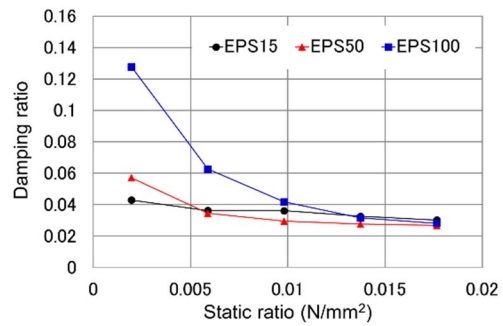
(1) 防振性能に関する物性値の調査

発泡ポリスチレンを用いた振動実験を行い、静的応力を変えながら緩衝材のバネ定数および減衰比を調査した。図4にさまざまな静的応力におけるバネ定数および減衰比を示す。バネ定数は静的応力とともに大きくなるが、発泡倍率が大きくなるとほぼ一定値を示す傾向にある。一方、減衰比は発泡倍率 15 および 50 倍では静的応力に対して大きく変化しないが、発泡倍率 100 倍では減少する傾向がみられる。このように静的応力がバネ定数や減衰比に及ぼす影響について確認した。

さらに、これら物性値の調査結果から、任意の静的応力における伝達関数の推定が可能かどうかを検討した。発泡倍率 15 倍、静的応力 0.012N/mm² の条件を取り上げ、図4のデータから導出した近似曲線を用いてバネ定数と減衰比を求めた。得られた値と 1 自由度系の共振周波数および伝達率の算出式から推定した伝達関数と実測した伝達関数を比較した。その結果、共振周波数と伝達率の最大値は、推定結果が 72.4Hz と 14.6、実測結果が 75.1Hz と 14.5 であり、誤差は数%以内に収まった。このように物性値と静的応力との関係をデータベース化しておけば、任意の静的応力における伝達関数の推定に利用でき、防振設計に役立つことがわかった。



(a) バネ定数 - 静的応力曲線



(b) 減衰比 - 静的応力曲線

図 4 さまざまな静的応力におけるバネ定数および減衰比

(2) 緩衝設計と防振設計との関係調査

緩衝設計の諸条件(包装製品の質量と許容加速度、緩衝材の厚さと発泡倍率)と防振設計に必要な共振周波数帯との関係を調査した。ここでは一例として、包装製品の許容加速度および緩衝材の厚さと共振周波数帯との関係を取り上げる。図5に緩衝材の厚さ50 cm、発泡倍率15倍の条件で、包装製品の許容加速度を27 Gから80 Gまで変化させたときの共振周波数帯の変化を示す。許容加速度が大きくなるとともに、共振周波数帯が広がっている。また図6に包装製品の許容加速度50G、緩衝材の発泡倍率15倍の条件で、緩衝材の厚さを3 cmから10 cmまで変化させたときの共振周波数帯の変化を示す。厚さが大きくなるとともに、共振周波数帯は低周波数帯に変化している。このように包装製品の質量や許容加速度、緩衝材の厚さや発泡倍率が共振周波数帯に及ぼす影響について明らかにした。

さらに、包装製品特有の共振現象がみられる原因を検討するために、緩衝材の使用量と共振周波数帯との関係を考察した。図7に包装製品の許容加速度50 G、緩衝材の発泡倍率15倍の条件における共振周波数の推移を示す。また図8に緩衝材の発泡倍率15倍の条件で、緩衝材の厚さを2 cmから8 cmまで変化させたときの最大加速度 - 静的応力曲線と共振周波数 - 静的応力曲線を示す。静的応力が増大するとともに、共振周波数は低下する傾向にある。また静的応力を大きく、すなわち、緩衝材の接触面積を小さくし、使用量を抑えると、共振周波数が30 Hz以下になる。ここで、共振周波数が30 Hz以下になる静的応力を図8の最大加速度 - 静的応力曲線上に矢印で示す。厚さが2 cm以外のどの厚さにおいても、共振周波数が30 Hz以下になる静的応力が存在している。このように使用量を抑えて緩衝設計することは、約10 Hz~30 Hzの特定の周波数帯で包装製品が共振する包装製品特有の共振現象が起きる一因であることを見出した。

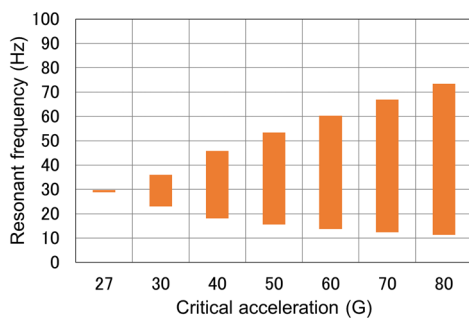


図 5 包装製品の許容加速度と共振周波数帯との関係 (厚さ 50 cm、倍率 15 倍)

