

損傷境界曲線評価法の実験的検証

中嶋隆勝*・斎藤勝彦**・寺岸義春*

Experimental Proof of Damage Boundary Curve Evaluation Method

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

JIS Z 0119 および ASTM D 3332で規定されている製品の衝撃強さ試験方法では、著者らが指摘する「速度変化依存性」や「逆転現象」が存在する場合、製品の衝撃強さを正しく評価できない。そこで、著者らは、製品の破損部位の衝撃応答スペクトル(SRS)を実測し、そのSRSから製品の損傷境界曲線(DBC)を導出する評価法(DBC評価法)を考案した。本研究では、DBC評価法の実験的検証を行うために、市販のビデオカセットレコーダー(VCR)を実験試料として用い、DBC評価法に従って衝撃強さの評価を行った。これにより、DBC評価法の実用性が明らかとなった。

キーワード：衝撃強さ、製品、評価、損傷境界曲線、実験的検証、包装、携帯機器

As for the mechanical-shock fragility test method of product regulated in JIS Z 0119 and ASTM D 3332, it is difficult to evaluate "Dependency on the velocity change" and "Reverse phenomenon" that we have advocated. Accordingly, we developed a test method (Damage boundary curve evaluation method : DBC evaluation method) that will be able to evaluate these phenomena. In this study, in order to prove this test method experimentally, we conducted the mechanical-shock fragility test according to "DBC evaluation method" using a video cassette recorder on the market as a specimen. As a result, the practicability of this test method was clarified.

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

1. 緒言

工場で製造されたほとんどの製品は、船舶、航空機、トラックなどの輸送機関により消費者(または使用者)の所へ輸送される。その輸送過程における荷役作業(積み卸し、運搬、取り出し)などに伴って衝撃が発生し、消費者に届いた段階で、すでに製品が破損してい

るという事故が発生することがある。これらの製品破損事故を未然に防ぐために緩衝包装が施されるが、製品の衝撃強さを正確に把握した上で、緩衝設計(緩衝材の種類や形状を設計する)しなければ、適正包装を実現することはできない。

著者らは、これまでの研究^{1)~7)}で、製品の衝撃試験で現れるいくつかの奇妙な現象

*大阪府立産業技術総合研究所(〒594-1157 大阪府和泉市あゆみ野2-7-1) : Technology Research Institute of Osaka Prefecture 2-7-1, Ayumino, Izumi, 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, Fukae-minami, Higashinada, Kobe, Hyogo 658-0022, Japan

〔「速度変化依存性」、「逆転現象」および「複数の損傷境界曲線（以下、DBC と呼ぶ）の交差現象〕を数値解析^{1)~3)}、実験^{4) 5)}により見いだした。さらに、これらの現象が原因で、製品の衝撃強さが誤って評価されることがないように、二つの新しい試験方法を考案した^{6) 7)}。ひとつは「保証範囲確認試験」であり、JIS C 0041⁸⁾ および IEC 68-2-27⁹⁾（規定の衝撃パルスによる合否判定試験）を改良したものである。もうひとつは「DBC 評価法」であり、JIS Z 0119¹⁰⁾ および ASTM D 3332¹¹⁾（許容速度変化および許容加速度により製品の衝撃強さを評価する試験方法）を改良したものである。これらについては、まだ実験的検証を行っていない。また、他の報告も見当たらない。

本研究では、「DBC 評価法」の実験的検証を行うため、市販の製品（ビデオカセットレコーダー（以下、VCR と略す））の衝撃強さ、すなわち、DBC を「DBC 評価法」により導出した。さらに、JIS Z 0119 の許容速度変化試験を行うことにより、導出した DBC の精度について検証した。

2. JIS Z 0119 と DBC 評価法

JIS Z 0119 は、R. E. Newton によって考案された衝撃強さ評価法¹²⁾に基づいて試験方法が規定されており、ASTM D 3332 もほぼ同じ内容となっている。DBC 評価法との相違点は以下の通りである。

