

一般論文~~~~~

## 正弦半波による1試料での製品衝撃強さ試験

堀口翔伍<sup>\*,\*\*</sup>、斎藤勝彦<sup>\*\*\*</sup>

### Mechanical Shock Fragility Testing Method Using Only Half Sine Shocks with One Sample

Shogo Horiguchi<sup>\*,\*\*</sup> and Katsuhiko SAITO<sup>\*\*\*</sup>

欠陥包装や過剰包装は経済面、環境負荷の観点から問題となっており適正包装が求められている。適正包装には輸送中の落下高さと製品衝撃強さを用いた緩衝包装設計が不可欠である。しかし、製品衝撃強さの取得試験は、規格化されているものの広く実施されているとは言い難い。これまでに簡易に実施するために1試料で緩衝設計に必要な情報を得られる製品衝撃強さ試験を提案してきた。しかし、この試験には台形波と正弦半波の2種類の衝撃波形を使用する、台形波の最大加速度より大きな許容加速度を取得できない、貨物中で発生する衝撃波形が正弦半波の場合に過剰包装となる、と言った3つの課題があった。そこで、これらの課題を解決するため、1試料により正弦半波のみで製品衝撃強さを取得できる試験方法を提案する。なお、実製品を用いて本提案試験について実証を行い、台形波の最大加速度より大きい加速度帯で正弦半波による許容加速度の取得に成功した。

Proper packaging is required because defective packaging and over-packaging create economic and environmental problems. For proper packaging, cushioning packaging design in which the drop height during transportation and mechanical shock fragility of the product are considered is an effective method. Although the test method for determining mechanical shock fragility of a product is standardized, it is generally not performed. Therefore, we developed a mechanical shock fragility test method for a product that could obtain the information necessary for cushioning design using only one sample. However, there were three issues: (1) two types of shock waveforms, i.e., trapezoidal and half-sine waves were used for the test; (2) the critical acceleration that was higher than the maximum acceleration of the trapezoidal wave could not be obtained; (3) the cargo would be over-packaged if it generated a half-sine shock waveform. Therefore, we proposed a test method using only half-sine waves to solve these issues. We demonstrated the reliability of the proposed test method using actual products and succeeded in obtaining the critical acceleration of the product using the half-sine wave when the acceleration band was broader than the maximum acceleration of the trapezoidal wave.

キーワード：包装、製品衝撃強さ試験、衝撃試験、緩衝設計、正弦半波

Keywords : Packaging, Mechanical shock fragility test, Shock test, Cushioning design, Half-sine shock

\* 連絡者(Corresponding author)

(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, TEL: 0725-51-2719, Email: HoriguchiS@tri-osaka.jp

\*\*神戸大学大学院海事科学研究科博士後期課程 Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

\*\*\*神戸大学輸送包装研究室 Transport Packaging Laboratory, Kobe University

## 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。例えば、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。そのため、適切な緩衝設計を行うためには輸送中の落下高さと製品の衝撃強さの両方について知ることが重要となる。そこで、本研究では製品の衝撃強さを得るための方法について検討を行う。

製品の衝撃強さは JIS Z 0119<sup>1)</sup>で規定されている製品衝撃強さ試験（以下、JIS 法とする）により知ることができる。この試験は R.E.Newton<sup>2)</sup>により提唱された損傷境界曲線（Damage Boundary Curve：以下、DBC とする）を評価するための試験であり、許容速度変化試験と許容加速度試験の 2 つの試験から構成されている。それぞれの試験で試料を破壊する必要があり、最低 2 つの試料が必要となる。また、試験で与える衝撃値（速度変化と加速度）は、試験者が任意に決める必要があり、初心者の実施は難しい。従来の研究では複雑なモデルの使用<sup>3)</sup>、脆弱部の加速度測定<sup>4)</sup>、および統計解析<sup>5)</sup>などを行い、とりわけ正確性を追求した方法が提案されている。しかし、未だ難解なものばかりである。したがって、試験の普及拡大のため簡易的に実施できる方法が求められてきた。

そこで、我々は、これまでに 1 試料で実施できる方法として「1 試料による疲労影響を考慮した製品衝撃強さ試験<sup>6)</sup>（以下、従来法とする）」を提案した。この方法は、輸送中の落下高さに応じた速度変化において、①許容加速度試験を台形波で実施後、②同じ速度変化で短い正弦半波の衝撃の印加により、1 つの

試料で緩衝設計の要否と必要な場合に許容加速度を得る試験方法である。

この方法には 3 つの課題が残されている。

(1) ①の台形波の最大加速度と②の短い正弦半波の加速度の間に大きな隔たりがあるため許容加速度を過小評価してしまう。(2) 台形波を発生させる衝撃試験機が必要である。正弦半波のみ発生可能な衝撃試験機に比べ、台形波と正弦半波の両方を発生可能な衝撃試験機は機構が複雑で高価となるため普及率が低く実施できる機関が少ない。(3) 実際の輸送中に貨物中で製品に発生する衝撃波形が、試験で用いる衝撃波形と異なる形状を持つことである。衝撃波形の形状により製品に与える影響が異なる。

