

一般論文

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

堀口 翔伍*、川口 和晃**

Proposal of Mechanical Shock Fragility Testing Methods Considering Fatigue Effect by One Sample

Shogo HORIGUCHI* and Kazuaki KAWAGUCHI**

JIS Z 0119 に規定される製品衝撃強さ試験の有効性は徐々に認知されつつあるが、未だ広く普及しているとは言い難い。本研究では、試験の普及と適正包装の推進のため、試験に十分な試料が用意できない場合でも適正な製品衝撃強さを推定することができる手法を目指す。通常 1 方向について 2 試料必要な JIS 法に対して、1 試料で 1 方向に対する緩衝設計に必要な十分な情報（緩衝設計の要否と緩衝設計要の場合は許容加速度）を得られる試験方法と、この試験方法における加速度増加方法として、蓄積疲労を基準とした理論的な試験条件の決定方法を提案する。提案法の実用性を確認するため、実製品による実験を実施し、JIS Z 0119 により得られた損傷境界曲線（DBC）に対して緩衝設計に必要な情報を矛盾なく得られることを確認した。

Although the effectiveness of the product mechanical shock fragility test prescribed in JIS Z 0119 is gradually being recognized, it is not still widely spread. In this research, in order to promote spread of the test and proper packaging, we aim for a method that can estimate appropriate product impact strength even when a sufficient number of samples cannot be prepared for testing. For JIS method requiring two samples in one direction, we propose a test method that can obtain necessary and sufficient information for cushioning design (necessity of cushioning design and critical acceleration in case of cushioning design required) for one direction with one sample. Furthermore, as an acceleration increase method in this test method, we propose a theoretical method based on accumulated fatigue. In order to confirm the practicality of the proposed method, experiments with real products were conducted. It was confirmed that information necessary for cushioning design can be obtained consistently with DBC obtained by JIS Z 0119.

キーワード：包装、製品衝撃強さ試験、衝撃試験、蓄積疲労

Keywords : Packaging , Mechanical Shock Fragility Test, Shock Test, Accumulation fatigue,

*(地独)大阪産業技術研究所, 〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1

ORIST(Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology),2-7-1,Ayumino,Izumi,Osaka 594-1157,Japan
TEL:0725-51-2719,, Email:HoriguchiS@tri-osaka.jp

** 神栄テストマシナリー株式会社 SHINYEI Testing Machinery Co.,LTD.

1. はじめに

JIS Z 0119¹⁾に規定される製品衝撃強さ試験（以下、JIS 法）の有効性は徐々に認知されつつあるが、未だ広く普及しているとは言い難い。試験の普及と適正包装の推進のため、製品衝撃強さ試験についての様々な研究が行われている²⁻³⁾が、手順が煩雑であるなど、試験を初めて実施する人には困難である。

本研究では、試験に十分な試料が用意できない場合でも適正な製品衝撃強さを推定することができる手法を目指す。通常 1 方向について 2 試料必要な JIS 法に対して、1 試料で 1 方向に対する緩衝設計に必要十分な情報（緩衝設計の要否と緩衝設計要の場合は許容加速度）を得られる試験方法（以下、提案 A）と、提案 A における加速度増加方法として、JIS 法における加速度増加方法の任意性を削減し、試料の推定強度が不要な試験条件（衝撃パルスの形状や加速度、作用時間）の決定方法として蓄積疲労を基準とした理論的な試験条件の決定方法（以下、提案 B）を提案する。

また、提案 B に基づいて試験条件を自動的に生成するソフトを試作する。さらに提案 B のソフトで自動算出した試験条件による提案 A の実用性を、実製品による実験を実施し、確認する。

2. 試験方法の提案

JIS 法の課題を整理し、提案 A の試験

方法と提案 B の条件決定方法を提案する。

2.1 JIS Z 0119 による衝撃強さ試験の課題

JIS 法では Fig.1 に示すように、許容速度変化試験と許容加速度試験の 2 つの試験を実施し、それぞれ、許容速度変化（以下、 ΔV_c ）と許容加速度（以下、 A_c ）を得る。そのため、1 方向の試験に対して 2 つの試料を用意する必要がある。また、速度変化や加速度の設定値の増加方法は蓄積疲労の影響を防ぐため、最大衝撃回数を 5~6 回とされている。設定値の最大値は製品の推定強度を用いるとされており、任意性がある。試験を初めて実施する人には、多くの試料を準備することや、任意性が存在する衝撃パルスの設定値を決めることは容易ではない。

