

輸送包装のための製品衝撃強さ評価法 の実状と新しい提案

Fact-Finding and New Proposition of Evaluation Method of Mechanical-Shock Fragility of Products for Transport Packaging

中嶋 隆勝* 寺岸 義春*
Takamasa Nakajima Yoshiharu Teragishi
高田 利夫* 津田 和城*
Toshio Takada Kazuki Tsuda

(2003年7月17日 受理)

キーワード：輸送包装，製品，衝撃強さ，評価法，破損，損傷境界曲線，衝撃応答スペクトル

1. はじめに

製品衝撃強さ試験は，衝撃台上に製品を固定し，台形波や正弦半波などの形状をした衝撃パルスを加え，製品損傷の有無を確認する試験であり，製品衝撃強さ評価法とは，どのような衝撃パルスによって製品が破損するか否かを把握する技術である。

通常，輸送過程で発生する落下衝撃から製品を保護するために，緩衝包装が施されるが，製品衝撃強さ評価は，その緩衝包装設計の目標設定に相当する作業であり，輸送包装において重要な技術である。また，近年，携帯電話機やノート型パソコンなど，本来，衝撃に弱く運搬される機会の少なかった精密機器が携帯化される傾向にある。このような携帯型精密機器の開発においても製品衝撃強さ評価は重要な技術であり，その理論や技術の体系化を進め，広く普及させる必要がある。

本報では，輸送包装および製品設計のための製品衝撃強さ評価法に関する研究成果として，現在の評価法の問題点，ならびに，その対策としての新評価法について述べる。

2. 製品衝撃強さ評価の実状

現在，製品衝撃強さ評価に関する試験方法は，大きく分けて2種類ある。一つは，JIS C 0041あるいはIEC 68-2-27で規定されている方法で，製品(試料)

に規定の衝撃パルスを加え，損傷の有無を調べる試験(以下，合否判定試験と呼ぶ)である。また，もう一つは，JIS Z 0119およびASTM D 3332に規定されている方法で，R. E. Newtonによって考案された損傷境界曲線(以下，DBCと略称する)を用いた評価法(以下，製品衝撃強さ評価試験と呼ぶ)である¹⁾。さらに，これら試験方法の他，製品によっては，規定の衝撃パルスを製品に加え，製品内部の特定部品に伝搬される加速度を計測する試験(以下，衝撃応答特性試験と呼ぶ)も行われる。

(1) 合否判定試験(JIS C 0041 および IEC 68-2-27)

試験は，一般に製品規格に規定された衝撃の厳しさで行われるが，製品規格で衝撃の厳しさが規定されていない場合は，表1から適当なピーク加速度と作用時間の組み合わせが選択される。衝撃のピーク加速度とその作用時間が決まれば，その速度変化は衝撃パルスの波形毎に決定される。初期想定として，製品規格の規定に基づき，供試品の目視によって外観が検査され，寸法・機能検査が行われる。

次に，製品規格で衝撃方向に関する規定がない場合，供試品(製品)の互いに直交する三軸の各軸の両方向にそれぞれ連続する3回(合計18回)の衝撃が加えられる。その後，再度，製品規格に基づき，供試品の目視による外観検査および寸法・機能検査が行われ合否が判定される。

しかし，この方法では，製品の漠然とした衝撃に対する「強い」，「弱い」を判定できるだけで，どのような衝撃に対して製品が破損するかは推定できない。ま

* 評価技術部 包装技術グループ

表 1 衝撃パルスの加速度と作用時間による速度変化 (JIS C 0041 より抜粋)

