



輸送包装のための製品衝撃強さ評価に関する研究

中嶋, 隆勝

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2003-03-31

(Date of Publication)

2010-05-21

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0026

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS100026>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神 戸 商 船 大 学
博 士 論 文

輸送包装のための製品衝撃強さ評価に関する研究

2003 年 1 月

神戸商船大学大学院商船学研究科
博士後期課程 海上輸送システム科学専攻

中 嶋 隆 勝

目 次

第1章 序 論	1
1.1 緒 言	1
1.2 本研究の背景	2
1.3 現在の製品衝撃強さ評価における問題点	3
1.3.1 環境試験方法 - 電気電子 - 衝撃試験方法 (JIS C 0041-1995)	5
1.3.2 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法 (JIS Z 0119-2002)	5
1.3.3 R. E. Newton による損傷境界理論	7
1.4 本研究の目的と方針	8
1.5 本論文の構成	9
第2章 製品衝撃強さ評価において問題となる現象	15
2.1 緒 言	15
2.2 解析による問題点の発見	15
2.2.1 製品モデルおよび衝撃パルス	15
2.2.2 理論解析および数値解析方法	17
(1) 従来型モデル (Model-O) の理論解析	17
a Model-O の方形波衝撃パルス応答	18
b Model-O の正弦半波衝撃パルス応答	19
(2) 線形モデル (Model-A) の理論解析	19
a Model-A の方形波衝撃パルス応答	20
b Model-A の正弦半波衝撃パルス応答	21
(3) 非線形モデル (Model-4P) の数値解析方法	23
(4) SRS および DBC の導出方法	24
2.2.3 解析結果	25
(1) 線形モデル (Model-A) の方形波衝撃パルス応答	26
(2) 線形モデル (Model-A) の正弦半波衝撃パルス応答	28
(3) 非線形モデル (Model-4P) の方形波衝撃パルス応答	30
(4) 非線形モデル (Model-4P) の正弦半波衝撃パルス応答	33
2.2.4 考 察	35
(1) 応答波と SRS と DBC の関係	35
(2) 「速度変化依存性」(問題点その1)	38

(3) 「逆転現象」(問題点その2)	39
(4) 「DBC 交差現象」(問題点その3)	39
2.3 実験による問題となる現象の存在証明	40
2.3.1 実製品による衝撃強さ実験	40
2.3.2 段積み状態での衝撃強さ実験	44
2.3.3 考 察	50
2.4 結 言	52
第3章 新しい製品衝撃強さ評価法	54
3.1 緒 言	54
3.2 保証範囲確認試験の考案	54
3.2.1 JIS C 0041 の問題点および解決方法	54
3.2.2 保証範囲確認試験の手順	57
3.3 DBC 評価法の考案	58
3.3.1 JIS Z 0119 の問題点および解決方法	58
3.3.2 DBC 評価法の手順	60
(1) 破損部品(部位)(複数箇所)の確認	60
(2) 各破損部品(部位)の衝撃応答計測	60
(3) 破損部品(部位)強度の予測	62
(4) DBC の導出	63
(5) 衝撃の方向	63
3.4 DBC 評価法の実験的検証	63
3.4.1 DBC 評価法による衝撃強さ評価試験	63
(1) 実験試料および動作・外観確認	63
(2) 許容加速度試験	63
(3) SRS 計測	69
(4) DBC の導出	69
(5) 考 察	69
a DBC の形状	69
b 衝撃応答の線形性	70
c 問題となる現象の存在	70
d 試験に要する時間	70
3.4.2 許容速度変化試験による DBC の検証	73
3.5 結 言	73

第4章 確率 DBC 評価法	76
4.1 緒言	76
4.2 DBC 評価法への確率論の導入	76
4.2.1 製品衝撃強さのばらつき	76
4.2.2 許容加速度試験	77
4.2.3 破損部品（部位）の強度試験（確率論導入）	77
4.2.4 SRS の計測（確率論導入）	79
4.2.5 確率 DBC の導出	79
(1) 破損部品（部位）強度と伝達係数の関係	79
(2) 独立 2 変数関数の平均値および分散	79
(3) 製品の許容加速度の平均値および分散	81
(4) 破損確率の推定	82
a 正規分布を用いた推定	82
b ワイブル分布を用いた推定	83
4.3 実製品の確率 DBC の推定	84
4.3.1 破損部品（部位）および A_{Ci} (T_{0ia}) の設定	86
4.3.2 $E(a_{Ci})$, $V(a_{Ci})$ の設定	86
4.3.3 SRS の計測	86
4.3.4 実製品の確率 DBC	87
4.3.5 「市場クレームの非再現性」の理論的導出	87
4.4 結 言	89
第5章 「DBC 評価法」類型の考案および体系化	91
5.1 緒 言	91
5.2 SRS による DBC の導出法	91
5.2.1 「 $A_C \cdot$ SRS 法」	91
5.2.2 「 $\Delta V_C \cdot$ SRS 法」	92
5.3 製品の固有振動数と SRS の関係	95
5.3.1 実験試料および破損部品（部位）	95
5.3.2 固有振動数の計測	95
5.3.3 SRS の計測	97
5.3.4 実測 SRS とモデル SRS	98
5.4 固有振動数からの DBC の導出法	98
5.4.1 「 $A_C \cdot f_C$ 法」	100
5.4.2 「 $\Delta V_C \cdot f_C$ 法」	103

5.5	ΔV_C 、 A_C からの DBC の導出法	103
5.5.1	導出理論	104
5.5.2	「 $\Delta V_C \cdot A_C$ 法」	104
5.6	製品の衝撃強さ評価法の体系化	107
5.6.1	各評価法の特徴の整理	107
5.6.2	必要な機器の整理	109
5.6.3	各評価法の複合化	110
5.7	結 言	110
第6章	結 論	112
記号表		115
謝 辞		119

第1章 序 論

1.1 緒 言

家電製品をはじめ、大型機械、医薬関連機器など、あらゆる工業製品は、輸送中に発生する衝撃から保護される必要があり、輸送包装技術を必要とする業種の広さはきわめて大きいと言える。さらに、今後、eコマースが普及するのにもない、商品購入範囲がグローバル化し、輸送貨物はこれまで以上に過酷な輸送環境にさらされることが予想される。このような状況の中、輸送包装がこれまで以上に重要な技術となることは明らかである。

輸送包装は、輸送・搬送機器の進歩および道路表面の舗装化、荷役作業の質の変化など、輸送環境の変化だけでなく、新製品の開発・改良による製品の衝撃強さの変化も考慮して設計する必要がある¹⁾。さらに、地球規模の環境問題が憂慮されている現在、輸送包装資材についても、使用量削減、および、環境対応型材料への移行など、環境対応が不可欠である。このような、輸送包装に求められる保護性および制約条件が、時代とともに変化する一方、輸送包装技術は、未だ十分な技術水準に到達したとは言えない状況であり、経験や勘に基づいて包装設計が実践される場合も多い。さらに、輸送過程での製品破損事故が発生した場合、一般に、衝撃試験機などを用いた再現実験により破損原因が明らかにされ、その対策が講じられる。しかし、常にその原因が明らかになるとは限らず、理論的な裏付けなく対策を講じなければならない場合も少なくない。

これらの問題を解決するためには、既存技術により計測データを大量に蓄積するだけでは不十分である。蓄積されたデータに基づき、経験や勘による包装設計の部分を理論体系化し、さらに、これまで経験してきた原因不明の現象については、解析的および実験的検討を加え、新理論を創出することによって未解決な現象を解明する必要がある。また、輸送包装技術における、理論の緻密さや厳密さを向上させることも非常に重要であるが、業界における輸送包装技術の向上という観点では、理論的に完璧な手法の開発よりも、企業ニーズに適した簡易手法の開発およびその体系化がさらに重要な課題である。

製品衝撃強さ評価は、輸送過程で製品にどのような衝撃が加われば破損するかを把握する技術であり、緩衝包装設計での設計目標の設定に相当する作業である。このように、製品の衝撃強さ評価は、輸送包装において非常に重要な技術で

あり、その理論および技術の体系化を進め、広く普及させる必要がある。また、数年前より、携帯電話機やノート型パソコンに代表されるように、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がある。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る。また、衝撃耐久性が製品の重要な機能の一つとなりつつある中、製品衝撃強さ評価の重要性は、今後さらに高まるものと考えられる。

1.2 本研究の背景

材料や構造物が衝撃荷重を受けるときの変形や強さに関する研究は、約 100 年前から始められている。20 世紀初頭に B. Hopkinson により金属材料の強度や破壊に及ぼす動的効果に関する実験研究²⁾が始められた。その後、研究対象が、純金属から、合金³⁾⁴⁾⁵⁾、複合材料⁶⁾⁷⁾へと、また、単純構造要素から自動車の衝突⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、より複雑な構造物¹¹⁾や、建造物¹²⁾、地盤などの動的挙動¹³⁾へと広まってきている¹⁴⁾。また、物体中を高速で伝播するき裂に関する研究¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾、スペースデブリの衝突など地上では実験が困難である超高速の破壊現象に関する研究¹⁸⁾¹⁹⁾も行われている。さらに、生体に衝撃荷重が加わった場合の傷害に関する研究²⁰⁾²¹⁾²²⁾もある。

しかし、輸送包装あるいは製品落下対策を目的とした、製品衝撃強さを評価する一般的実験手法に関する研究は少ない。1960 年代の後半に、1 自由度のばね-質量系の DBC（損傷境界曲線の略、詳細は 1.3.3 にて説明する）を用いた製品衝撃強さ評価法が R. E. Newton によって考案²³⁾され、その後、製品衝撃強さ評価に関する研究は、あまり活発に行われなかった。1980 年代の後半になって、G. J. Burgess らは、剛-塑性モデルにより、繰り返し衝撃が及ぼす DBC への影響を解析的に検討した²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾。さらに、ASTM の技術検討委員らにより、製品衝撃強さ評価における疲労蓄積の影響が検討され始めた²⁷⁾。

その他、包装貨物および製品の落下衝撃問題に関する研究には、自由落下と衝撃試験での落下高さの関係についての研究²⁸⁾²⁹⁾、包装貨物の衝撃応答および衝撃強さ解析³⁰⁾³¹⁾³²⁾³³⁾、有限要素法による DBC の導出³⁴⁾、SEA（Statistical Energy Analysis の略）³⁵⁾を用いた製品衝撃強さの予測理論式の導出³⁶⁾、放射性物質の輸送における衝撃問題に関する研究³⁷⁾³⁸⁾、などがある。これらの研究も、実験に基づく製品衝撃強さ評価法ではない。実験により製品衝撃強さを把握する評価法の

研究は、R. E. Newton²³⁾ および W. I. Kipp²⁷⁾、G. J. Burgess²⁴⁾らミシガン州立大学の研究グループによるもの²⁵⁾²⁶⁾のほか、全く報告されていない。

輸送中あるいは使用中の衝撃による製品破損を削減するためには、製品衝撃強さ評価技術を向上させ、実験室における製品評価段階で、製品が破損する衝撃のレベルを十分に把握できる新評価法を確立する必要がある。また、そうするためには、近年、行われている Z. W. Wang らの研究³¹⁾、ならびに、S. Baofeng の研究³⁶⁾など、衝撃解析理論を輸送包装分野の問題に適用するような理論中心の研究だけではなく、現在の試験方法の理論的基礎となっている仮説にまでさかのぼった解析的および実験的研究を行い、試験方法の問題点を具体的に指摘する必要がある。さらに、その問題点を解決する新評価法を考案することにより、衝撃強さ評価の精度および信頼性を向上させなければならない。さらに、新評価法が現場の多様なニーズに適応した活用しやすい試験として改良することにより、正しく衝撃強さを評価する方法を普及させることも重要な課題である。

1.3 現在の製品衝撃強さ評価における問題点

製品衝撃強さ評価に関する試験方法は、JIS C 0041³⁹⁾、および、IEC 68-2-27⁴⁰⁾、JIS Z 0119⁴¹⁾、ASTM D 3332⁴²⁾に規定されており、Fig.1.3.1 に示す自由落下型衝撃試験機が一般に用いられている。製品（供試品）は衝撃台上に固定され、Fig.1.3.2 に示す衝撃パルスを生じさせることにより衝撃が加えられる。

JIS C 0041 と IEC 68-2-27 は、ほぼ同じ試験方法であり、ある規定の衝撃パルスを試料（製品）に加え、損傷の有無を調べるものである。この方法には、製品の衝撃強さを把握するための特別な理論が存在しないため、規定以外の衝撃パルスが製品に加えられたとき、製品損傷の有無を推定することができない。JIS C 0041 の評価方法を 1.3.1 で簡単に記述する。

一方、JIS Z 0119 と ASTM D 3332 も、ほぼ同じ試験方法であり、R. E. Newton によって考案された DBC が導入された評価法である²³⁾。具体的には、以下の二種類の衝撃試験、すなわち、製品の許容速度変化（ただし、速度変化とは、衝撃台の衝突速度と反発速度の絶対値の和を意味し、衝撃パルスの面積に相当する）を測定する試験と、許容加速度を測定する試験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が把握できるようになっている。しかし、R. E. Newton による DBC は、Fig.1.3.3 で示す 1 自由度のばね-質量系で

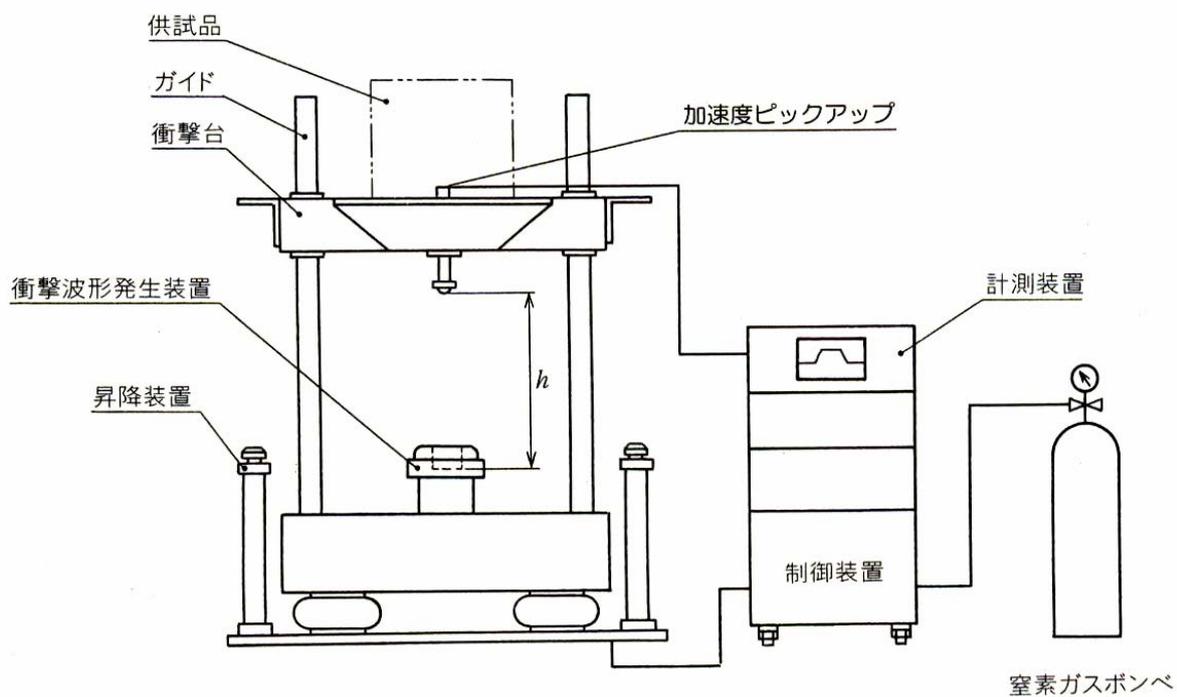


Fig.1.3.1 Example of mechanical-shock test machine. (An extract from JIS Z 0119-2002)

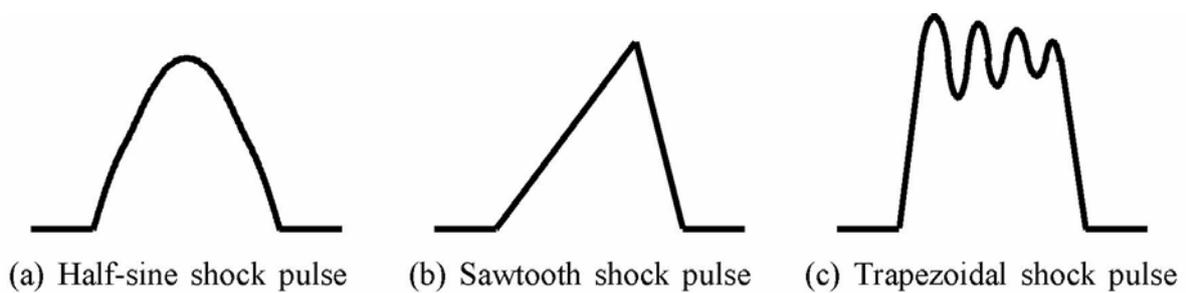


Fig.1.3.2 Typical shock pulses in the mechanical-shock tests

モデル化された製品の衝撃応答が用いられているため、複雑な衝撃応答となる製品については、この評価法では十分正確に衝撃強さを把握することはできない。JIS Z 0119 の評価方法を 1.3.2 で簡単に記述する。

1.3.1 環境試験方法 - 電気電子 - 衝撃試験方法 (JIS C 0041-1995)