そのため上記 3 課題を解決するため、製品衝撃強さ試験について、正弦半波のみで実施可能な方法（以下、提案法とする）を提案する。正弦半波のみで実施可能になれば、許容加速度の評価精度を向上できるとともに、より普及率の高い試験機で実施できる。正弦半波のみを発生可能な簡易な試験機の提案<sup>7)</sup>も行われており、試験の普及が期待できる。

また、台形波と正弦半波では衝撃応答スペクトル（Shock Response Spectrum：以下、SRS とする）の違いから、異なる DBC を持つため、異なる許容加速度が得られる。特に本研究では、この違いが緩衝設計に与える影響について、包装貨物中で発生する衝撃波形と比較しながら検討する。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2. 理論において、矩形波と正弦半波における SRS と DBC の違いについて述べる。また、提案法の試験方法と試験加速度の増加方法について述べる。次に、3. 実験において、従来法

と提案法による実験と結果について述べる。さらに、4.考察において、従来法と提案法についての実験結果を比較する。加えて、緩衝材材質による衝撃波形の違いから従来法と提案法の使い分けについて検討する。最後に、5.結論とする。

## 2. 理論

本章では衝撃波形の形状による SRS と DBC の違いを述べ、提案法における試験方法と加速度増加方法について検討する。なお、本章では、台形波は矩形波に近似して考える。

### 2.1 矩形波と正弦半波の SRS と DBC

矩形波と正弦半波では衝撃の加速度応答が異なる。単純な系として Fig. 1 に示す 1 自由度バネ( $k$ )—マス( $m$ )系での衝撃加速度応答を考える。

矩形波および正弦半波を 1 自由度バネーマス系に与えた場合の加速度応答倍率を Fig. 2 に示す。有効作用時間と固有振動数の積により加速度応答倍率が変わる。また、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 SRS が大きく異なる。

DBC を Fig. 3 に示す。固有振動数を 160 Hz、脆弱部が壊れる応答加速度を  $980 \text{ m/s}^2$  とした例である。正弦半波と矩形波で許容速度変化は同じである、しかし、許容加速度は速度変化により異なり、正弦半波の方が大きくなっている。これは SRS の違いによるものである。

正弦半波の方が許容加速度が大きくなるため、Fig. 4 に示すように、矩形波の試験により取得した許容加速度を用いて緩衝設計を行った場合、実際の貨物中で正弦半波に近い衝撃が発生すると、過剰包装につながる。

一方、Fig. 5 に示すように、正弦半波の試験で取得した許容加速度を用いて緩衝設計を行った場合、貨物中で矩形波に近い衝撃波形が発生すると、欠陥包装になる。

つまり、試験で使用する衝撃波形と実際の貨物中で発生する衝撃波形が同一形状であることが適正包装には不可欠である。

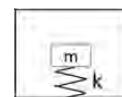


Fig. 1 One degree of freedom spring mass system

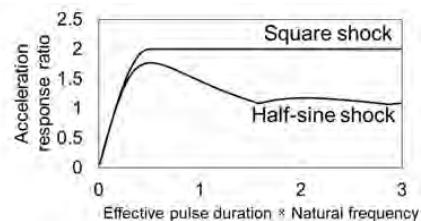


Fig. 2 Difference between SRSs in square and half-sine shock

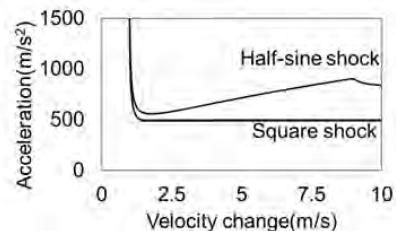
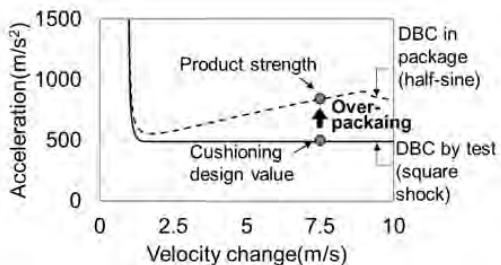
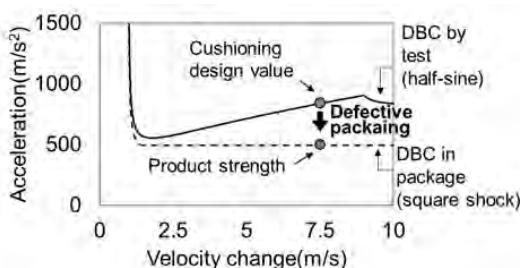


Fig. 3 Difference between DBCs in square and half-sine shock (natural frequency: 160Hz, response critical acceleration: 980m/s²)