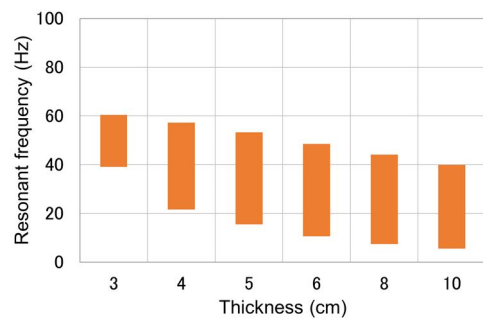


図 6 緩衝材の厚さと共振周波数帯との関係 (許容加速度 50 G、倍率 15 倍)

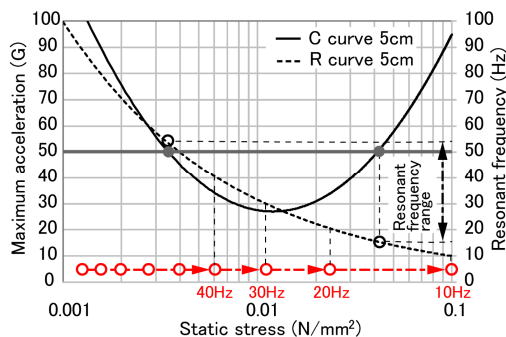


図 7 共振周波数の推移 (許容加速度 50 G、倍率 15 倍)

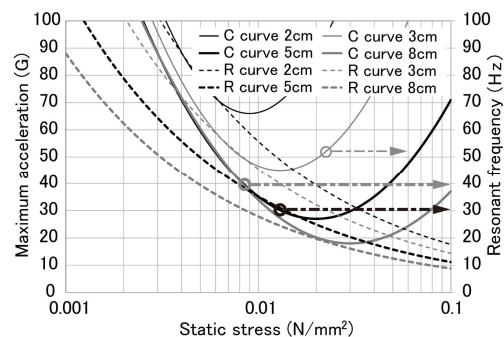


図 8 最大加速度 - 静的応力曲線と共振周波数 - 静的応力曲線 (倍率 15 倍)

(3) 共振周波数の調整方法の考案

緩衝材の応力 - ひずみ曲線の立ち上がりをさらに急峻な形状に変更することにより、包装貨物の共振周波数を上げ、荷台振動の卓越周波数帯との一致を回避する方法を考案した。図9に形状変更前後における応力 - ひずみ曲線(以下、形状変更前をパターン0、形状変更された3種類をパターン1、2および3と呼ぶ)を示す。ここでは、ひずみ0.1で応力がピークになる凸の2次関数の応力 - ひずみ曲線を基の曲線に足し合わせることで、初期ひずみでの傾きが大きくなるように形状変更が行われている。

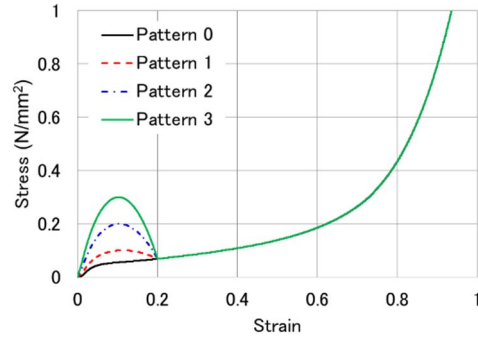


図9 形状変更前後における緩衝材の応力 - ひずみ曲線

さらに、提案した共振周波数の調整方法の効果を明らかにするために、緩衝材の応力 - ひずみ曲線の形状変更が、落下時の最大加速度および加振時の加速度実効値の低減に及ぼす影響について解析した。図10に形状変更前後における緩衝材の最大加速度 - 静的応力曲線を、図11に共振周波数 - 静的応力曲線を示す。また、図12に形状変更前後における静的応力 0.0075 N/mm^2 での最大加速度および加速度実効値を示す。形状変更により包装貨物の共振周波数は荷台振動の卓越周波数帯よりも高くなり、加速度実効値は小さくなっている。また形状変更の割合により、最大加速度にはほぼ影響を及ぼさず、加速度実効値は小さくなっている。このように緩衝材の応力 - ひずみ曲線の立ち上がりを急峻にすることは、緩衝と防振の両立に有効であることが明らかになった。

