

緩衝材を介した衝撃波形と衝撃試験の衝撃波形における製品内部への加速度応答の比較

堀口 翔伍*、津田 和城*、細山 亮*

Comparison of Acceleration Response Inside Products in Shock Waveform Through Cushioning Material and Shock Waveform of Shock Test

Shogo HORIGUCHI*, Kazuki TSUDA* and Akira HOSOYAMA*

輸送中の衝撃から製品を守るための緩衝設計では、許容加速度を基に緩衝材の使用量が決定される。許容加速度は製品衝撃強さ試験により台形波を用いて計測される。しかし、包装貨物中で製品に作用する衝撃は緩衝材により異なる。許容加速度の取得に用いた衝撃波形と包装貨物中で製品に作用する衝撃波形が異なる場合、適切な緩衝設計とならない。本研究では、台形波と正弦半波における衝撃応答スペクトルと緩衝材を介して製品に作用する衝撃による衝撃応答スペクトルを比較した。その結果、緩衝材として発泡ポリエチレンを用いる場合は衝撃試験で正弦半波を、段ボールを用いる場合は台形波を用いる必要があることが示された。

In packaging design of cushioning for protecting products from shock during transportation, the amount of cushioning material used is determined based on critical acceleration, which is measured using trapezoidal waves via a mechanical shock fragility test of the product. However, the shock affecting the product in the packaged cargo varies depending on the cushioning material. If the shock waveform used to obtain the critical acceleration is different from the shock waveform affecting the product in the package, the design of the packaging would not be appropriate.

In this study, the shock response spectra of trapezoidal and half-sine waves are compared with those of the shock affecting the product through the cushioning material. Results suggest that half-sine waves should be used in the mechanical shock fragility tests when using foamed polyethylene as the cushioning material, whereas trapezoidal waves should be used when using corrugated cardboard.

キーワード：包装、製品衝撃強さ試験、衝撃試験、緩衝設計、緩衝材、正弦半波

Keywords : Packaging, Mechanical shock fragility test, Shock test, Cushioning design, Cushioning

*(地独)大阪産業技術研究所, Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology (ORIST). 2-7-1. Ayumino, Izumi-city, Osaka 594-1157, Japan, 連絡者(Corresponding author): 堀口翔伍(Shogo HORIGUCHI) TEL: 0725-51-2719, Email: horiguchis@orist.jp

1. 緒言

輸送中の衝撃から製品を守るために緩衝設計がなされる。緩衝設計においては、輸送中の落下衝撃と製品の衝撃強さを比較して製品が破損しないように緩衝材を用いて落下衝撃を緩和する。この際、緩衝材が少なすぎると製品が破損する欠陥包装に、多すぎると過剰包装となる。

製品の衝撃強さは、JIS Z 0119¹⁾で規定されている製品衝撃強さ試験により評価できる。この試験は R.E.Newton²⁾により提唱された損傷境界曲線（Damage Boundary Curve：以下、DBC とする）の評価を目的とし、許容速度変化試験と許容加速度試験で構成される。緩衝材の必要量を決定するための許容加速度は衝撃波形により異なる^{2,3)}。そのため、許容加速度試験では様々な衝撃波形で破損しない許容加速度を取得するため、台形波を用いる。しかし、輸送中に緩衝材を介して製品に作用する衝撃は台形波とは限らないため、過剰包装を引き起こす可能性がある。そこで、緩衝設計後の落下試験で取得した衝撃波形から算出した DBC と落下試験で発生した加速度や速度変化との比較による緩衝設計の安全性の評価方法⁴⁾が報告された。この報告では、緩衝設計後に緩衝設計が正しいかどうかの評価は可能であるが、緩衝設計には台形波で取得した許容加速度を用いるため、緩衝設計の段階で使用する緩衝材に応じた適切な緩衝設計はできない。適切に緩衝設計をするためには、使用する緩衝材に適した衝

