

「損傷境界曲線評価法」類型の考案 および試験方法の体系化

中嶋隆勝*・斎藤勝彦**・寺岸義春*

Development of Several Patterns of "DBC Evaluation Method" and Systematization of Evaluation Methods

Takamasa NAKAJIMA*, Katsuhiko SAITO** and Yoshiharu TERAGISHI*

許容加速度試験と衝撃応答スペクトルの計測により、損傷境界曲線（以下、DBC と呼ぶ）を導出する「損傷境界曲線評価法」は、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「複数の DBC 交差現象」が現れても、製品の衝撃強さを正しく評価することができる。しかし、試験現場では、時間・設備・試料数などの制約条件があり、常に本評価法が、その試験現場での最適な評価方法であるとは限らない。本研究では、「DBC 評価法」を少しずつ修正した 4 種類の「DBC 評価法」を新たに考案し、それぞれの試験現場で最適な評価方法が選択できるように、それらの特徴を整理し、製品の衝撃強さ評価法の体系化を図った。

キーワード：衝撃強さ、評価、損傷境界曲線、体系化、製品、包装、携帯機器

"Damage boundary curve (DBC) evaluation method" can derive the DBC from the results of critical acceleration shock test and the measurements of shock response spectrum. It can also evaluate the fragility of products properly, even if there occur "Dependency of velocity change", "Reverse phenomenon" or "Cross over of DBCs". However, on the spot of tests, there are some restrictions, such as time, equipment and the number of specimens. In this study, we developed four types of evaluation methods modified from the "DBC evaluation method", and systematized these evaluation methods in order to select the optimal method out of the five types of methods.

Keywords : Mechanical-shock fragility, Evaluation, Damage boundary curve, Systematization, Product, Packaging, Mobile

1. 緒言

製品の衝撃強さ評価試験規格には、JIS Z 0119¹⁾ および ASTM D 3332²⁾ がある。それらの試験規格は、ある規定の衝撃パルスに対

する製品の損傷の有無を確認するだけの試験ではなく、製品にどんな衝撃パルスが加われれば破損するかが予測できるものである。しかし、この試験方法では、理論的な基礎³⁾として、1 自由度のばね質量系の衝撃応答が用

*大阪府立産業技術総合研究所（〒594-1157 和泉市あゆみ野2-7-1）：Technology Research Institute of Osaka Prefecture 2-7-1 Ayumino, Izumi-shi, Osaka 594-1157, Japan

**神戸商船大学（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1）：Kobe University of Mercantile Marine 5-1-1 Fukaemina-mi, Higashinada, Kobe-shi, Hyogo 658-0022, Japan

いられているため、著者らが指摘した「速度変化依存性」および「逆転現象」⁴⁾を把握することはできない。また、製品の破損部品または破損部位（以下、破損部位と総称する）を唯一と仮定しているため、衝撃パルスによる製品内の損傷と非損傷の境界を表す損傷境界曲線（以下、DBCと呼ぶ）が唯一となり、「複数のDBC交差現象」を把握することができない⁵⁾。その対策として、著者らは、許容加速度試験と衝撃応答スペクトル（以下、SRSと呼ぶ）の計測により、DBCを導出する「DBC評価法」を考案した⁵⁾。

しかし、現場での評価試験は、限られた時間・設備・試料数の範囲で行われる必要がある。さらに、試料の大きさによってはセンサーの貼り付けが困難な場合もある。このような現場で遭遇するさまざまな状況に対して、先に考案した「DBC評価法」が常に最適な評価方法ではありえない。本研究では、「DBC評価法」を少しずつ修正した4種類の「DBC評価法」を新たに考案し、それぞれの試験現場で最適な評価方法が選択できるように、それらの特徴を整理し、製品の衝撃強さ評価法の体系化を図った。

2. 衝撃応答スペクトルによる DBC の導出

2.1 「DBC 評価法 (a_c・SRS法)」⁵⁾

先に考案した「DBC評価法」は a_c（許容加速度）および SRS を測定し、DBC を導出する方法である。その手順から、ここでは、「a_c・SRS法」と呼ぶことにする。DBC 導出手順の概略は次のとおりである⁵⁾。

①（許容加速度試験）JIS Z 0119 とは異なり、

許容加速度試験を加速度が十分に高くなるまで続け、破損する可能性があるすべての脆弱部位の許容加速度を把握する。この時、加える衝撃パルスの速度変化は、製品の輸送中または使用中に発生する最大速度変化とする。破損した部位 i (i=A, B, …) の許容加速度を a_{ci}(T_{ia}) とし、その時の速度変化を ΔV_i(T_{ia}) とする。ここで、添え字_aは許容加速度試験結果を表す。

②（SRS 計測）試料内のすべての破損部位付近に加速度センサーまたはひずみゲージなどを貼り付けた後、試料を衝撃台上に取り付ける。そして、衝撃パルスに対する伝達係数（最大応答を入力衝撃パルスの最大整形加速度で除したものを）を計測し、計測された作用時間 T に対する破損部位 i の伝達係数を Tr_i(T) とする。