## 正弦半波による1試料での製品衝撃強さ試験



**Fig. 4 Over-packaging due to difference in critical acceleration between square and half-sine shock**



**Fig. 5 Defective packaging due to difference in critical acceleration between square and half-sine shock**

## 2.2 正弦半波のみを用いた1試料による製品衝撃強さ試験

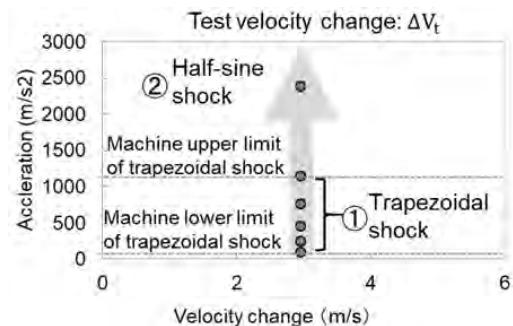
従来法を改良し、正弦半波のみを用いて1試料で実施できる製品衝撃強さ試験を提案する。

### 2.2.1 従来法とその課題

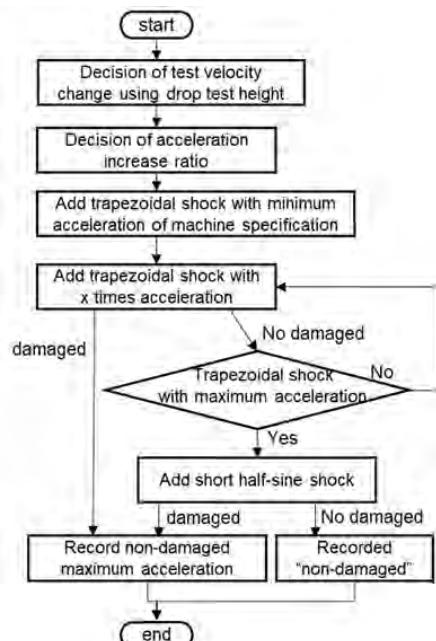
従来法は、1試料で緩衝設計に必要な製品衝撃強さを取得可能な試験方法である。2試料必要であった規格試験に対して、試験を実施する速度変化（以下、試験速度変化 $\Delta V_t$ とする）を、落下試験高さ $h$ を基準に式(1)で算出することで1試料で実施可能とした。なお、反発係数 $e$ は緩衝設計に用いる予定の緩衝材の反発係数を使用する。試験方法の概要を**Fig. 6**、手順を**Fig. 7**にそれぞれ示す。試験速度変化にお

いて、①台形波で許容加速度試験を行い、②作用時間の短い正弦半波を与える試験を実施する。なお、①では一定間隔で増加させていた加速度を一定倍率で増加させることで、蓄積疲労の影響を限定し、与える衝撃の回数制限の撤廃を可能とした。

$$\Delta V_t = (1 + e)\sqrt{2gh} \quad g: \text{gravity acceleration} \quad (1)$$



**Fig. 6 Overview of the conventional method<sup>6)</sup>**



**Fig. 7 Procedure of the conventional method**

6)

課題は次の3つである。

- (1) Fig. 8 に示すように、台形波の上限加速度と正弦半波の試験の間に試験できない加速度域が存在する。したがって、この加速度域に許容加速度がある製品では台形波の上限加速度で緩衝設計することになり、過剰包装の原因となる。
- (2) 台形波と正弦半波の 2 種類の波形を使用するため、高価な衝撃試験機が必要となる。
- (3) 前節で述べた貨物中で発生する衝撃波形の形状が正弦半波の場合に過剰包装となる。

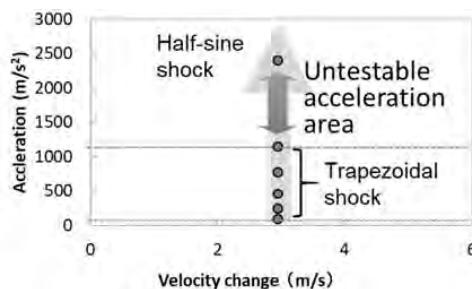


Fig. 8 Issue of the conventional method

### 2.2.2 提案法

正弦半波のみで試験を実施することで従来法の課題を解決できると考えた。台形波を正弦半波に置き換えた場合、試験方法の概要は Fig. 9 となり、手順は Fig. 10 として実施可能である。しかし、加速度の増加倍率は従来法では矩形波の応答加速度を基準に決めたため、正弦半波のみで実施するためには正弦半波に合わせた加速度増加倍率を決める必要がある。

### 2.2.3 試験加速度の増加倍率

従来法の台形波で用いた加速度の増加倍率は SRS が異なるために提案法の正弦半波に適用できない。そのため、台形波で用いた加速度増加倍率を正弦半波用に変換する補正值を