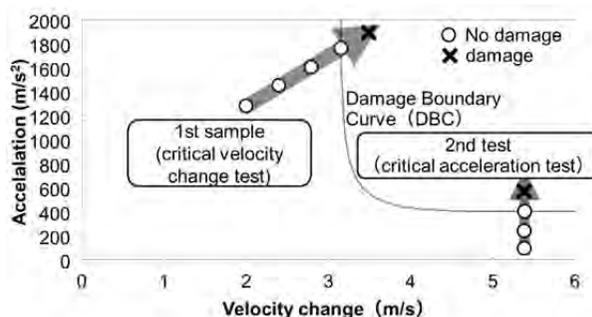


Fig.1 Test by JIS method.

また、JIS 法での試験結果を緩衝設計に活用する手順は次の通りである。

1：輸送中に発生する想定最大落下高さ h に相当する速度変化（以下、想定速度変化 ΔV_t ）と ΔV_c を比較する。

2-1 : $\Delta V_c > \Delta V_t$ の時、緩衝設計は不要。

2-2 : $\Delta V_c < \Delta V_t$ の時、緩衝設計が必要。

このとき、許容加速度試験を実施し、 A_c は非破損の最大加速度を用いる。

なお、 ΔV_t は反発係数を e 、重力加速度 g とすると式(1)で表すことができる。 e が不明の場合は 1 とする。

$$\Delta V_t = (1 + e)\sqrt{2gh} \quad (1)$$

JIS 法の手順で行う場合、 ΔV_c と ΔV_t の関係は大小関係のみを利用している。すなわち、 ΔV_c の具体的な値を得る方法となっているが、試験結果を緩衝設計に活用する観点では具体的な値は不要である。

以上より、JIS 法による試験は速度変化の情報が過剰である。

2.2 1 試料で必要十分な情報を得るための試験方法の提案

JIS 法における課題を解決するために、試料数を 1 つとし、速度変化の情報量を減らした提案 A の試験方法を提案する。

提案 A の概念図を Fig.2 に示す。速度変化を ΔV_t (Fig.2 では 3 m/s) として許容加速度試験を実施した後、許容速度変化試験の内、 ΔV_t のみの速度変化試験を実施する。これにより、JIS 法から速度変化の情報量を大小関係のみに削減することが可能である。

提案 A の試験手順を Fig.3 に示す。許容加速度試験は台形波で行い、速度変化は ΔV_t とする。加速度の下限値と上限値は試験装置仕様の下限と上限とする。その