③（DBC 算出）①で得られた a_{ci}(T_{ia}) を基点として②で得られた Tr_i(T) から、任意の作用時間 T における許容加速度 a_{ci}(T) が式(1)より算出される。また、これに対応する速度変化は式(2)で得られる。

$$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{ia}) \times \frac{Tr_i(T_{ia})}{Tr_i(T)} \quad (1)$$

$$\Delta V_i(T) = a_{ci}(T) T \kappa \quad (2)$$

ここで、衝撃パルスが方形波(台形波)の場合、κ = 1.0 とし、正弦半波の場合、κ = 2/π とする。

本手法により導出した VCR の DBC⁶⁾ を Fig. 1 に示す（実験試料の詳細は「3.1 実験試料および破損部位」を参照）。

2.2 「ΔV_c・SRS法」

「a_c・SRS法」では、許容加速度試験で測定

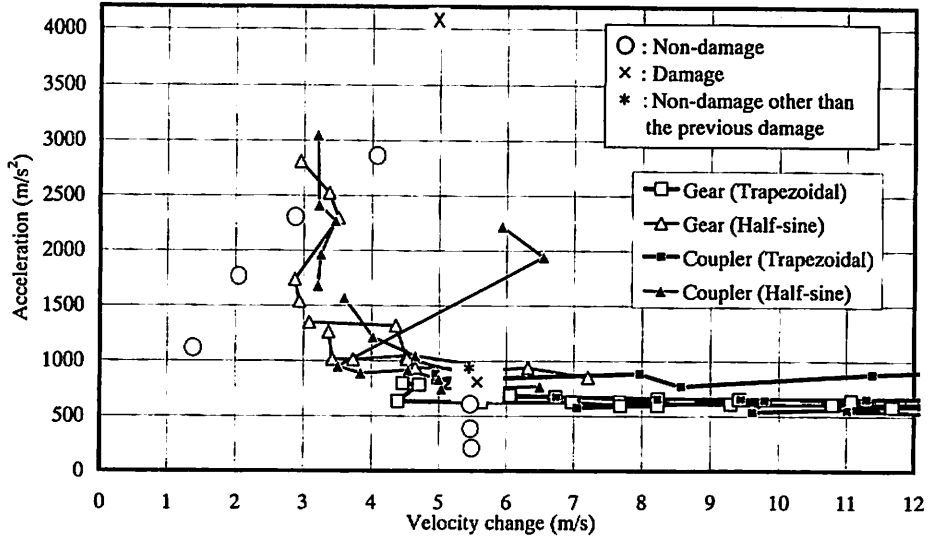


Fig. 1 The DBC derived from a_c and SRS according to "a_c·SRS method"

した $a_{ci}(T_{ia})$ を基点として DBC を導出したが、許容速度変化試験によって求めた $a_{ci}(T_{iv})$ を基点として DBC を導出することも可能である。「a_c·SRS 法」で許容加速度試験を行った理由は、緩衝包装される製品の場合、一般に $\Delta V_{ci}(T_{iv})$ の測定精度よりも $a_{ci}(T_{ia})$ の測定精度が重要だからである。しかし、携帯機器などのように使用中に製品が直接地面に落下するような場合、 $\Delta V_{ci}(T_{iv})$ の測定精度の方が重要となるため、許容速度変化試験から DBC を導出の方が実質的に精度のよいデータが得られる。本手法は、「a_c·SRS 法」(2.1 参照) の許容加速度試験を許容速度変化試験に置き換えたものであり、その概略を以下に示す。

① (許容速度変化試験) JIS Z 0119 とは異なり、許容速度変化試験を十分に速度変化が高くなるまで続け、破損する可能性があるすべての脆弱部位の許容速度変化を把握する。ここで、破損部位 i ($i = A, B, \dots$) の許容速度変化を $\Delta V_{ci}(T_{iv})$ とし、その

時の加速度を $a_{ci}(T_{iv})$ とする。ここで、添え字 v は許容速度変化試験結果を表す。

- ② (SRS 計測) 2.1 の手順②と同じ。
- ③ (DBC 導出) 2.1 の手順③と同じ。ただし、 T_{ia} は T_{iv} に置き換える。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig. 2 に示す。手順①では、2.1 と同型の別試料を用い⁶⁾、手順②では、2.1 手順②の結果 (SRS データ) を用いた。

3. 製品の固有振動数と SRS の関係

ここでは、現実の製品の SRS が 1 自由度のばね質量系でモデル化した SRS (以下、モデル SRS と呼ぶ) とどの程度違いがあるのかを調べるため、市販の VCR (ビデオカセットレコーダー) について許容加速度試験を行い破損した部位について、SRS⁶⁾ および f_c (固有振動数) を計測し、実測 SRS と f_c から導出したモデル SRS を比較検討した。

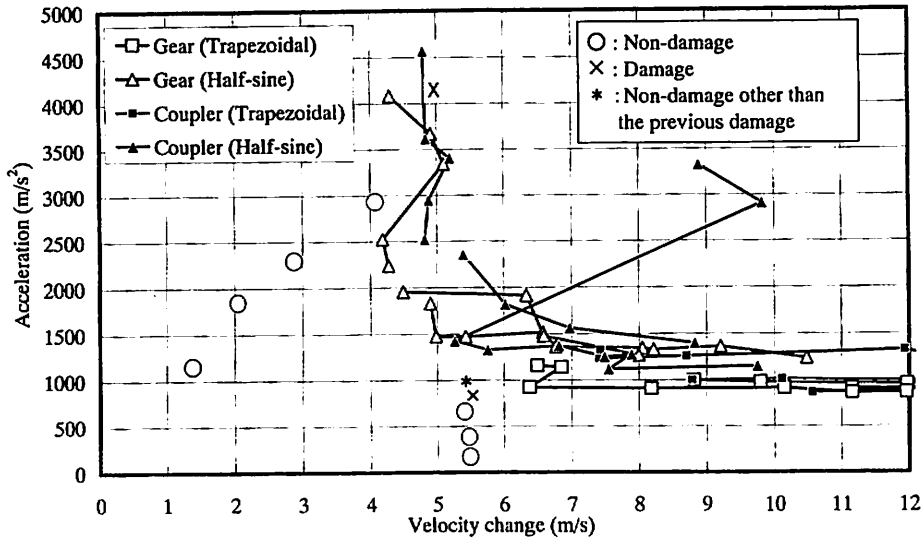


Fig. 2 The DBC derived from ΔV_c and SRS according to " ΔV_c ·SRS method"