一般に、製品規格に規定された衝撃の厳しさとで試験が行われるが、特に製品規格で衝撃の厳しさが規定されていない場合は、Table 1.3.1 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。

初期測定として、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、寸法および機能検査が行われる。次に、製品規格に特に規定がない場合、供試品の互いに直行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。

1.3.2 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法 (JIS Z 0119-2002)

本規格には、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 により考案された損傷境界理論²³⁾に基づいて作成されており、Fig.1.3.4 に示す二種類の試験、すなわち、許容速度変化試験（試験 No.1～6）および許容加速度試験（試験 No.7～12）から構成され、得られた許容加速度および許容速度変化から製品の DBC を決定する評価法である。

許容速度変化試験では、作用時間が 3ms 以下の正弦半波衝撃パルスが用いられ、いくら加速度が高くても製品が破損しない限界の速度変化、すなわち、許容速度変化が求められる。はじめに、製品が損傷しないと予想される程度の速度変化の衝撃パルスを加え、製品に損傷がなければ、同じ方法で、製品に損傷が認められるまで速度変化を増加する。損傷までの試験回数は、繰り返し衝撃による蓄積疲労の影響を避けるため多くとも 5～6 回とするのが望ましい。

許容加速度試験では、許容速度変化試験で求めた許容速度変化の 1.6 倍以上の台形波衝撃パルスが用いられる。ただし、許容速度変化が未定の場合は、衝撃パルスの速度変化を流通過程で製品が受ける速度変化の最大値とする。はじめに、

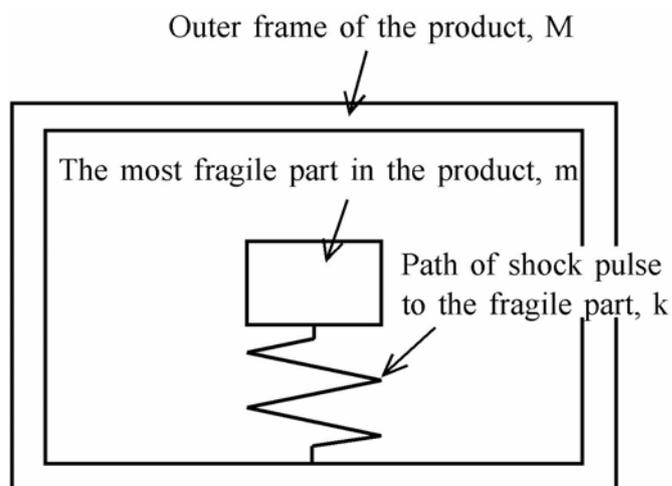


Fig.1.3.3 Expalanation of the product model based on single-degree-of-freedom system.

Table 1.3.1 Maximum acceleration, duration and velocity change of shock pulse.

(An extract from JIS C 0047-1995)

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 $\Delta V = 0.5 AD \times 10^{-3}$	台形波 $\Delta V = 0.9 AD \times 10^{-3}$
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	—	—

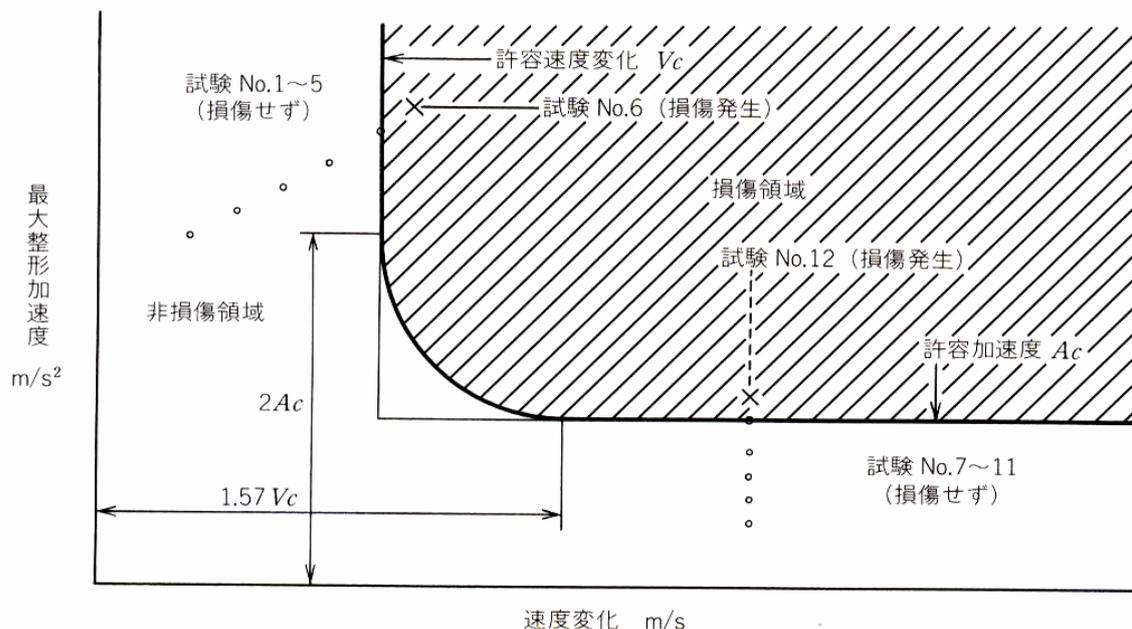


Fig. 1.3.4 The way of making a damage boundary curve.

(An extract from JIS Z 0119-2002)

製品が損傷しないと予想される程度の加速度の衝撃パルスを加え、製品に損傷がなければ、同じ方法で試験を行い、製品に損傷が認められるまで加速度を増加する。損傷までの試験回数は、繰り返し衝撃による蓄積疲労の影響を避けるため多くとも5～6回とするのが望ましい。

1.3.3 R. E. Newton による損傷境界理論

R. E. Newton によって構築され、JIS Z 0119 の理論的な基礎となっている損傷境界理論²³⁾について簡単に記述する。解析に用いられた製品の衝撃応答モデルを Fig.1.3.3 に示す。この製品モデルでは、製品内部の最弱部品が質量 m の物体で表され、最弱部品への衝撃の伝搬経路がばね定数 k のばねで表現されている。また、最弱部品にある一定値 (a_c) を越える加速度が伝搬すれば破損すると仮定されている。

このモデルを用いて、製品の方形波衝撃パルスに対する衝撃応答およびその最

大値が理論的に導出されており（第2章の2.2.2.2を参照）、加速度伝達率（衝撃応答の最大値を入力加速度の最大値で除した値）をプロットすることにより、製品の衝撃応答スペクトル（以下、SRSと略す）が得られる。さらに、得られたSRSと a_c から、DBC、すなわち、最弱部品が破損する衝撃パルスの領域と、破損しない衝撃パルスの領域の境界を示す曲線を導出することができる。導出されたDBCは、Fig.1.3.4に示すとおり直線部分を多く含んだ形状であり、許容速度変化と許容加速度の二値で近似することができる。そのため、JIS Z 0119では、製品衝撃強さは、許容速度変化と許容加速度の二値で表現されるように規定されている。

1.4 本研究の目的と方針

本研究は以上の観点から、製品衝撃強さ評価技術の向上を目的としたもので、特に、製品が出荷される前、すなわち、実験室での製品評価試験の段階で、製品衝撃強さが十分正確に把握できる評価法の確立に重点を置いている。

R. E. Newtonが衝撃応答解析に用いた製品モデルは、1自由度のばね-質量系であるが、当時に比べ飛躍的に数値解析が容易になった現在、現実の製品に近くより複雑な製品モデルについても容易に衝撃応答解析が可能である。そこで、R. E. Newtonの衝撃強さ評価法の妥当性を確認する目的で、数種類の製品モデルについて理論解析および数値解析を行い、製品衝撃強さ試験において問題となるいくつかの現象を見出す。さらに、見出された問題となる現象が現実存在することを、衝撃試験機を用いた実験により確認する。

製品衝撃試験規格であるJIS C 0041およびIEC 68-2-27では、実際に製品に加えた衝撃パルス以外、製品損傷の有無を推定することができない。そのため、たとえ試験に合格しても、製品破損の事故が発生すれば、その衝撃パルスには製品は耐えられないと判断され、製品の衝撃耐久性の向上を余儀なくされる。しかし、貨物輸送または製品使用時に発生する衝撃パルスを想定し、製品の耐衝撃性仕様として、製品が耐えうる衝撃の範囲（以下、保証範囲と呼ぶ）を規定しておけば、これが具体的な設計目標となるだけでなく、製品破損事故を予防する基準にもなる。以上の目的で、上記製品衝撃試験規格への「保証範囲」の概念の導入を検討する。また、製品衝撃強さ評価試験規格であるJIS Z 0119およびASTM D 3332では、R. E. Newtonによる衝撃強さ評価法が採用されており、先に見出された問題となる現象が発生すれば、その衝撃強さを正確に評価することができない。また、

これらの試験方法は二種類の破壊試験から構成されているため、最低でも2台の試料を破壊せねばならない。一般的に、企業にとって出荷前の試作品は貴重であり、本試験で試料を2台破壊するのは負担が大きい。以上の理由から、先に見出された現象に対して十分正確な評価ができ、かつ、破壊に至る試料の数が最低1台で済む新評価法（以下、DBC評価法と呼ぶ）の開発に取り組む。

一方、製品について衝撃強さ評価が詳細に行うことができても、市場に出荷される製品のばらつきをもった衝撃強さを把握することはできない。そこで、製品の破損確率を考慮した衝撃強さ評価が行われる必要がある。よって、DBC評価法に確率論を導入することにより、製品の破損確率に応じたDBCが導出できる新評価法（以下、確率DBC評価法と呼ぶ）の開発に取り組む。また、確率DBC評価法の実用性を確認する目的で、衝撃実験を行い、実製品の確率DBCを導出し、製品衝撃強さのばらつきの把握を試みる。

最後に、DBC評価法がより多くの企業で活用され、製品の衝撃破損削減に寄与する観点で検討を行う。企業が製品衝撃強さ評価を行う上で問題となるのは、評価精度のみとは限らない。破壊できる試料数の不足、あるいは、使用できる試験機や計測機器の制約、各製品への適合性などさまざまな問題が存在する。これらの評価現場における種々の要求に応じるため、DBC評価法の類型を数種類考案し、それらの中から、各評価現場・事例に最適な評価法が適切に選択できるよう、それら試験方法の特徴を分類し、体系的にまとめる。

1.5 本論文の構成

第1章においては、製品衝撃強さ評価法に関する研究の背景および目的、方針、概要について述べている。

第2章では、R. E. Newtonが製品衝撃強さ評価法を構築する際に製品モデルとして用いた1自由度のばね-質量系よりも少し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（以下、SRSと略称する）およびDBCを導出している。また、その解析結果から、R. E. Newtonの評価法で問題点となる3つの現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC交差現象」を見出している。さらに、これらの現象が現実に衝撃試験で発生することを確認するため、実製品の一例としてミニフロッピーディスクを用いた実験、および、段積み実験モデル（製品が段積みされた状態を表している）に

よる実験を行っている。

第3章では、JIS C 0041 および IEC 68-2-27 について検討し、製品が破損しない衝撃パルスの範囲、すなわち、保証範囲の概念の重要性を指摘するとともに、「保証範囲確認試験」を考案している。次に、JIS Z 0119 および ASTM D 3332 について検討し、第2章で見出した現象による評価精度の低下を指摘している。また、その対策として、許容加速度試験結果および製品内破損部品（部位）SRS データから製品 DBC が導出できる評価法（以下、DBC 評価法と呼ぶ）を考案している。さらに、市販の VCR（ビデオカセットレコーダーの略）について、本評価法に従った衝撃強さ評価試験を行い、本評価法の実用性について確認している。

第4章では、部品強度や衝撃伝達に起因する製品衝撃強さのばらつきが把握できる「確率 DBC 評価法」を考案するとともに、本評価法に従ったミニフロッピーディスクの衝撃強さ評価を行い、確率 DBC を導出している。さらに、その結果を分析し、市場において現実に発生する製品の破損クレームが、実験室で行われる製品衝撃強さ試験では発生しないという現象（以下、市場クレームの非再現性と呼ぶ）を発見し、その発生メカニズムを解明している。

第5章では、DBC 評価法の理論的厳密さを妥協する代わりに、その利便性を向上させた DBC 評価法の類型を考案している。それらは、作用時間の短い衝撃パルスに対する評価精度を向上させるため、許容加速度試験の代わりに許容速度変化試験を行う評価法、SRS の計測の代わりに振動試験により固有振動数を調べ、モデル SRS を導出する評価法、許容速度変化試験結果と許容加速度試験結果から破損部位（部品）の固有振動数を導出する評価法である。さらに、各評価法の特徴および必要な機器などを整理し、試験方法の体系化を図っている。

第6章では、本研究で得られた結論をまとめている。

なお、本論文は、以下の有審査論文で公表した研究成果をとりまとめたものである。

- ・ 中嶋，斎藤，久保，寺岸；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，日本包装学会誌一般論文，**8**, 3, (1999), 123-134.
- ・ 中嶋，斎藤，久保，寺岸；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，日本包装学会誌一般論文，**9**, 1, (2000), 33-46.
- ・ 中嶋，斎藤，寺岸；製品衝撃強さ試験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, (2002), 539-546.

- ・ 中嶋, 斎藤, 寺岸; 新しい製品衝撃強さ評価方法の提案, 日本機械学会論文集 (C編), **67**, 664, (2001), 3924-3929.
- ・ 中嶋, 斎藤, 寺岸; 損傷境界曲線評価法の実験的検証, 日本包装学会誌一般論文, **11**, 2, (2002), 115-124.
- ・ 中嶋, 斎藤, 寺岸; 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, No.105, (2001), 63-70.
- ・ 中嶋, 斎藤, 寺岸; 「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, 日本包装学会誌一般論文, **11**, 4, (2002), 217-229.

参考文献

- 1) 中嶋隆勝, 段積みされた製品の衝撃強さについての検討, 神戸商船大学大学院修士論文, (2000), 7-11.
- 2) Hopkinson, B., Proc. R. Soc. Lond., A, **74** (1905), 498-506.
- 3) たとえば、中川紀壽, ほか3名, 材料, **45**,10 (1996), 1145-1150.
- 4) たとえば、Itabshi, M., ほか2名, Structural Failure, Technical, Legal and Insurance Aspects, (1996), 151-175.
- 5) たとえば、小川欽也, 材料, **46**, 2 (1997), 118-123.
- 6) たとえば、宇治橋, 田中, 松本, 足立, 一方向 CFRP 積層板の動的破壊靱性値の評価, 日本機械学会論文集 A 編, **63**, 616 (1997), 2568-2574.
- 7) たとえば、武田, 万, 平松, Yuan, 改良 SHPB 法による GFRP の衝撃圧縮破損進展挙動のひずみ速度・温度依存性評価, 日本機械学会論文集 A 編, **63**, 616 (1997), 2598-2603.
- 8) たとえば、豊福, 衝突車両に対応した緩衝施設による交通安全対策に関する検討, 土木学会論文集, , No.637 (1999), 53-62.
- 9) たとえば、戸倉, 原田, 汎用パラメータ最適化プログラムによる乗員安全解析への最適化手法の応用, 日本機械学会 [No.99-7]Dynamics and Design Conference '99 講演論文集, (1999) D534.
- 10) たとえば、堤, 吉田, 宮島, 追突事故による頸部鞭打ち挙動に関する衝撃解析, 日本機械学会 (C編), **63**, 607 (1997), 791-796.
- 11) たとえば、辻尾, 瀬尾, マニピュレータの指先と環境との衝突運動-指先等価質量の衝突実験による評価-, 日本機械学会 [No.99-9]ロボティクス・メカトロニク

- ス講演会'99 講演論文集, (1999) 2A1-32-034.
- 12)たとえば、佐藤, 小川, 梶原, ピロティ崩壊実験の振動台加振波形への影響, 日本機械学会[No.00-6]Dynamics and Design Conference 2000 CD-ROM 論文集, (2000-9) 612.
 - 13)たとえば、藤田, 木村, 前田, 地盤を考慮した履帯構造を持つ移動体のマルチボディダイナミクス, 日本機械学会 [No.99-7]Dynamics and Design Conference '99 講演論文集, (1999-3) D416.
 - 14)谷村眞治, 材料・構造物の衝撃問題研究 (これまでの推移と今後の展望), 日本機械学会論文集 (A 編), **63**, 616, (1997), 2466-2471.
 - 15)たとえば、Aoki, S. (Aliabadi, M. H.編), Dynamic Fracture Mechanics, (1995), 203-236.
 - 16)たとえば、Nishioka, T., ほか 3 名, JSME Int. J., A, **37**, 1 (1994), 22-30.
 - 17)たとえば、Nishioka, T., Epstein, J. S., Dynamic Fracture Failure and Deformation, The American Society of Mechanical Engineers, (1995), 73-85.
 - 18)たとえば、中谷敬子ほか, 分子動力学法を用いた超高速衝突破壊現象の解明, 第 40 回構造強度に関する講演会講演集, (1998), 165-168.
 - 19)たとえば、Love, S.G., ほか 3 名, Int. J. Impact Eng., **18**, 3 (1995), 405-418.
 - 20)たとえば、Gadd, C.W., Use of Weighted Impulse Criterion for Estimating Injury Hazard, SAE Paper No. 660793, Proceedings of the Tenth Stapp Car Crash Conference, New York, Society of Automotive Engineers, 1966.
 - 21)たとえば、菊池, 小野, 小林, 中村, 人間の頭部衝撃耐性に関する研究, 自動車技術会論文集, No.21 (1980), 150-157.
 - 22)たとえば、西本, 村上, 意識障害と脳の衝撃応力集中との関係, 日本機械学会論文集 (C 編), **63**, 607 (1997), 715-722.
 - 23)Newton, R. E., Fragility Assessment –Theory and Test Procedure-, (1968), U.S. Naval Post Graduate School. Now available from Lansmont Corporation, 17 Mandecille Ce., Monterey, CA 93940, www.lansmont.com.
 - 24)Burgess, G. J., Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging Technology and Science, Vol.1 (1988), 5-10.
 - 25)Donald E.Baumdraher Jr., Shock Fragility Testing of Fatigue-Sensitive Products, Masteral's Thesis, Michigan State University School of Packaging, (1995).