撃波形を用いて取得した許容加速度を用いる必要がある。そこで、我々は正弦半波を用いて許容加速度を取得する試験方法を提案した⁵⁾。

これまでに許容加速度試験で用いる衝撃波形について、段ボール箱に梱包された包装貨物中で緩衝材を介して製品に作用する衝撃波形との形状比較により定性的に検討⁵⁾した。そこで本研究では、それぞれの衝撃波形を加速度応答の観点から比較することで、緩衝材ごとに許容加速度試験に用いる適切な衝撃波形を検討する。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2章において、矩形波と正弦半波における加速度応答の違いによる衝撃易損性への影響について述べる。次に、3章では、錘を緩衝材に落下させた衝撃波形を用いて、1自由度バネマス系に作用させる計算をした加速度応答倍率を矩形波や正弦半波の理想波形と比較する。4章では、製品内部の加速度応答倍率を製品衝撃強さ試験と緩衝材を用いた落下試験において比較する。さらに、5章では、実験で得られた各緩衝材の特性により適切な衝撃試験波形について考察する。最後に、6章のまとめとする。

2. 衝撃波形の違いによる衝撃易損性への影響⁵⁾

過去の研究において、発泡ポリエチレンと段ボールを緩衝材として用いた際に製品に作用する衝撃波形が異なることを

明らかにした。このことから、製品に作用する衝撃波形は緩衝材の特性による影響を受けると考えられる。製品に作用する衝撃波形が異なると製品内部の加速度応答は異なる。そのため、同一の最大加速度を持つ衝撃波形でも衝撃易損性は異なる。

例えば、1自由度バネマス系に矩形波と正弦半波を与えた場合、有効作用時間および固有振動数に対する加速度応答倍率を示した衝撃応答スペクトル（Shock Response Spectrum：以下、SRS とする）は **Fig.1** となり、有効作用時間と固有振動数の積が大きくなると正弦半波と矩形波の加速度応答倍率の差は大きくなる。

ここで、矩形波の試験による許容加速度を用いて緩衝設計をしたが、製品に正弦半波の衝撃が作用した場合を考える。この場合、矩形波より正弦半波の方が加速度応答倍率は小さいため、製品内部に作用する加速度は許容値より小さくなり、破損までに余裕があり過剰包装につながる。

このように、許容加速度を求める試験の衝撃波形と、包装貨物中で製品に作用する衝撃波形の加速度応答が異なると適

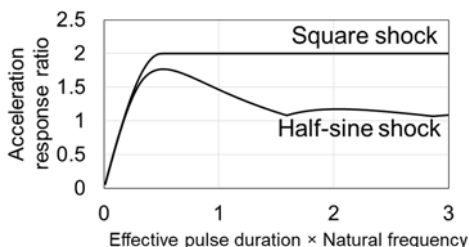


Fig.1 Difference between SRSs in square and half-sine shock

正な緩衝設計を行うことが出来ない。よって、実際の包装貨物中で緩衝材を介して製品に作用する衝撃波形を把握し、同様の SRS を持つ衝撃波形を許容加速度試験で選択することが適正包装につながる。

3. 錘の落下による検証

緩衝材に錘を落下させた際に発生する衝撃波形と矩形波や正弦半波の理想波形を 1 自由度バネマス系に作用させる計算をした際の SRS を比較する。

3.1 実験方法

包装貨物中で緩衝材を介して製品に作用する衝撃を模擬した衝撃波形を取得した。クッションテスター (**Fig.2**) を用いて 5.8 kg の錘を製品に見立てて、緩衝材に落下させることで衝撃波形を取得した。また、取得した衝撃を 1 自由度バネマス系に作用させる計算をした際の SRS を比較した。



Fig.2 Cushion tester

3.2 実験試料

緩衝材として発泡ポリエチレンと段ボールを用いた。発泡ポリエチレンは発泡

倍率を 30 倍とし、動圧縮による緩衝能力を評価するため Fig.3 のような直方体形状とした。また、段ボールは A フルートとし、圧壊による緩衝能力を評価するため Fig.4 の形状のもの 4 個を実験試料として用いた。

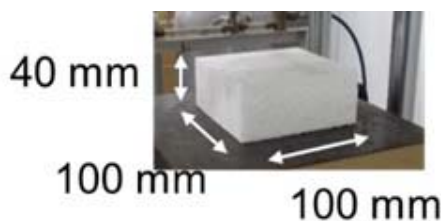


Fig.3 Formed polyethylene

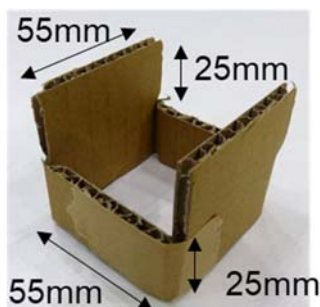


Fig.4 Corrugated cardboard

3.3 実験結果

3.3.1 発泡ポリエチレン

Fig.3 の発泡ポリエチレンに高さ 60 cm から 5.8 kg の錘を落下させた場合、Fig.5 に示す衝撃波形が得られた。この衝撃波形を 1 自由度バネマス系に作用させる計算をすると SRS は Fig.6 となり、理想波形（正弦半波・矩形波）と比較する。正弦半波の SRS に対しては-17%~+16%の差であり正弦半波の周りの値を取り、同様の傾向を示した。一方、矩形波の SRS に対

