

一般論文

落下試験機による損傷境界曲線 導出法の提案

中嶋 隆勝*

Derivation of Damage Boundary Curve by Drop Tester

Takamasa NAKAJIMA *

緩衝包装設計を实践する上で、製品の衝撃強さ（損傷境界曲線、以下、DBC と略す）を調べることは重要である。しかし、衝撃強さ評価に必要な衝撃試験装置は高価なため全産業分野に普及している状況にない。また、製品設計者によって実施される衝撃試験方法（JIS C 60068-2-27）では、耐衝撃性の合否判定がなされるが、許容速度変化が考慮されてないため、この結果を用いて緩衝包装設計を実施すれば過剰包装や破損クレームにつながる可能性がある。そこで、比速度変化、比加速度という新概念を導入することにより、落下試験機を用いて簡易に DBC を導出できる手法を考案した。本研究では、製品の被落下面に装着する緩衝材の性能をデータベース化し、提案法による市販 DVD プレーヤーの落下試験を行い、実際に DBC を導出できることを確認した。また、比速度変化と比加速度を用いた方法の妥当性について理論的な確認を行った。

It is important to evaluate the shock fragility (i.e. to derive damage boundary curve, DBC) of products with the shock test machines when packaging cushions are designed. However, shock test machines have not been used widely in all industrial fields. Moreover, product designers perform the shock test (JIS C 60068-2-27) and judge the product to be good or no good. As a result, package designers are not able to utilize the results of the shock test for designing packaging cushions, since the results do not include its critical velocity change. So, we developed a new practical method for deriving DBCs easily by drop test, which includes new concepts, namely, specific velocity change and specific acceleration. In this study, we made the cushioning performance database of cushions that is attached on the bottom of products when dropping the product. Moreover, we conducted the shock test of DVD player according to this method in order to confirm that the DBCs can be derived practically. Lastly, it has been shown theoretically the validity of the new method.

キーワード：包装、損傷境界曲線、衝撃強さ、落下試験、破損、試験方法、緩衝材

Keywords : packaging, damage boundary curve, shock fragility, drop test, damage, test method, cushion

* 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
TRI Osaka (Technology Research Institute of Osaka Prefecture), Ayumino, Izumi, Osaka 594-1157, Japan
TEL:0725-51-2711, FAX:0725-51-2639, Email:nakajima@tri.pref.osaka.jp

1. 緒言

緩衝包装設計を実践する上で、製品の衝撃強さ評価は必要不可欠である。製品の衝撃強さを調べるには、衝撃パルスを台上に発生できる衝撃試験装置を必要とするが、高価なため全産業分野に普及している状況にない。そのため衝撃強さが不明であり、経験と勘による緩衝設計を余儀なくされる事例が散見される。また、多くの製品設計者はJIS C60068-2-27「環境試験方法 電気・電子 衝撃試験方法」に従って耐衝撃性の合否判定を実施しているが、製品の許容速度変化が考慮されてないため、この結果を用いて緩衝包装設計を実施すれば過剰包装や破損クレームにつながる可能性がある¹⁾。したがって、包装設計者が簡易に製品の衝撃強さを評価できる装置およびシステムが必要とされている。しかし、現在そのような装置やシステムはなく、その方法を提案する報告も見当たらない。そこで、筆者らは、比速度変化²⁾、比加速度²⁾という新概念を導入し、落下試験機を用いて簡易に損傷境界曲線（以下、DBCと略す）³⁾を導出できる手法を考案²⁾した。本研究では、製品の被落下部に装着する緩衝材の性能をデータベース化するとともに、提案法による市販DVDプレーヤーのDBC導出を実際に行う。また、本手法の理論的根拠の妥当性を示すため、比速度変化と比加速度の関係（以下、基準化DBCと呼ぶ）が、衝撃パルス波形の種類のみにより決定され、一自由度のバネ質量系でモデル化できるあらゆる製品に対して普遍性を

有することを理論的に確認する。

2. DBC導出の手順

落下試験機を用いたDBC導出法²⁾の手順をFig.1に示す。

では緩衝材に重錘を落下した時に発生する衝撃パルスを計測し、にて緩衝材の性能をデータベース化する。では製品（供試品）の落下試験を行い、許容落下高さを調べる。

で作成したデータベースとの測定結果に基づき、にてその許容速度変化 V_c および許容加速度 A_c を推定する。最後に、において製品のDBCを導出する。ただし、事前に、の作業を実施しておけば、～の作業のみでDBCが導出できる。また、にて製品に生じる加速度を実測する場合も、同様に、の作業は省略できる。