3.1 実験試料および破損部位

実験試料 (VCR) の質量および外寸法を Table 1 に示す。また、破損部位は、製品デッキ内の歯車および基板上のカプラーである。これら部位付近に加速度センサーを貼付し、衝撃応答および振動応答を計測した。

3.2 固有振動数の計測

試料内の歯車 (部位 A) およびカプラー (部位 B) 付近に加速度センサーを貼り付けた後、試料を振動台上に固定した。そして、垂直方向に 5~100 Hz の範囲で PSD (パワースペクトル密度) が $0.724 \text{ m}^2/\text{s}^3$ (一定) となるランダム振動を加え、各部位付近に発生する振動を計測した。計測した振動の PSD を Fig. 3 に示す。図り、カプラー (部位 B) 部の PSD には、顕著なピーク (46.5 Hz , $445 \text{ m}^2/\text{s}^3$) が唯一存在するので、これをカプラー部の固

有振動数とした。一方、歯車 (部位 A) 部の PSD には、ピーク (61.3 Hz , $20 \text{ m}^2/\text{s}^3$) だけでなく、少し小さなピーク (91.5 Hz , $5.1 \text{ m}^2/\text{s}^3$) も存在する。ここでは、大きい方のピーク (61.3 Hz) を歯車 (部位 A) の固有振動数とした。

3.3 SRS の計測⁶⁾

試料内の歯車 (部位 A) およびカプラー (部位 B) 付近に加速度センサーを貼り付けた後、試料を振動台上に固定した。次に、衝撃台上に台形波衝撃パルスおよび正弦半波衝撃パルスを発生させ、各部位に伝搬する加速度を計測した。そして、加速度伝達係数 T_r を、各伝搬加速度の最大値を入力衝撃パルスの最大整形加速度 (ノイズ除去後の最大加速度) で除した値と定義した。縦軸を加速度伝達係数とし、横軸を $f_c \cdot T$ (f_c には 3.2 で計測した固有振動数 f_c を代入) とし、各破損部位毎に SRS を作成した。本図を実測 SRS とし、Fig. 4 に実測 SRS およびモデル SRS を示す。

Table 1 Mass and outer size of specimen (VCR)

Specimen	Mass	Outer size
VCR	2.57 kg	320×255×93 mm

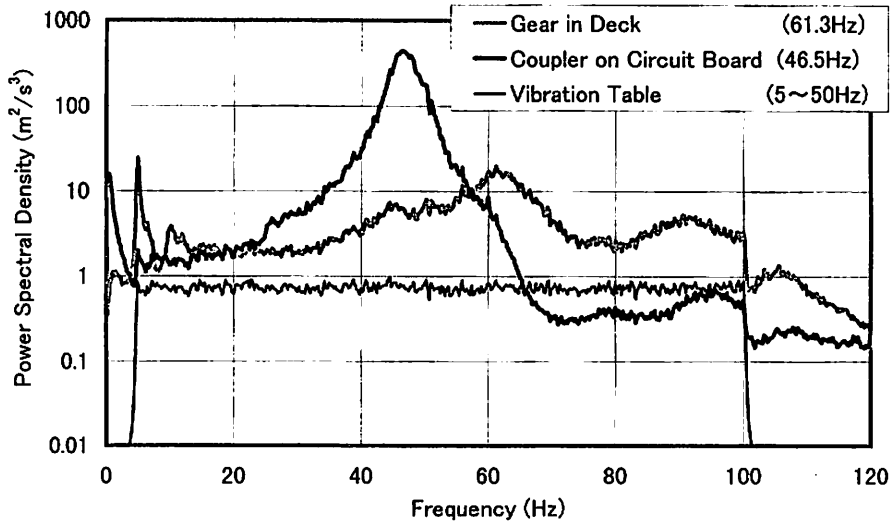


Fig. 3 Resonance search by random vibration
(PSD of vibration near the gear and the coupler in VCR)

3.4 実測 SRS とモデル SRS

実測 SRS は 3.3 で計測されたとおりである。また、モデル SRS は、JIS Z 0119 の解説などで記載されているように、すでに明らかになっている。ここでは、得られた各部位の実測 SRS とモデル SRS を比較検討する。

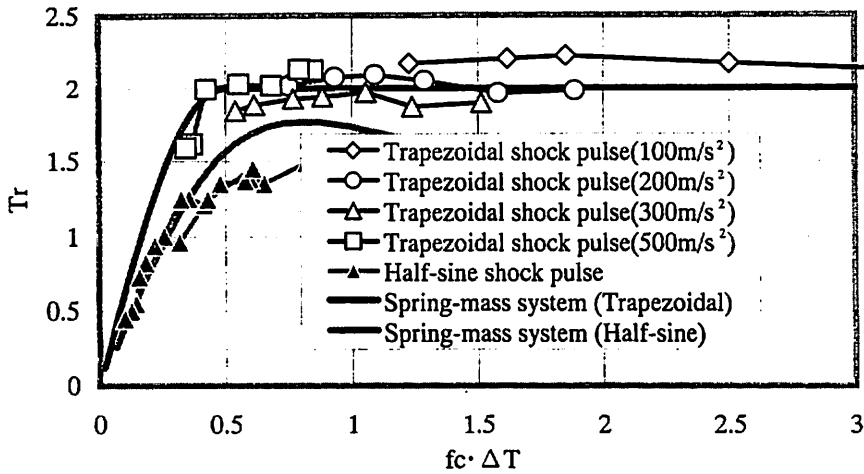
Fig. 4(a) の歯車 (部位 A) 部の SRS について見る。台形波衝撃パルスに対する実測 SRS は、モデル SRS の約 ±10% の範囲内に入っており、ほぼ一致していると言える。一方、正弦半波衝撃パルスに対する SRS は、 $f_c \cdot T < 0.25$ で両者がよく一致しているのに対し、 $f_c \cdot T > 0.5$ では、実測 SRS がモデル SRS よりも約 20% 程度低い値となっている。