2.1 DBC 導出に用いた仮定

JIS Z 0119 では、DBC の導出に、「製品内にただ一つの脆弱部品（部位）が存在し、そ

の衝撃応答が 1 自由度のばね質量系と同じ特性である」という仮定が用いられている。

一方 DBC 評価法では、製品の衝撃応答についてのモデル化は行っておらず、「同じ作用時間の衝撃パルスに対する各部品の衝撃応答が線形である」という仮定を用い、実測した衝撃応答スペクトル（以下、SRS と呼ぶ）から DBC を導出している。本仮定は JIS Z 0119 の仮定よりも適用範囲が広く現実的であることは自明である。

2.2 試料数

JIS Z 0119 を構成する許容速度変化試験および許容加速度試験は、共に破壊試験であるため、最低 2 点の試料を破壊する必要がある。一方、DBC 評価法を構成する許容加速度試験および SRS 計測のうち、SRS 計測では試料を破壊する必要がないため、最低 1 点の試料だけで DBC が導出できる。

2.3 手順（JIS Z 0119 および DBC 評価法）

JIS Z 0119 では、以下の手順で台形波衝撃パルスに対する製品の衝撃強さ（DBC）を導出する。

- ① 作用時間が 3 ms 以下の正弦半波衝撃パルスを用いて、許容速度変化試験を行い、製品の許容速度変化を調べる。
- ② 得られた許容速度変化の 1.6 倍以上の速度変化の台形波衝撃パルスを用いて、許容加速度試験を行い、製品の許容加速度を調べる。
- ③ 製品の DBC の形状が L 字形であると仮定する。すなわち、縦線部の値を許容速度変化とし、横線部の値を許容加速度とする。一方、DBC 評価法では、以下の手順で台

形波衝撃パルスまたは正弦半波衝撃パルスに対する製品の衝撃強さ (DBC) を導出する。

- ① 輸送貨物の等価落下高さより算出した速度変化の台形波衝撃パルスを用いて、許容加速度試験を行う。試験は、すべての脆弱な部品が破損するまで続け、各破損部品(部位)に関する許容加速度を調べる。
- ② 各破損部品(部位)に加速度センサー、ひずみゲージなどを貼り付け、製品が破損しないレベルの台形波衝撃パルスまたは正弦半波衝撃パルスを用いて SRS を計測する。
- ③ ①で得られた各部品(部位)に関する許容加速度を DBC の基点として、SRS に基づき DBC を導出する。

ただし、②で、台形波衝撃パルスを用いて SRS を計測すれば、③で得られる DBC も台形波衝撃パルスに対するものとなる。また、正弦半波衝撃パルスを用いれば、得られる DBC は正弦半波衝撃パルスに対するものとなる。

2.4 複雑な現象に対する適応性

2.4.1 速度変化依存性および逆転現象

「速度変化依存性」とは、衝撃パルスの速度変化が異なれば、製品の許容加速度が変化する現象である。また、「逆転現象」とは、その加速度が小さいときの方が逆に製品が破損しやすくなる現象である。

これらは一見奇妙な現象ではあるが、製品の衝撃応答モデルによる数値解析^{1)~3)}によって見いだされ、実験^{4) 5)}によって確認された現象である。

JIS Z 0119 では、DBC の形状が L 字形と仮定されているため、「速度変化依存性」「逆転

現象」を把握することができない。しかし、DBC 評価法では、実測 SRS から DBC を導出するため、「速度変化依存性」「逆転現象」が把握できる。

2.4.2 複数の DBC の交差現象

「複数の DBC の交差現象」とは、製品内の複数の脆弱部品(部位)の各 DBC が互いに交差する場合、DBC の交点の前後で、破損する部品が変わってしまう現象である。JIS Z 0119 の許容速度変化試験と許容加速度試験で異なる部品が破損する場合があるが、これは「複数の DBC の交差現象」によるものである。DBC 評価法では、部品別に DBC が導出できるため、本現象を容易に把握することができる。しかし、JIS Z 0119 はその仮定からわかるように、部品別に DBC を評価する試験方法とはなっておらず、一本の L 字形の DBC が描かれるだけであり、本現象を把握することはできない。