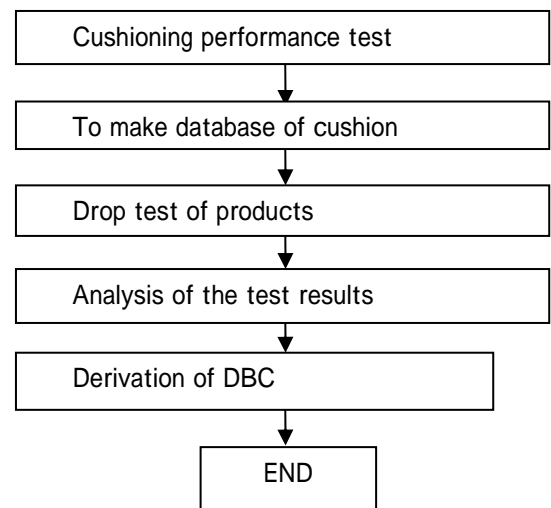


Fig.1 Derivation procedure of DBC by drop test machine

3. 緩衝材の落錘実験によるデータベース作成(手順 および)

直方体に近い形状の製品を想定し、Fig.2 に示す3種類のコーナパッドに対して、落下高さを順次変えて落錘実験 (Fig.3 参照) を行い、緩衝性能のデータベース化を行った。本実験では、面落下の他、専用の治具による角落下も実施し、角落下で生じる衝撃パルスもデータベース化している。データベースを用いて、製品に生じる加速度と速度変化を推定

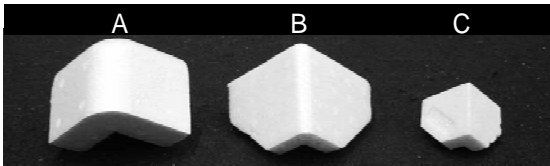


Fig.2 Corner pads made of expanded polyethylene foam

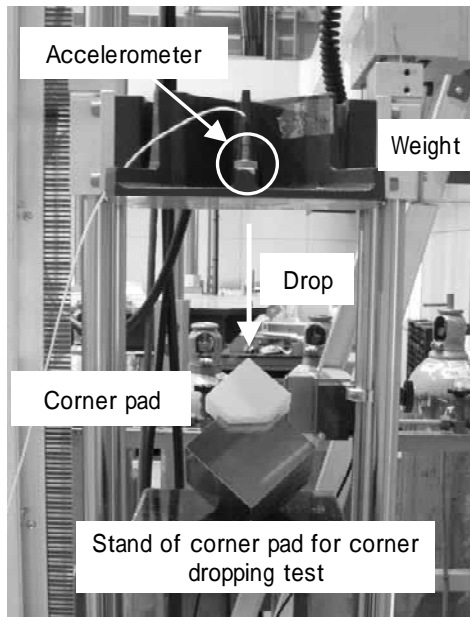
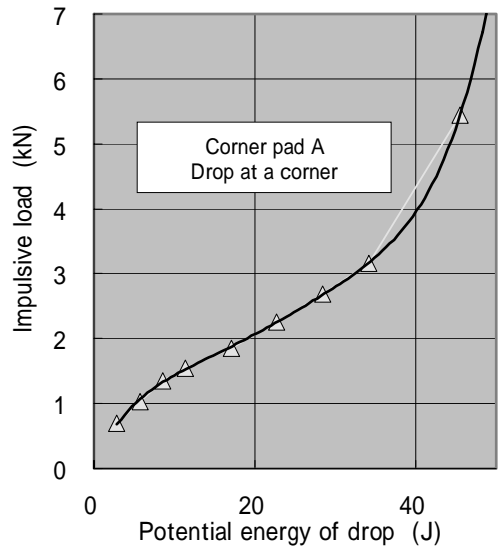
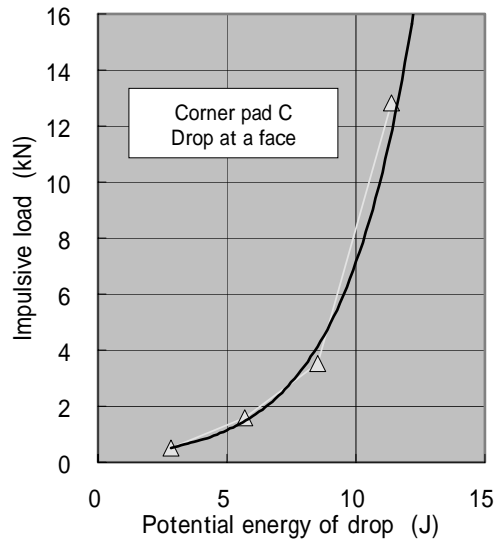