しては-47%~-18%と常に小さい結果となった。

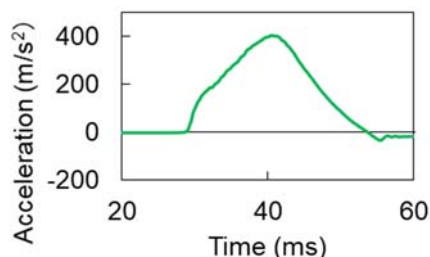


Fig.5 Shock waveform by formed polyethylene

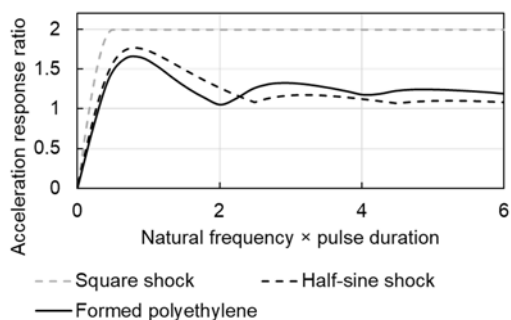


Fig.6 SRS of formed polyethylene

3.3.2 段ボール

Fig.4 の段ボール 4 個に高さ 50 cm から 5.8 kg の錘を落下させた場合、Fig.7 に示す衝撃波形が得られた。この衝撃波形を 1 自由度バネマス系に作用させる計算をすると SRS は Fig.8 となった。理想波形（正弦半波・矩形波）と比較すると、正弦半波の SRS に対しては①付近で-16%と負の最大となり、②付近で+44%と正の最大となった。矩形波の SRS に対しては-20%~-53%と常に小さい結果となった。以上より、正弦半波とも矩形波とも異なる SRS を持つ結果となった。

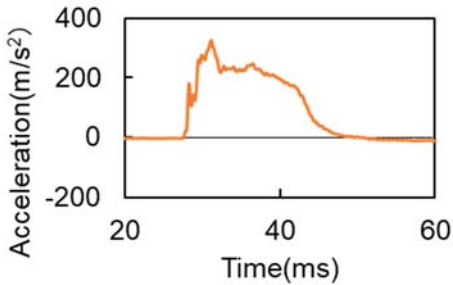


Fig.7 Shock waveform by corrugated cardboard

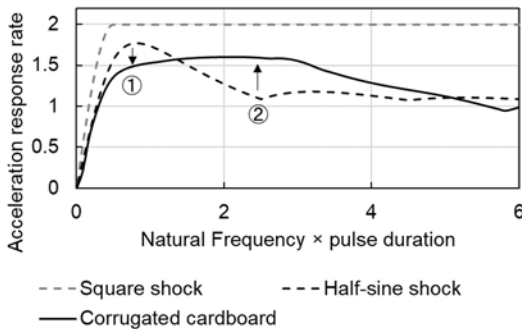


Fig.8 SRS of corrugated cardboard

4. 製品内部の加速度応答による検証

製品衝撃強さ試験において許容加速度は非破損時における衝撃試験機のテーブルの最大加速度を用いる。そして、包装貨物中で緩衝材を介して製品筐体には作用する衝撃の最大加速度を許容加速度以下となるよう緩衝設計がなされる。