提案する。なお、本節では台形波を矩形波に近似して考える。

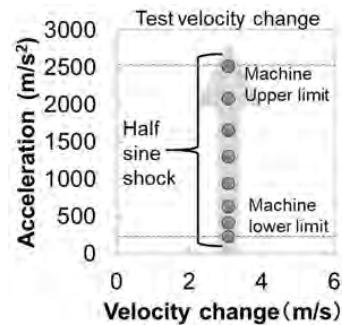


Fig. 9 Overview of half-sine only test

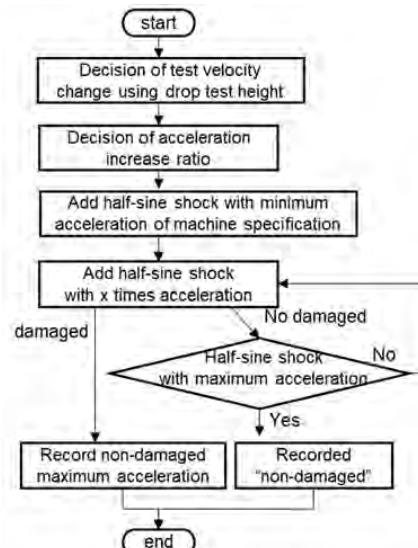


Fig. 10 Procedure of half-sine only test

従来法において、加速度増加倍率は許容加速度が求まる場合、矩形波の加速度の応答倍率は Fig. 11 の破線部に示すように 2 倍で一定であり、入力の加速度増加倍率と応答の加速度増加倍率が同じであることを前提としている<sup>6)</sup>。この前提の元で Fig. 12 に示すように最後の 2 回の衝撃による疲労値 A に対するそれ以前の衝撃による疲労値の合計 B の割合として定義した蓄積疲労割合を基準に式(2)<sup>6)</sup>によ

り加速度増加倍率  $r$  を決定した。 $\alpha$ は加速係数、 $\Delta_{\text{fatigue}}$ は許容蓄積疲労割合（試験毎に定める蓄積疲労割合の許容値）である。

$$r = \left( \frac{1 + \Delta_{\text{fatigue}}}{\Delta_{\text{fatigue}}} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} \quad (2)$$

一方で、Fig. 11 の破線部に示すように、正弦半波では応答倍率が変化するため、矩形波の加速度増加倍率をそのまま使用できない。

Fig. 13 に①→②と入力の加速度を 1.3 倍に増加させた場合の例（固有値 111 Hz、速度変化 3 m/s）を示す。同一の速度変化の時、作用時間が短くなるため、SRS 上では①→②と加速度応答倍率が変化する。①より②の方が加速度応答倍率が小さいため、応答の加速度は①→②で 1.2 倍にしかならない。これは蓄積疲労割合が想定より大きくなる原因となる。そこで、Fig. 14 に示すように、(A)正弦半波の入力の加速度増加倍率を、正弦半波の応答の加速度増加倍率の最小値が(B)矩形波での加速度増加倍率と等しくなるように設定する。設定した(A)(B)の組み合わせから、式(3)を満たす補正値を予め算出しておくことで、容易に試験に利用できる。また、補正値は矩形波で設定した加速度増加倍率に対して Fig. 15 のように算出できる。

(A)正弦半波の入力加速度の増加倍率 =

補正値

× (B) 矩形波の入力加速度の増加倍率 (3)

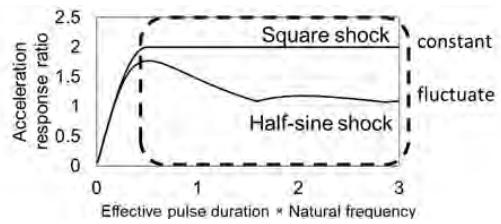


Fig. 11 Comparison of SRSs of between square shock and half-sine shock

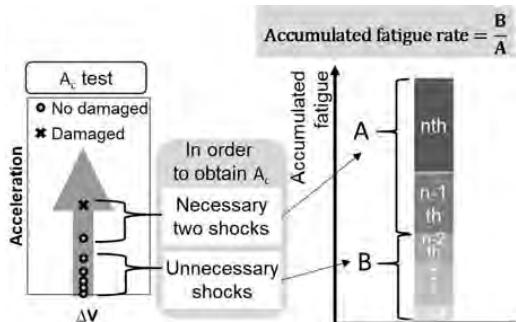


Fig. 12 Accumulated fatigue rate

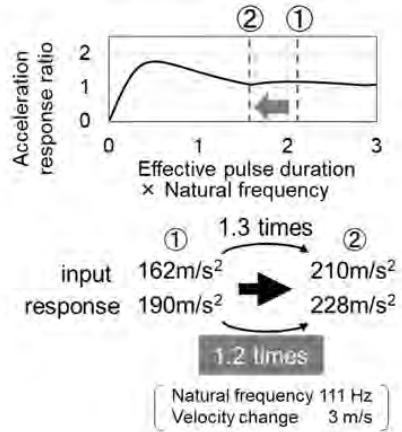


Fig. 13 Change in acceleration response ratio on half-sine shock

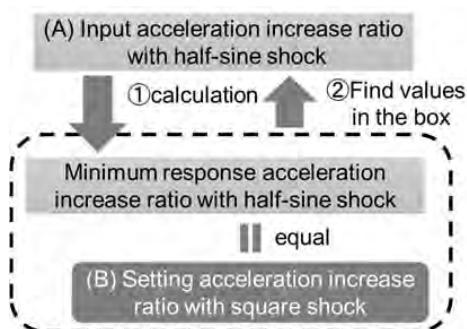


Fig. 14 Determination of acceleration increase ratio at half sine shock

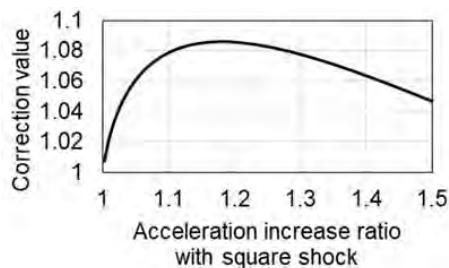


Fig. 15 Correction value of acceleration increase ratio from square shock to half sine shock