- 26) Mathew Paul Saum, Shock Response Spectrum on Fatigue Damage: A New Approach to Product Fragility Testing, Doctoral Thesis, Michigan State University School of Packaging, (1999).
- 27) William I. Kipp, Developments in Testing Products for Distribution, Packaging Technology and Science, Vol.13 (2000), 89-98.
- 28) 前沢, 門脇, 衝撃試験機を使用した包装落下試験法, 包装研究, **12**, 1 (1991), 29-34.
- 29) Fanfu Li, Diana Twede, James W. Goff, Method for Deriving the Correlation Between Free Fall and Shock Machine Drop Height, Packaging Technology and Science, Vol.6 (1993), 139-146.
- 30) J. Y. Sun, H. A. Newlyn, J. A. G. Knight, Simulation of the Impact Behaviours of a Packet with Discrete Contents, Packaging No.2 (1994), 16-18.
- 31) Zhi-Wei Wang, Chan-Ying Hu, Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Non-linear Package Cushioning Systems, Packaging Technology and Science, **12** (1999), 207-217.
- 32) 前沢, 山崎, 岸田, 家電包装の非線形落下衝撃解析 (有限要素法活用), 第 39 回全日本包装技術研究大会-研究事例発表資料-, 札幌, (2001-11), 155-158.
- 33) Xiang Hong, Tang Bosen, An Approximate Solution of Nonlinear Problem of Packaging Drop Shocks, Proc. 13th IAPRI World Conf. Packaging, Michigan, (2002), 585-591.
- 34) D. V. Caletka, R. N. Caldwell, J. T. Vogelmann, Damage Boundary Curves: A Computational (FEM) Approach, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol.112 (1990-9), 198-203.
- 35) J. Woodhouse, An Introduction to Statistical Energy Analysis of Structural Vibration, Applied Acoustics, Vol.14 (1981), 455-469.
- 36) Song Baofeng, To Predetermine Product Shock Fragility by Statistical Energy Analysis (SEA), Proc. 13th IAPRI World Conf. Packaging, Michigan, (2002), 569-574
- 37) W. W. Teper, R. G. Sauve, Simplified Method for Predicting Impact Loads of Solid-Walled Transportation Packagings for Radioactive Materials, ASME Journal of Pressure Vessel technology, Vol.111 (1989), 316-321.

- 38)N. Butler, Impact Strength of Containers for Carrying Radioactive Materials, The Nuclear Engineer, **33**, 5, 138-145.
- 39)JIS C 0041-1995, 環境試験方法—電気電子—衝撃試験方法.
- 40)IEC 68-2-27, Basic environmental testing procedures Part2: Tests-Test Ea and guidance-Shock.
- 41)JIS Z 0119-1994, 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法.
- 42)ASTM D 3332-93, Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines.

第2章 製品衝撃強さ評価において問題となる現象

2.1 緒言

製品衝撃強さ評価に関する試験方法は、JIS C 0041¹⁾、および、IEC 68-2-27²⁾、JIS Z 0119³⁾、ASTM D 3332⁴⁾に規定されている。JIS C 0041 と IEC 68-2-27 は、ほぼ同じ試験方法であり、ある規定の衝撃パルスを試料（製品）に加え、損傷の有無を調べるものである。この方法には、製品の衝撃強さを把握するための特別な理論が存在しないため、規定以外の衝撃パルスが製品に加えられたとき、製品損傷の有無を推定することができない。一方、JIS Z 0119 と ASTM D 3332 は、互いにほぼ同じ試験方法であり、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）が導入された評価法である⁵⁾。具体的には、以下の二種類の衝撃試験、すなわち、製品の許容速度変化を測定する試験と許容加速度を測定する試験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が把握できるようになっている。

1980年代の後半、G. J. Burgess が、剛一塑性モデルにより、繰り返し衝撃が DBC へ及ぼすの影響を解析的に検討した⁶⁾。しかし、その他、製品衝撃強さ評価方法における問題点についての解析的研究はほとんど行われていない。

本章では、R. E. Newton の衝撃強さ評価法の妥当性を確認する目的で、R. E. Newton が衝撃応答解析に用いた製品モデル（1自由度のばね質量系）よりも多少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（以下、SRS と略称する）および DBC を導出する。そして、その結果、R. E. Newton の評価法で問題点となる3つの現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」を見出した。さらに、これらの現象が現実に衝撃試験で発生することを確認するため、実製品の一例としてミニフロッピーディスクを用いた実験、および、段積み実験モデル（製品が段積みされた状態を表している）による実験を行う。

2.2 解析による問題点の発見

2.2.1 製品モデルおよび衝撃パルス

Fig.2.2.1 の Model-O は現在、JIS、ASTM の製品衝撃強さ試験方法の理論的な基礎となっているモデルであり、製品内部の最弱部品が弾性支持されている状態を

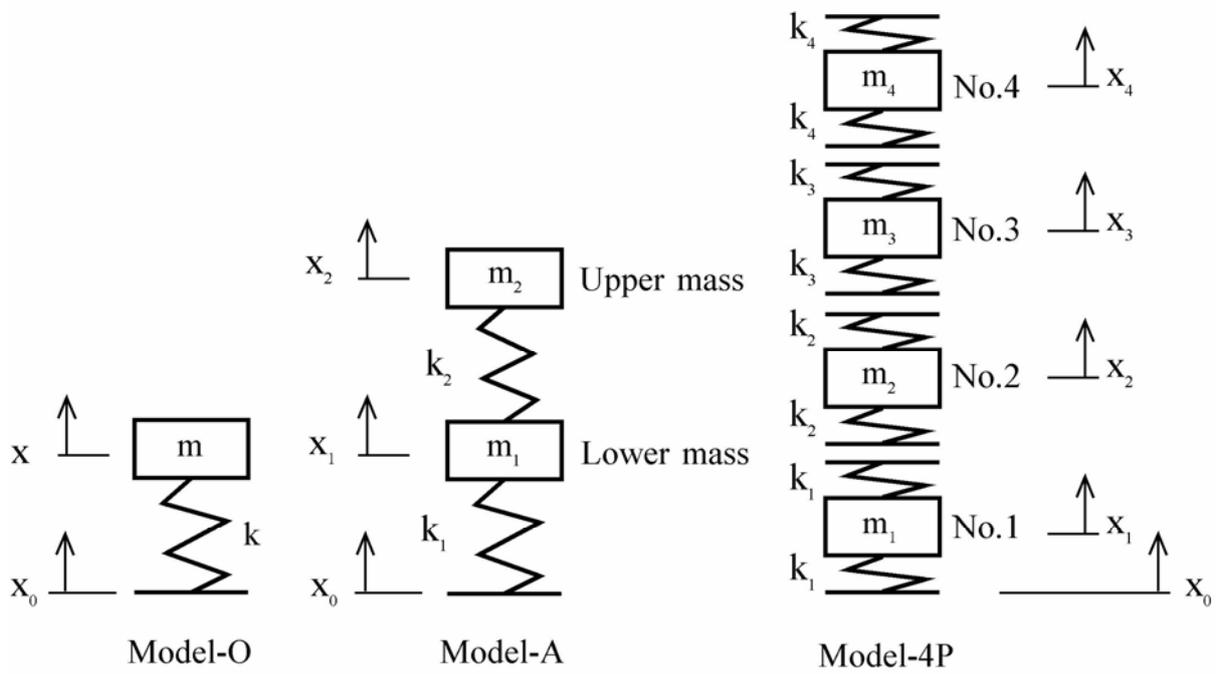
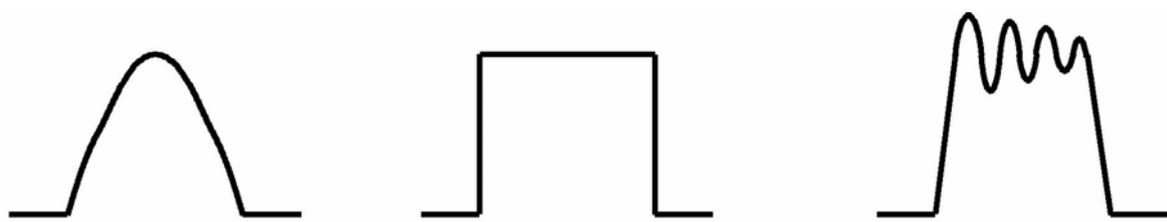


Fig.2.2.1 Mathematical Models for Products.



(a) Half-sine shock pulse (b) Rectangular shock pulse (c) Trapezoidal shock pulse

Fig. 2.2.2 Three kinds of shock pulse.

表している。残りのモデルは、新たに試みた解析モデルである。Model-A は2自由度ばね質量系であり、これにより、製品が段積みされた状態で集合包装されている場合の衝撃強さ（ただし、製品が衝撃により飛び跳ねたりする現象は表現することができない。このような場合は、Model-4Pにより解析することができる）、弾性支持されているユニット内の弾性支持されている部品への衝撃の伝達、段ボール包装貨物の積み重ね落下などについて考察することができる⁷⁾。これらのモデル（Model-O, Model-A）は線形モデルである。

一方、Model-4P は、非線形モデルであり、それぞれの質量部の上下にばねが取り付けられおり、その一つ一つが製品（または包装貨物）を表している。これらの製品が互いに接触しているとき圧縮力が発生するが、離れているとき引っ張り力は発生しない。これらのモデルにより、製品（または包装貨物）が段積みされている状態で衝撃を受けたときの挙動（製品の飛びはね現象を含む）を解析することができる。Model-4P は4段積みを表している⁷⁾。

Fig.2.2.2 に製品モデルに入力する衝撃パルスの形状を示す。Fig.2.2.2(a)は正弦半波衝撃パルスで、これまでの衝撃試験でよく用いられてきたものでゴムパッドに衝撃テーブルを衝突させることによって発生される波形であり、発泡プラスチック製緩衝材により包装された貨物が落下衝撃を受けたときこれに似た衝撃パルスが発生する。Fig.2.2.2(b)は方形波衝撃パルスである。1自由度ばね質量系にこの衝撃パルスを入力すると $T_0 \times f_c \geq 0.5$ （ただし、 T_0 は衝撃パルスの作用時間で、 f_c は系の固有振動数である。）の範囲で加速度伝達率（ただし、加速度伝達率は、最大応答加速度を入力衝撃パルスの最大加速度で除した値とする）が2となることが R.E.Newton の研究⁵⁾により、すでに明らかとなっている。一方、入力パルスが正弦半波やのこぎり波では加速度伝達率は一定とならず、入力する衝撃パルスの作用時間によって衝撃の伝達が異なり製品強度を正確に把握することができない。このため JIS Z 0119 および ASTM D 3332 では許容加速度を求めるのに台形波が用いられるように規定されている。この台形波は現実の衝撃試験で発生できる方形波に最も類似した波形であり、加速度伝達率もほぼ一定に保たれている⁵⁾。

2.2.2 理論解析および数値解析方法

(1) 従来型モデル（Model-O）の理論解析

Model-O の力の釣り合いを表した微分方程式（運動方程式）は、次のようにな

る⁷⁾。

$$m \ddot{x} + k(x - x_0) = 0 \quad (2.2.1)$$

ただし、 $\omega^2 = k/m$ とおくと次のようになる。

$$\ddot{x} + \omega^2(x - x_0) = 0 \quad (2.2.2)$$

また、 $y = x_0 - x$ とおき x を消去すると次のようになる。

$$\ddot{y} + \omega^2 y = \ddot{x}_0 \quad (2.2.3)$$

式(2.2.3)をラプラス変換⁸⁾し、 \tilde{y} を表す式に変形し、たたみ込み積分の形に逆ラプラス変換⁸⁾すると次のようになる。ただし、初期条件は、 $y(0)=0$ 、 $\dot{y}(0)=0$ とする。

$$y(t) = \frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{x}_0(\tau) \sin(\omega(t-\tau)) d\tau \quad (2.2.4)$$

また、式(2.2.2)より、 $\ddot{x} = \omega^2 y$ である。
よって、質量部に発生する加速度は次式で表される。

$$\ddot{x}(t) = \omega \int_0^t \ddot{x}_0(\tau) \sin(\omega(t-\tau)) d\tau \quad (2.2.5)$$

ただし、 \ddot{x}_0 は衝撃台に発生する加速度（衝撃パルス）である。

これにより、入力する衝撃パルスの関数がわかれば、式(2.2.5)の積分を計算することにより衝撃応答を求めることができる⁷⁾。

a Model-O の方形波衝撃パルス応答

作用時間 T_0 、加速度 A_0 の方形波衝撃パルスは次式で表される。

$$t \leq T_0 \text{ の時 } \ddot{x}_0(t) = A_0 \quad (2.2.6 \text{ a})$$

$$t > T_0 \text{ の時 } \ddot{x}_0(t) = 0 \quad (2.2.6 \text{ b})$$

これらを式(2.2.5)に代入して積分を計算すると、次のように質量部に発生する加速度がわかる。

$$t \leq T_0 \text{ の時 } \ddot{x}(t) = 2A_0 \sin^2(\omega t/2) \quad (2.2.7 \text{ a})$$

$$t > T_0 \text{ の時 } \ddot{x}(t) = 2A_0 \sin(\omega T_0/2) \sin(\omega(t-T_0)/2) \quad (2.2.7 \text{ b})$$

b Model-O の正弦半波衝撃パルス応答

作用時間 T_0 、加速度 A_0 の正弦半波衝撃パルスは次式で表される。

$$t \leq T_0 \text{ の時 } \ddot{x}_0(t) = A_0 \sin(\pi t/T_0) \quad (2.2.8 \text{ a})$$

$$t > T_0 \text{ の時 } \ddot{x}_0(t) = 0 \quad (2.2.8 \text{ b})$$

これらを式(2.2.5)に代入して積分（三角関数の加法定理を用いて被積分関数を三角関数の和の形に変換）すると、次のように質量部に発生する加速度がわかる。

$$t \leq T_0 \text{ の時 } \ddot{x}(t) = \left\{ \frac{\sin(at)}{(\omega^2 - a^2)a} + \frac{\sin(\omega t)}{(a^2 - \omega^2)\omega} \right\} \times A_0 \omega^2 a \quad (2.2.9 \text{ a})$$

$$t > T_0 \text{ の時 } \ddot{x}(t) = \left\{ \sin(\omega t) + \sin(\omega(t-T_0)) \right\} A_0 \omega a / (a^2 - \omega^2) \quad (2.2.9 \text{ b})$$

ただし、 $a = \pi/T_0$ とする。

(2) 線形モデル (Model-A) の理論解析

力の釣り合いを表した微分方程式（運動方程式）を作成し、それをラプラス変換することによって、Model-A の衝撃応答を導出した。具体的な手順は次のとおりである。

運動方程式は次のようになる。

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (2.2.10)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_2 (x_1 - x_2) + k_1 (x_1 - x_0) = 0 \quad (2.2.11)$$

ラプラス変換して整理すると次のようになる。ただし、初期条件は、 $x_1(0) = 0$, $\dot{x}_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $\dot{x}_2(0) = 0$ とする。

$$\tilde{x}_1 = \frac{\omega_{11}^2 (s^2 + \omega_{22}^2)}{s^4 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) s^2 + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2} \tilde{x}_0 \quad (2.2.12)$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{\omega_{11}^2 \omega_{22}^2}{s^4 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) s^2 + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2} \tilde{x}_0 \quad (2.2.13)$$

ただし、 $\omega_{11}^2 = k_1/m_1$ 、 $\omega_{12}^2 = k_2/m_1$ 、 $\omega_{22}^2 = k_2/m_2$ とする。

\tilde{x}_0 は、衝撃台の運動を表した変数であり、衝撃パルスを表した関数から導き出すことができる。よって、衝撃パルスが決まれば、式(2.2.12)および式(2.2.13)から、下段の質量部 (m_1) および上段の質量部 (m_2) の衝撃応答を導き出すことができる。

a Model-A の方形波衝撃パルス応答

方形波衝撃パルスは、次式は表される。

$$\ddot{x}_0 = A_0 (U(t) - U(t - T_0)) \quad (2.2.14)$$

ただし、 $U(t)$ はステップ関数とする。

式(2.2.8)をラプラス変換して、衝撃台の初期座標および初期速度をともに 0 とすると、 \tilde{x}_0 は次式で表される。

$$\tilde{x}_0 = A_0 (1 - \exp(-T_0 s)) / s^3 \quad (2.2.15)$$

式(2.2.15)を式(2.2.12)および式(2.2.13)に代入すると次式になる。

$$\tilde{x}_1 = \frac{\omega_{11}^2 (s^2 + \omega_{22}^2)}{s^4 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) s^2 + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2} \times \frac{A_0 (1 - \exp(-T_0 s))}{s^3} \quad (2.2.16)$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{\omega_{11}^2 \omega_{22}^2}{s^4 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) s^2 + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2} \times \frac{A_0 (1 - \exp(-T_0 s))}{s^3} \quad (2.2.17)$$