3. DBC 評価法による衝撃強さ評価試験

3.1 実験試料

市販の VCR の衝撃強さを調べるために、DBC 評価法に従って試験を行った。試料の質量および外寸法を Table 1 に示す。

3.2 動作・外観確認の方法

許容加速度試験では、Table 2 に示す試料の動作・機能および外観の確認により、試料の損傷の有無を判断した。

Table 1 Mass and outer size of specimen (VCR)

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

Table 2 Check-list of the specimen about functions and outlooks

Items of check-list	
Functions	Power, Play, Cue, Rewind, Stop, Insert, Eject, Screen
Outlooks	Front panel, Top panel, Bottom panel, Circuit-board, Deck, The other parts

3.3 許容加速度試験

試験に用いる衝撃パルスは、速度変化は、JIS Z 0200¹³⁾の「貨物質量、輸送レベルと落下高さとの関係」を参考にして以下のように決定した。

貨物質量が 10 kg 未満で輸送レベルがⅡの場合、等価落下高さ H は、60 cm となる。また、緩衝材の反発係数 e を 0.6 と仮定すると、次式により、速度変化 ΔV が 5.49 m/s と算出される。

$$\Delta V = (1+e) \sqrt{2 g H} \quad (1)$$

ここで、g は、地球の重力加速度である。

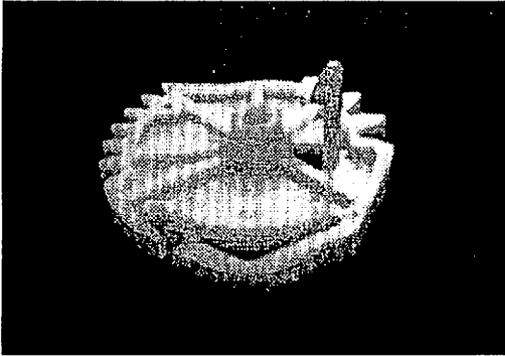
また、衝撃パルスの加速度は、約 200 m/s² から始め、200 m/s² の増分で 1000 m/s² になるまで試験を続けた。試験結果を Table 3 に示す。

破損部品は、歯車 (部品 A とする) およびカプラー (部品 B とする) であり、それぞれの破損状況を Fig. 1 (b) および Fig. 2 (b) に示す。試験結果から、本試料の許容加速度は、破損しなかった最後の加速度から、破損した

最初の加速度までの範囲内にあることがわかる。JIS Z 0119 では、より安全側の評価となるように、許容加速度は、破損しなかった最後の加速度にするよう規定されている。しかし、ここでは、試験の加速度増加幅による評価の誤差だけでなく製品強度のばらつきも含め、あくまで破損確率が 50% となる許容加速度を調べることにした (破損確率と DBC の関係については文献¹⁴⁾を参照)。そのため、許容加速度を、その部品が破損しなかった最後の加速度と破損した最初の加速度との平均値とした。また、各許容加速度に対応する作用時間を、その部品が破損しなかった最後の作用時間と破損した最初の作用時間との調和平均とした。(なぜならば、許容加速度試験は衝撃パルスの速度変化を一定の値に設定して行うため、加速度と作用時間が反比例する。そのため、破損しなかった最後の作用時間と破損した最初の作用時間の調和平均 (データの逆数の平均の逆数) が算出した許容加速度に対応する作用時間となる。) よって、各部