### 3. 実験による検証

DVD プレイヤーを用いて提案法と従来法による実験を行った。

#### 3.1 実験試料

実験試料として DVD プレイヤー (225 mm × 230 mm × 50 mm、重量 1200 g) を用いた。試験方向は底面のみとし、緩衝材による受け面を模擬するため Fig. 16 に示すように DVD プレイヤーのトレイが開閉不能となった場合とした。



Fig. 16 Test sample (DVD player)

#### 3.2 実験条件

実験試料の許容速度変化 ( $3.91 \text{ m/s}$ )<sup>8)</sup> と比較し、大小の速度変化の輸送環境を想定した場合を検証するため、 $\Delta V_t = 3.5 \sim 5.5 \text{ m/s}$  において 5 種類の速度変化で実施した。また、実験条件（加速度および速度変化）の設定のための試験装置の仕様は Table 1 の値を用いた。

Table 1 Set values as test machine specification in conventional method

Trapezoid shock pulse	
Minimum acceleration	$98 \text{ m/s}^2$
Maximum acceleration	$980 \text{ m/s}^2$
Minimum velocity change	$1.5 \text{ m/s}$
Maximum velocity change	$6 \text{ m/s}$
Minimum acceleration increase value	$49 \text{ m/s}^2$
Minimum acceleration increase ratio	$1.1x$
Half-sine shock pulse	
Maximum velocity change	$7 \text{ m/s}$ (short pulse only)
	$5.5 \text{ m/s}$ (other pulses)
Maximum and minimum acceleration	Depends on velocity change
Minimum acceleration increase value	$49 \text{ m/s}^2$
Minimum acceleration increase ratio	$1.18x$ or less

##### 3.2.1 従来法（台形波+正弦半波）

既報<sup>6,8)</sup>で実施した  $\Delta V_t = 3.9, 5.0, 5.5 \text{ m/s}$  に加え、 $\Delta V_t = 3.5, 4.5 \text{ m/s}$  についても実施した。試験で設定する加速度は次のように設定した。既報<sup>6)</sup>と同様に  $\Delta_{\text{fatigue}} = 5\%$ 、 $\alpha = 17$  とし、式 (2) から加速度増加倍率を 1.09 倍と算出し、試

験装置の加速度上下限の仕様に合わせて1.1倍とした。なお、Fig.17に $\Delta V_t$ 毎の加速度を示した。

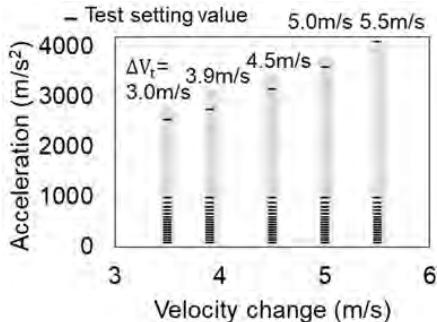


Fig. 17 Setting values on conventional method<sup>6,8)</sup>

### 3.2.2 提案法（正弦半波のみ）

試験速度変化は従来法同様、 $\Delta V_t = 3.5, 3.9, 4.5, 5.0, 5.5 \text{ m/s}$ とした。試験を実施する加速度は次のように決定した。提案法での加速度増加倍率は、式(3)を用いて従来法の加速度増加倍率1.09倍にFig. 15の補正值を乗算して1.18倍とした。加速度増加倍率1.18倍を用いて正弦半波の最低加速度から最大加速度まで試験加速度を増加させることとした。Fig. 18に $\Delta V_t$ 毎の加速度を示した。

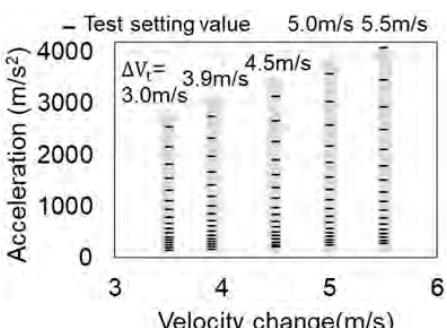


Fig. 18 Setting values on proposed method

## 3.3 実験結果

### 3.3.1 従来法による結果

従来法による結果をFig. 19に示す。 $\Delta V_t = 3.0, 3.9 \text{ m/s}$ については破損が確認されず、緩衝設計不要となった。一方、 $\Delta V_t = 4.5, 5.0, 5.5 \text{ m/s}$ については破損が確認されたため、緩衝設計が必要である。非破損の最大加速度および破損時の加速度は、 $\Delta V_t = 4.5 \text{ m/s}$ では、988 m/s<sup>2</sup>（台形波）および3446 m/s<sup>2</sup>（正弦半波）、 $\Delta V_t = 5.0 \text{ m/s}$ では973 m/s<sup>2</sup>（台形波）および3543 m/s<sup>2</sup>（正弦半波）、 $\Delta V_t = 5.5 \text{ m/s}$ では904 m/s<sup>2</sup>（台形波）および986 m/s<sup>2</sup>（台形波）であった。