Fig.3 Drop test to evaluate the cushioning performance



(a) Database of Corner pad A for a corner



(b) Database of Corner pad C for a face

Fig.4 Cushioning performance database of corner pads when dropping at a corner or a face

するため、衝撃荷重だけでなく反発係数も算出できるようにしている。データベースの一例として、Fig.4 に、Corner pad A の角落下お

よび Corner pad C の面落下に対して生じる衝撃荷重のデータベースを示す。ただし、本データは簡易的に作成したものであり、より詳細に、緩衝材の温度特性、速度依存性、製品受け部表面の凹凸などを考慮したデータベースを作成すれば、加速度、速度変化の推定精度が向上すると考えられる。データベースの詳細さは、要求される評価精度のレベルに応じて改良されるべきものと考えている。また、球殻を有する製品や青果物などについては、衝突部の曲率半径にも注目してデータベースを作成する必要がある。

4. 製品の落下試験(手順 および)

市販されている DVD プレーヤー (Table 1 参照) を供試品とし、その天面落下に対する衝撃強さ (DBC) を調べるため、製品単体で

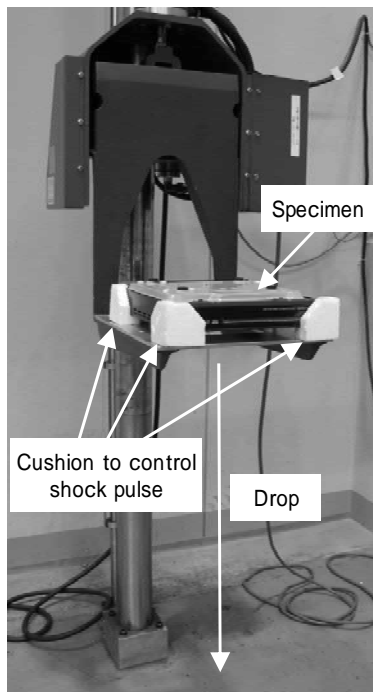


Fig.5 Drop test to evaluate fragility of a product (DVD player)

Table 1 Test specimen (DVD player)

Manufacturer	Domestic company
Size	225×235×52 mm
Mass	1.2kg

Table 2 Results of the drop tests without cushion

H (cm)	V (m/s)	Observations
30	2.43	OK
40	2.80	OK
50	3.13	OK
70	3.71	OK
100	4.43	Malfunction of “Play”
140	5.24	OK except the above
180	5.94	“Disc tray” does not open.

Table 3 Results of the drop tests with cushion

H (cm)	A (m/s ²)	V (m/s)	Observations
30	847	3.85	OK
40	943	4.45	OK
50	1051	5.00	OK
70	1303	5.95	OK
100	1799	7.18	OK
140	2766	8.60	Malfunction of “Play”
180	4253	9.87	OK except the above

Table 4 Allowable value obtained by the drop tests without cushion

Damage	Drop height (cm)	V _c (m/s)	A _c (m/s ²)
Malfunction of “Play”	70	3.71	-
“Disc tray” does not open.	140	5.24	-

Table 5 Allowable value obtained by the drop tests with cushion

Damage	Drop height (cm)	V _c (m/s)	A _c (m/s ²)
Malfunction of "Play"	100	7.18	1799
"Disc tray" does not open.	Over 180	Over 9.87	Over 4253

高さ H を 30 から 180cm の範囲で順次変えて落下試験 (Fig.5 参照) を実施した。試料数は 2 台とし、それぞれ緩衝材なしでの試験と被落下部に緩衝材を装着した状態での試験を実施した。衝撃パルスの速度変化 V および加速度 A の算出手順は次のとおりである。