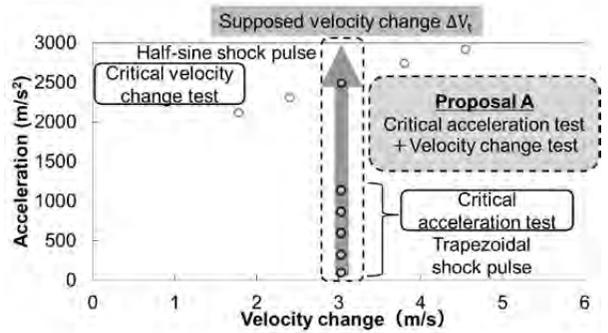


Fig.2 Conceptual diagram of proposal A

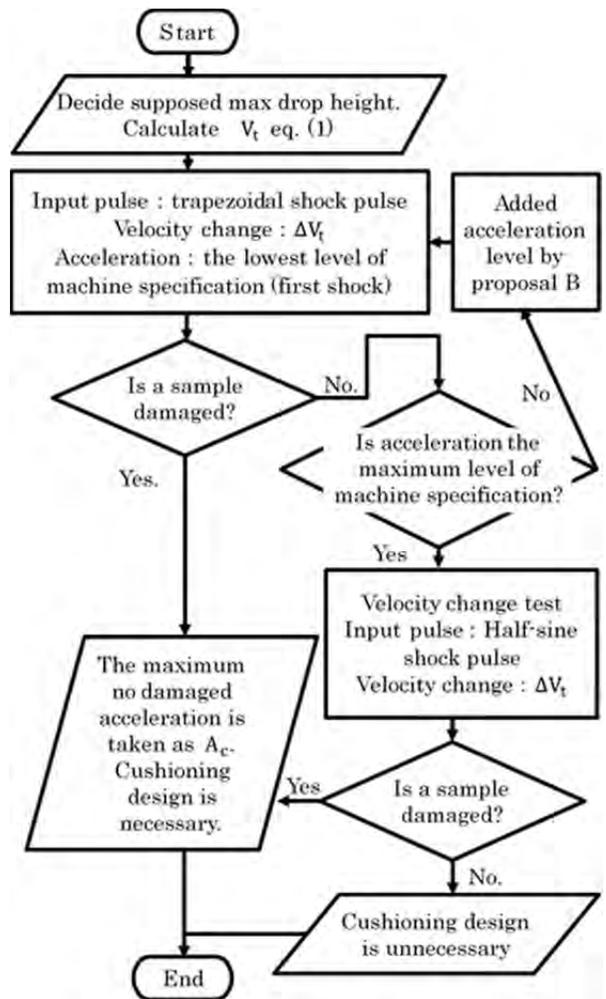


Fig.3 Flowchart of proposal A

間の加速度の増加方法は後述の提案 B を使用する。速度変化試験の衝撃パルスは正弦半波、速度変化を ΔV_t 、他は JIS 法の許容速度変化試験に準ずる。

結果の判定方法は破損の有無で ΔV_c との大小関係を判定し、破損無しの場合は緩衝設計が不要であり、破損有りの場合、 A_c は破損の最大加速度として緩衝設計値とする。

ΔV_c と ΔV_t の関係に着目して得られる結果を Table 1 に示す。

Table 1 Expected results of proposal A

Relation between ΔV_c and ΔV_t	Results
$\Delta V_c < \Delta V_t$	Damaged. Cushioning design is necessary. A_c value is obtained.
$\Delta V_c > \Delta V_t$	No damaged Cushioning design is unnecessary.

2.3 試験を実施する加速度の決定方法

ここでは台形波の加速度は一定倍率で増加することとして、加速度増加倍率の決定方法を提案する。

本節では、加速度を一定間隔での増加される方法と加速度を一定倍率での増加させる方法の蓄積疲労の影響を比較し、蓄積疲労を基準とした理論的な試験条件の決定方法（提案 B）を提案する。

また、衝撃波形は理想的な矩形波とし、供試品は 1 自由度ばねマス系に従うものとする。1 回目、2 回目・・・i 回目の衝撃

の入力加速度をそれぞれ $A_1, A_2 \dots A_i, i$ 回目の応答加速度を $A_{res,i}$ とするものとする。加速係数 α の時、 $A_{res,i}$ が N_i 回発生した時の疲労値を $N_i A_{res,i}^\alpha$ とする⁴⁾。

A_c の蓄積疲労の影響を基準に加速度増加倍率を決定するため、 A_c が求まる領域を考えることとし、応答倍率は 2 倍とする。

2.3.1 一定間隔での増加方法と一定倍率での増加方法の蓄積疲労の影響の比較

加速度を一定間隔で増加させた場合と一定倍率で増加させた場合で試験における蓄積疲労の影響を計算で比較する。

蓄積疲労の影響について以下に定義する。製品衝撃強さ試験は最低 2 回（非破損と破損）の試験により A_c を得ることができ、それ以前の試験は A_c を取得するためには不要な疲労であり、余剰疲労となる。そこで n 回目で破損したとするとき、「最後の 2 回(n 回目と n-1 回目)の試験による疲労に対する余剰疲労の割合」を蓄積疲労割合として式 (2) に定義する。

$$\text{蓄積疲労割合} = \frac{S_{n-2}}{(2A_n)^\alpha + (2A_{n-1})^\alpha} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} S_n = \sum_{i=1 \dots n} (2A_i)^\alpha \quad (3)$$