Fig. 4(b) のカップラー (部位 B) 部の SRS について見る。台形波衝撃パルスに対する SRS は、 $T \cdot f_c > 2.0$ で実測 SRS がモデル SRS よりも約 25% 以上大きな値となっている。一方、正弦半波衝撃パルスに対する SRS は、実測 SRS に多少のばらつきが存在するが、ほぼモデル SRS に一致している。

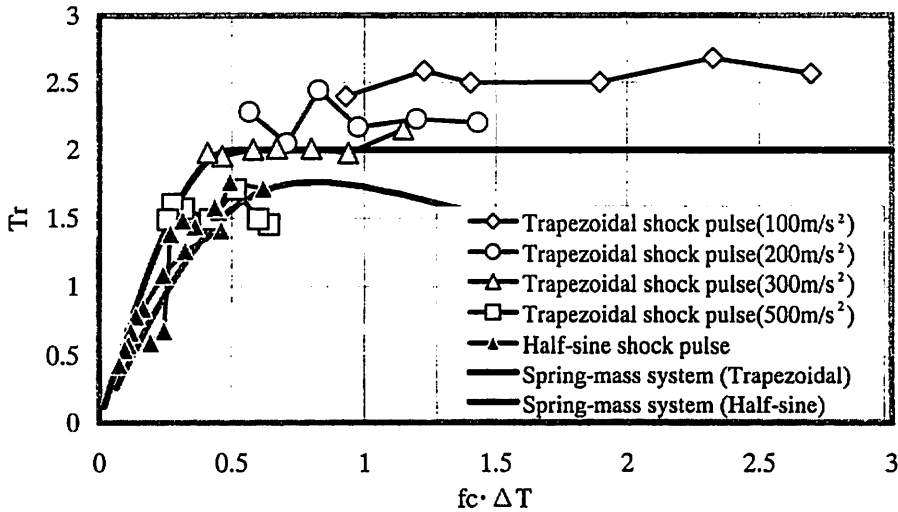
VCR に関する SRS 計測結果、実測 SRS とモデル SRS とにおける差異が一部認められた。これは、現実の製品を 1 自由度のばね質量系では表現しきれないことに起因する。このことは、著者らが「 a_c ・SRS 法」を提唱してきた大きな要因であるが、実際の試験現場では、要求される評価精度の程度はさまざまであり、これら実測 SRS とモデル SRS の違いを許容誤差の範囲として認めてもさしつかえない場合がある。このような場合のために、「実測 SRS とモデル SRS が一致する」という仮定の下、簡易的に DBC が導出できる評価法を考案した。4 章および 5 章で、これらの評価法を紹介する。

4. 固有振動数による DBC の導出

「実測 SRS とモデル SRS が一致する」という仮定の下で、固有振動数から DBC を導出する評価法を考案した。本評価法では、「速度変化依存性」や「逆転現象」は把握できな



(a) SRS of the gear of the deck in VCR. ($f_c = 61.3\text{Hz}$)



(b) SRS of the coupler on the circuit board in VCR. ($f_c = 46.5\text{Hz}$)

Fig. 4 The results of measurement of SRS and the SRS of spring-mass system.

いが、製品に多くの種類の衝撃パルスを加え SRS を計測する必要が無く、比較的簡易に DBC を導出できる。すなわち、本評価法は、製品の衝撃強さ評価の精度が多少下がっても、試験現場でより使いやすくなることを目的としている。手順は SRS の導出方法が異なるだけで、他は、「 $a_c \cdot \text{SRS}$ 法」「 $\Delta V_c \cdot \text{SRS}$ 法」とほぼ同じである。まず、製品の破損部位の

固有振動数 f_c を計測し、次に、モデル SRS の伝達係数 $Tr(f_c \cdot T)$ に f_c を代入して、破損部位の SRS を推定する。以下、本概念に基づき考案した二つの手法「 $a_c \cdot f_c$ 法」および「 $\Delta V_c \cdot f_c$ 法」について説明する。

4.1 「 $a_c \cdot f_c$ 法」

本手法は、製品の許容加速度および固有振

動数を測定し、それらに基づいて DBC を導出する方法である。DBC 導出手順は次のとおりである。

- ① (許容加速度試験) 2.1 の手順①と同じ。
- ② (f_c 計測) すべての破損部位の付近に加速度センサーまたはひずみゲージなどを貼り付けた試料を振動台上に取り付ける。そして、ランダム振動または掃引振動により共振点を調べ、得られた共振点を破損部位 i の固有振動数 f_{ci} と見なす(「3.2 固有振動数の計測」を参照)。これにより、各破損部位の伝達係数 $Tr(f_{ci} \cdot T)$ が T のみの関数となる。
- ③ (DBC 導出) ① で得られた $a_{ci}(T_{ia})$ と ② で得られた $Tr(f_{ci} \cdot T)$ (f_{ci} は既知) から、任意の作用時間 T における許容加速度 $a_{ci}(T)$ が式(3)で与えられる。また、これに対応する速度変化は式(2)より算出できる。

$$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{ia}) \times \frac{Tr(f_{ci} \cdot T_{ia})}{Tr(f_{ci} \cdot T)} \quad (3)$$

モデル SRS の伝達係数 $Tr(f_c \cdot T)$ は、すでに明らかにされおり、台形波衝撃パルスの場合、式(4a) および式(4b) で与えられる。

$$Tr(f_c \cdot T) = 2 \sin(\pi f_c \cdot T) \quad f_c \cdot T < 0.5 \quad (4a)$$

$$Tr(f_c \cdot T) = 2 \quad f_c \cdot T \geq 0.5 \quad (4b)$$

また、正弦半波衝撃パルスの場合は Table 2 に

$$Tr(f_c T) = \frac{2f_c T}{1 - (2f_c T)^2} \times 2 \cos(\pi f_c T) \quad (5)$$

示すとおりである。さらに、 $0 < f_c \cdot T < 0.5$ の範囲については、式(5)を用いて算出することもできる。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig. 5 に示す。手順①では、2.1 手順①の結果を用いた。手順②では、「3.2 固有振動数の計測」で得た固有振動数を用いた。