Table 3 Results of critical acceleration shock test

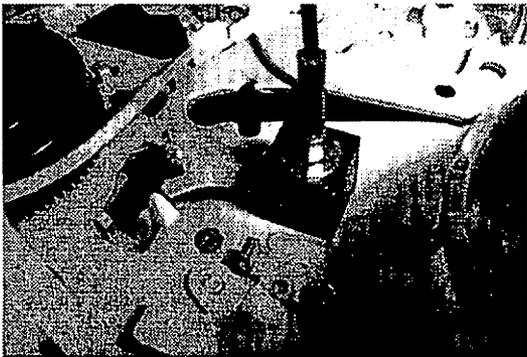
Acceleration m/s ²	ΔV m/s	Duration ms	Functions	Outlooks
199	5.51	28.2	OK	OK
389	5.48	14.5	OK	OK
596	5.39	9.55	OK	OK
772	5.52	7.56	No power	A gear pulled down from the deck Broken legs of a coupler on circuit-board
951	5.38	6.16	OK for the other function	OK for the other parts



(a) The gear in the deck of VCR



(b) The gear pulled down from the deck

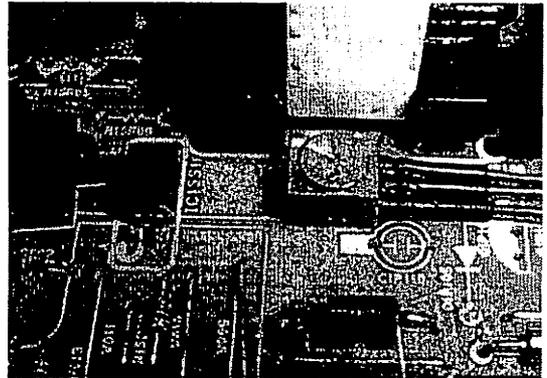


(c) The accelerometer set near the gear

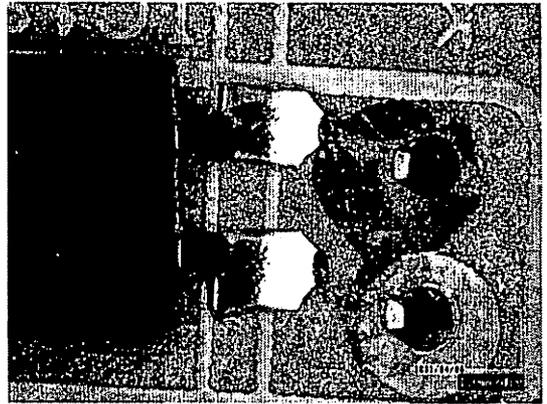
Fig.1 The gear pulled down and the accelerometer set near the gear

品の許容加速度および作用時間は共に 684 m/s^2 、 8.44 ms と算出される。

$$a_{cA}(8.44) = 684 \quad a_{cB}(8.44) = 684 \quad (2)$$



(a) The coupler on the circuit-board and the accelerometer set near the coupler



(b) The broken legs of the coupler

Fig.2 The broken legs of the coupler and the accelerometer set near the coupler

ここで、許容加速度 $a_{ci}(T)$ ($i=A,B$) の a_c は許容加速度を表し、添え字 i (A および B) は破損した部品の記号を表している。また、変数 T は衝撃パルスの作用時間である。

3.4 SRS 計測

試料内の各破損部品(歯車およびカップラー)付近にそれぞれ加速度センサーを貼り付け (Fig. 1 (c) および Fig. 2 (a) 参照)、次に、試料 (VCR) を衝撃台上に固定した。そして、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、各部品に伝搬する加速度を測定した。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）で除した値を加速度伝達係数 Tr とし、得られた Tr と作用時間 T の関係（SRS と称す）を Fig. 3 に示す。