一定間隔で増加させる場合の蓄積疲労割合を Fig.4 に示す。初回の加速度を 100 m/s²、増加幅を 100 m/s² とする。加速係数 α は 10 とする。この場合、回数を重

ねるごとに蓄積疲労割合が増大している。このため、蓄積疲労の影響を抑えるために回数制限が必要である。

一定倍率で増加させる場合の蓄積疲労割合を Fig.5 に示す。初回の加速度を 100 m/s²、増加倍率を 1.3 とする。加速係数 α は MIL-STD-810G⁵⁾ に示されている正弦波振動試験でよく用いられる 6 とする。この場合、回数を増加させても蓄積疲労割合は増加せず、ある一定値に収束していることがわかる。また、増加倍率や加速係数が変わった場合、収束する値は変わるが、一定値に収束する。

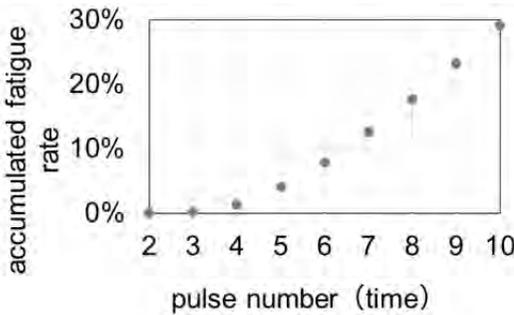


Fig 4 The acceleration level are increased at fixed intervals.

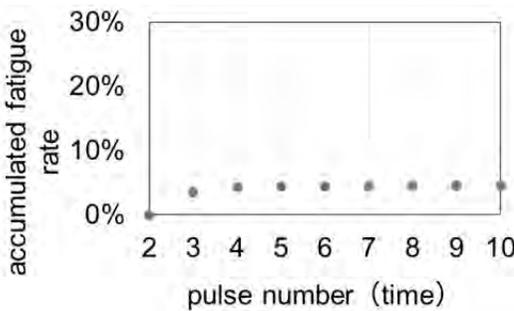


Fig.5 The acceleration level are increased at fixed multiplication factor.

以上より、一定倍率で増加させる場合、蓄積疲労の影響は回数を増やすと一定値に収束するため、回数制限が不要であり、蓄積疲労の影響を基準にした試験条件の決定が可能である。

2.3.2 蓄積疲労を基準として加速度増加倍率を決定する方法

蓄積疲労を基準とした理論的な試験条件の決定方法（提案 B）を提案する。

一定倍率で増加させる場合、回数を増加させると蓄積疲労割合は一定値に収束する (Fig.5)。この収束値を許容蓄積疲労割合 $\Delta_{fatigue}$ と定義すると、式(2)より式(4)で表すことができる。

$$\Delta_{fatigue} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_{n-2}}{(2A_n)^\alpha + (2A_{n-1})^\alpha} \quad (4)$$

次に加速度増加倍率を α と $\Delta_{fatigue}$ を設定することで算出する方法を示す。

加速度増加倍率 r とすると、 A_i は式(5)の等比数列で表される。

$$A_i = r^{i-1} \times A_1 \quad (5)$$

よって、 S_n は式(3)と式(5)から式(6)と表せる。

$$S_n = \frac{(2A_1)^\alpha \{1 - r^{\alpha n}\}}{1 - r^\alpha} \quad (6)$$

式(4)を式(5)と式(6)を用いて整理すると $\Delta_{fatigue}$ は式(7)となる。

$$\Delta_{fatigue} = \frac{1}{r^{2\alpha} - 1} \quad (7)$$

式(7)を r について解くと、式(8)が得ら

れ、 r は α と $\Delta_{fatigue}$ により算出することができる。

$$r = \left(\frac{1 + \Delta_{fatigue}}{\Delta_{fatigue}} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} \quad (8)$$

試験装置仕様の下限の加速度から r 倍で増加させた場合、仕様上限ちょうどにならないことも多い。そこで、式(9)を満たす最大の n を衝撃回数として得る。さらに、試験で用いる加速度増加倍率 r_{test} を式(10)で決定する。これにより提案 A の試験装置仕様の下限から上限まで試験可能となり、 $\Delta_{fatigue}$ は設定値以下となる。

$$r^{(n-1)} < \frac{\text{仕様上限加速度}}{\text{仕様下限加速度}} \quad (9)$$

$$r_{test} = \left(\frac{\text{仕様上限加速度}}{\text{仕様下限加速度}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (10)$$