ピーク加速度 (A)	公称パルスの 作用時間 (D)	速度変化 (ΔV)		
		正弦半波 $\Delta V=2/\pi \cdot AD \times 10^{-3}$	のこぎり波 $\Delta V=0.5AD \times 10^{-3}$	台形波 $\Delta V=0.9AD \times 10^{-3}$
m/s ²	ms	m/s	m/s	m/s
50	30	1.0	—	—
150	11	1.0	0.8	1.5
300	18	3.4	2.6	4.8
300	11	2.1	1.6	2.9
300	6	1.1	0.9	1.6
500	11	3.4	2.7	4.9
500	3	0.9	0.7	1.3
1,000	11	6.9	5.4	9.7
1,000	6	3.7	2.9	5.3
2,000	6	7.5	5.9	10.6
2,000	3	3.7	2.9	5.3
5,000	1	3.1	—	—
10,000	1	6.2	—	—
15,000	0.5	4.7	—	—
30,000	0.2	3.7	—	—

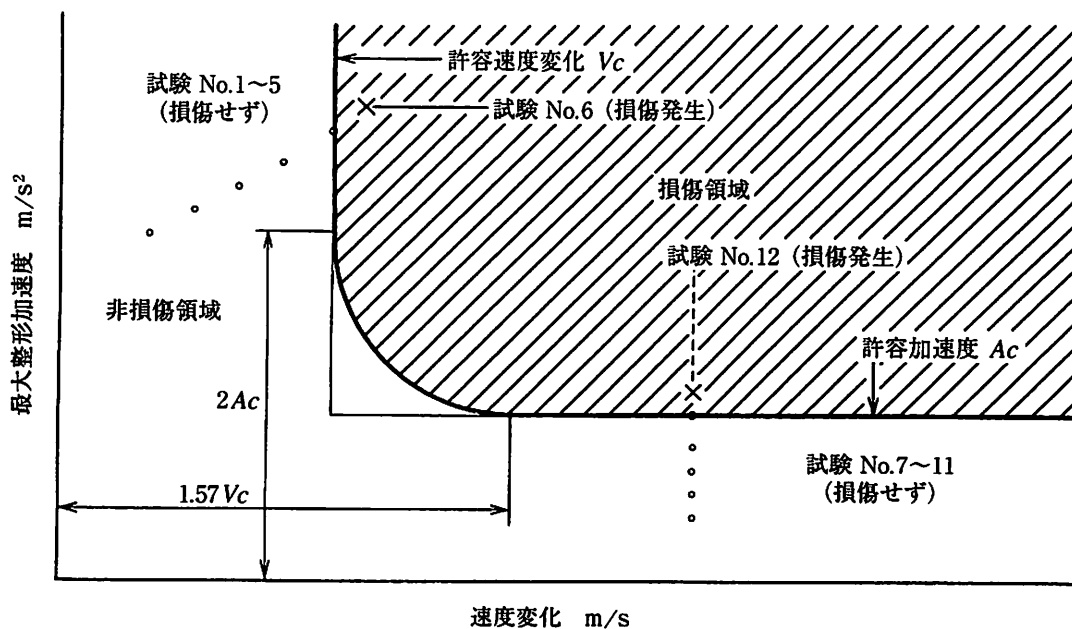


図 1 製品衝撃強さ試験方法における速度変化と最大整形加速度の関係 (JIS Z 0119-2002 より抜粋)
(損傷領域と非損傷領域の境界を損傷境界曲線 (DBC) という.)

た、製品が耐えうる衝撃の範囲を定め、それを保証することもできない。

(2) 製品衝撃強さ評価試験 (JIS Z 0119 および ASTM D 3332)

これらの規格には、包装設計のために包装内容品となる製品の衝撃に対する強度を評価する試験方法が規定されている。この方法は、R. E. Newtonにより考案されたDBC理論¹⁾に基づいて作成されており、具体的には、図1に示す二種類の試験、すなわち、製品の許容速度変化を測定する許容速度変化試験(試験No.1~6)および許容加速度を測定する許容加速度試験(試験No.7~12)から構成されており、測定した二値により、製品に損傷を与える衝撃パルスの範囲(図中の斜線部分が損傷領域でその他の部分が非損傷領域である)が把握できるようになっている。ここで、速