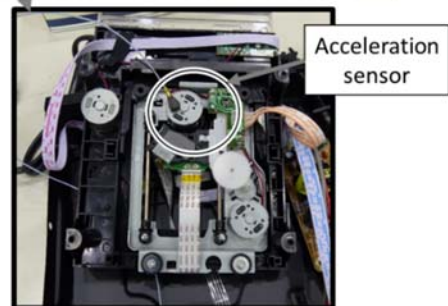
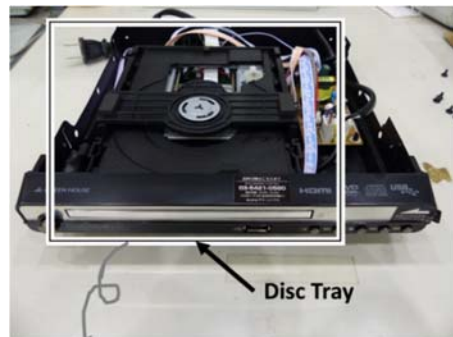
そこで本章においては、衝撃試験機のテーブルに作用する衝撃と製品筐体には作用する衝撃が同一であると仮定し、製品衝撃強さ試験では衝撃試験機のテーブルを基準とし、落下試験では製品筐体を基準として、製品内部への加速度応答倍率を実験により取得し、比較する。

4.1 実験に用いた製品

実験試料として、Fig.9 に示す DVD プレイヤー (225 mm×230 mm×50 mm、1.2 kg) を用いた。また、内部のトレイ部 (Fig.9(b)) の裏側に加速度センサーを取り付けて、製品に作用させる衝撃の作用時間ごとの加速度応答を取得した。



(a)Outside view



(b)Inside view

Fig.9 Test sample (DVD Player)

4.2 衝撃試験機による加速度応答

4.2.1 実験方法

衝撃試験機に実験試料（DVD プレイヤー）を Fig.10 に示すように固定し、台形波と正弦半波を用いて加速度応答を取得した。使用した衝撃の作用時間は台形波では 5 ms～26 ms、正弦半波では 2 ms～26 ms とした。また、加速度応答倍率は衝撃試験機のテーブルの最大加速度に対するトレイ部の最大加速度の倍率とした。



Fig.10 Shock test

4.2.2 実験結果

衝撃試験機のテーブルの衝撃作用時間を横軸に加速度応答倍率を Fig.11 に示す。なお、Fig.11 の作用時間及び加速度応答倍率は同じ条件により 3 回測定した平均値を用いた。

台形波については 7 ms までは加速度応答倍率が増加し、7 ms を超えると約 3 倍で一定となった。一方で、正弦半波については約 8 ms で加速度応答倍率は 2.7 倍で最大となり、10 ms を超えると徐々に小さくなった。これらはスケールが異なるものの傾向として Fig. 1 の 1 自由度バネマ

ス系と一致している。スケールが異なる原因は DVD プレイヤーのトレイ部への伝達が 1 自由度バネマス系でないことが原因と考えられるが、本章で行う衝撃試験と落下試験は同一の系（同一の DVD プレイヤー）で評価するため、加速度応答の比較は可能である。

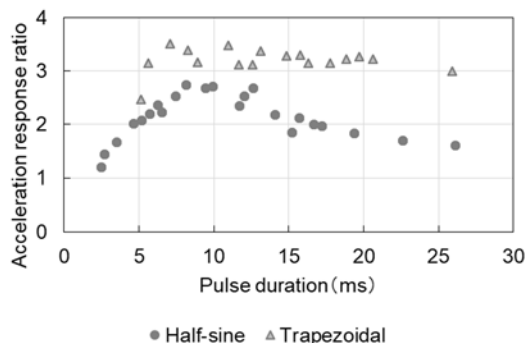


Fig.11 Acceleration response ratio by shock test

4.3 落下試験による加速度応答

4.3.1 実験方法

包装貨物中で緩衝材を介して製品に作用する衝撃を模擬するため、Fig.12 に示すように実験試料（DVD プレイヤー）の底面に緩衝材（発泡ポリエチレン・段ボール）を固定し、Fig.13 に示す落下試験機により底面から自由落下させることで、落下衝撃時の加速度波形を取得した。試料筐体（Fig.12）とトレイ部（Fig.9(b)）に取り付けた加速度センサーにより加速度応答倍率を取得する。

発泡ポリエチレンについては、3 章と同様に Fig.12(a) に示した直方体状の発泡ポリエチレンを用いた。Table 1 に示すよう

に発泡倍率（15 倍・30 倍）や実験試料と緩衝材が接する面積を変化させることで実験試料に作用する衝撃の作用時間を 4 ms～24 ms で変化させた。また、厚さはすべて 40 mm とし、落下高さはそれぞれ **Table 1** に示す値とした。