3.5 DBC の導出

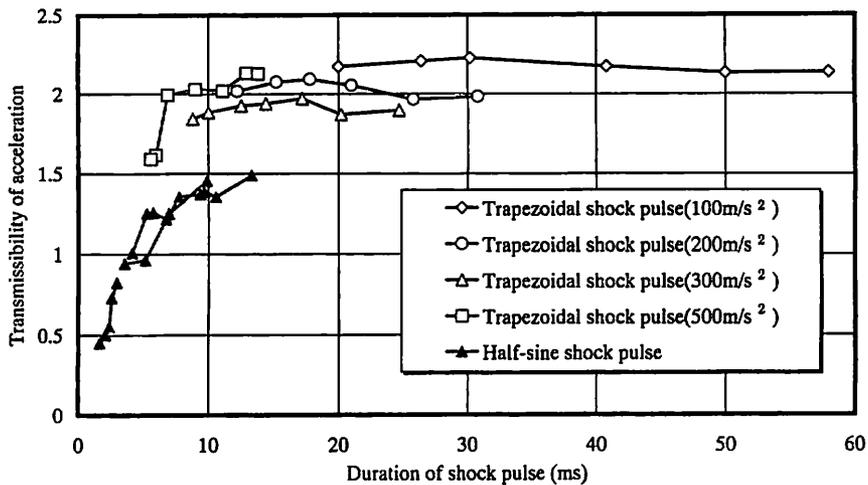
部品 i ($i=A,B$) についての DBC は、次

の手順で導出できる。

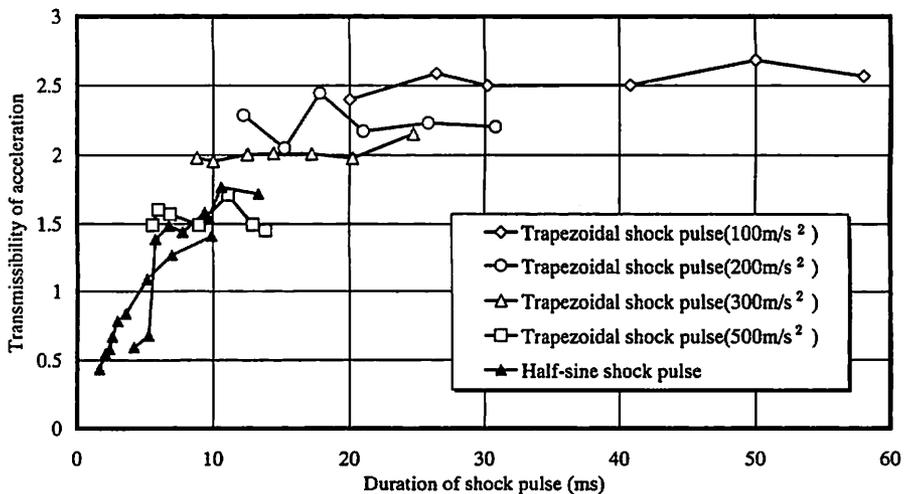
許容加速度試験で得られた部品 i の許容加速度を $a_{ci}(T_{i0})$ とし、SRS 計測で得られた部品 i の伝達係数を $Tr_i(T)$ とすると、作用時間 T に対する部品 i の許容加速度 $a_{ci}(T)$ は、次式で得られる。

$$a_{ci}(T) = a_{ci}(T_{i0}) \times Tr_i(T_{i0}) / Tr_i(T) \quad (3)$$

また、その時の速度変化は、衝撃パルスの形状によって異なり次式で算出される。



(a) SRS of the gear in the deck of VCR



(b) SRS of the coupler on the circuit-board of VCR
Fig.3 Results of SRS measurement on damaged parts