度変化とは、衝突速度と反発速度の絶対値の和であり、落下衝撃の場合は、落下高さとの高い相関性がある。

この評価試験方法を用いて行った衝撃試験結果の一例を表2に示す。また、この結果からJIS Z 0119に従って導出されるDBCを図2に示す。このDBCは1自由度のばね質量モデルを用いてR. E. Newtonが導出した極めて単純な形状となっているが、この評価法をすべての製品に適用できるとは限らない。

(3) 衝撃応答特性試験

ある製品の内部に脆弱な部品が存在し、その部品に伝搬する加速度が問題となるとき、規定の衝撃パルスを製品に加え、部品に伝搬する加速度を計測する試験が行われる。この衝撃応答特性試験において、許容以上の加速度が計測されると、部品支持方法や緩衝材の使用が再検討され、製品の耐衝撃性の改善策が講じら

表2 衝撃試験結果 (JIS Z 0119による)
(試験No.1~5まで同一試料を用い、試料交換後、試験No.5~10まで同一試料を用いた.)

試験 No.	加速度 m/s ²	速度変化 m/s	作用時間 ms	観察結果	方法
1	1930	2.31	2.01	試料外観に異常なし。	許容速度変化試験
2	2110	2.49	1.98	試料外観に異常なし。	
3	2660	2.90	1.94	部位 A の変形を認めた。	
4	2790	3.14	1.59	上記の他、部位 B の変形を認めた。	
5	3360	3.41	1.50	部位 A,B の他、試料外観に異常なし。	
6	228	7.41	32.9	試料外観に異常なし。	許容加速度試験
7	279	7.20	26.1	試料外観に異常なし。	
8	323	7.12	22.3	部位 C の変形を認めた。	
9	376	6.88	18.4	上記の他、部位 A および部位 D の変形を認めた。	
10	419	6.93	16.8	部位 A,C,D の他、試料外観に異常なし。	