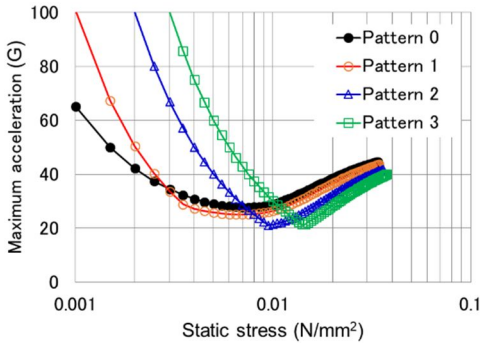


図10 形状変更前後における緩衝材の最大加速度 - 静的応力曲線

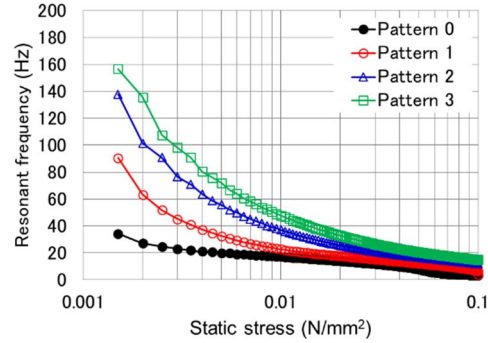
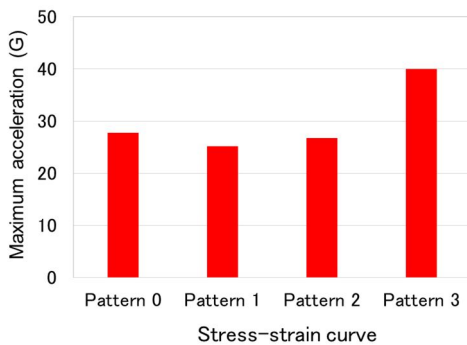
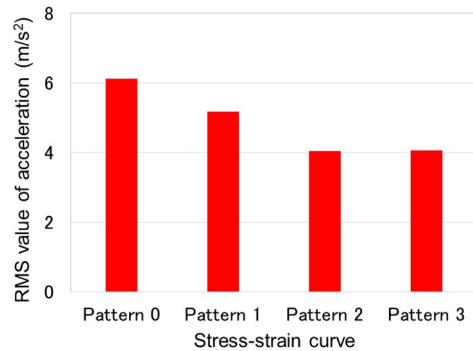


図11 形状変更前後における緩衝材の共振周波数 - 静的応力曲線



(a) 落下時の最大加速度



(b) 加振時の加速度実効値

図12 形状変更前後における最大加速度および加速度実効値

< 引用文献 >

張奇、斎藤勝彦、長岡克樹、ハイブリッド緩衝防振包装設計の提案、日本包装学会誌、Vol. 23、No.6、2014 .
 Herbert H. Schueneman, Cushion Material Testing, WESTPACK.
 由木俊、緩衝設計方法、日本包装技術協会別冊 No.7、58-84、1988 .
 Gray Burgess, Consolidation of Cushion Curves, Packaging Technology and Science, Vol.3, 189-194, 1990.
 Kazuki Tsuda, Akira Hosoyama, Shogo Horiguchi, Relation between Conditions of Cushioning Design and Resonant Frequencies of Cushion-Product System, 29th IAPRI Symposium on Packaging 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍	4. 巻 -
2. 論文標題 緩衝材の応力 - ひずみ曲線の形状変更による包装貨物の共振周波数の調整 ~ 落下時の最大加速度および加振時の加速度実効値の低減効果 ~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本包装学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍
2. 発表標題 緩衝と防振の両立に適した緩衝材の補強方法に関する検討
3. 学会等名 日本包装学会第29回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Tsuda, Akira Hosoyama, Shogo Horiguchi
2. 発表標題 Relation between Conditions of Cushioning Design and Resonant frequencies of Cushion-Product System
3. 学会等名 29th IAPRI Symposium on Packaging 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津田和城、細山亮、堀口翔伍
2. 発表標題 防振設計に役立つさまざまな静的応力下における緩衝材の物性に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本包装学会第27回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究協力者	細山 亮 (Hosoyama Akira) (10530074)	大阪産業技術研究所・製品信頼性研究部・主任研究員 (84431)	
研究協力者	堀口 翔伍 (Horiguchi Shogo) (20736300)	大阪産業技術研究所・製品信頼性研究部・研究員 (84431)	