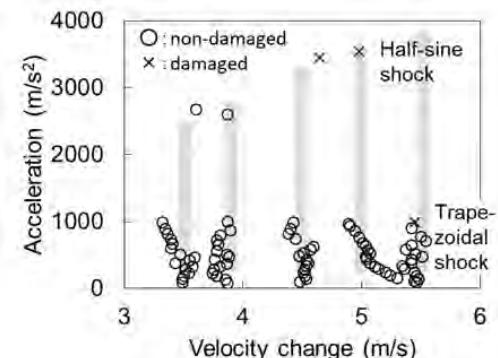


Fig. 19 Test results on conventional method

### 3.3.2 提案法による結果

提案法による結果をFig. 20に示す。 $\Delta V_t = 3.5, 3.9 \text{ m/s}$ については破損が確認されず、緩衝設計不要となった。 $\Delta V_t = 4.5, 5.0, 5.5 \text{ m/s}$ については破損が確認されたため、緩衝設計が必要である。非破損の最大加速度および破損時の加速度は、 $\Delta V_t = 4.5 \text{ m/s}$ では1962 m/s<sup>2</sup>および2117 m/s<sup>2</sup>、 $\Delta V_t = 5.0 \text{ m/s}$ では、1574 m/s<sup>2</sup>および1852 m/s<sup>2</sup>、 $\Delta V_t = 4.5 \text{ m/s}$ では、807 m/s<sup>2</sup>および984 m/s<sup>2</sup>であった。

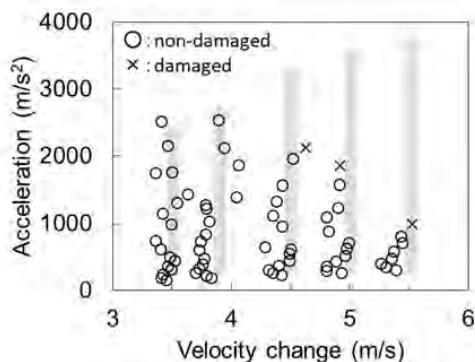


Fig. 20 Test results on proposed method

#### 4. 考察

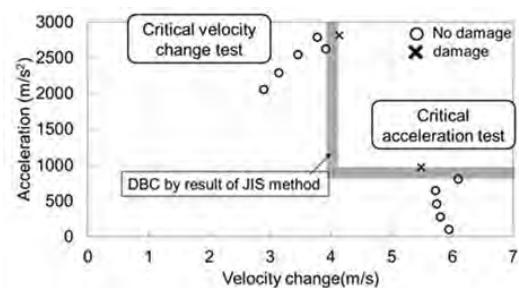
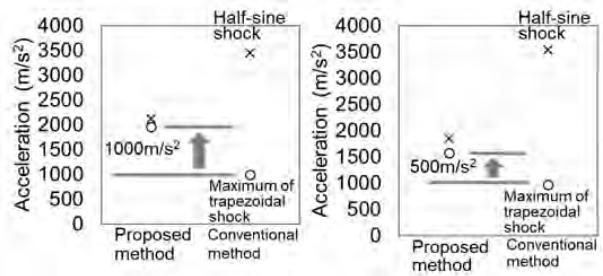
##### 4.1 DBC との関係

JIS Z 0119に準じた試験では Fig. 21 に示したDBCを得ており、許容速度変化は 3.91 m/s である<sup>8)</sup>。従来法、提案法共に速度変化 3.5、3.9 m/s では破損せず、4.5、5.0、5.5 m/s で破損した。これは JIS 法の許容速度変化試験の結果と一致する。

許容加速度は  $805 \text{ m/s}^2$  であり、従来法、提案法共に速度変化 5.5 m/s ではおおよそ一致する。速度変化 4.5、5.0 m/s においては、JIS 法では直線状の DBC しか得られないため、本来曲線である DBC の詳細な値は得られない。

Fig. 22 に (a)  $\Delta V_t = 4.5 \text{ m/s}$ 、(b)  $\Delta V_t = 5.0 \text{ m/s}$  における従来法と提案法の比較を示す。 $\Delta V_t = 4.5 \text{ m/s}$ において、非破損の最大加速度および破損加速度は、従来法では  $988 \text{ m/s}^2$ (台形波)および  $3446 \text{ m/s}^2$ (正弦半波)、提案法では  $1962 \text{ m/s}^2$  および  $2117 \text{ m/s}^2$  であった。また、 $\Delta V_t = 5.0 \text{ m/s}$ においては、非破損の最大加速度および破損加速度は、従来法では  $973 \text{ m/s}^2$ (台形波)および  $3543 \text{ m/s}^2$ (正弦半波)、提案法では  $1574 \text{ m/s}^2$  および  $1852 \text{ m/s}^2$  であった。両方の  $\Delta V_t$ において提案法では従来法と比べ、精度よく許容加速度を取得できた。