まず、衝撃エネルギー E を次式で算出する。

$$E = mgH \quad (1)$$

ただし、m は製品質量、g は重力加速度、H は落下高さである。緩衝性能データベースを用いて E に対応する衝撃荷重 F および反発係数 e を調べ、次式に代入することにより V および A を算出する。

$$V = (1+e) \sqrt{2gH} \quad (3)$$

$$A = F/m \quad (4)$$

試験結果および A、V の推定値を Table 2 および Table 3 に示す。ここで、緩衝材なしでの落下衝撃時の反発係数 e は 0 としている。結果を整理すると、Table 4、Table 5 に示すように破損部位別に許容速度変化 V_c、許容加速度 A_c が得られる。これらの許容値により DBC の導出が可能となる。

5. DBC の導出(手順)

DBC とは製品の損傷と非損傷の境界を衝撃パルスの加速度 A_c と速度変化 V_c により表現したものである。その加速度と速度変化を次のように比加速度 a と比速度変化 v に無次元化する。

$$v = V_c \cdot (f_c / a_c) \quad (5)$$

$$a = A_c / a_c \quad (6)$$

ただし、f_c は製品の破損部位に関する固有振動数、a_c はその部位の許容加速度とする。

a と v の関係図を基準化 DBC と呼ぶことにする。この基準化 DBC は、6 章で後述するように、衝撃パルスの波形別に 1 自由度のばね質量系による衝撃応答モデルから導出される理論値であり、f_c と衝撃パルスの有効作用時間 D_e の積のみの関数で表すことができる。f_c・D_e は、製品の固有振動数を衝撃パルスの有効作用時間で無次元化した係数とみなせるので、基準化 DBC は製品の特徴 (f_c あるいは a_c) に影響されない普遍性を有している。この基準化 DBC を使えば、衝撃試験装置で発生させるような台形波衝撃パルスがなくても容易に DBC を導出することが可能になる。その導出法を以下に記す。製品を緩衝材なしで直接、地面に落下して得られる許容落下高さを H_{c1} とすると、その時の速度変化 V₁ は次式で得られる。

$$V_1 = \sqrt{2gH_{c1}} \quad (7)$$

このとき、緩衝材がないので、加わる衝撃パルスの作用時間は 0、加速度は無量大とみな

すことができる。したがって V_1 は製品の許容速度変化に相当する。基準化 DBC では、 a が無限大となるとき v に相当し、その値を v_1 と表すことにする。衝撃パルスの波形が方形波あるいは正弦半波の場合、 v_1 は $1/(2)$ である。

ここで、 v_1 、 V_1 は既知であるから、式(5)の V_c および v に、それぞれ V_1 、 v_1 を代入すると、未知の係数 f_c / a_c が得られる。

$$f_c / a_c = v_1 / V_1 \quad (8)$$

手順 4 で求めた、緩衝材で保護された製品の落下試験で得られる許容加速度と許容速度変化をそれぞれ A_2 および速度変化 V_2 とすると、式(6)における未知数 a_c が次のように算出できる。まず、式(5)に V_2 を代入すると、

$$v_2 = V_2 \cdot (f_c / a_c) \quad (9)$$

となる。式(8)を式(9)に代入すると、次式により v_2 が得られる。

$$v_2 = V_2 \cdot (v_1 / V_1) \quad (10)$$

基準化 DBC より、比速度変化が v_2 となるときの比加速度 a_2 がわかるので、式(6)の a_c 、 A_c にそれぞれ a_2 、 A_2 を代入すると、 a_c が得られる。ただし、このときに用いる基準化 DBC は、EPE 緩衝材にて生じる波形が一般的に正弦半波に近いものなので、正弦半波に対するものとする。

$$a_c = A_2 / a_2 \quad (11)$$

式(8)および式(11)より、 f_c / a_c および a_c が既知となり、式(5)および式(6)における未知数が決定するので、基準化 DBC を通常の DBC に変換することが可能となる。このときに用いる基準化 DBC は、正弦半波、方形波共に設定

可能である。従来、DBC は方形波に対する導出が一般的であったが、これにより、正弦半波に対する DBC についても容易に導出できるようになる。

以上の手順で、Table 4 および Table 5 に示した破損部位別の許容値を用いて DBC を導出した。Fig.6 に示すように、破損部位別、かつ、衝撃パルスの波形別に DBC を導出することができる。