4.2 「 $\Delta V_c \cdot f_c$ 法」

本手法は、製品の許容速度変化および固有振動数を測定し、それらに基づいて DBC を

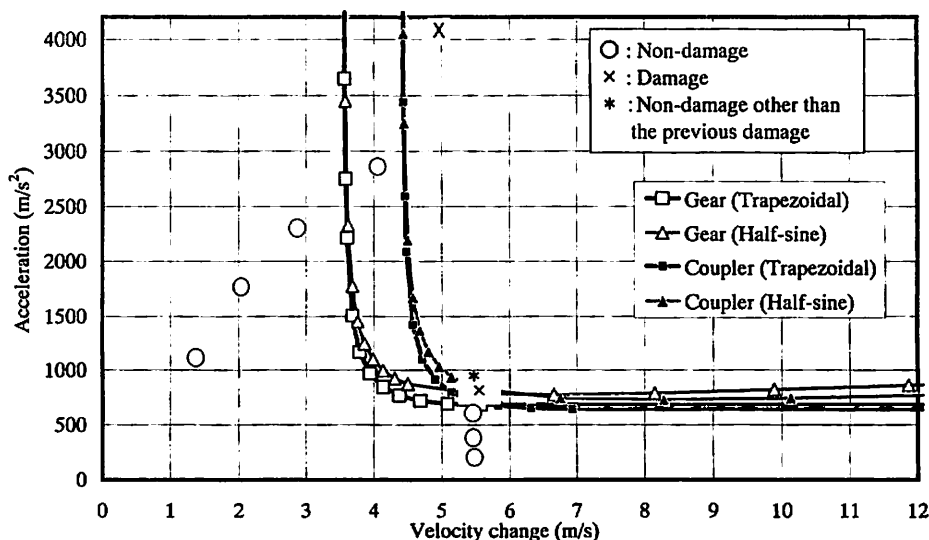


Fig. 5 The DBC derived from a_c and f_c according to " $a_c \cdot f_c$ method"

導出する方法である。DBC 導出手順は次のとおりである。

- ① (許容速度変化試験) 2.2の手順①と同じ。
- ② (f_{ci} 計測) 4.1の手順②と同じ。
- ③ (DBC 導出) 4.1の手順③と同じ。ただし、 T_{ia} は T_{iV} に置き換える。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig. 6 に示す。手順①では、2.2 手順①の結果を用いた。手順②では、「3.2 固有振動数の計測」で得た固有振動数を用いた。

5. ΔV_c 、 a_c からの DBC の導出

JIS Z 0119 では、製品の方形波 (台形波) 衝撃パルスに対する DBC が一本導出されるだけで、正弦半波衝撃パルスに対する DBC も、破損部位別の DBC も導出することはできない。そこで、著者らは、「実測 SRS とモデル SRS が一致する」という仮定 (4 章と同様) だけでなく、

$$\left[\Delta V_{Ci}(T_{iV}) = a_{imax}/(2\pi f_{Ci}) \right. \quad (6)$$

および

$$a_{Ci}(T_{ia}) = a_{imax}/2 \quad (7)$$

が成立する」

という仮定も設定することにより、JIS Z 0119 とほぼ同じ試験手順で、DBC が各破損部位毎に導出でき、さらに、正弦半波衝撃パルスに対する DBC も導出できる評価法を考案した。

式(6)および式(7)において、添え字 i は破損部位を意味する。また、 $V_{Ci}(T_{iV})$ 、 $a_{Ci}(T_{ia})$ はそれぞれ許容速度変化試験および許容加速度試験によって得られた破損部位 i ($i = A, B, \dots$) に対する許容速度変化および許容加速度であり、 a_{imax} は破損部位 i が破壊する限界の伝搬加速度を表す。 f_{Ci} は破損部位 i の固有振動数を示す。式(6)、式(7)は理論解析によって得られた 1 自由度のばね質量系の方形波衝撃パルスに対する衝撃応答の最大値から導出されたものである⁷⁾。

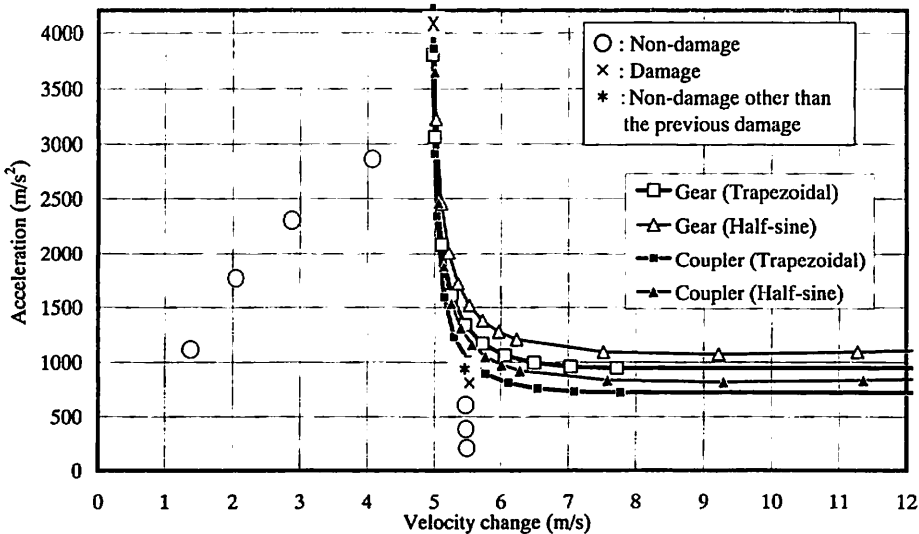


Fig. 6 The DBC derived from ΔV_c and f_c according to " $\Delta V_c \cdot f_c$ method"