2.4 製品衝撃強さ試験支援ソフトの試作

本章では「提案 A : 1 試料で必要十分な情報を得るための試験方法」と「提案 B : 蓄積疲労を基準として加速度増加倍率を決定する方法」を提案した。提案 A と提案 B により実施する試験方法を提案法とする。提案法における試験条件を作成するソフトを Microsoft® EXCEL® VBA を用いて試作した。試作したソフトの条件作成のフローチャートを Fig.6 に示す。本ソフトでは、輸送中の最大想定落下高さ h と反発係数 e から想定速度変化 ΔV_t を算出し、加速係数 α と許容蓄積疲労割合

$\Delta_{fatigue}$ から各台形波の加速度全てを算出する。

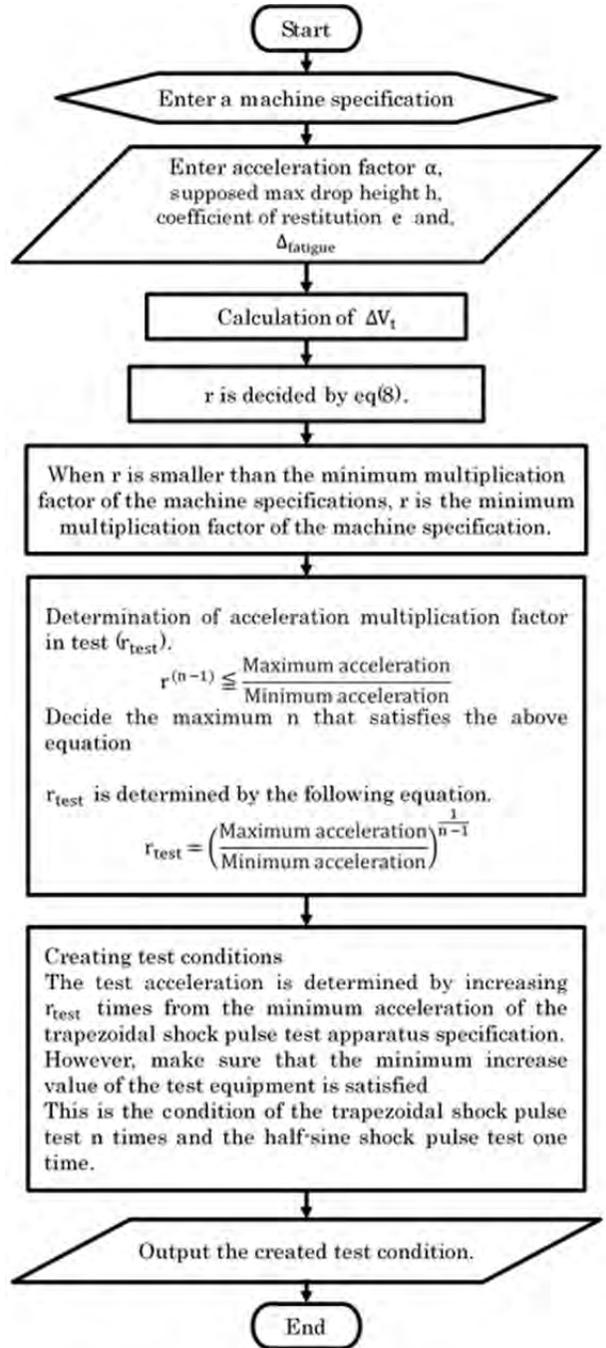


Fig.6 Flowchart of test condition creation.