これらについて第 2 遷移定理を用いた高位の極を有する場合の逆ラプラス変換⁸⁾を行うと次のようになる。

$$x_1(t) = A_0 \omega_{11}^2 \{g_1(t)U(t) - g_1(t - T_0)U(t - T_0)\} \quad (2.2.18)$$

$$g_1(t) = \frac{\omega_{22}^2 - \alpha^2}{\alpha^4(\beta^2 - \alpha^2)} \cos(\alpha t) + \frac{\omega_{22}^2 - \beta^2}{\beta^4(\alpha^2 - \beta^2)} \cos(\beta t) + \frac{\omega_{22}^2}{2\alpha^2\beta^2} t^2 + \frac{\alpha^2\beta^2 - \omega_{22}^2(\alpha^2 + \beta^2)}{\alpha^4\beta^4} \quad (2.2.19)$$

$$x_2(t) = A_0 \omega_{11}^2 \omega_{22}^2 \{g_2(t)U(t) - g_2(t - T_0)U(t - T_0)\} \quad (2.2.20)$$

$$g_2(t) = \frac{\cos(\alpha t)}{\alpha^4(\beta^2 - \alpha^2)} + \frac{\cos(\beta t)}{\beta^4(\alpha^2 - \beta^2)} + \frac{t^2}{2\alpha^2\beta^2} - \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\alpha^4\beta^4} \quad (2.2.21)$$

ただし、 α 、 β は次のとおりである。

$$\alpha, \beta = \sqrt{\frac{(\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) \pm \sqrt{(\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2)^2 - 4\omega_{11}^2\omega_{22}^2}}{2}} \quad (2.2.22)$$

荷重 f_1 および荷重 f_2 は次式より求めることができる。

$$f_1 = k_1(x_0(t) - x_1(t)) \quad (2.2.23)$$

$$f_2 = k_2(x_1(t) - x_2(t)) \quad (2.2.24)$$

また、各質量部に発生する加速度 $\ddot{x}_1(t)$ 、 $\ddot{x}_2(t)$ は、式(2.2.18)および式(2.2.20)により求められた $x_1(t)$ および $x_2(t)$ を 2 階微分することによって求めることができる。

b Model-A の正弦半波衝撃パルス応答

正弦半波衝撃パルスは、次式は表される。

$$\ddot{x}_0 = A_0 \{ \sin(\pi t / T_0) U(t) + \sin(\pi(t - T_0) / T_0) U(t - T_0) \} \quad (2.2.25)$$

ただし、 $U(t)$ はステップ関数とする。

式(2.2.25)をラプラス変換して、衝撃台の初期座標および初期速度をともに 0 とすると、 \tilde{x}_0 は次式で表される。

$$\tilde{x}_0 = \frac{A_0 a(1 + \exp(-T_0 s))}{s^2(s^2 + a)} \quad (2.2.26)$$

ただし、 $a = \pi / T_0$ とする。

式(2.2.26)を式(2.2.12)および式(2.2.13)に代入すると次式になる。

$$\tilde{x}_1 = \frac{\omega_{11}^2 (s^2 + \omega_{22}^2)}{s^4 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) s^2 + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2} \times \frac{A_0 a (1 + \exp(-T_0 s))}{s^2 (s^2 + a^2)} \quad (2.2.27)$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{\omega_{11}^2 \omega_{22}^2}{s^4 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) s^2 + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2} \times \frac{A_0 a (1 + \exp(-T_0 s))}{s^2 (s^2 + a^2)} \quad (2.2.28)$$

これらについて第2遷移定理を用いた高位の極を有する場合の逆ラプラス変換を行うと次のようになる。

$$x_1(t) = A_0 \omega_{11}^2 \{g_1(t)U(t) + g_1(t-T_0)U(t-T_0)\} \quad (2.2.29)$$

$$g_1(t) = \frac{\omega_{22}^2 - \alpha^2}{\alpha^3 (\alpha^2 - \beta^2) (a^2 - \alpha^2)} \sin(\alpha t) + \frac{\omega_{22}^2 - \beta^2}{\beta^3 (\beta^2 - \alpha^2) (a^2 - \beta^2)} \sin(\beta t) \quad (2.2.30)$$

$$x_2(t) = A_0 \omega_{11}^2 \{g_2(t)U(t) + g_2(t-T_0)U(t-T_0)\} \quad (2.2.31)$$

$$g_2(t) = \frac{\sin(\alpha t)}{\alpha^3 (\alpha^2 - \beta^2) (a^2 - \alpha^2)} + \frac{\sin(\beta t)}{\beta^3 (\beta^2 - \alpha^2) (a^2 - \beta^2)} + \frac{\sin(at)}{a^3 (a^2 - \alpha^2) (\beta^2 - a^2)} + \frac{t}{\alpha^2 \beta^2 a^2} \\ + \frac{(\omega_{22}^2 - a^2) \sin(at)}{a^3 (a^2 - \alpha^2) (\beta^2 - a^2)} + \frac{\omega_{22}^2 t}{\alpha^2 \beta^2 a^2} \quad (2.2.32)$$

ただし、 α 、 β は次のとおりである。

$$\alpha, \beta = \sqrt{\frac{(\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2) \pm \sqrt{(\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2)^2 - 4\omega_{11}^2 \omega_{22}^2}}{2}} \quad (2.2.33)$$

また、式(2.2.29)および式(2.2.31)において、ステップ関数 $U(t)$ が用いられており、 $U(t)$ は2回微分不可能であるが、 $g_1(t)$ 、 $g_1(t-T_0)$ 、 $g_2(t)$ 、 $g_2(t-T_0)$ が乗じられているため、 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ については2回微分可能である。

荷重 f_1 および荷重 f_2 は次式より求めることができる。

$$f_1 = k_1 (x_0(t) - x_1(t)) \quad (2.2.34)$$

$$f_2 = k_2 (x_1(t) - x_2(t)) \quad (2.2.35)$$

また、各質量部に発生する加速度 $\ddot{x}_1(t)$, $\ddot{x}_2(t)$ は、式(2.2.29)および式(2.2.31)より得られる $x_1(t)$ および $x_2(t)$ を 2 回微分することによって求めることができる。

(3) 非線形モデル (Model-4P) の数値解析方法

Model-4P は非線形モデルであるため、理論解析を行うことが困難であり、数値解析により衝撃応答をシミュレーションする。

まず、初期条件として、各質量部の初期速度を 0 とし、初期位置を決める。次に、微小時間間隔 (時間ステップ) 経過後の衝撃応答を逐次計算することにより、これらの衝撃応答を求める。計算手順を以下に示す。

- ① 互いに接触しあう製品間に働く荷重および製品と衝撃台間に働く荷重の合力を求め、ニュートンの運動方程式から各製品に働く加速度を計算し、各製品に働く重力加速度を加えることにより、製品が運動する加速度を算出する。
- ② 各製品の加速度および衝撃台に発生する衝撃パルス (加速度) を積分することにより、次の時間ステップでの各速度増分を算出する。
- ③ 現在の速度に速度増分を加え、次の時間ステップでの各製品の速度とする。
- ④ 各製品の速度および衝撃台の速度を積分することにより、次の時間ステップでの各変位増分を算出する。
- ⑤ 現在の変位に変位増分を加え、次の時間ステップでの各製品の変位とする。
- ⑥ 各製品間または製品衝撃台間に重なりが発生した場合、そこに荷重が発生しているとみなし、ばね定数を用いて発生している荷重を計算する。
- ⑦ 時間ステップを 1 つ更新した後、①へ戻り、同様の手順で、次の時間ステップで各製品に働く荷重、加速度 (衝撃応答) を計算する。

以上に示すとおり、ここでは、少ない計算回数で解析精度を上げるための特別な手法 (たとえば、Newmark の β 法、かえる跳び法など) は用いておらず、時間ステップ間に運動する各製品の加速度は一定であると仮定して計算している。また、計算精度の確認および時間ステップ間隔の決定は、次の方法で行っている。

1 つの製品をある高さから固定された剛体に向けて自由落下 (数値計算) させ、衝突後、跳ね返ってくる最大高さを求める。その時の、跳ね返ってくる最大高さと落下高さとの誤差が十分に小さければ、計算精度が十分であるとみなす。高さ 10cm からの落下実験 (数値計算) の結果、時間ステップ間隔を $10 \mu s$ で誤差が

0.1%未満となったが、十分精度に余裕を持たせるため、本数値計算では、時間ステップ間隔を $1\mu\text{s}$ とする。ちなみに、時間ステップ間隔を $100\mu\text{s}$ とすると誤差が 1%以上となった。

(4) SRS および DBC の導出方法

2.2.2 (1)~2.2.2 (3)では、Model-O, Model-A および Model-4P に衝撃パルスが入力した場合の衝撃応答を導出した。ここでは、導出した衝撃応答を用いて、SRS および DBC の導出方法について記す。一般的に、SRS の横軸には、衝撃パルスの作用時間にモデルの固有振動数 f_c を掛けた無次元化パラメータが用いられる。また、縦軸には、伝達係数を用いる。ただし、伝達係数は、最大衝撃応答を入力衝撃パルスの最大加速度で除した値とし、特に、衝撃応答が加速度のときの伝達係数を加速度伝達率と呼ぶことにする。ここで、固有振動数は次式により算出する。

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m} \quad (\text{Model - O}) \quad (2.2.36)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k_i/m_i} \quad (i = 1,2 \quad \text{Model - A}) \quad (2.2.37)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k_i/(2m_i)} \quad (i = 1,2,3,4 \quad \text{Model - 4P}) \quad (2.2.38)$$

したがって、加速度伝達率に関する SRS は次式により得られる。

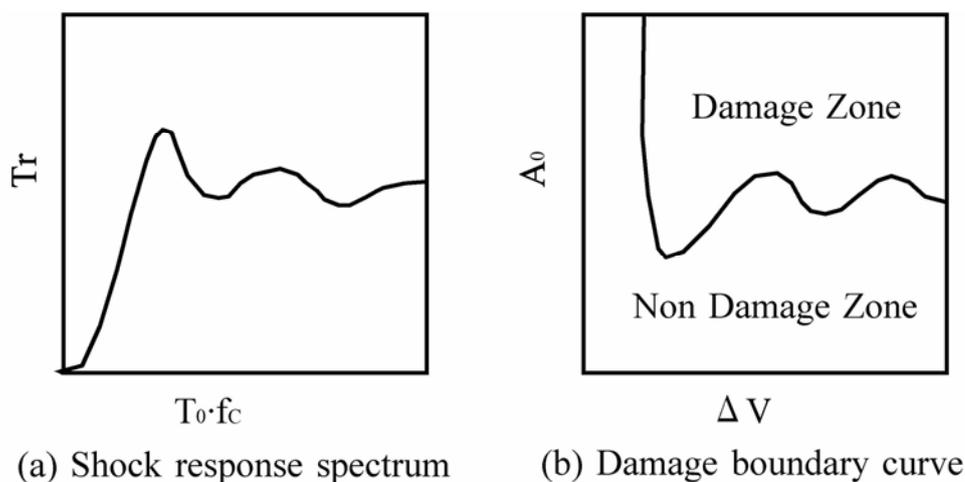


Fig.2.2.3 Illustration of SRS and DBC.

$$\text{Tr} (T_0 \cdot f_c) = \ddot{x}_{\max} / A_0 \quad (2.2.39)$$

ただし、 $\text{Tr}()$ は、加速度伝達率を表し、 \ddot{x}_{\max} は各質量部に伝搬する加速度の最大値を表す。本式により導出される SRS の模式図を Fig.2.2.3(a)に示す。

DBC を作成する際、各質量部（製品）に伝搬する加速度が a_c 以上になると、その質量部が破損するものと仮定する。したがって、製品が破損しないためには、次式を満足する必要がある。

$$\ddot{x}_{\max} < a_c \quad (2.2.40)$$

式(2.2.39)を式(2.2.40)に代入することにより、製品が破損しないための入力衝撃パルスが満足すべき条件が導出される。

$$A_0 < a_c / \text{Tr} (T_0 \cdot f_c) \quad (2.2.41)$$

このときの衝撃パルスの速度変化 ΔV は次式で算出される。

$$\Delta V = A_0 T_0 \kappa \quad (2.2.42)$$

ただし、 κ は、衝撃パルス波形が方形波、または、台形波の場合、それぞれ、 $\kappa = 1.0$ 、 $\kappa = 1.0$ であり、正弦半波の場合、 $\kappa = 2 / \pi$ である。

DBC の縦軸は、衝撃パルスの最大整形加速度とし、横軸をその速度変化として、製品が破損する衝撃パルス領域と、破損しない衝撃パルス領域の境界を表した曲線である。したがって、式(2.2.41)および式(2.2.42)より、Fig.2.2.3(b)に示すような DBC を導出することができる。

2.2.3 解析結果

Model-O をはじめとし、ここで扱うすべてのモデル (Model-A,4P) を構成するばねおよび質量部の定数は、スチール缶 (340g 入り) を参考にして次のように設定した。

$$m = m_i = 390 \text{ (g)} \quad i = 1,2,3,4$$

$$k = k_i = 423 \text{ (N/mm)} \quad i = 1,2 \quad (\text{Model-O,A})$$

$$k_i = 846 \text{ (N/mm)} \quad i = 1,2,3,4 \quad (\text{Model-4P})$$

形状は円柱形とし、直径 66mm、長さ 98mm である。(Model-4P)

これらの値は、測定結果をまとめたものであり、特にばね定数はスチール缶の

扁平圧縮試験により得られた荷重－変位曲線から算出したものである。

以上、計算に必要な定数がすべてそろったので、2.2.2 で記述した手順に従って、各モデルの衝撃応答を計算し、SRS および DBC を描く。解析対象として、加速度応答、衝撃荷重、ひずみなどが考えられるが、ここでは、各質量部に伝搬する加速度を解析対象とし、各質量部の a_c を 980m/s^2 と設定する。

(1) 線形モデル (Model-A) の方形波衝撃パルス応答

Model-A および Model-O の方形波衝撃パルスに対する加速度応答を Fig.2.2.4 に示す。図より、Model-O の応答は、方形波（入力波形）上に質量部の自由振動が加わった規則正しい波形となっており、衝撃パルス作用中に現れる応答波の複数のピーク値がすべて同じ値となっている。また、衝撃パルス作用後に現れる応答波についても同様のことがいえる。一方、Model-A は2つの質量部が互いに影響しあい複雑な衝撃応答となる。そのため、衝撃パルス作用中に現れる複数のピーク値が異なった値となっている。

Model-A および Model-O の方形波衝撃パルスに対する SRS を Fig.2.2.5 に示す。図より、加速度伝達率の最大値は Model-O および Model-A（下段質量部）がとも

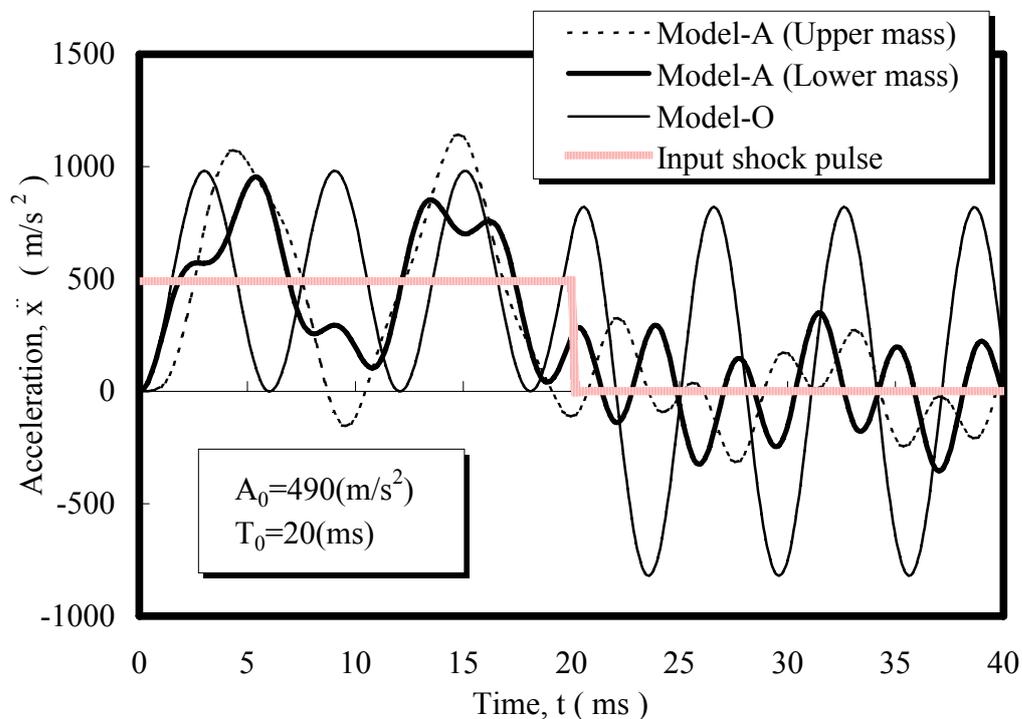


Fig.2.2.4 Shock response of Model-A and Model-O by rectangular shock pulse.