5.1 ΔV_c 、 a_c からの導出理論

破損部位 i における a_{imax} と許容加速度 $a_{Ci}(T)$ の間には次の関係が成り立つ。

$$a_{imax} = a_{Ci}(T) \times Tr_i(f_{Ci} \cdot T) \quad (8)$$

式(7)に式(8)を代入すると、次式が得られる。

$$a_{Ci}(T) = 2 a_{Ci}(T_{ia}) / Tr_i(f_{Ci} \cdot T) \quad (9)$$

式(6)、式(7)より a_{imax} を消去すると、次式が得られる。

$$f_{Ci} = a_{Ci}(T_{ia}) / |\pi V_{Ci}(T_{iv})| \quad (10)$$

ここで、実測 SRS とモデル SRS が一致すると仮定しているので、正弦半波衝撃パルスに対する伝達係数 $Tr(f_{Ci} \cdot T)$ は Table 2 および式(5)で与えられる。よって、式(9)に式(10)を代入することにより $a_{Ci}(T)$ が得られる。また、 $a_{Ci}(T)$ に対応する速度変化は式(2)より算出できる。

5.2 「 $\Delta V_c \cdot a_c$ 法」

本手法の DBC 導出手順は次のとおりである。

- ① (許容速度変化試験) JIS Z 0119 とは異なり、許容速度変化試験を十分に加速度および速度変化が高くなるまで続け、破損する可能性があるすべての脆弱部位の許容速度変化を把握する。破損した部位 i ($i = A, B, \dots$) の速度変化を $\Delta V_{Ci}(T_{iv})$ とし、その時発生する最大加速度を $a_{Ci}(T_{iv})$ とする。
- ② (許容加速度試験) もう 1 台新しい試料を用意する。JIS Z 0119 と異なり、許容加速度試験を十分に加速度および速度変化が

Table 2 Transmissibility of model SRS for half-sine shock pulse

$f_c \cdot T$	$Tr(f_c \cdot T)$	$f_c \cdot T$	$Tr(f_c \cdot T)$
0.066	0.264	2.387	1.120
0.133	0.522	2.453	1.098
0.199	0.767	2.519	1.088
0.265	0.993	2.586	1.107
0.332	1.195	2.652	1.124
0.398	1.368	2.718	1.137
0.464	1.509	2.785	1.148
0.530	1.615	2.851	1.157
0.597	1.683	2.917	1.163
0.663	1.732	2.984	1.168
0.729	1.759	3.050	1.172
0.796	1.763	3.116	1.175
0.862	1.765	3.182	1.176
0.928	1.750	3.249	1.175
0.995	1.734	3.315	1.173
1.061	1.705	3.381	1.171
1.127	1.682	3.448	1.169
1.193	1.651	3.514	1.166
1.260	1.618	3.580	1.162
1.326	1.587	3.647	1.157
1.392	1.554	3.713	1.152
1.459	1.518	3.779	1.146
1.525	1.487	3.845	1.140
1.591	1.455	3.912	1.134
1.658	1.422	3.978	1.127
1.724	1.390	4.044	1.121
1.790	1.359	4.111	1.114
1.856	1.330	4.177	1.107
1.923	1.301	4.243	1.099
1.989	1.273	4.310	1.092
2.055	1.245	4.376	1.084
2.122	1.218	4.442	1.077
2.188	1.192	4.508	1.070
2.254	1.167	4.575	1.077
2.321	1.144	4.641	1.082

高くなるまで続け、破損する可能性がある脆弱部位の許容加速度をすべて把握する。この時、加える衝撃パルスの速度変化は、JIS Z 0119 と同様、許容速度変化の 1.6 倍 (正確には、 $(\pi/2)$ 倍) 以上とする。破損部位の記号 i は、手順 ① で記号付けた i に対応しておかなければならない。許容加速度を $a_{Ci}(T_{ia})$ 、その時の速度変化を $\Delta V_i(T_{ia})$ とする。

- ③ (DBC 導出) ① で得られた $\Delta V_{Ci}(T_{iv})$

と②で得られた $a_{Ci}(T_{ia})$ から式(10)を用いて固有振動数 f_c が算出できる。 $Tr(f_c \cdot T)$ は、式(4)または Table 2 (または式(5)) によって与えられるので、式(9)の $a_{Ci}(T_{ia})$ と f_{ci} は既知となり任意の作用時間 T の衝撃パルスに対する許容加速度 $a_{Ci}(T)$ が算出できる。また、これに対応する速度変化は式(2)で得られる。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig. 7 に示す。手順①では、2.2 手順①の結果を用いた。手順②では、2.1 手順①の結果を用いた(ここでは、 ΔV を輸送中の最大速度変化に設定して計測しているが、この ΔV が ΔV_C の 1.6 倍以上であるとみなし本手法を適用した)。

6. 製品の衝撃強さ評価法の体系化

考案した五つの衝撃強さ評価法について、それぞれの長所、短所および必要な計測装置などの特徴をまとめ、試験現場での状況に応

じ、最適な評価法が選択できるようにした。

6.1 各評価法の特徴の整理

各評価法の手順を Table 3 にまとめた。また、各長所および短所を Table 4 に示す。許容加速度試験、許容速度変化試験ではともに試料を破壊する必要があるが、 f_c および SRS の計測では試料を破壊する必要はない。そのため、JIS Z 0119、「 $\Delta V_C \cdot a_C$ 法」では最小試料数が 2 台であるのに対し、その他の四つの評価法では、必要とする最小試料数は 1 台である。試作品が不足しているような場合には、これらの方法を選択すればよい。「速度変化依存性」「逆転現象」を把握できるのは SRS 計測を行う評価法のみであり、製品の衝撃強さをできるだけ正確に把握したい場合には、これらの方法を選択するのが望ましい。また、「複数の DBC 交差現象」の把握および正弦半波衝撃パルスに対する DBC の導出に関しては、JIS Z 0119 以外の五つの評価法すべてで可能である。