また、試験装置の最低加速度増加倍率、最低加速度増加幅を入力することで、試験装置で実行不可能な条件が作成されないような設計とした。作成された試験条件を用いて **Fig.3** で示した手順で試験を実施する。

3. 実験による実用性の確認

提案法（提案 A と提案 B により実施する試験方法）を用いて緩衝設計に必要な情報（緩衝設計の要否と緩衝設計要の場合は許容加速度 A_c ）を得られるかどうかを確認するため実験を行った。

3.2 実験の方法

試料は DVD プレイヤーとし、試験方向は底面のみとした。緩衝材による受け面を模擬するため、**Fig.7** に示すように DVD プレイヤーを支持した。また、破損判定は「DVD プレイヤーのトレイが開閉不能となった場合」とした。

また、試験は Lansmont 製 Shock Test System Model 152 を用いて行い、計測には Lansmont 製 Test Partner 3 を使用した。



Fig.7 Sample and supporting method.

比較のため次の 2 つの実験をそれぞれ実施する。

① JIS 法を参考に許容速度変化試験、許容加速度試験を実施し、許容速度変化 ΔV_c 及び許容加速度 A_c を取得する。

② 提案法による試験を、損傷境界曲線 (DBC: Damage Boundary Curve) に対して正しい情報が得られるか確認するため① JIS 法の結果を参考に **Table 2** に示す 3 種類の想定速度変化 ΔV_t で実施し、それぞれ緩衝設計に必要な情報を取得する。

② 提案法の実験で用いる加速係数については、今回は予備実験(付録)で得た 17 を用いた。 $\Delta_{fatigue}$ は 5%とした。その他の設定値は **Table 3** の通りであり、加速度設定値は ΔV_t に依らず **Table 4** の通りとなる。1~16 回目は台形波による許容加速度試験、17 回目は正弦半波による速度変化試験である。

Table2 ΔV_t performed by ② proposed method

ΔV_t (m/s)
3.0
3.9
5.5

Table 3 Set value as test machine specification in ② proposed method

Trapezoid shock pulse		
Minimum acceleration		98 m/s ²
Maximum acceleration		980 m/s ²
Minimum velocity change		1.5 m/s
Maximum velocity change		6 m/s
Minimum acceleration	increase value	49 m/s ²
Minimum acceleration	increase ratio	1.1 times
Half-sine shock pulse		
Maximum velocity change		7 m/s

Table 4 setting acceleration in ② proposed method

times	acceleration (m/s ²)	times	acceleration (m/s ²)
1st	98	10th	541
2nd	147	11th	597
3rd	196	12th	659
4th	245	13th	728
5th	294	14th	804
6th	343	15th	888
7th	392	16th	980
8th	441	17th	half-sine
9th	490		

3.3 実験の結果

3.3.1 ①JIS法の結果

JIS法による結果を Fig.8 に示す。許容速度変化試験では非破損の最大速度変化は 3.91 m/s、破損時の速度変化は 4.14 m/s となり、 ΔV_c は 3.91 m/s となった。また許容加速度試験については非破損の最大加速度は 805 m/s²、破損時の加速度は 1007 m/s² となり、 A_c は 805 m/s² となった。

3.3.2 ②提案法の結果

提案法による結果を Fig.9 に示す。 $\Delta V_t = 3.0$ m/s、3.9 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。 $\Delta V_t = 5.5$ m/s については破損が確認された。この時、非破損の最大加速度は 904 m/s² (台形波)、破損時の加速度 986 m/s² (台形波) であった。よって、緩衝設計が必要であり、JIS法に準じて、 A_c は 904 m/s² となった。

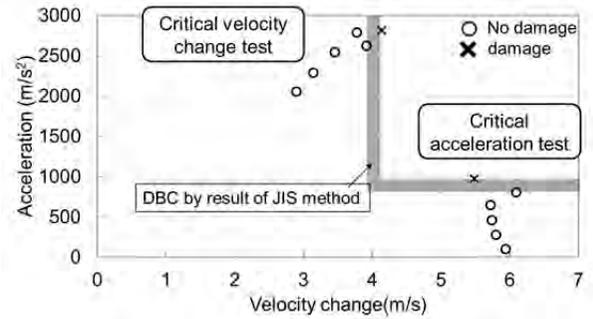


Fig.8 Results of JIS method.