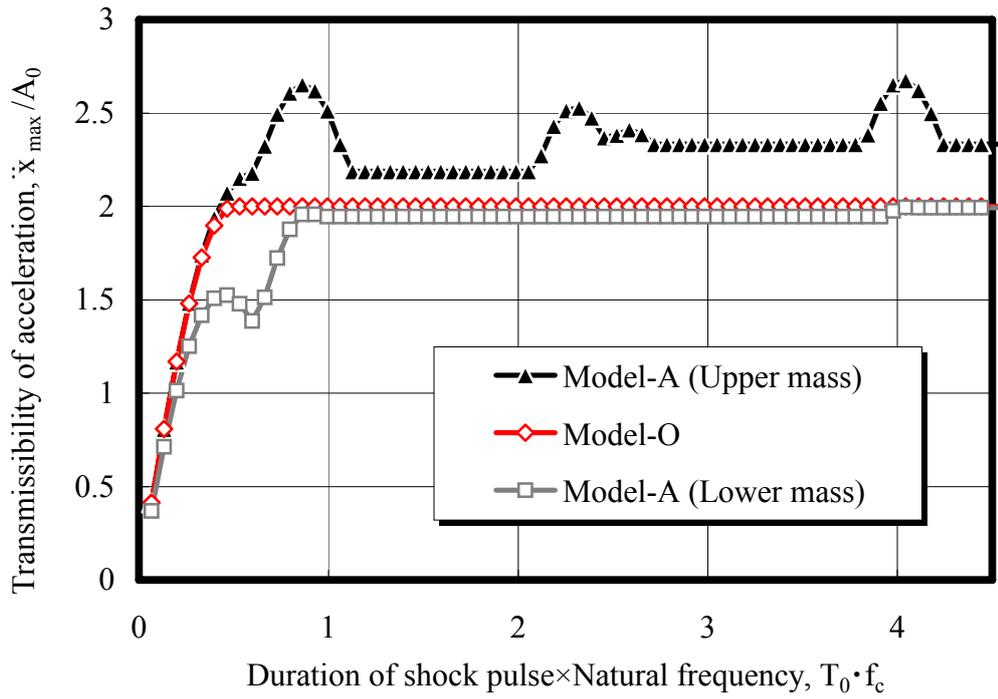


Fig.2.2.5 Shock spectrum of Model-A and Model-O by rectangular shock pulse.

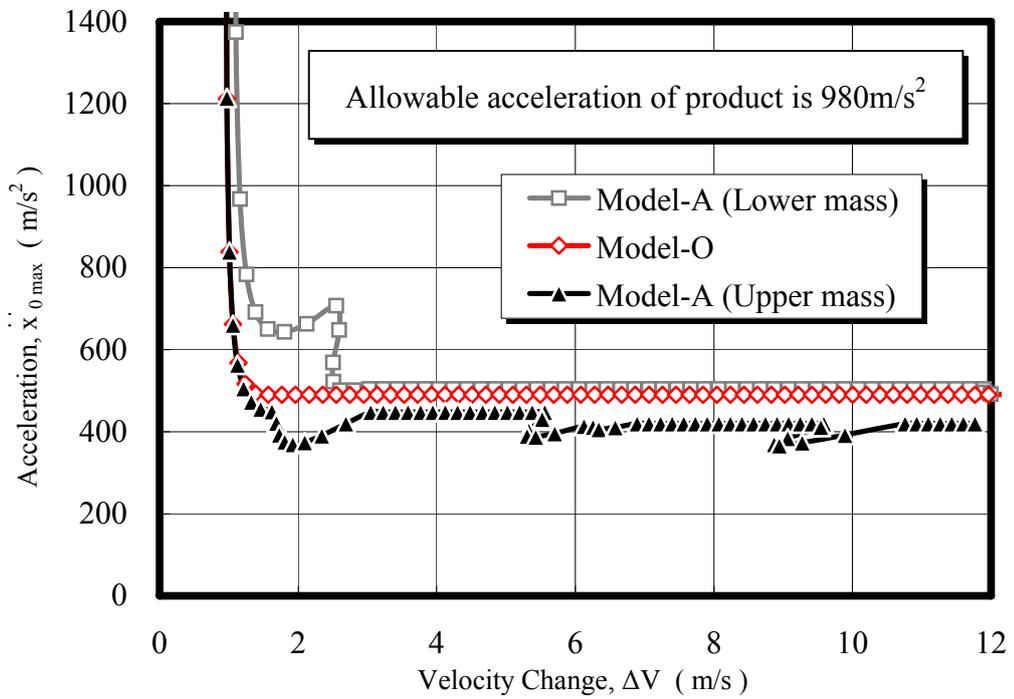


Fig.2.2.6 Damage boundary curve of Model-A and O by rectangular shock pulse.

に2であるのに対して、Model-A（上段質量部）は2.67とModel-Oより大きな値となる。このことは、衝撃実験（2.3で詳しく記載）で2以上の加速度伝達率が測定された結果の理論的な裏付けとなる。

Model-AおよびModel-Oの方形波衝撃パルスに対するDBCをFig.2.2.6に示す。図より、衝撃パルスの速度変化の値にかかわらず、Model-A（上段質量部）はModel-Oよりも低い加速度で破損する。一方、Model-A（下段質量部）の許容加速度はModel-Oと同程度である。Model-A（上段質量部）のDBCに突起のように変化する部分がある。これに関しては2.2.4で考察する。

(2) 線形モデル（Model-A）の正弦半波衝撃パルス応答

Model-AおよびModel-Oの正弦半波衝撃パルスに対する加速度応答をFig.2.2.7に示す。図より、Model-Oと同様、Model-A（下段質量部）の応答も正弦半波（入力波形）上に質量部の自由振動が加わった波形となっており、ピーク値が衝撃パルスの作用時間に大きく依存している。一方、Model-A（上段質量部）は下段質量部およびばねを介して衝撃が伝搬されるため、上段質量部の応答波の形状は、

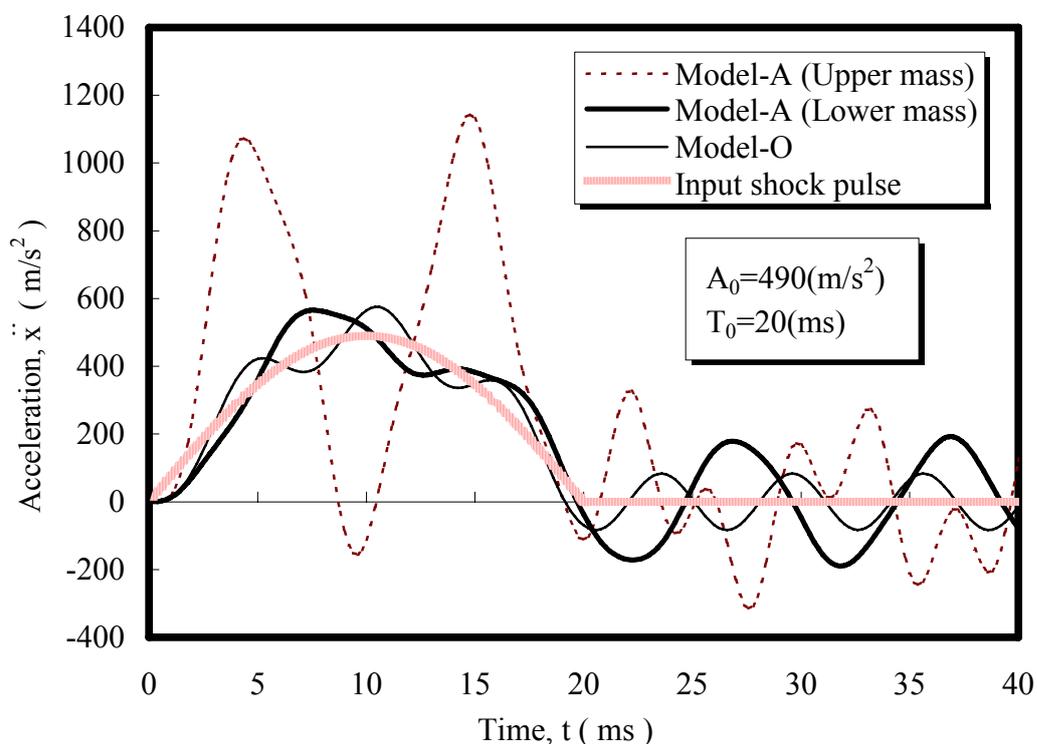


Fig.2.2.7 Shock response of Model-A and O by half-sine shock pulse.

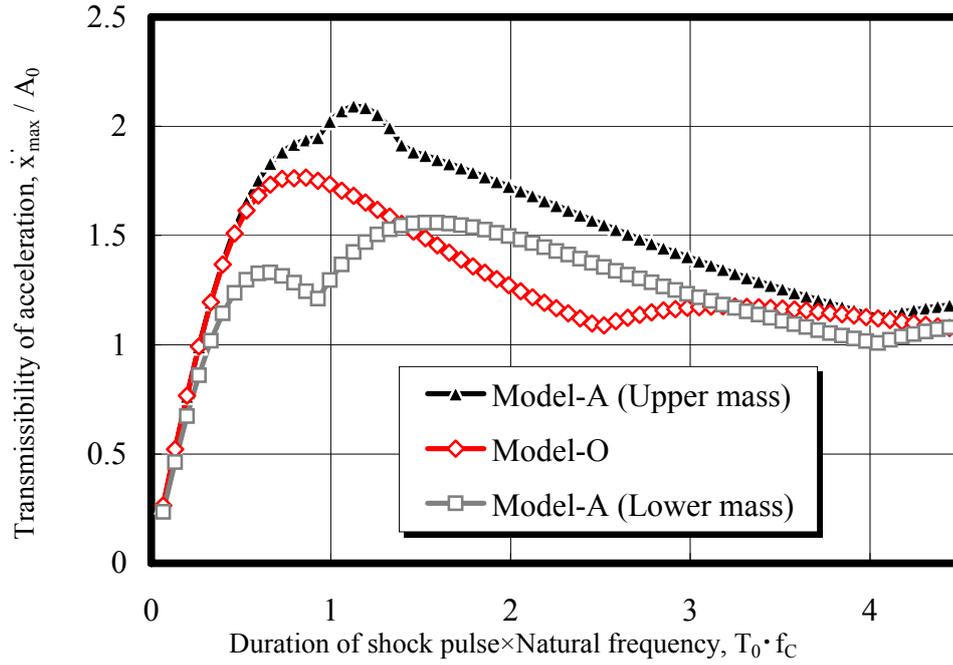


Fig.2.2.8 Shock spectrum of Model-A and O by half-sine shock pulse.

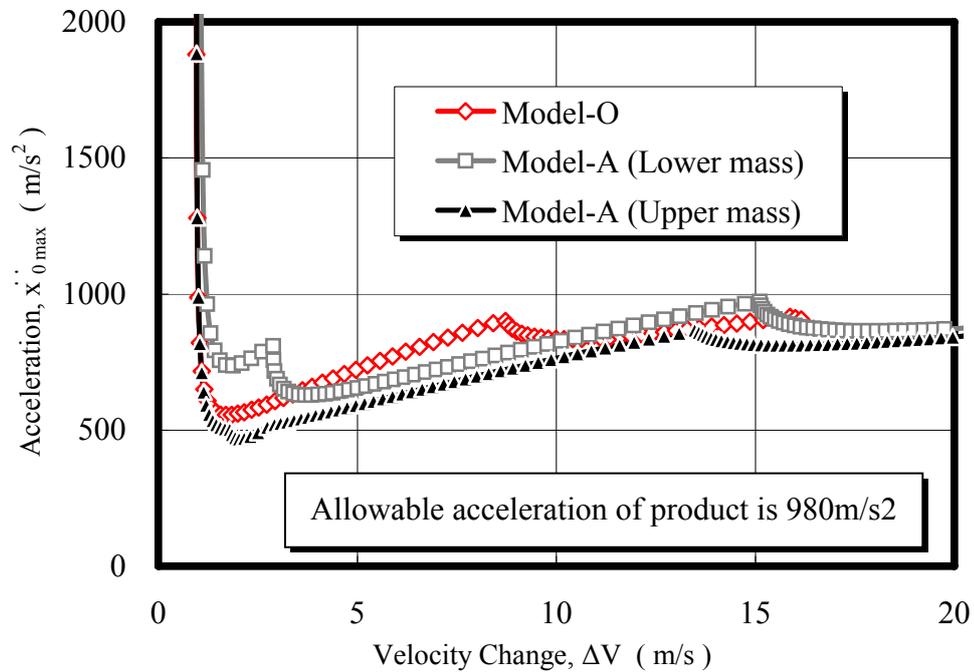


Fig.2.2.9 Damage boundary curve of Model-A and O by half-sine shock pulse.

入力衝撃パルス波形と大きく異なる形状となっている。

Model-A および Model-O の正弦半波衝撃パルスに対する SRS を Fig.2.2.8 に示す。図より、Model-A（上段質量部）への加速度伝達率の最大値は約 2.1 となる（ただし、Model-O では最大でも 1.76）。また、Model-A（上段質量部および下段質量部）、Model-O ともに、加速度伝達率が $T_0 \cdot f_c$ に大きく依存している。

Model-A および Model-O の正弦半波衝撃パルスに対する DBC を Fig.2.2.9 に示す。図より、Model-A（上段質量部および下段質量部）、Model-O ともに、許容加速度が速度変化に大きく依存している。

(3) 非線形モデル（Model-4P）の方形波衝撃パルス応答

Model-4P の方形波衝撃パルスに対する加速度応答を Fig.2.2.10 に示す。図より、

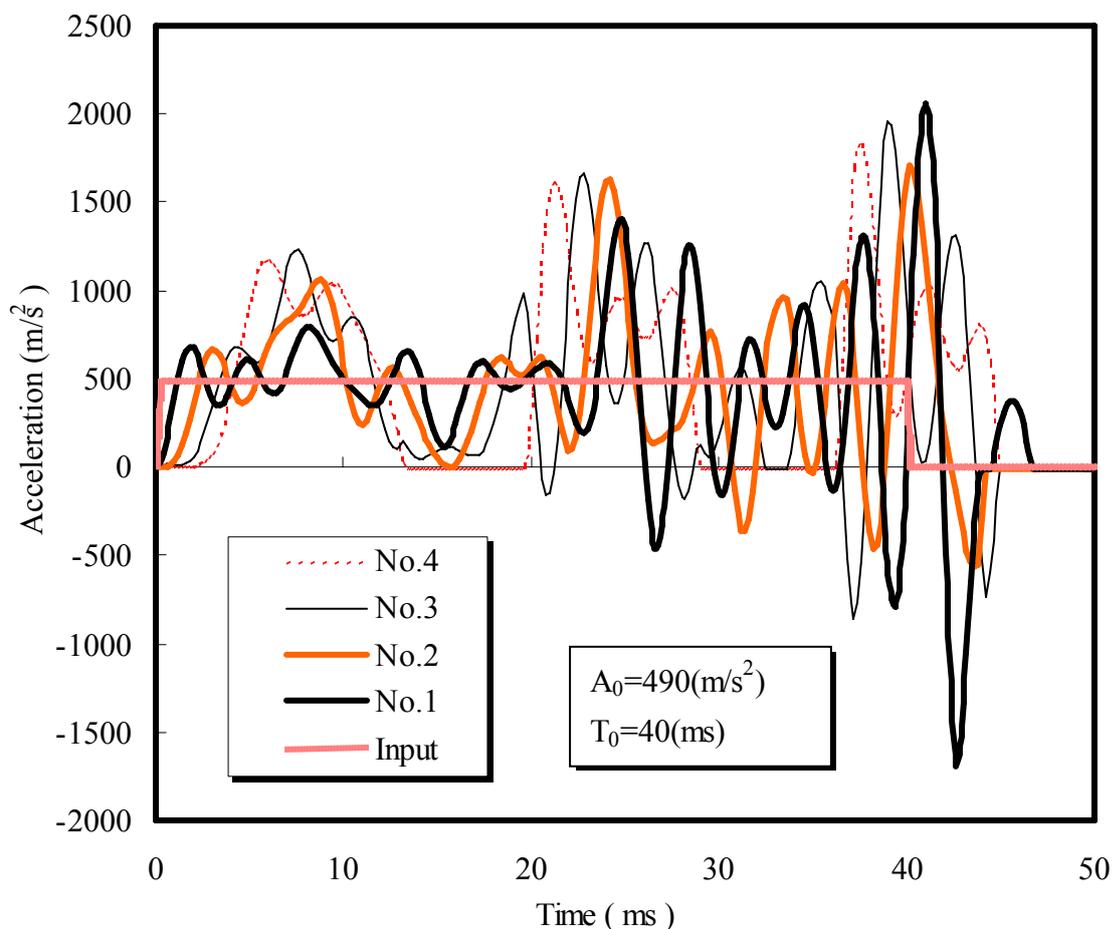


Fig.2.2.10 Shock response of Model-4P by rectangular shock pulse.