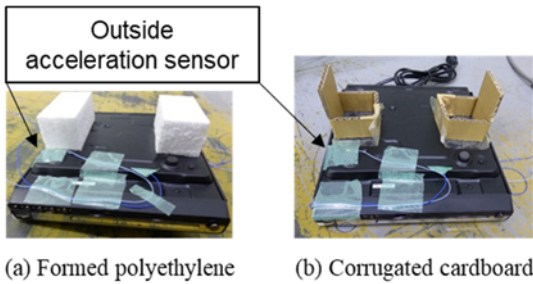


Fig.12 Test samples for drop tests



Fig.13 Drop test machine

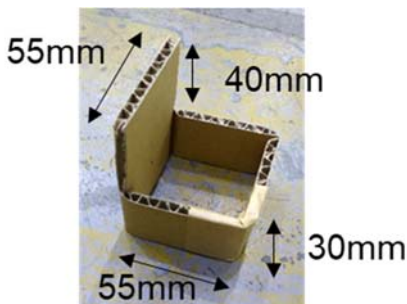


Fig.14 Corrugated cardboard (one side)

段ボールについては、3 章と同様に **Fig.4** の 2 辺の段ボールの他、**Fig. 14** の 1 辺のみの段ボールを用いた。1 辺のみとした場合、緩衝距離が必要となるため、圧壊する部分の高さを 40 mm と長くした。**Table 2** に示すように辺の長さ、辺の数 (**Fig.4,14**) および落下高さを変化させることで実験試料に作用する衝撃の作用時間を 5 ms～19 ms で変化させた。落下高さを変化させたのは、圧壊により作用時間が変化するためである。

Table 1 Experimental sample of foamed polyethylene

Foaming magnification	Contact area	Drop height
15	10000 mm ²	400 mm
30	15000 mm ²	400 mm
30	12500 mm ²	400 mm
30	10000 mm ²	400 mm
30	7500 mm ²	600 mm
30	5000 mm ²	600 mm
30	2700 mm ²	600 mm
30	1800 mm ²	600 mm

Table 2 Experimental sample of corrugated cardboard

Type	One side length	Piece	Drop height
Both side	55 mm	2	600 mm
Both side	55 mm	2	800 mm
One side	55 mm	2	600 mm
One side	55 mm	2	800 mm
One side	40 mm	2	800 mm

4.3.2 実験結果

4.3.2.1 発泡ポリエチレン

作用時間ごとの加速度応答倍率を **Fig.15** に示す。**Fig.15** の作用時間及び加速度応答倍率は同じ条件により 3 回計測し

た平均値とした。衝撃試験機による加速度応答 (Fig.11) と比較すると、正弦半波に対しては-27%~+19%と正弦半波の結果の周りの値となり同様の傾向を示したが、台形波に対しては-51%~-11%と小さい値となった。

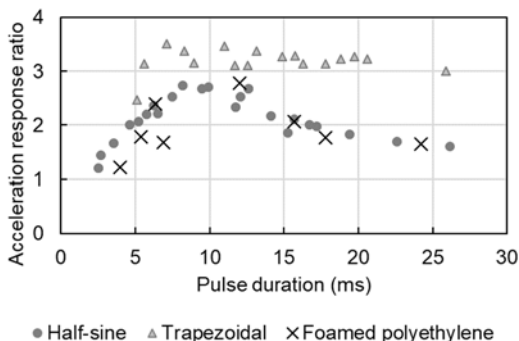


Fig.15 Difference of acceleration response ratio (Fig.11 VS. Foamed polyethylene)

4.3.2.2 段ボール

作用時間ごとの加速度応答倍率を Fig.16 に示す。Fig.16 の作用時間及び加速度応答倍率は、同じ条件により 3 回計測した平均値とした。衝撃試験機による加速度応答 (Fig.11) と比較すると、正弦半波に対しては-35%~+13%であり、特に正

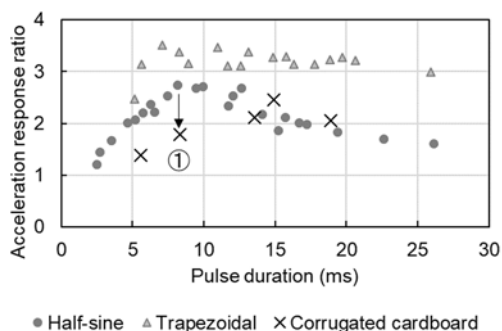


Fig.16 Difference of acceleration response ratio (Fig.11 VS. Corrugated cardboard)