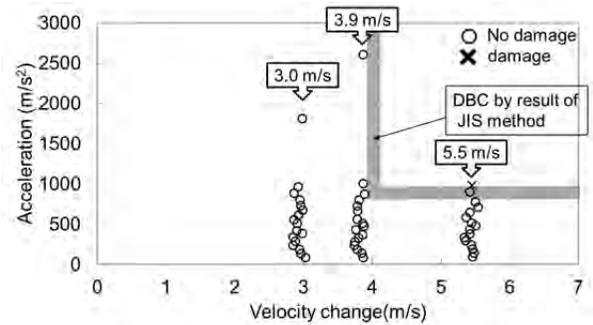


Fig.9 Results of proposed method.

4. 考察

4.1 許容速度変化について

①JIS法では ΔV_c は3.91~4.14 m/sである。一方、②提案法では ΔV_c 以下である $\Delta V_t = 3.0$ m/s、3.9 m/s では破損が確認されず緩衝設計不要となった。また、 ΔV_c 以上である $\Delta V_t = 5.5$ m/s の時は破損し、緩衝設計が必要となった。緩衝設計の要否について3種類すべての ΔV_t において正しく判断することができた。

4.2 許容加速度について

A_c について、①JIS法では805~1007 m/s²と得られたのに対して、②提案法の

$V_t=5.5$ m/s の場合、 $904\sim 986$ m/s²であった。 A_c の推定範囲は①JIS 法に対して②提案法では半分以下の範囲で求められている。これは②提案法では衝撃回数の制限を無くしたためである。また、②提案法において、①JIS 法の非破損の最大加速度と破損時の加速度の間で得られており、衝撃回数の増加による蓄積疲労の影響は認められなかった。

4.3 設定する加速係数について

加速係数の取り扱いについて、包装試験の分野では製品の加速係数は未知であることが大半でありながら、その導出には多くの労力が必要とされる。そのため、ほとんどの場合で個々の製品の加速係数を求める事前試験を行わず、試験規格や業界ごとに定められた数値を使用している。提案法においても従来の加速係数の取り扱いと同様に、試験規格などの数値を採用することが必要である。しかし、規格や書籍に掲載された加速係数の多くが繰り返し荷重や振動に対するものであり、衝撃に対する加速係数を測定した事例は少ない。これまでの研究⁶⁻⁷⁾ではサイクル数の違いによる S-N 曲線の傾きの変化を議論しており、サイクル数が $10^4\sim 10^5$ 程度より小さくなると傾きが小さくなるとされている。すなわち S-N 曲線の傾きが小さくなることは加速係数が大きくなることを示しており、衝撃のような少ない回数の負荷による加速係数は振動

のような多い回数の負荷による加速係数に対して大きくなることを意味している。このことから振動における加速係数を用いた場合、実際の衝撃における加速係数よりも小さく設定することになる。この時、試験の加速度増加倍率の増大により推定精度が低下するものの、疲労による影響は減少しているため疲労の問題は発生しにくくなると考えられる。振動試験では MIL-STD-810G⁵⁾では一般に振動試験では 5~8 が、正弦波振動試験では 6 がよく用いられるとされている。また、JIS E 4031⁸⁾の鉄道車両用品の振動試験においては通常 3~9 とされている。提案法において、これらの数値を採用することが可能である。ただし、厳密な加速度増加倍率を得るためには製品別の加速係数を求める必要がある。

4.4 DBC の疲労による変化

DBC の許容値は疲労により低下すると言われている⁹⁻¹⁰⁾。許容速度変化よりわずかに小さい速度変化での試験となった場合、許容速度変化が疲労により低下することで破損してしまう可能性がある。この可能性は加速係数が小さい程大きく、加速係数が大きい程小さくなる。今回の実験でこの影響が観測されなかったのは加速係数が十分大きかったためだと考えられる。

5. 結論

JIS Z 0119 に規定される製品衝撃強さ試験の改善策として、2 試料が必要な JIS 法に対して、1 試料で緩衝設計に必要な情報を得られる試験方法と蓄積疲労を基準として加速度増加倍率を決定する方法を提案した。その試験条件を自動的に算出する試験支援ソフトを試作した。提案法の概要は次の通りである。