Model-A や Model-2P と同様、Model-4P も複数個の質量部が互いに影響しあい複雑な応答となり、特に、衝撃パルス作用中に現れる複数のピーク値が大きく異なった値となっている。このような1次ピークよりも2次ピークの方が大きい場合に現れる SRS の特徴について、2.2.4 で詳しく説明する。

Model-4P の方形波衝撃パルスに対する SRS を Fig.2.2.11 に示す。図より、Model-4P（最下段質量部）への加速度伝達率の最大値は、Model-O よりもはるか

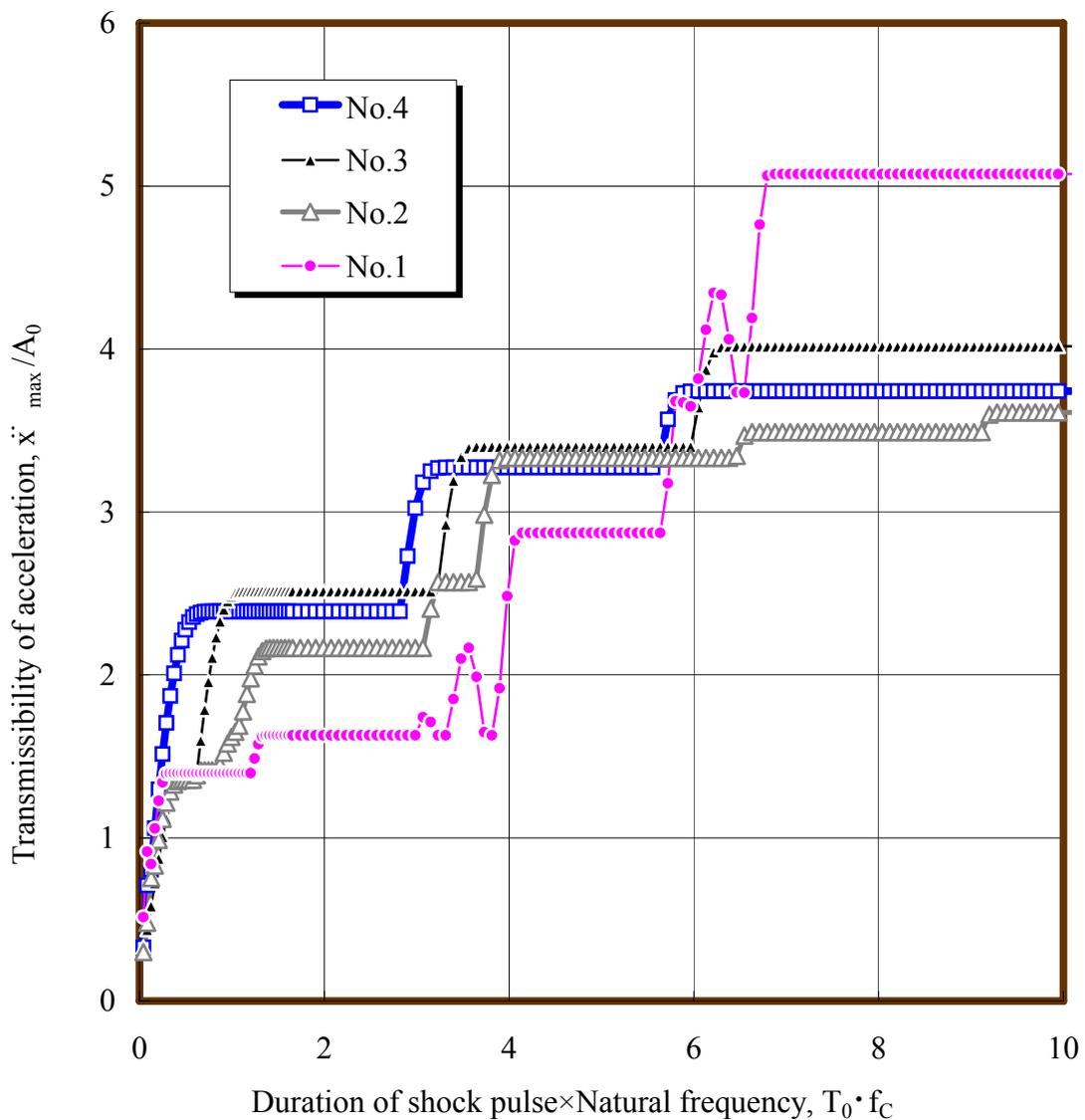


Fig.2.2.11 Shock spectrum of Model-4P by rectangular shock pulse.

に大きい値（約 5.1）である。また、加速度伝達率は階段状に単調増加している。ただし、最下段質量部の SRS には突起のような変化が 2 カ所（ $f_c T_0$ が 3.5 と 6.2 の付近）認められ、この部分では単調増加とはなっていない。このような SRS に段差や突起が現れる場合の DBC の特徴についても 2.2.4 で詳しく説明する。

Model-4P の方形波衝撃パルスに対する DBC を Fig.2.2.12 に示す。図より、Model-4P の許容加速度は速度変化によって大きく変化する。さらに、その変化の幅は最下段質量部が最も大きいため、速度変化が 7m/s よりも小さい場合、最上段

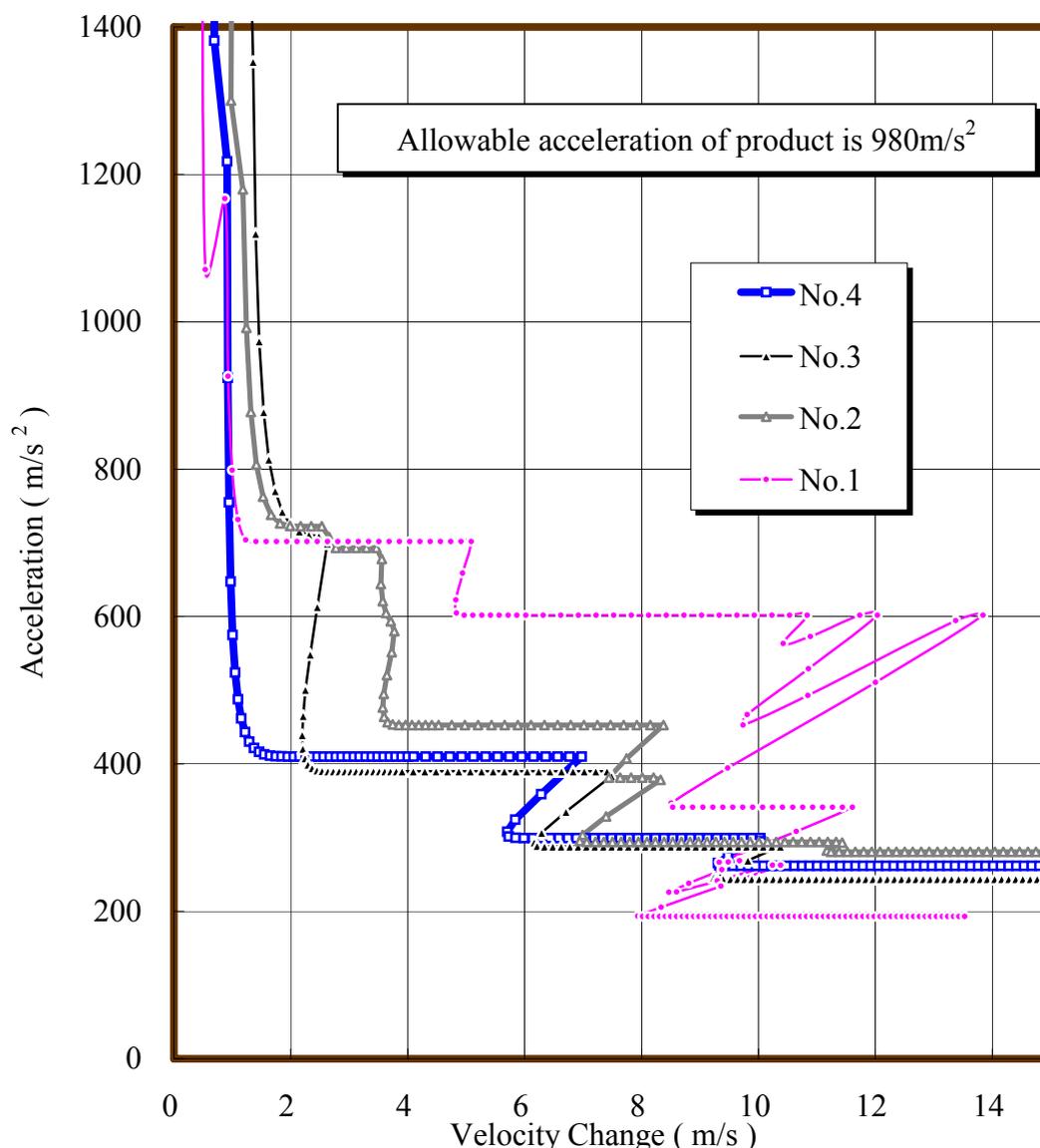


Fig.2.2.12 Damage boundary curve of Model-4P by rectangular shock pulse.

質量部 (No.4) や上段質量部 (No.3) の許容加速度が最も低く破損しやすいにもかかわらず、速度変化が 7m/s よりも大きい場合には、最下段質量部の許容加速度が最も低く破損しやすい。したがって、加える衝撃パルスの速度変化によって、最も脆弱な質量部の位置が変化することになる。

(4) 非線形モデル (Model-4P) の正弦半波衝撃パルス応答

Model-4P の正弦半波衝撃パルスに対する加速度応答を Fig.2.2.13 に示す。Model-O や Model-A と同様、Model-4P (特に、最下段質量部 No.1) も入力された衝撃パルスの作用時間に大きく依存した応答となる。しかし、最上段の質量部はあまり衝撃パルスの作用時間に依存した応答とはなっていない。

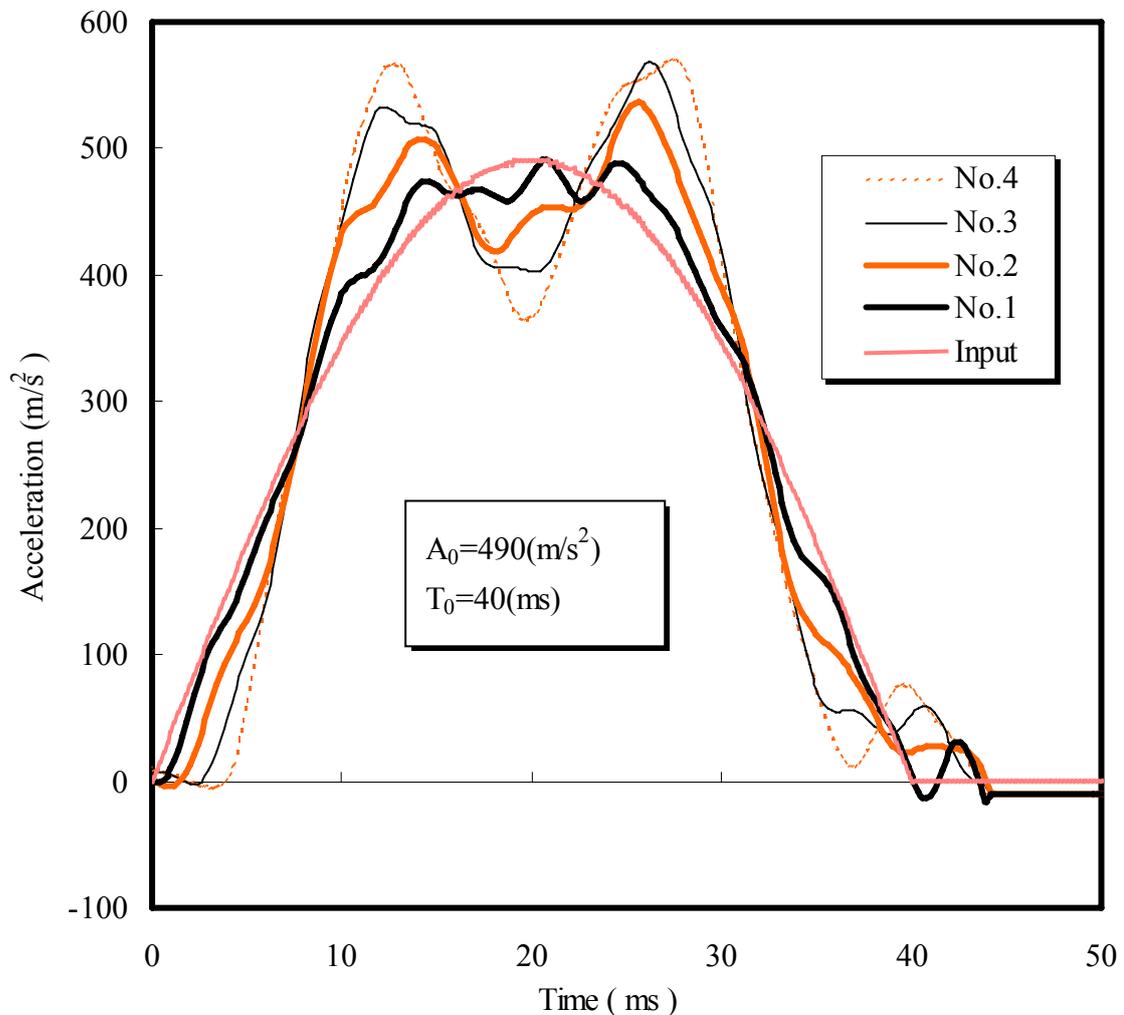


Fig.2.2.13 Shock response of Model-4P by half-sine shock pulse.

Model-4P の正弦半波衝撃パルスに対する SRS を Fig.2.2.14 に示す。Model-O と同様、Model-4P の最下段質量部の加速度伝達率は $T_0 \cdot f_C$ に依存するが、上段になるにつれて、方形波衝撃パルス応答のように加速度伝達率が一定の値となる ($T_0 \cdot f_C \geq 1$)。

Model-4P の正弦半波衝撃パルスに対する DBC を Fig.2.2.15 に示す。Model-O や Model-A と同様、Model-4P の最下段質量部の許容加速度は、速度変化に依存するが、上段になるにつれて、方形波衝撃パルスに対する応答のように、許容加速度が一定の値となる。

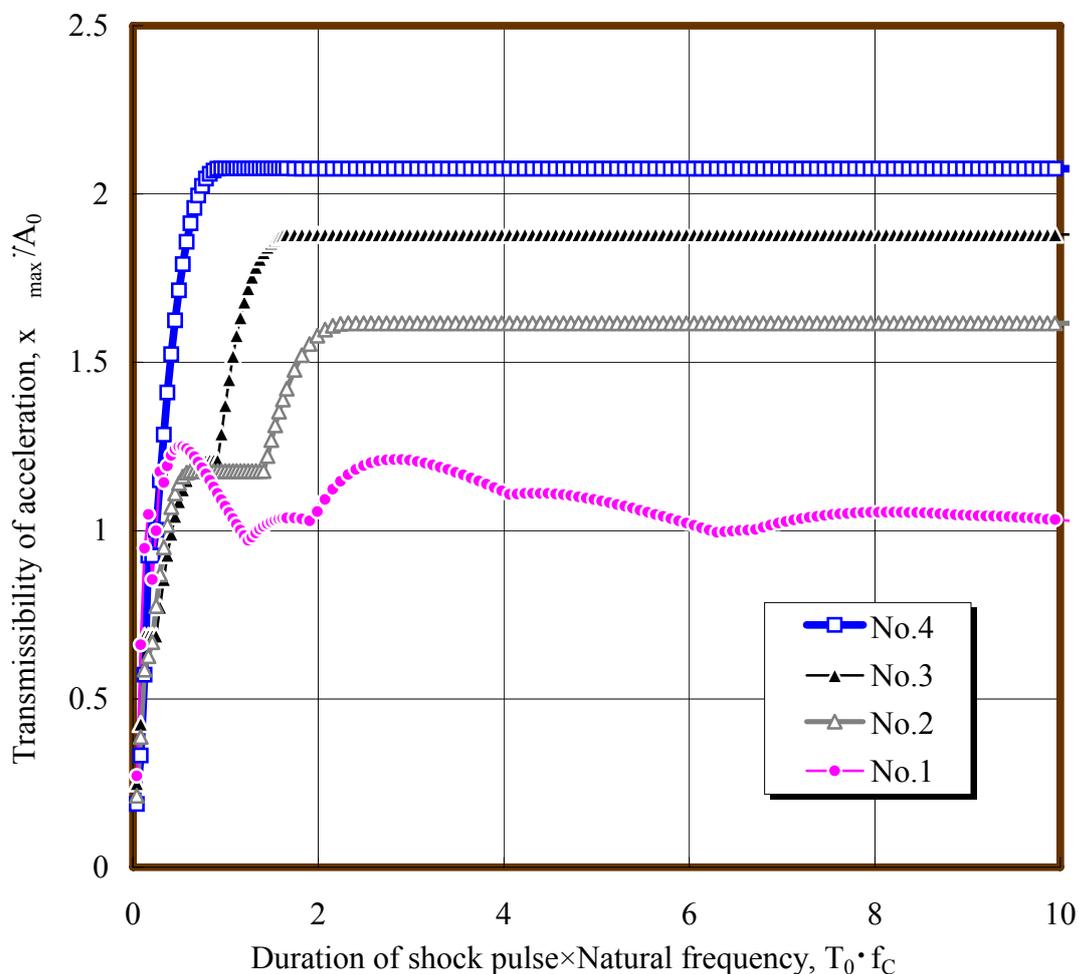


Fig.2.2.14 Shock spectrum of Model-4P by half-sine shock pulse.