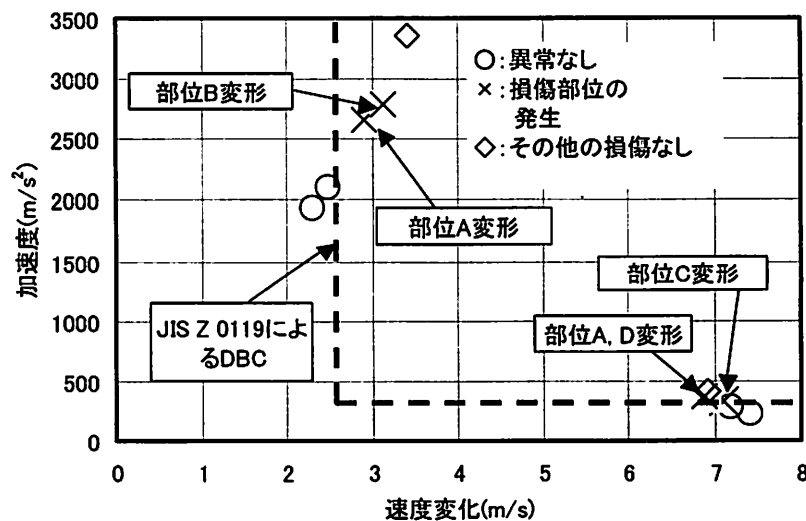


図2 JIS Z 0119により衝撃試験結果から決定されるDBC

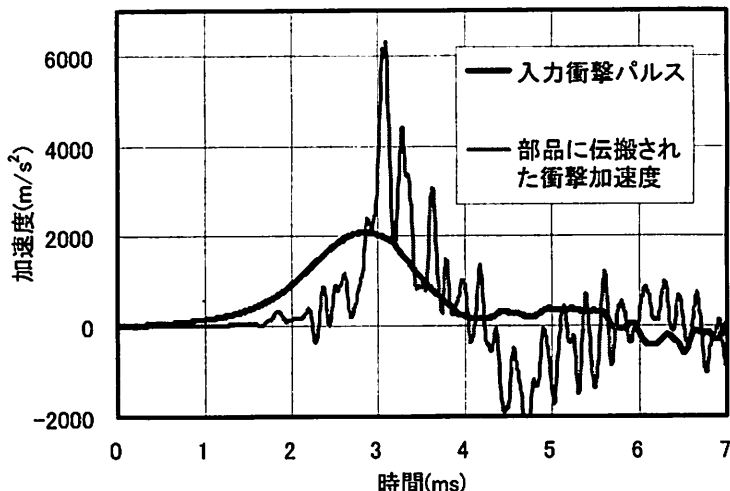


図3 衝撃応答特性試験結果の一例

れる。

ある製品の内部に脆弱な部品が存在し、その部品に伝搬する加速度が問題となるとき、規定の衝撃パルスを製品に加え、部品に伝搬する加速度を計測する試験が行われる。この衝撃応答特性試験において、許容以上の加速度が計測されると、部品支持方法や緩衝材の使用が再検討され、製品の耐衝撃性の改善策が講じられる。

これまでに行った試験結果の一例を図3に示す。通常、1自由度のばね質量モデルの場合、正弦半波衝撃パルスに対して伝搬される衝撃の最大加速度は、入力最大加速度の1.76倍以下であり、また、方形波衝撃パルスに対して伝搬される衝撃の最大加速度は入力最大加速度の2.0倍以下である²⁾。しかし、実際には図3の結果に示すように3倍以上の応答が発生している場合がある。したがって、1自由度のばね質量モデルではすべての製品の衝撃応答を表現することはできない。

3. 製品衝撃強さ評価で問題となる現象

R. E. Newtonは製品衝撃強さ評価法を構築する際に、製品モデルとして1自由度ばね質量系を用いている。そのモデルよりもやや複雑な製品モデルについて衝撃応答解析を行い、各製品モデルの衝撃応答スペクトル(SRS)およびDBCを導出すると、図4および図5に示すように特徴的なDBCの形状が現れ、R. E. Newtonの評価法で問題点となる現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC交差現象」が存在する^{2,3)}。図中の○×はそれぞれ製品の破損・非破損を表しており、「逆転現象」(低い加速度で逆に破損する現象)が発生している。これらの現象が実際の衝撃試験で発生することは、実製品(ミニフロッピーディスク)を用いた実験、ならびに、段積み実験モデル(製品が段積みされた状態を表す)により確認している⁴⁾。