また、非破損の最大加速度は、従来法に比べ、提案法の方が  $\Delta V_t = 4.5 \text{ m/s}$  では約  $1000 \text{ m/s}^2$ 、 $\Delta V_t = 5.0 \text{ m/s}$  では約  $500 \text{ m/s}^2$  大きく、過剰包装の改善が可能である。したがって、台形波の最大加速度以上の許容加速度を持つ製品について過剰包装の大幅な改善が可能となる。

Fig. 21 Test result and DBC on JIS method<sup>8)</sup>

(a) Test velocity change: 4.5 m/s      (b) Test velocity change: 5.0 m/s

Fig. 22 Comparison of accuracy of critical acceleration between conventional method and proposed method

#### 4.2 緩衝材で発生する衝撃波形との比較

製品衝撃強さ試験における衝撃波形として、台形波および正弦半波のどちらの衝撃波形を用いるべきかを検討する。これまでに段ボール構造体<sup>9)</sup>および発泡ポリエチレン<sup>10)</sup>を用いた場合の衝撃波形が取得されている。本研究においても段ボール構造体と発泡ポリエチ

ンをそれぞれ緩衝材として用いた場合の貨物内で発生する衝撃波形の形状を確認する。

**Fig.23** に示した緩衝材用の衝撃試験機 (Lansmont 製 Model 23) を用いて 5.8kg の重りを製品と見立て、高さ 60cm から落下させ衝撃波形を取得した。



Fig. 23 Cushion tester

#### 4.2.1 段ボール構造体との比較

**Fig. 24** に示す段ボール構造体 (A フルート、 $110\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ) を実験に用いた。取得した衝撃波形を **Fig. 25** に示す。段ボール構造体を緩衝材として用いた場合、台形波に類似した衝撃波形が貨物内で発生する。そのため、従来通りの台形波を用いた許容加速度試験が必要となる。

正弦半波での許容加速度を使用する場合は、最悪のケースを想定した安全率を定める必要がある。**Fig. 3** に示したように、許容加速度は正弦半波の方が大きく、速度変化が大きくなると約 2 倍の許容加速度が得られている。証明は付録で行うが、最大で矩形波の許容加速度の 2 倍となる。そのため、段ボール構造体を緩衝材として用いる場合に、正弦半波の許容加速度を安全に適用するためには、許容加速度の半分の値を緩衝設計に使用する必要がある。

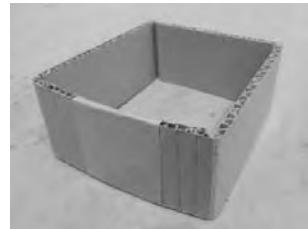


Fig. 24 Corrugated cardboard structure

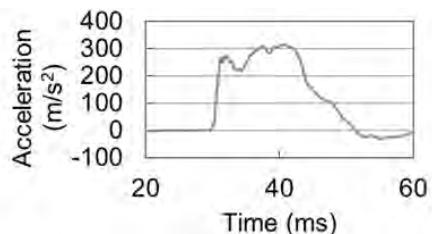


Fig. 25 Shock waveform by corrugated cardboard structure

#### 4.2.2 発泡ポリエチレンとの比較

**Fig. 26** に示す発泡ポリエチレン (発泡倍率 30 倍、 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ ) を実験に用いた。取得した衝撃波形を **Fig. 27** に示す。発泡ポリエチレンを用いた場合、貨物内では正弦半波に類似した衝撃波形が発生する。このため、緩衝材として発泡ポリエチレンを用いる場合は提案法により正弦半波の許容加速度を取得することで適正包装が可能であると考えられる。



Fig. 26 Foamed polyethylene

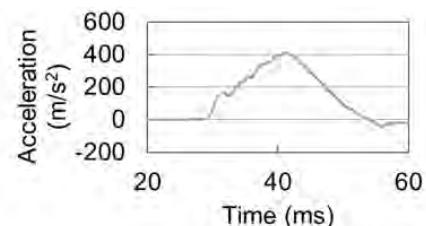


Fig. 27 Shock waveform by foamed polyethylene

## 5. 結論

本稿においては、正弦半波のみによる1試料による製品衝撃強さ試験を提案した。従来法では台形波の最大加速度と正弦半波との間の加速度域の許容加速度は測定できなかったが、提案法により測定可能となった。この結果、当該加速度域における許容加速度の取得精度が大幅に向上した。また、台形波が不要となったことで、正弦半波だけを発生できる試験機でも試験が可能となった。

また、発泡ポリエチレンを緩衝材として使用する場合、正弦半波に類似した形状の波形が発生するため、台形波の許容加速度を用いた場合は過剰包装となる。したがって、提案法で得られる正弦半波の許容加速度を用いることで適正包装が可能となることが示唆された。

一方で、段ボール構造体を緩衝材として用いる場合は台形波に類似した形状の波形が発生するため、台形波の許容加速度を用いることが望ましいことが分かった。正弦半波の許容加速度を用いる場合、安全を期すと許容加速度の半分の値を用いる必要があることが分かった。