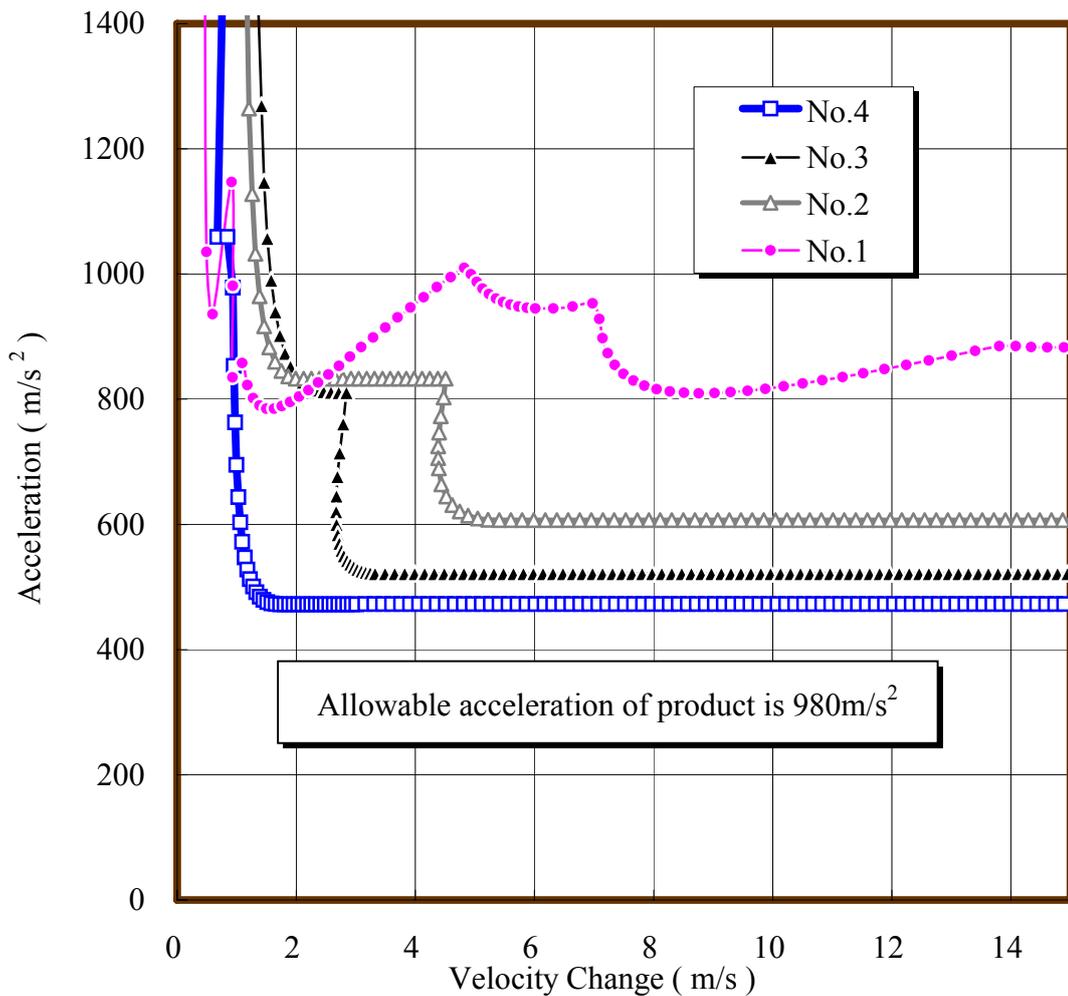


Fig.2.2.15 Damage boundary curve of Model-4P by half-sine shock pulse.

2.2.4 考 察

(1) 応答波と SRS と DBC の関係

Fig.2.2.16(f)のように方形波衝撃パルスに対する応答波上に複数のピークが存在する場合（本数値計算結果では、Fig.2.2.4 および Fig.2.2.10 がこれに相当する）について考察する。衝撃パルスの作用時間 T_0 が 1 次ピーク発生時間 T_1 に等しいときの応答波の最大値は、Fig.2.2.16(a)に示すように、1 次ピークと同じ値 (A_1) となる。作用時間が大きくなっても、時間区間 $[0, T_1]$ における応答波の形状は変化しない。そのため、2 次ピークが 1 次ピークと等しくなるときの作用時間を $T_2 - \Delta T$ (Fig.2.2.16(b)参照) とすると、作用時間が T_1 以上 $T_2 - \Delta T$ 以下の衝撃パ

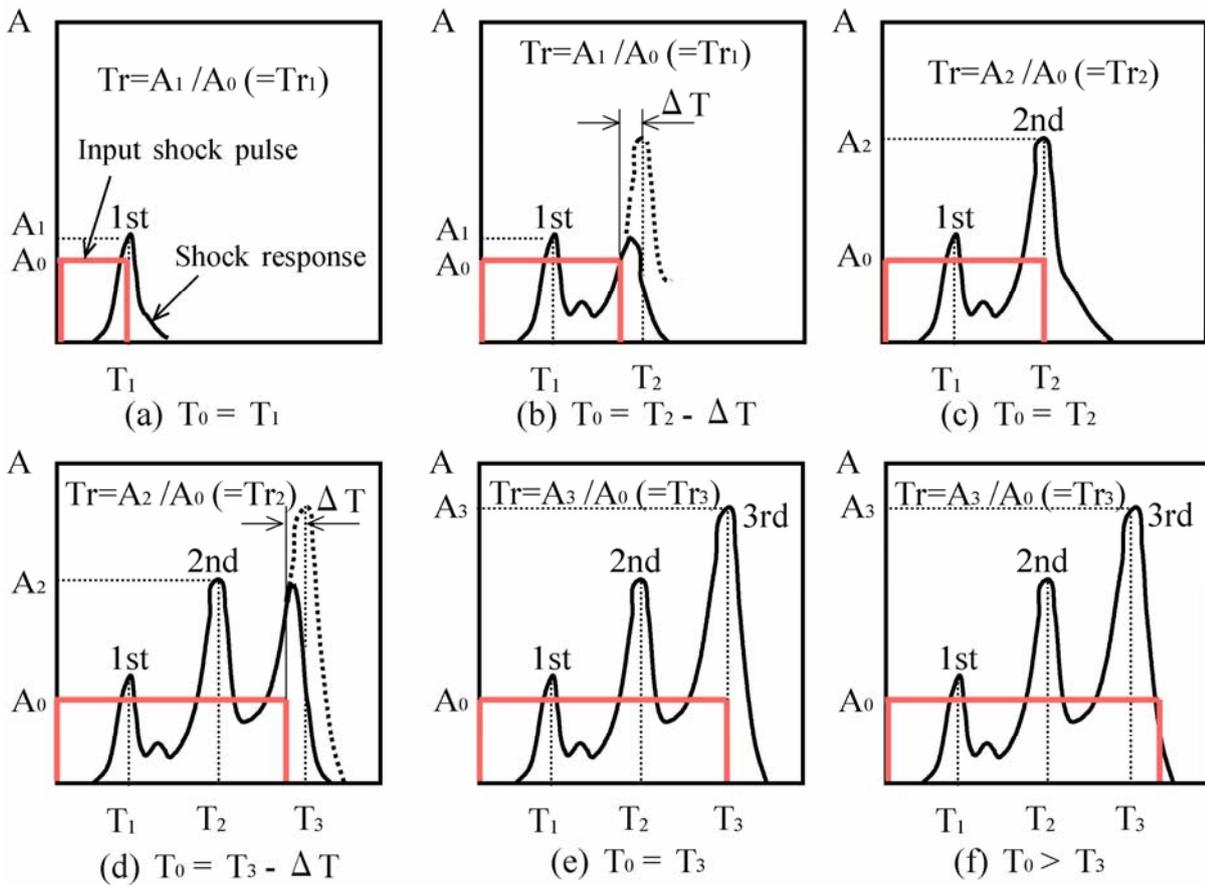


Fig.2.2.16 The shock responses for the several durations, T_0 .

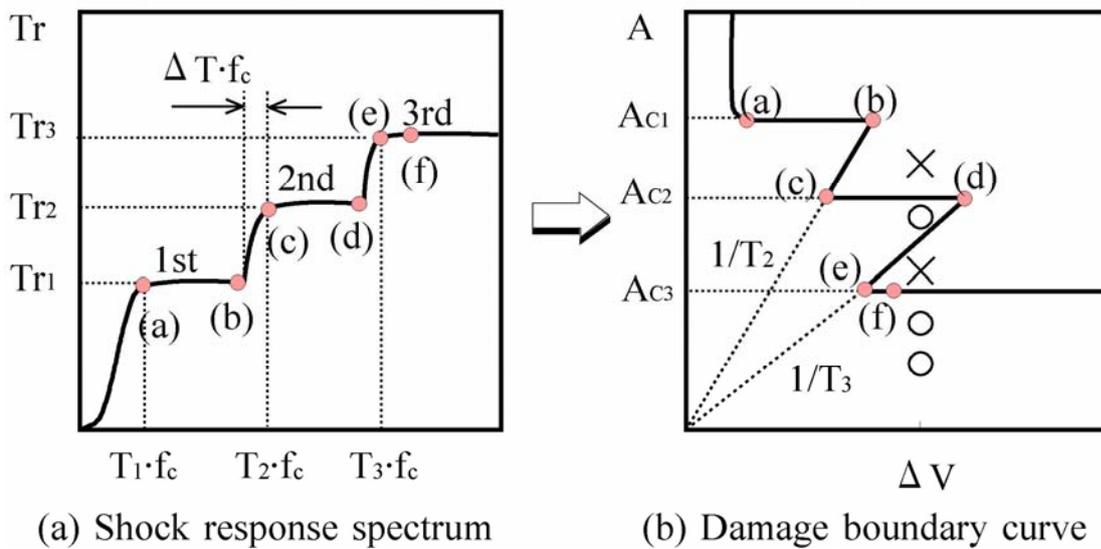


Fig.2.2.17 The influence of multiple peaks in a shock response on the SRS and the DBC.

ルスが入力した場合、応答波の最大値は A_1 、加速度伝達率は Tr_1 で一定となる。しかし、作用時間が $T_2 - \Delta T$ から $T_2 + \Delta T$ だけ長くなると、2次ピークが急激に増大し、応答波の最大値は A_2 となり、加速度伝達率は Tr_2 となる (Fig.2.2.16(c) 参照)。以下同様に、3次ピークが発生して2次ピークと等しくなるまで、応答波の最大値および加速度伝達率はそれぞれ A_2 、 Tr_2 を維持し (Fig.2.2.16(d) 参照)、その後、急激に、応答波の最大値および加速度伝達率が増大し、それぞれ A_3 、 Tr_3 となり (Fig.2.2.16(e) 参照)、Fig.2.2.16(f) の状態に至る。以上の経過を SRS および DBC として整理すると、Fig.2.2.17 の模式図のようになり、Fig.2.2.16(a)~(f) の各衝撃応答は、Fig.2.2.17(a) および (b) 中に記した点 (a)~(f) に対応している。

次に、SRS と DBC の関係について考察する。方形波衝撃パルスに対する SRS が Fig.2.2.17(a) のように階段状になっている場合、その DBC は、Fig.2.2.17(b) のような形状になる。この理由は次のとおりである。

$$A_{Ci} = a_c / Tr_i \quad (2.2.43)$$

$$\Delta V_{Ci} = A_{Ci} \times T_0 = a_c T_0 / Tr_i \quad (2.2.44)$$

ただし、 a_c は各質量部に伝搬する加速度の許容値を示し、 Tr は加速度伝達率を示している。また、添字 i は応答波における i 次のピークを表し、添字 c はその変数の許容値を表している。SRS (Fig.2.2.17(a)) 上の急激に変化している2点 (b) および (c) の座標を $((T_2 - \Delta T) f_c, Tr_1)$ 、 $(T_2 f_c, Tr_2)$ とすると、式(2.2.43) および式(2.2.44) と式(2.2.44) により、これらの点に対応する DBC (Fig.2.2.18(b)) 上の座標が次のように導出できる。

$$\text{点(x)} \quad (\Delta V_{C1}, A_{C1}) = (T_1 a_c / Tr_1, a_c / Tr_1) \quad (2.2.46 \text{ a})$$

$$\text{点(y)} \quad (\Delta V_{CP}, A_{CP}) = (T_P a_c / Tr_P, a_c / Tr_P) \quad (2.2.46 \text{ b})$$

$$\text{点(z)} \quad (\Delta V_{C2}, A_{C2}) = (T_2 a_c / Tr_2, a_c / Tr_2) \quad (2.2.46 \text{ c})$$

ただし、 $Tr_P > Tr_1$ 、 $Tr_P > Tr_2$ である。これより、 $a_c / Tr_P < a_c / Tr_1$ 、 $a_c / Tr_P < a_c / Tr_2$ が成立し、 $A_{C1} > A_{CP}$ 、 $A_{C2} > A_{CP}$ となることがわかる。したがって、SRS のピーク (極大値) が、DBC ではピーク (極小値) となる。また、入力衝撃パルスが方形波の場合、DBC 上のある点と原点を結んだ直線の傾きは、式(2.2.42) より、 $1/T_0$ である。そのため、SRS 突起部に対応する DBC 上の各点と原点を結んだ直線の傾きは、それぞれ $1/T_1$ 、 $1/T_P$ 、 $1/T_2$ となることがわかる。ただし、

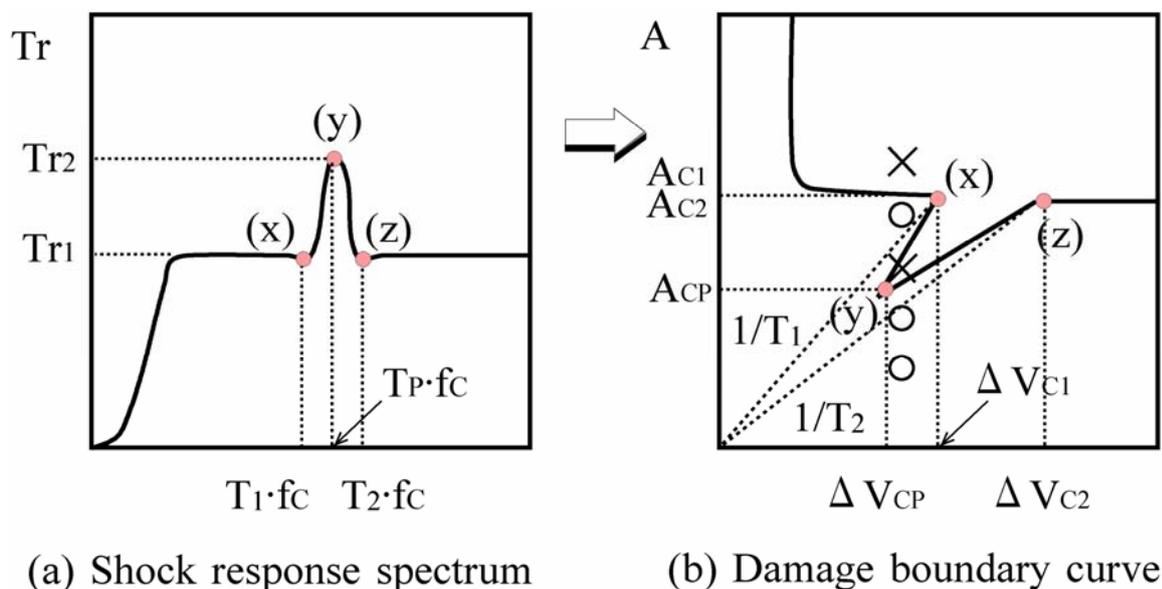


Fig.2.2.18 The relationship between the SRS and the DBC.