想定最大落下高さ、反発係数、加速係数、許容蓄積疲労割合、装置仕様を決めることで、試験を実施する速度変化と加速度の増加倍率を決定する。決定した速度変化と加速度の増加倍率を用いて、台形波の試験装置の仕様の下限の加速度から上昇させていき、台形波の試験装置の仕様の上限の加速度まで許容加速度試験を実施する。破損なき場合は同じ速度変化の正弦半波で試験を実施する方法である。これにより、試料 1 つで緩衝設計に必要な情報（緩衝設計の要否と緩衝設計要の場合は許容加速度）を得ることができる。また、加速度増加倍率を加速係数と許容蓄積疲労割合により決めるため、加速係数が小さく蓄積疲労の影響を大きく受けるイチゴ¹¹⁾やマンゴー¹²⁾などは加速度増加倍率を大きく、加速係数が大きく蓄積疲労の影響を受けにくい今回の DVD プレイヤーなどは加速度増加倍率を小さく設定でき、試料にあった加速度増加倍率を設定することが可能である。

以上の提案法を用いて、実製品を用い

た実験により提案法の実用性を評価し、JIS 法で得られた DBC に対して緩衝設計に必要な情報を矛盾なく得ることができた。

付録 加速係数の算出

3 章の②提案法の実験において加速度増加倍率を設定するために加速係数が必要となる。不明である場合はおおよその値を用いることになる。本稿では加速度増加倍率を厳密に算出するため、加速係数の値を求めることとした。試料数が少ないため高い精度は望めないが、3 試料で加速係数の推定を行った。

試験を実施した加速度と結果を **Table A1** に示す。衝撃パルスは台形波とした。また、**Fig.A1** に示すように $N = CA^{-\alpha}$ (A : 加速度、 N : 破損に至った回数、 α : 加速係数、 C : 定数) に近似する。加速係数 α は 17 と推定された。また、加速度 996 m/s^2 、速度変化 5.6 m/s で実験を行い 1 回で破損することを確認した。

以上より、3 章の②提案法による実験では加速係数は 17 を用いて条件を算出することとした。

Table A1 Result of the experiment for obtaining α

Acceleration(m/s^2)	Number of shocks until damage occurred
865	3
813	27
764	24

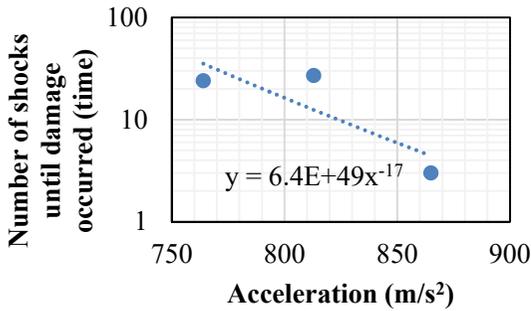


Fig.A1 Calculation of acceleration factor.

<参考文献>

- 1) JIS Z 0119 (2002)
- 2) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春, 日本包装学会, 11(4), 217-229(2002) (原稿受付 2017年8月25日)
- 3) 中嶋隆勝, 日本包装学会, 20(2), 99-106(2002) (採録受理 2017年10月20日)
- 4) 中嶋隆勝, 津田和城, 川田浩二, 山内佳門, 日本包装学会誌, 16(1), 41-51(2007)
- 5) MIL-STD-810G
- 6) 金山幸雄, 中山英明, 岡部永年, 森忠夫, 桜井靖也. 材料, 1985, 34.384: 1064-1069.
- 7) Christian Lalanne. Mechanical Vibration and Shock Analysis Revised and Updated 3rd edition Volume4 Fatigue Damage. Wiley, 2014, p.18-19.
- 8) JIS E 4031 (2013)
- 9) G. J. Burgess. Product fragility and damage boundary theory. Packag. Technol. Sci. 1988; 1: 5-10.
- 10) William I. Kipp. Developments in Testing Products for Distribution. Packag. Technol. Sci. 2000; 13:89-98.
- 11) 北澤裕明, 佐藤達雄, 長谷川奈緒子, 李艶傑, 石川豊, 日本包装学会, 21(2), 125-132(2012)
- 12) NAKAMURA,N.,HASEGAWA,N.,INAMORI,H.,OGAWA,Y.,KITAZAWA,H., *Tropical Agriculture and Development*, 2015, 59.3: 112-117.