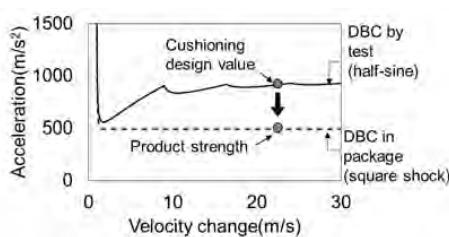
これまで、使用する緩衝材材質に対し、衝撃波形形状による定性的な評価しか行っていない。今後、製品衝撃強さ試験用の衝撃波形と包装貨物中で緩衝材により発生する衝撃波形による応答加速度の定量的な比較評価を行うことで、より精度の高い緩衝設計が実現できると考えられる。

## ＜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, 段積みされた製品の非線形モデルによる衝撃強さの検討, 9(1), p. 33 (2000)
- 4) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春, 「損傷境界曲線評価法」類型の考案及び試験方法の体系化, 日本包装学会誌, 11(4), p. 217 (2002)
- 5) S. Horiguchi, K. Saito, Test Method for Enhanced Mechanical Shock Fragility Statistics Accuracy. Packaging Technology and Science, 32(4):199(2019). DOI:10.1002/pts.2428.
- 6) 堀口翔伍, 川口和晃, 1試料による疲労影響を考慮した製品衝撃強さ試験方法の提案, 日本包装学会誌, 26(5), p. 357 (2017)
- 7) 川口和晃, 簡易衝撃試験システムの開発, 第57回全日本包装技術研究大会(2017)
- 8) 堀口翔伍, 川口和晃, 1試料による製品衝撃強さ試験の条件自動決定方法についての検討, 日本包装学会, 第26回年次大会予稿集, p. 64 (2017)
- 9) Chen ZHONG, Katsuhiko SAITO, Modified Equivalent Drop Test for Structural Corrugated Fiberboard Cushioning, 日本包装学会誌 21(4), p.281 (2012)
- 10) 川口和晃、斎藤勝彦、減衰の影響を考慮した包装貨物等価落下試験の実験的検証 日本包装学会誌, 17(1), p.39 (2008)

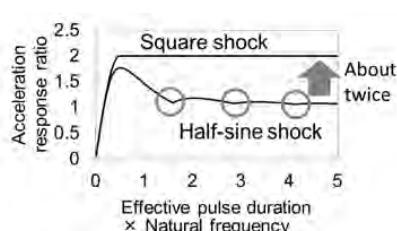
## 付録. 正弦半波と矩形波の許容加速度の違いの最大値

4.2.1 節で述べたように、正弦半波と矩形波の許容加速度は異なり、速度変化が大きくなると Fig. A1 に示すように矩形波の許容加速度は正弦半波の半分程度になる。速度変化がさらに大きくなった場合、許容加速度が最大でどの程度違うのかを検討する。



**Fig. A1 difference in critical acceleration between half-sine shock and square shock**

まず、最も大きな違いが出る点を SRS で検討する。Fig. A2 に示すように、矩形波と正弦半波では約 2 倍の違いがある。これが許容加速度の差の原因である。つまり、正弦半波の応答倍率の極小値（○印）の最小値の導出が必要となる。



**Fig. A2 Difference SRSs between square wave and half sine shock**

正弦半波の応答倍率は式(A1)で表される。極小値は  $fD=(4n+1)/2$  の時であり、式(A2)で表される。nについてグラフ化すると Fig. A3

のようになり、 $n \geq 1$  で単調減少、 $n \rightarrow \infty$  で 1 に収束する。したがって、正弦半波の応答倍率は  $fD > 0.5$ において 1 以上である。

矩形波の応答倍率は 2 であるので、最も大きな違いがある時の矩形波の許容加速度は正弦半波の許容加速度の半分である。

### 正弦半波の応答倍率

$$= \begin{cases} \frac{2fD}{1-(2fD)^2} 2\cos(\pi fD) & (fD < 0.5) \\ \frac{(2fD)^2}{1-(2fD)^2} \left( \frac{1}{2fD} \sin \frac{4\pi n f D}{2fD+1} - \sin \frac{2\pi n}{2fD+1} \right) \\ \left( \frac{4n-3}{2} < fD \leq \frac{4n+1}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \right) \end{cases}$$

D:作用時間  $D_e$  : 有効作用時間  $D_e = D \frac{2}{\pi}$

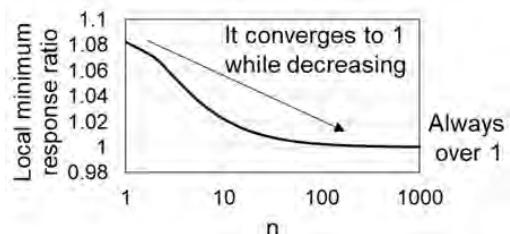
(A1)

### 正弦半波の応答倍率の極小値

$$= \frac{(4n+1)^2}{1-(4n+1)^2} \left( \frac{1}{4n+1} \sin \frac{2\pi n(4n+1)}{4n+2} - \sin \frac{2\pi n}{4n+2} \right)$$

$$= \left( 1 + \frac{1}{4n} \right) \sin \frac{\pi n}{2n+1}$$

(A2)



**Fig. A3 Local Minimum value of half-sine shock response ratio**

(原稿受付 2020 年 7 月 10 日)

(審査受理 2020 年 8 月 26 日)