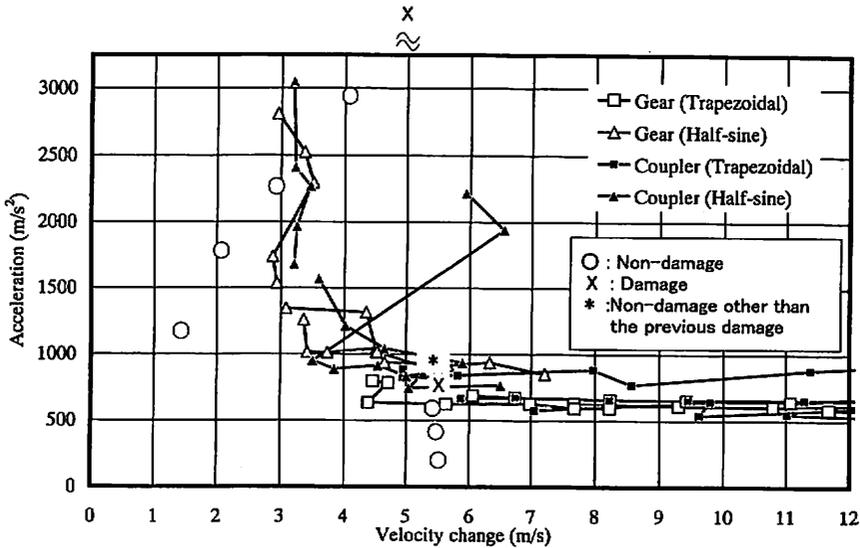


Fig.4 DBC of the specimen (VCR) for the each damaged part

$$\Delta V_i(T) = a_{Ci}(T) \times T$$

(台形波衝撃パルス) (4a)

$$\Delta V_i(T) = a_{Ci}(T) \times T \times 2/\pi$$

(正弦半波衝撃パルス) (4b)

得られた $a_{Ci}(T)$ および $\Delta V_i(T)$ を T の大き
 さ順にプロットし、直線でつなぐと、Fig. 4
 に示す DBC が得られる。

3.6 考察

3.6.1 DBC の形状

歯車、カップラー共に、速度変化が約 3.2
 m/s 付近で、DBC がほぼ垂直となり、1 自
 由度はね質量系の DBC と同様、許容速度変
 化が存在することがわかる。これより、許容
 速度変化試験を行うことなく（破壊する試料
 が 1 台削減できる）許容速度変化が把握でき
 ることが確認できた。しかし、計測した SRS
 にばらつきがあるため、きれいな一本の
 DBC とはならなかった。ばらつきを小さく
 するためには、①各プロットについての計測
 回数を複数にする。②同じ加速度の衝撃パル

スを用いて SRS を計測する。などの工夫が
 必要である。

3.6.2 衝撃応答の線形性

DBC 評価法は、「同じ作用時間の衝撃パル
 スに対する各部品品の衝撃応答に線形性があ
 る」という仮定に基づいている。すなわち「入
 力衝撃パルスの作用時間が同じなら、加速
 度が異なっても、同じ伝達係数となる」とい
 う仮定である。歯車部の SRS (Fig. 3 (a)) を
 見ると、入力衝撃パルスの加速度を 100
 m/s² から 500 m/s² に変化しても、伝達係
 数は約±10%の範囲内にある。この結果から、
 歯車部の衝撃応答には、ほぼ線形性が存在す
 ると判断できる。また、カップラー部の SRS
 (Fig. 3 (b)) を見ると、入力衝撃パルスの加
 速度が 100 m/s² から 500 m/s² に変化すると、
 伝達係数が最大約±20%の範囲で変化して
 おり、歯車部の SRS と比較すると、多少大
 きな非線形性が存在する。しかし、製品の品質
 管理上、この程度の評価誤差が認められると
 すれば（たとえば、緩衝設計によって十分に

吸収できる誤差の範囲である)、カプラー部についても DBC 評価法を適用することが可能である。

3.6.3 複雑な現象の有無

歯車部の SRS (Fig. 3 (a)) を見ると、作用時間に対して伝達係数の変化は 10% 以内であり、特に特徴的な変化の傾向は認められない。このため、「速度変化依存性」「逆転現象」は発生しないと考えられる。一方、カプラー部の SRS (Fig. 3 (b)) を見ると、作用時間に対して伝達係数は徐々に増加する傾向にあり、特に作用時間が 50 ms では伝達係数が約 2.7 に達している。本結果から、「速度変化依存性」が存在し、速度変化が増加するとともに、許容加速度が減少すると推測される。しかし、SRS に、特に目立った急激な変化は認められず、「逆転現象」は発生しないと考えられる。