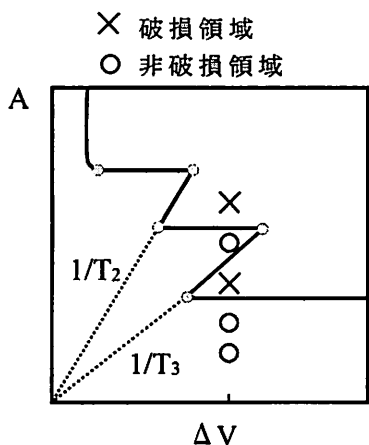


図4 SRSが階段状の場合のDBC

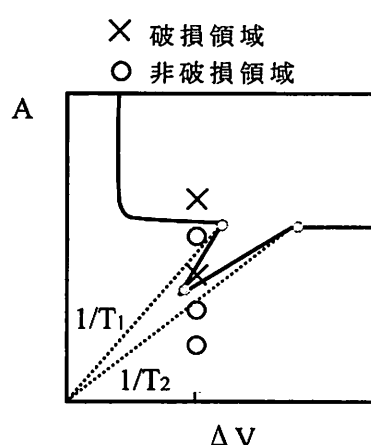


図5 SRSに突起がある場合のDBC

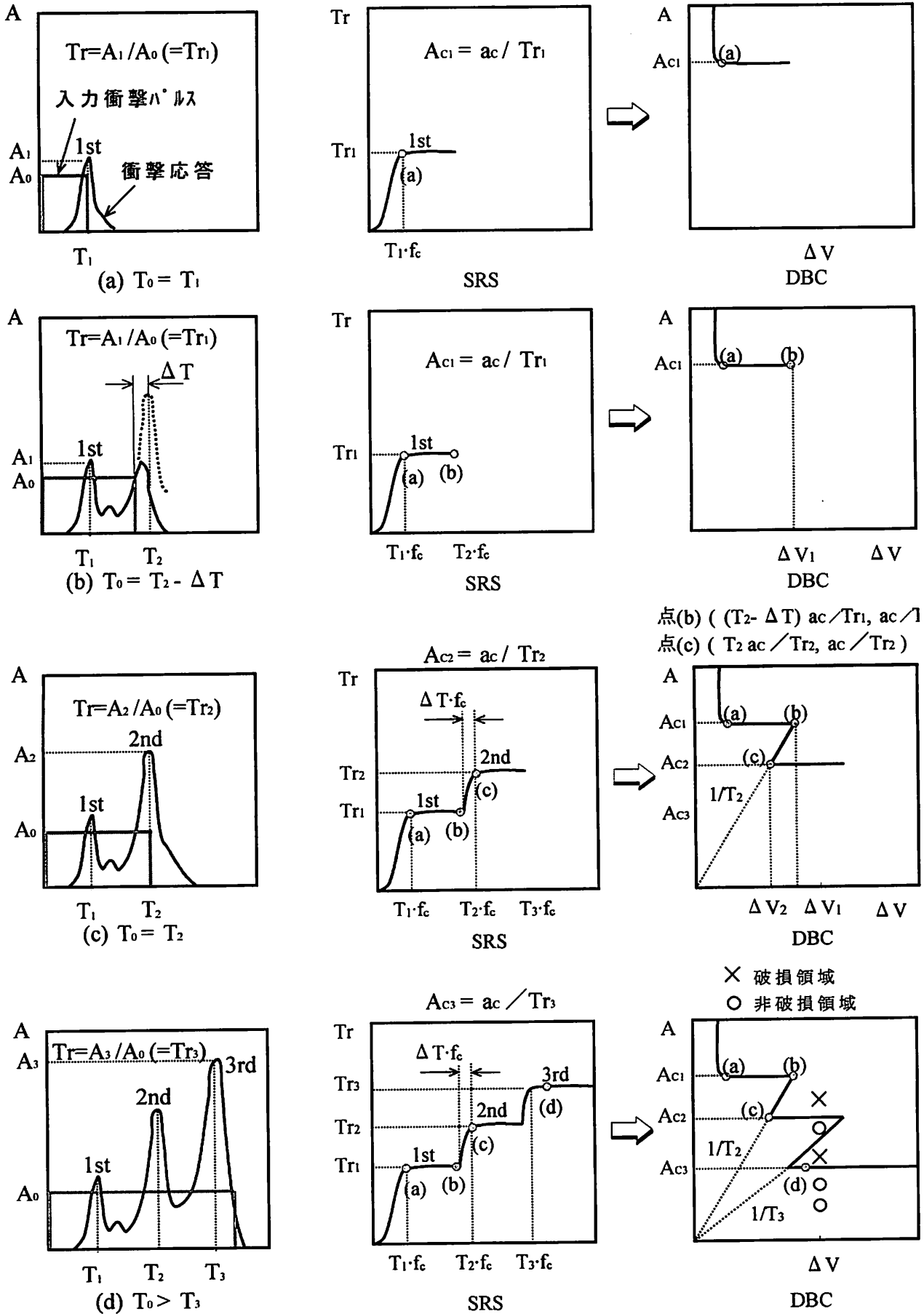


図6 衝撃パルス作用時間とSRS, DBCの関係(「逆転現象」発生メカニズム)