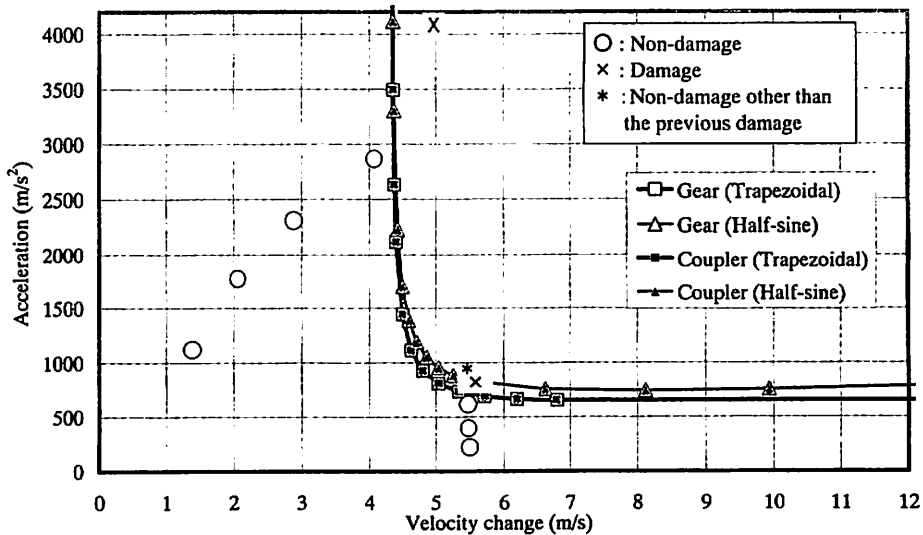


Fig. 7 The DBC derived from ΔV_C and a_C according to " $\Delta V_C \cdot a_C$ method"

Table 3 Procedures of each DBC evaluation method

DBC evaluation methods	Step 1	Step 2	Step 3
JIS Z 0119	$\Delta V_c(T_v)$	$a_c(T_a)$	$a_c(T) = a_c(T_a)$ ($\Delta V(T) > \Delta V_c(T_v)$) $\Delta V_c(T) = \Delta V_c(T_v)$ ($a_c(T) > a_c(T_a)$)
$a_c \cdot$ SRS Method	$a_{ci}(T_{ia})$	$Tr_i(T)$	$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{ia}) \times Tr_i(T_{ia}) / Tr_i(T)$ $\Delta V_{ci}(T) = a_{ci}(T) \times T \times \kappa$
$\Delta V_c \cdot$ SRS Method	$a_{ci}(T_{iv})$	$Tr_i(T)$	$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{iv}) \times Tr_i(T_{iv}) / Tr_i(T)$ $\Delta V_{ci}(T) = a_{ci}(T) \times T \times \kappa$
$a_c \cdot f_c$ Method	$a_{ci}(T_{ia})$	$f_{ci} \rightarrow Tr_i(f_{ci} \cdot T)$	$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{ia}) \times Tr_i(f_{ci} \cdot T_{ia}) / Tr_i(f_{ci} \cdot T)$ $\Delta V_{ci}(T) = a_{ci}(T) \times T \times \kappa$
$\Delta V_c \cdot f_c$ Method	$a_{ci}(T_{iv})$	$f_{ci} \rightarrow Tr_i(f_{ci} \cdot T)$	$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{iv}) \times Tr_i(f_{ci} \cdot T_{iv}) / Tr_i(f_{ci} \cdot T)$ $\Delta V_{ci}(T) = a_{ci}(T) \times T \times \kappa$
$\Delta V_c \cdot a_c$ Method	$\Delta V_{ci}(T_{iv})$	$a_{ci}(T_{ia})$	$f_{ci} = a_{ci}(T_{ia}) / \{ \pi \Delta V_{ci}(T_{iv}) \}$ $f_{ci} \rightarrow Tr_i(f_{ci} \cdot T)$ \downarrow $a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{ia}) \times Tr_i(f_{ci} \cdot T_{ia}) / Tr_i(f_{ci} \cdot T)$ $\Delta V_{ci}(T) = a_{ci}(T) \times T \times \kappa$

c means critical value. a and v mean the result of critical acceleration shock test and the result of critical velocity shock test respectively. i represents the damaged part.
 $\kappa = 1$ (Rectangular shock pulse), $\kappa = 2/\pi$ (Half-sine shock pulse)

Table 4 Features of each DBC evaluation method

DBC evaluation methods	Minimum number of specimens to be destroyed	Grasp of 'strange phenomena'	Grasp of 'DBC's cross over'	Derivation of DBCs against half-sine shock pulse
JIS Z 0119	2 specimens	impossible	impossible	impossible
$a_c \cdot$ SRS Method	1 specimens	possible	possible	possible
$\Delta V_c \cdot$ SRS Method	1 specimens	possible	possible	possible
$a_c \cdot f_c$ Method	1 specimens	impossible	possible	possible
$\Delta V_c \cdot f_c$ Method	1 specimens	impossible	possible	possible
$\Delta V_c \cdot a_c$ Method	2 specimens	impossible	possible	possible

* "Strange phenomena" means "Dependency of ΔV " and "Reverse Phenomenon".