次に「複数の DBC の交差現象」について考察する。歯車部およびカプラー部の DBC (Fig. 4) を見ると、2 本の DBC が複雑に交差しているが、これは、2 本の DBC が非常に接近している状態で、データがばらついていてためである。ただし、カプラー部には「速度変化依存性」が存在するため、Fig. 4 の範囲を越える大きな速度変化では、許容加速度が減少し、これら 2 本の DBC は離れていくと推測できる。以上の考察から、典型的な「複数の DBC の交差現象」の発生は考えられない。

3.6.4 試験に要する時間

DBC 評価法は、許容加速度試験と SRS 計測から構成されている。ここでは、これらの試験に要する時間について考察する。

許容加速度試験の手順は、JIS Z 0119 の方法とほとんど同様であり、試験時間に関して

も大差はない。ただし、JIS Z 0119 とは違い、試料の動作または機能に異状が認められた場合、その原因となる破損を見いださなければならない。今回の試験では、衝撃パルスを加えた回数は 5 回で、製品内部の破損箇所（デッキの歯車、電子基板上のカプラー）も比較的簡単に見つかったため、試験に要する時間は、約 2 時間であった。しかし、もし動作機能の異状に対応する破損場所が見つからなければ、試験は遂行できず、さらに時間も必要となる可能性がある。しかし、本作業は、製品の脆弱部分を把握し、今後製品を改良するためにも重要であり、十分な時間を費やすだけの価値はあると考える。

一方、SRS 計測は、JIS Z 0119 にはない試験項目であり、非常に手間のかかる試験である。今回の計測では、約 6 時間もの試験時間がかかったが、作業効率の見直し（プリンター出力の高速化、計測点数の削減）により、試験時間の短縮が可能である。たとえば、許容加速度試験で得られた許容加速度に対応する作用時間よりも長い作用時間の衝撃パルスは、実用上、必要性が低く、計測しなくても問題ないため（許容加速度試験は、最大速度変化で行われ、それよりも大きな速度変化となる衝撃はあまり考える必要がない）試験回数を今回の約半分に削減することができる。

今回、許容加速度試験および SRS 計測に約 8 時間を要したが、今後、試験時間を大幅に短縮できる可能性があり、試験時間についても、本評価法は十分に実用性があると言える。

4. 許容速度変化試験による DBC の検証

DBC 評価法による許容速度変化推定の精度を確認するために、もう一台新たに試料を用意し、許容速度変化試験を行った。試験方法は JIS Z 0119 に準じ、作用時間 3 ms 以下の正弦半波衝撃パルスを用い、十分に小さな速度変化の衝撃パルスから始め、徐々にその速度変化を増加し、試料に損傷が現れた時点で試験を終了することにした。ただし、本検証には、各試料間の強度のばらつきによる誤差は考慮していない。許容速度変化試験結果を Table 4 に示す。

試験で破損した部品は、許容加速度試験と同じ歯車 (部品 A) およびカップラー (部品 B) に加え、フロントパネル化粧板および天蓋前部であった。

DBC 評価法による推定では、歯車およびカップラーは共にほぼ同じ許容速度変化 (約 3.2 m/s) となったが、実際には多少高め (4.96 m/s : 安全側である) の速度変化で破損した。また、実際の許容速度変化試験では、許容加速度試験で破損しなかったフロントパネル化粧板および天蓋前部が破損した。これは、部