4. 「逆転現象」発生メカニズムの考察

「逆転現象」発生メカニズムを説明する模式図を図6に示す。製品に加える方形波衝撃パルス(入力衝撃パルス)および製品内部の脆弱部品に伝搬する加速度(衝撃応答)を左側の図で示す。また、左側の図に対応する衝撃加速度伝達率 Tr および許容加速度をそれぞれ中央の図(SRS)内の一点、右側の図(DBC)内の一点で示す。ここで、 Tr は最大衝撃応答 A_1 を入力最大加速度 A_0 で除した値($Tr=A_1/A_0$)とし、許容加速度 A_c は脆弱部品の許容加速度 a_c を伝達率 Tr で除した値($A_c=a_c/Tr$)としている。また、SRS横軸の f_c は固有振動数を示しており、DBC横軸の ΔV は許容加速度と衝撃パルスの作用時間の積($\Delta V=A_c T_0$)を表している。図中の(a)から(d)の順に、徐々に衝撃パルスの作用時間 T_0 が T_1 , $T_2-\Delta T$, T_2 , T_3 と長くなっている。

図6(a)に示すように、入力衝撃パルスの作用時間が T_1 の場合、最大衝撃応答は A_1 である。したがって、伝達率は Tr_1 となり、許容加速度は A_{c1} となる。次に、

入力衝撃パルスの作用時間が $T_2-\Delta T$ の場合(図6(b))について見ると、作用時間が長くなっているにもかかわらず最大衝撃応答は A_1 であり、作用時間が T_1 の場合と同じ値となっている。そのため、対応する伝達率および許容加速度もそれぞれ Tr_1 , A_{c1} となり、SRSもDBCもフラットに変化することがわかる。しかし、入力衝撃パルスの作用時間が T_2 と少し長くなれば(図6(c)), 衝撃応答に二つ目のピークが現れ、最大衝撃応答が A_2 となる。その結果、対応する伝達率および許容加速度はそれぞれ Tr_2 , A_{c2} となり、SRSおよびDBCに急激な変化が現れることになる。このとき、 $A_1 < A_2$ であるため、 $Tr_1 < Tr_2$ となり、 $A_{c1} > A_{c2}$ となる。さらに、 $\Delta V = A_c T_0$ を考慮すると、 $\Delta V_1 > \Delta V_2$ となることがわかる。同様に、さらに長い作用時間の入力衝撃パルス(図6(d))に関するSRS, DBCについて考えると、図中の最下段のような形状のSRS, DBCが予想される。このように、衝撃応答に複数のピークが現れる場合、DBCが複雑な形状となり、低い加速度で逆に製品が破損してしまう「逆転現象」が発生する⁵⁾。

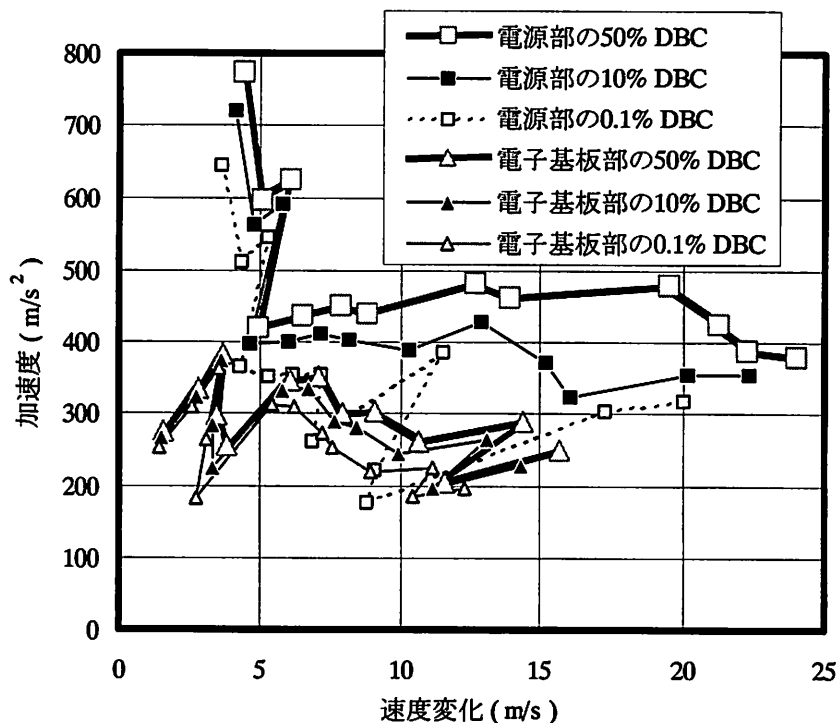


図7 ミニフロッピーディスクの確立DBC

表3 市場クレームの非再現性

破損部品	実験室(破損確率50%) での許容加速度	市場(破損確率0.1%) での許容加速度
電源部(Power Unit)	約 500m/s ²	約 250m/s ² (未対策)
電子基板(Circuit Board)	約 300m/s ² (対策)	約 250m/s ² (対策済み)