製品の緩衝包装設計のために衝撃強さ評価を行う場合、 ΔV_c よりも a_c をできるだけ正確に把握しておく必要がある。そのため、 a_c を計測する評価法（すなわち、「 $a_c \cdot$ SRS法」と「 $a_c \cdot f_c$ 法」、「 $\Delta V_c \cdot a_c$ 法」）が適している。一方、携帯機器などのように、 a_c よりも ΔV_c をできるだけ正確に把握しておく必要がある場合、 ΔV_c を計測する評価法（すなわち、「 $\Delta V_c \cdot$ SRS法」と「 $\Delta V_c \cdot f_c$ 法」、「 $\Delta V_c \cdot a_c$ 法」）が適している。

6.2 必要な機器の整理

各評価法に必要な機器を Table 5 に示す。

f_c および SRS の計測では試料にセンサー（加速度センサー、ひずみゲージなど）を貼り付け、応答を計測する必要がある。これらの計測機器を保有しない場合や試料にセンサーを貼り付けるだけの隙間がない場合には、「 $\Delta V_c \cdot a_c$ 法」によってセンサーなしで衝撃強さを評価することができる。

振動試験機が利用できる場合、「 $a_c \cdot f_c$ 法」や「 $\Delta V_c \cdot f_c$ 法」が可能であり、SRS 計測よりも短時間で f_c を計測できるという利点がある。この場合、衝撃試験機に台形波衝撃パルスを発生させる機能がなくても DBC 評価が可能である。ただし、本評価法では「速度

Table 5 Equipment required in each DBC evaluation method

DBC evaluation methods	Sensor and recorder	Vibration test machine (shaker)	Shock test machine (Trapezoidal-shock pulse)
JIS Z 0119	unnecessary	unnecessary	necessary
a_c ·SRS Method	necessary	unnecessary	(necessary)**
ΔV_c ·SRS Method	necessary	unnecessary	(necessary)**
a_c · f_c Method	necessary	necessary	unnecessary
ΔV_c · f_c Method	necessary	necessary	unnecessary
ΔV_c · a_c Method	unnecessary	unnecessary	necessary

** (necessary) means it is necessary to use trapezoidal shock pulse in order to derive DBC against trapezoidal shock pulse. Namely, only half-sine shock pulse is required when DBC against half-sine shock pulse would be derived.

変化依存性」、「逆転現象」を把握することはできない。

衝撃試験機に台形波衝撃パルスを発生させる機能がなく（正弦半波衝撃パルスを発生させる機能はある）、さらに、振動試験機もない場合、「 a_c ·SRS法」、「 ΔV_c ·SRS法」によって、正弦半波衝撃パルスに対するDBCを導出することができる。しかし、台形波衝撃パルスに対するDBCは導出できない。

6.3 各評価法の複合化

例えば、製品の緩衝包装設計のために衝撃強さ評価を行う場合、許容加速度試験を行う方が、実用上、精度よく衝撃強さが評価できる。しかし、一般に、衝撃試験機が発生し得る台形波衝撃パルスの最大加速度は、正弦半波衝撃パルスの最大加速度よりも低く、許容加速度試験では、問題となる部位がすべて破損しない場合がある。このような場合、「 a_c ·SRS法」や「 a_c · f_c 法」では、すべての破損部位のDBCが導出されない。その対策として、「 a_c ·SRS法」と「 ΔV_c ·SRS法」（あるいは、「 a_c · f_c 法」と「 ΔV_c · f_c 法」）を複合し、両者の長所を生かす評価法（複合型評価法）を考案した。これにより、「 a_c の評価精度」および「試験機仕様上（台形波衝撃パルス）の限界」を両立することが可能とな

る。また、この時必要な最小試料数は1台であり、試験者の負担も変わらない。本複合型評価法のDBC導出手順を以下に示す。

- ①（許容加速度試験）2.1の手順①と同じ。ただし、試験機仕様上の最大加速度（台形波衝撃パルス）まで加速度を上げる。
- ②（許容速度変化試験）①で用いた試料に対して、2.2の手順①と同じ手順で試験を行い、新たに破損する部位について許容速度変化を調べる。
- ③（SRSまたは f_c の計測）2.1の手順②、または、4.1の手順②と同じ。
- ④ (a) (SRS→DBC算出) ③でSRSを計測した場合、①で破損した部位については、2.1の手順③に従い、②で破損した部位については、2.2の手順③に従う。
- ④ (b) (f_c →DBC算出) ③で f_c を計測した場合、①で破損した部位については、4.1の手順③に従い、②で破損した部位については、4.2の手順③に従う。

7. 結論

先に考案したDBC評価法（「 a_c ·SRS法」）は、 a_c を基点としてSRSに基づきDBCを導出する評価法であった。 ΔV_c を基点とする方法、 f_c からモデルSRSを算出し

DBCを導出する方法、 ΔV_C と a_C から f_C を導出する方法について検討した結果、「 $\Delta V_C \cdot SRS$ 法」「 $a_C \cdot f_C$ 法」「 $\Delta V_C \cdot f_C$ 法」「 $\Delta V_C \cdot a_C$ 法」が考案できた。さらに、各評価法の特徴について整理することにより、試験者が利用できる機器や用意できる試料数などの状況に応じて、適切な評価方法が選択できるように試験方法を体系化した。

<引用文献>

- 1) JIS Z 0119-1994、包装設計のための製品衝撃強さ試験方法。
- 2) ASTM D 3332-93, Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines.
- 3) R. E. Newton, Fragility Assessment - Theory and Test Procedure -, U. S. Naval Postgraduate School (1968).
- 4) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、製品衝撃強さ試験法における問題点の実験的確認、日本機械学会論文集C編、68(666)、539(2002)。
- 5) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、新しい製品衝撃強さ試験方法の提案、日本機械学会論文集C編、67(664)、3924(2001)。
- 6) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、実測SRSデータに基づく製品DBC評価法に関する検討、日本包装学会第10回年次大会要旨集、(2001-6)、48。
- 7) G. J. Burgess, Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging Technology and Science, Vol. 1, p. 5 (1988).
(原稿受付 2002年2月5日)
(審査受理 2002年7月10日)