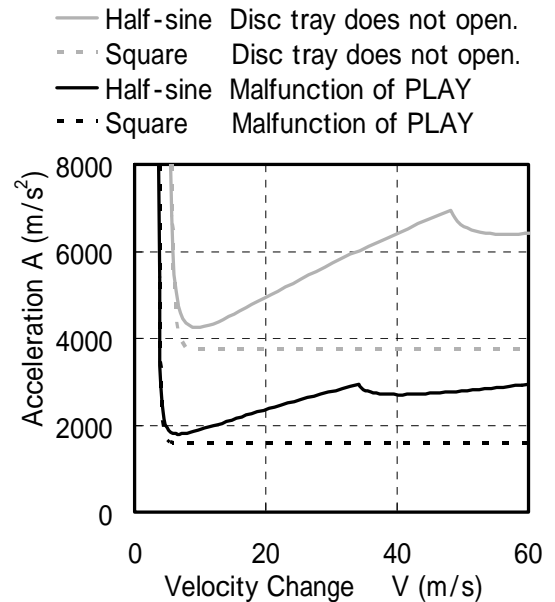


Fig.6 DBC of DVD player derived by the drop tests

6. 基準化 DBC の普遍性について

前章で記載した基準化 DBC を用いた DBC 導出法は、 f_c および a_c に対する基準化 DBC の普遍性が前提となっている。ここでは、その前提条件の成立を理論式の展開にて確認する。

一般的に、衝撃パルスに対する衝撃応答スペクトル（以下、SRS とする）は、横軸を製品の固有振動数 f_c と衝撃パルスの有効作用時間 D_e との積とし、縦軸を衝撃の伝達率（動的倍率） Tr としたグラフで表現 4)-6)される。そして、製品の衝撃伝達が一自由度のばね質量系で表現可能な場合、SRS は、衝撃パルスの波形（たとえば、方形波、正弦半波、のこぎり波など）のみに依存し、 f_c および a_c には依存しないことが知られている。この SRS の普遍性が存在すれば、基準化 DBC の普遍性も存在することを示す。

Tr の定義より、

$$a_c = A_c \cdot Tr(f_c \cdot D_e) \quad (12)$$

が成立する。

速度変化および有効作用時間の定義より、

$$V = A \cdot D_e \quad (13)$$

が成立する。

式(6)に式(12)を代入して整理すると、

$$a = 1 / Tr(f_c \cdot D_e) \quad (14)$$

となり、 a は $Tr(f_c \cdot D_e)$ のみの関数であることがわかる。

式(5)に式(12)および式(13)を代入して整理すると、

$$v = f_c \cdot D_e / Tr(f_c \cdot D_e) \quad (15)$$

となり、 v は $f_c \cdot D_e$ および $Tr(f_c \cdot D_e)$ のみの関数であることがわかる。

したがって、基準化 DBC を構成する v 、 a は、 $f_c \cdot D_e$ および $Tr(f_c \cdot D_e)$ のみの関数で表すことができる。 $Tr(f_c \cdot D_e)$ が $f_c \cdot D_e$ のみの関数であり、製品の f_c および a_c の積に対して普遍性が存在するという仮定の下、基準化 DBC も

同様に普遍性が存在することがいえる。ただし、SRS、すなわち $Tr(f_c \cdot D_e)$ の普遍性は、一自由度のばね質量系を前提としているので、非線形性の強い破損部位については十分な精度は保証できない。

7. おわりに

提案法で用いる緩衝材の性能をデータベース化し、実際に、落下試験機を用いて市販 DVD プレーヤーの DBC を導出した。また、基準化 DBC が、衝撃パルス波形の種類のみにより決定し、一自由度のバネ質量系でモデル化できるあらゆる製品に対して普遍性を有することを理論的に確認して本手法の理論的根拠の妥当性を示した。今後は、従来の衝撃試験機による DBC と比較し、評価精度の確認を実施したい。

謝辞

本研究は、JA 全農の打田宏氏から寄せられた技術相談がきっかけで始まり、特許の共同出願、本技術の普及に向けた取り組みなど、同氏には多大なご協力を頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

< 参考文献 >

- 1) 中嶋隆勝、日本包装学会誌、19(1)、17(2010)
- 2) 大阪府、全国農業協同組合連合会：特開 2009-047596

- 3) Newton,R.E. Fragility assessment theory and practice. Monterey Research Laboratory, Inc. Monterey, California, 1968.
- 4) 斎藤勝彦、“輸送包装の科学”、日本包装学会、p.53(2008)
- 5) JIS Z 0119:2002
- 6) JIS C 60068-2-27:1995

(原稿受付 2010年10月8日)
(審査受理 2010年11月17日)