5. 新しい製品衝撃強さ評価法

製品のDBCが図4あるいは図5のような形状をしていても、十分正確に製品の衝撃強さを評価できるように筆者らは新しい評価法を考案している⁶⁾。JIS C 0041およびIEC 68-2-27に対応する新たな試験は、「保証範囲確認試験」であり、JIS Z 0119およびASTM D 3332に対応する試験は、「DBC評価法」である。前者により、製品が破損しない衝撃パルスの範囲を保証できるようになった。この保証範囲は、物流業者および輸送包装設計への要求仕様として用いることができる。後者は、許容加速度試験結果および製品内破損部品(部位)のSRSデータから製品DBCを直接導出する評価法であり、市販のビデオカセットレコーダーを用いた衝撃強さ評価試験による実用性の確認も行っている⁷⁾。この評価法により、製品衝撃強さ評価で問題となる現象を具体的に把握できるようになった。

6. 確率DBC評価法

市場において、実験室における製品衝撃強さ試験では破損しなかった製品が、実際には破損したというクレーム(「市場クレームの非再現性」と呼ぶ)が生じることがある。それは、部品強度や衝撃伝達率に起因する製品衝撃強さのばらつきによると考えられる。そこで、筆者らはそのばらつきが把握できる「確率DBC評価法」を考案した⁸⁾。その考案した評価法に従い、ミニフロッピーディスクの衝撃強さを評価した結果、「市場クレームの非再現性」が見出せ、その発生メカニズムについても明らかにできた⁸⁾。導出したミニフロッピーディスクの確率DBCを図7に示し、この現象に関連するデータを表3に示す。図および表より、50%の破損確率では、電源部は、電子基板部よりも明らかに強いが、0.1%の破損確率では、大きな違いが認められない。すなわち、本結果は、実験室では破損しない電源部が、市場では破損する可能性があることを示している。

7. 「DBC評価法」類型の考案および体系化

上記のDBC評価法では、製品衝撃強さ評価の理論的厳密さを追求することはできるが、企業の品質管理を行う現場での利便性が悪ければ、本評価法を普及させることはできない。そのため、各試験の目的、使用できる機器などの制約を考慮して、5種類のDBC評価法の類型を考案している。また、各評価法の特徴および必要な機器などの整理、試験方法の体系化も図った⁹⁾。

8. おわりに

輸送包装および製品設計のための製品衝撃強さ評価法に関する研究を行い、現在の評価法の問題点を明らかにし、その対策として新評価法を提案した。これらの研究成果は、輸送包装や製品設計に生かされ、輸送包装技術の高度化に貢献できる。

参考文献

- 1) R.E.Newton: Fragility Assesment - Theory and Test Procedure -, U.S. Naval Post Graduate School. Now available from Lansmont Corporation, 17 Mandecille Ce., Monterey, CA 93940, www.lansmont.com.
- 2) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 久保雅義, 寺岸義春: 日本包装学会誌, 8, 123 (1999)
- 3) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 久保雅義, 寺岸義春: 日本包装学会誌, 9, 33 (2000)
- 4) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 日本機械学会論文集(C編), 67, 539 (2002)
- 5) 中嶋隆勝: 神戸商船大学学位論文, 35 (2003)
- 6) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 日本機械学会論文集(C編), 67, 3924 (2001)
- 7) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 日本包装学会誌, 11, 115 (2002)
- 8) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 日本航海学会論文集, 63 (2001)
- 9) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 日本包装学会誌, 11, 217 (2002)