品の固有振動数および強度が非常に高かったためであり、許容加速度試験ではさらに高い加速度の衝撃パルス (951 m/s^2 以上) を加えなければ破損しないと考えられる。この対策として、さらに高い加速度で許容加速度試験を行うか、許容加速度試験終了後、同じ試料を用いて、許容速度変化試験を行い、破損の可能性のある脆弱部品をすべて把握しておくという方法がある。しかし、輸送包装を目的とした衝撃試験の場合、最も重要な衝撃強さは、輸送中の等価落下高さに相当する速度変化をもつ衝撃パルスに対するものであり、その意味から、許容加速度試験結果を基準に DBC を導出する DBC 評価法は、十分実用的な評価法であると言える。

5. 結論

考案した「DBC 評価法」に従って、市販の VCR の衝撃強さ評価を行った結果、部品別に DBC を導出することができ、得られた DBC には明らかな許容速度変化が認められた。その推定結果は、実際の許容速度変化試験結果の約 70% であり、試料のばらつきも

Table 4 Results of critical velocity shock test

Acceleration m/s ²	ΔV m/s	Duration ms	Functions	Outlooks
1180	1.42	2.10	OK	OK
1800	2.01	1.95	OK	OK
2280	2.89	2.10	OK	OK
2940	4.09	2.45	OK	OK
4100	4.96	2.05	No power	A gear pulled down from the deck Broken legs of a coupler on circuit-board A dressed face pulled down from the front panel The front part of the top panel bended

あるが、低め（安全側）となった。

衝撃応答の線形性が DBC 評価法の前条件であるが、VCR のカプラー（基板上）付近の SRS に関して、最大±20% の範囲で不一致（ばらつき）が認められた。このため、より精度よく DBC を導出するためには、SRS 計測時、入力衝撃パルスの加速度をできるだけ許容加速度に近くする必要がある。

許容加速度試験で破損した歯車およびカプラーには SRS に急激な変化が認められず、「逆転現象」は発生しない。しかし、カプラーに関しては、速度変化を大きくすれば、許容加速度が低下するため「速度変化依存性」が現れる。

DBC 評価法での試験に要した時間は約 8 時間であり、時間短縮も可能である。このことから、DBC 評価法は、試験時間に関しても十分実用的な評価法であると言える。

<参考文献>

- 1) 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)、123(1999)
- 2) 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、日本包装学会誌、**9** (1)、33(2000)
- 3) T. Nakajima, K. Saito, M. Kubo, Y. Teragishi, Mechanical Shock Fragility of Stacked Products - Consideration with 1 Dimensional Model - , Proceeding of 11th IAPRI World Conference on Packaging, Singapore, p.637(1999.7)
- 4) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、製品衝撃強さ試験法の実験的検討、日本包装学会第 9 回年次大会要旨集、p.32(2000.6)
- 5) T.Nakajima, K.Saito, Y.Teragishi, Test Methods for Mechanical shock Fragility of Products, Proceeding of 20th IAPRI Symposium, San Jose, p.123(2000.6)
- 6) T.Nakajima, K.Saito, Y.Teragishi, Damage Boundary Analysis on Products - Proposal of New Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products - , Proceeding of 12th IAPRI World Conference on Packaging, Warsaw, p.123(2000.6)
- 7) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、損傷境界曲線評価試験および保証範囲確認試験、包装技術、**39** (2)、4(2001)
- 8) JIS C 0041 -1995, 環境試験方法—電気・電子—衝撃試験方法
- 9) IEC 68-2-27, Basic environmental testing procedures Part 2 : Tests-test Ea and guidance : Shock
- 10) JIS Z 0119 -1994, 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法、解説。
- 11) ASTM D 3332, Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines
- 12) R. E. Newton, Fragility Assesment - Theory and Test Procedure - , U. S. Naval Postgraduate School (1968)
- 13) JIS Z 0200 -1999, 包装貨物—評価試験方法通則
- 14) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、確率論を導入した製品の損傷境界曲線評価法、日本航海学会論文集、(105)、63(2001)
(原稿受付 2001 年 10 月 22 日)
(審査受理 2002 年 1 月 28 日)