弦半波の最大値である①で負の最大である-35%となった。台形波に対しては-47%~-25%と小さい値となった。

5. 考察

5.1 発泡ポリエチレン

発泡ポリエチレンの場合、3 章 (Fig.5) において、正弦半波に近い形状の波形が得られた。また、3 章 (Fig.6) と 4 章 (Fig.15) の両方で正弦半波の加速度応答倍率の周囲の値を取り、3 章で-17%~+16%、4 章では-27%~+19%となり、発泡ポリエチレンの加速度応答は正弦半波の加速度応答と同様の傾向を示した。一方、矩形波 (4 章では台形波) の加速度応答倍率に対しては 3 章で-47%~-18%、4 章で-51%~-11%となった。正弦半波との比較、矩形波との比較の両方において、3 章の結果と 4 章の結果で同様の傾向を示していることが確認できた。また、波形の見た目と加速度応答の評価は一致した。

緩衝設計の観点では、発泡ポリエチレンでの加速度応答倍率は矩形波 (台形波) よりも小さいことから、JIS Z 0119 で定められた台形波を用いて取得する許容加速度では過剰包装となる。一方、正弦半波の加速度応答倍率と同様の傾向を示すことから、正弦半波で許容加速度を取得することで適切な緩衝設計を実施できる可能性を見出した。

5.2 段ボール

段ボールの場合、3 章 (Fig.7) において

台形波に近い形状の波形が得られた。また、正弦半波の加速度応答に対する差は、3章 (Fig.8) と 4章 (Fig.16) の両方で①の正弦半波の加速度応答倍率の最大値付近で負の最大値となった。一方、3章で正の最大値となった②は 4章では対応する作用時間での実験ができなかったため比較できなかった。一方、矩形波 (4章では台形波) については 3章では-53%~-20%、4章では-47%~-25%となった。以上より、4章で実験出来た範囲ではあるが、3章と4章で同様の傾向を示していることが確認できた。一方、波形の見た目は台形波に近い形状であるが、加速度応答は正弦半波とも台形波とも異なっており、波形の見た目だけでなく加速度応答も評価する必要性が示された。

緩衝設計の観点では、段ボールでの加速度応答倍率は矩形波 (台形波) よりも小さいが、正弦半波に対して 3章で最大+40%の加速度応答倍率が示されているため、輸送中の破損を防ぐ目的から台形波による許容加速度を用いる必要がある。

6. まとめ

これまでの研究により、適切な緩衝設計を実施するために、緩衝材の緩衝特性により異なる衝撃波形の違いを形状により定性的に検討した。より詳細に検討するため、本研究では製品内部への加速度応答に与える影響について検証を行った。その結果、発泡ポリエチレンにおいては、衝撃波形の見た目通り、正弦半波の加速

度応答倍率と同様の傾向を示した。一方で、段ボールについては、衝撃波形は台形波に見えるものの、加速度応答倍率は台形波よりは小さく、正弦半波とも異なる特性を示した。このことから、発泡ポリエチレンについては従来の JIS Z 0119 における台形波により取得する許容加速度では過剰包装となる可能性があり、正弦半波による許容加速度の取得により過剰包装を改善できる可能性を見出した。一方で、段ボールにおいては台形波で許容加速度を取得しなければ輸送中に破損する可能性がある。また、衝撃波形の形状だけでなく、加速度応答について検討することが緩衝設計において重要であることを確認した。最後に、他の緩衝材についても衝撃波形を取得し SRS を評価することによって、適正な衝撃波形を選択できると考えられる。

<参考文献>

- 1) JIS Z 0119(2002)
- 2) R.E. Newton, Fragility Assessment Theory and Test Procedure, Monterey Research Laboratory, Monterey, CA (1968)
- 3) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 久保雅義, 寺岸義春, 段積み・粘弾性支持された製品の線形モデルによる衝撃強さの検討, 日本包装学会誌, 8(3), p.123(1999)
- 4) 川口和晃, 斎藤勝彦, 損傷境界曲線を用いた緩衝包装評価方法, 日本包装学会誌, 30(2), p.139(2021)

- 5) 堀口翔伍, 斎藤勝彦, 正弦半波による
1 試料での製品衝撃強さ試験, 日本包装学会誌, 29(6), p.437(2020)

(原稿受付 2022 年 5 月 24 日)

(原稿受理 2022 年 7 月 13 日)