$T_1 < T_p < T_2$ より、 $1/T_1 > 1/T_p > 1/T_2$ となり、DBC 上の突起部ピークは、始点および終点を原点と結んだ 2 直線間に存在することになる。以上の考察から SRS 上の突起を DBC に変換すると Fig.2.2.18(b) のような形状となることがわかる。

(2) 「速度変化依存性」(問題点その 1)

Model-O に方形波衝撃パルスを加えた場合、Fig.2.2.6 からわかるように、衝撃パルスの速度変化が許容速度変化よりも十分に大きければ、許容加速度は速度変化に対して一定の値となる。一方、Model-O に正弦半波衝撃パルスを加えた場合、Fig.2.2.9 からわかるように、その許容加速度が速度変化によって変化する。このように、製品衝撃強さ試験において、設定する衝撃パルスの速度変化が変われば、得られる許容加速度も変わる現象を「速度変化依存性」と呼ぶことにする。

JIS Z 0119、ASTM D 3332 などの製品衝撃強さ試験方法では、許容加速度を測定する際、上記の「速度変化依存性」が出ないように台形波衝撃パルス（現実に発生可能な最も方形波に近い波形）を使用するように決められている。したがって、Model-O と同様に応答する製品については、これらの試験方法で十分正確に衝撃強さを評価することができる。逆に、製品の衝撃応答に、Model-A や Model-4P

のような Model-O と異なる特徴があれば、これらの試験方法では、製品の衝撃強さを正確に評価することはできない。たとえば、Model-A や Model-4P に方形波衝撃パルスが加わった場合、Fig.2.2.6 や Fig.2.2.12 からわかるように、DBC が複雑な形状となり、「速度変化依存性」が現れる。以上の理由から、この速度変化依存性を「問題点その1」と呼ぶことにする。

(3) 「逆転現象」(問題点その2)

Fig.2.2.17(b)、Fig.2.2.18(b)に記載した○および×は、そこで示した衝撃パルスを製品に加えると、それぞれ製品が「破損しない」および「破損する」ことを示している。すなわち、○および×は、DBC 上の段差または突起部における許容加速度試験（通常、速度変化を一定とし加速度を徐々に増していく）の結果の予測を表している。一般に、衝撃パルスの加速度が大きければ、それだけ、製品は破損しやすくなるが、図では、加速度が低いときに製品が破損し、加速度が高いときには製品は破損しないという、通常とは逆の現象が発生している。ここでは、このような現象を「逆転現象」と呼ぶことにする。

実際の許容加速度試験において、たとえば、加速度の増分を少し大きく設定すると、Fig.2.2.17(b)、Fig.2.2.18(b)中の下側の損傷領域では試験をせず、上側の非損傷領域で試験を行ってしまう可能性がある。このような場合、上側の損傷領域を製品の許容加速度と判断してしまい、製品の衝撃強さが過大に評価される。以上の理由から、この逆転現象を「問題点その2」とする。

(4) 「DBC 交差現象」(問題点その3)

Fig.2.2.12 に示した Model-4P の方形波衝撃パルスに対する DBC では、各質量部の DBC が複雑に交差しており、衝撃パルスの加速度、速度変化によって、破損する位置が異なる。Model-4P を一般の製品に置き換えて考えてみると、製品内の各部位（部品）毎に衝撃伝搬経路が異なり、さらに、各部位（部品）の強度も異なるため、Model-4P と同様、各部位（部品）の DBC が複雑に交差する可能性が十分に考えられる。このように、製品内に複数の破損部位（部品）が存在し、それらの DBC が互いに交差する現象を「DBC 交差現象」と呼ぶことにする。

Fig.2.2.19(a)は、DBC 交差現象が現れたときの各 DBC の模式図であり、Fig.2.2.19(b)は、製品全体として見たときの DBC を示している。すなわち、製品全体の DBC は、各 DBC のうち許容加速度（または許容速度変化）が最も小さい部分をつなぎ合わせた曲線である。図からわかるように、DBC 交差現象は、速度変化依存性

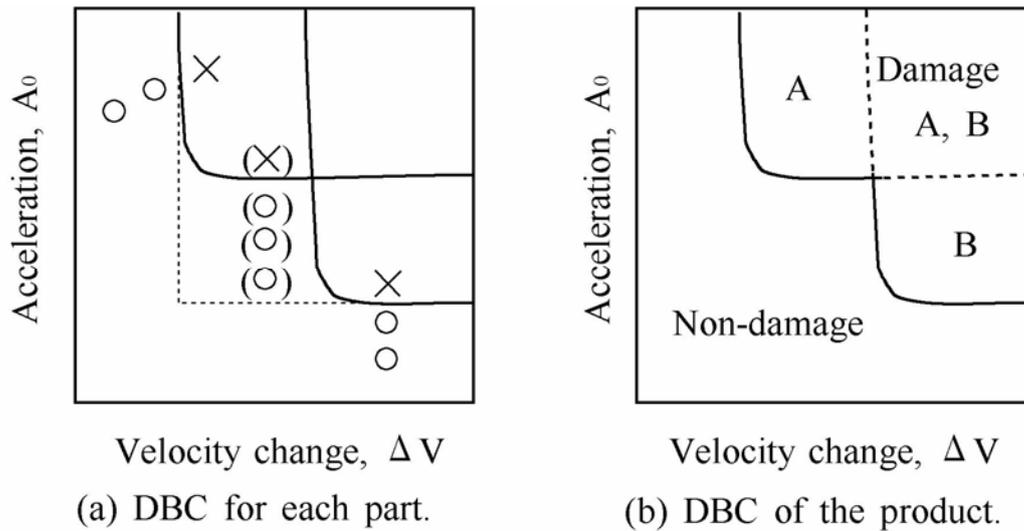


Fig.2.2.19 DBC of a product which includes two fragile parts (Part A and Part B).

を伴うだけでなく、衝撃試験で、一方の部位（部品）のみ破損する場合、もう一方の部位（部品）が見落とされ、製品改良などの対策が施されない可能性がある。以上の理由から、この DBC 交差現象を「問題点その 3」とする。

2.3 実験による問題となる現象の存在証明

前節で見出した製品衝撃強さ評価において問題となる現象が、解析だけでなく実際の実験でも発生することを、実製品（フロッピーディスク装置）および段階み製品実験モデルを用いた実験により証明する。

2.3.1 実製品による衝撃強さ実験

実製品としてフロッピーディスク装置を用いる。フロッピーディスク装置を衝撃台上に固定している様子を Fig.2.3.1 に示す。試料に台形波衝撃パルスを加え、試料内の部品（電源ユニットおよび電子基板）に伝搬する加速度を測定する。電源ユニット、電子基板上に加速度センサーを貼付している様子を Fig.2.3.2 に示す。加えた衝撃パルスの高調波成分を取り除いた後の最大加速度（以下、最大整形加速度と呼ぶ）は、約 100m/s^2 とし、作用時間は約 17ms から約 63ms の範囲で変化させる。実験に使用した加速度センサーの周波数範囲は $0.1\text{Hz}\sim 15\text{kHz}$ で、加速度範囲は $5\times 10^{-3}\sim 2\times 10^4\text{m/s}^2$ である。また、実験試料（フロッピーディスク装置）の外形、外寸法および質量を Table 2.3.1 に示す。

Table 2.3.1 Specification of the product (Floppy disk drive).

Shape	Outer size	Mass
Rectangular box	385×300×130mm	7.7kg

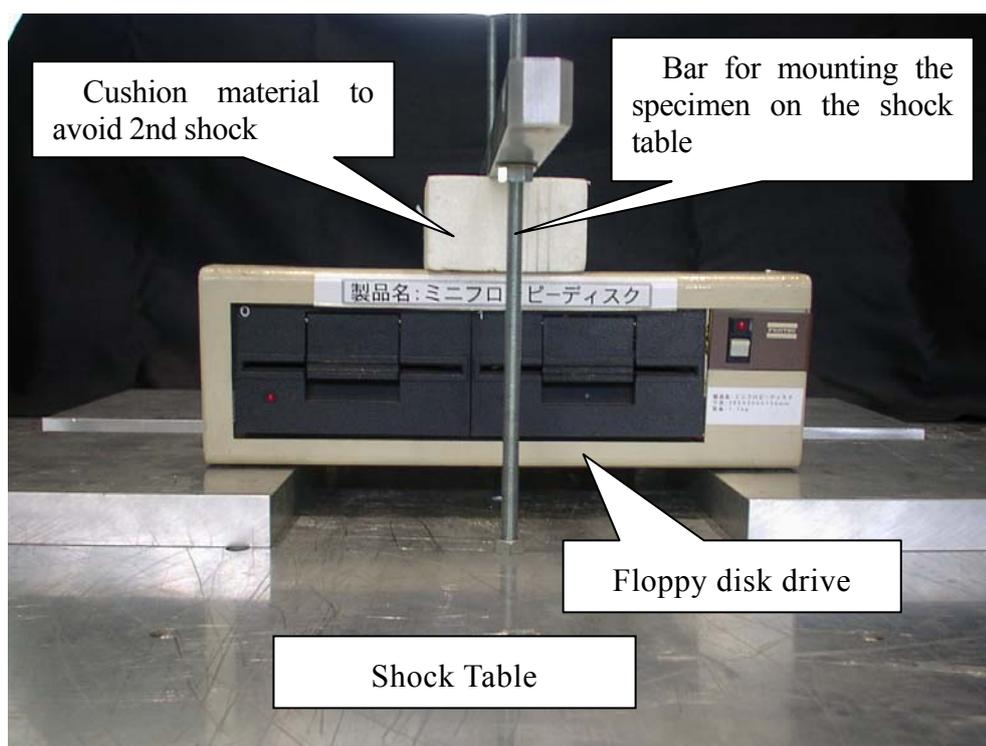


Fig.2.3.1 The specimen (Floppy disk unit) mounted on the shock table.

実験によって得られた入力衝撃パルス作用時間と各部品加速度伝達率との関係を Fig.2.3.3 に示す。図中の各点は、同一条件で 5 回ずつ行った実験結果の平均値であり、矢印により、それらの 95%信頼区間を示している。また、それらの変動係数も算出している。電源ユニットへの加速度伝達率の変動係数は最大 19%に達し、電子基板上への加速度伝達率の変動係数はすべて 8%以内に収まっている。試験条件により加速度伝達率が約 50%変化していることを考慮すると、これらの変動係数は十分に小さな値であるといえる。

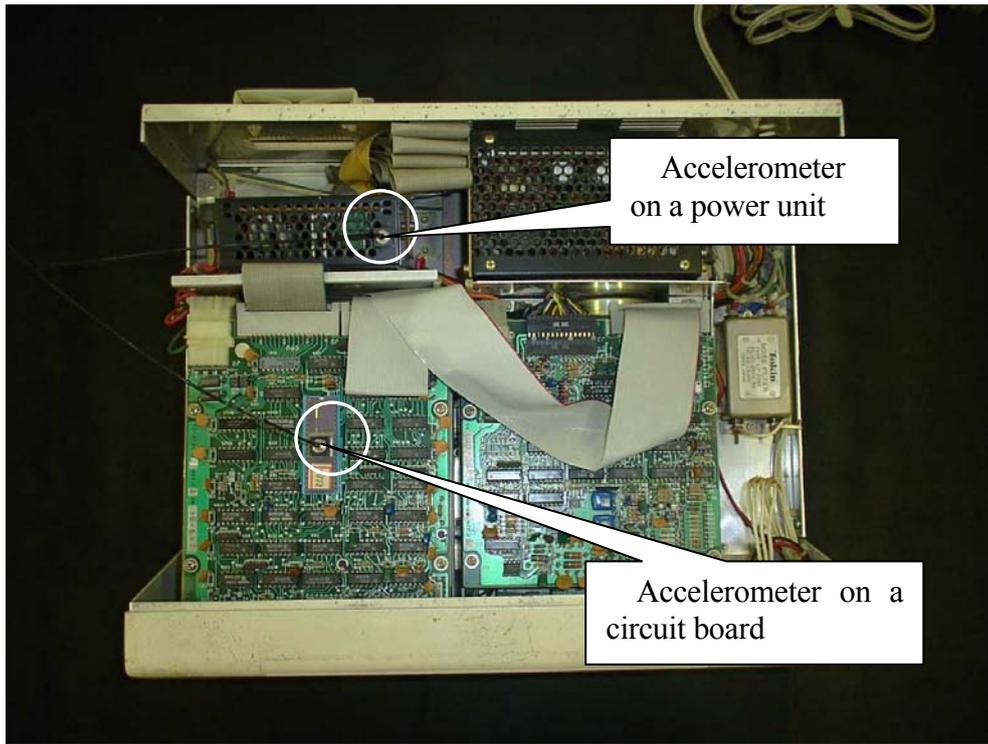


Fig.2.3.2 Accelerometers set on a power unit and on a circuit board of Floppy disk drive.

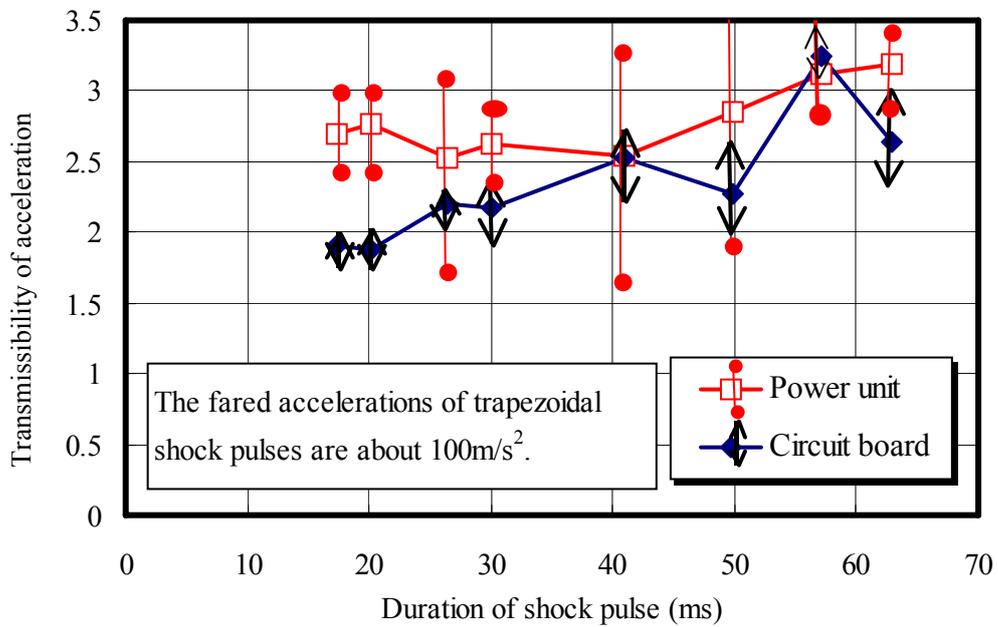


Fig. 2.3.3 Shock response of trapezoidal shock pulse (100m/s^2) on a real product (Floppy disk unit) in mechanical shock experiments.

一般に、製品内の各部品に伝搬する加速度がある値（部品強度）を越えるとその部品は破損する。すなわち、加速度伝達率 Tr が一定なら、許容加速度 A_c も一定となるが、Fig.2.3.3 に示す電子基板の SRS のように加速度伝達率の変動が大きければ、その許容加速度も大きく変動する。図の横軸は、入力衝撃パルスの作用時間であるが、最大加速度を一定 ($100m/s^2$) としているため、作用時間に比例して速度変化が変化する。よって、本実験結果は、フロッピーディスク装置の電子基板部に速度変化依存性が存在することを示している。次式を用いて導出した本試料の DBC を Fig.2.3.4 に示す。（各曲線の右上は各部品の損傷領域であり、左下は非損傷領域である）

一般に、製品内の各部品に伝搬する加速度がある値（部品強度）を越えるとその部品は破損する。すなわち、加速度伝達率 Tr が一定なら、許容加速度 A_c も一定となるが、Fig.2.3.3 に示す電子基板の SRS のように加速度伝達率の変動が大きければ、その許容加速度も大きく変動する。図の横軸は、入力衝撃パルスの作用時間であるが、最大加速度を一定 ($100m/s^2$) としているため、作用時間に比例して速度変化が変化する。よって、本実験結果は、フロッピーディスク装置の電子基板部に速度変化依存性が存在することを示している。次式を用いて導出した本試料の DBC を Fig.2.3.4 に示す。（各曲線の右上は各部品の損傷領域であり、左下は非損傷領域である）

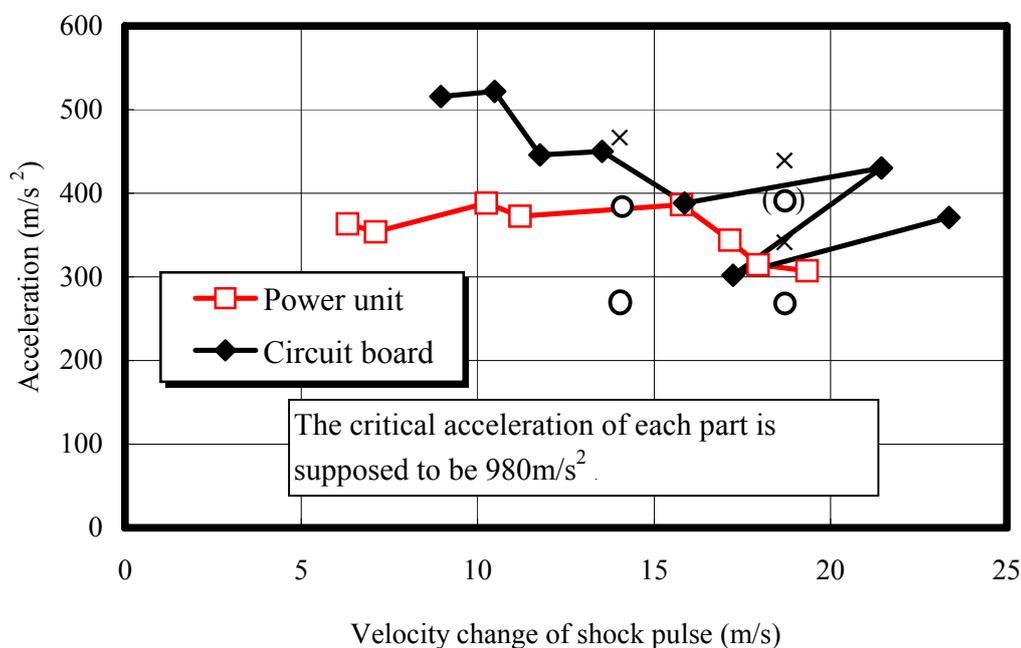


Fig.2.3.4 Damage Boundary Curve which is derived from the transmissibility measured in the experiment on a real product (Floppy disk unit).

$$A_c(T_0) = a_c / Tr(T_0) \quad (2.3.1)$$

$$\Delta V_c(T_0) = A_c(T_0) \times T_0 \quad (2.3.2)$$

ただし、 $A_c(T_0)$ および $\Delta V_c(T_0)$ 、 $Tr(T_0)$ は、それぞれ作用時間 T_0 の衝撃パルスに対する製品の許容加速度、許容速度変化、加速度伝達率を表す。DBCを導出するには、 $Tr(T_0)$ および各部品に伝搬する加速度の許容値 a_c が必要である。ここでは、 $Tr(T_0)$ にはFig.2.3.3で示すデータを用い、 a_c は実際に計測せず、仮想値($a_c=980\text{m/s}^2$)を用いてDBCを導出している。Fig.2.3.4中の×、○は、仮に該当する衝撃パルスを製品に加えれば、電子基板部に損傷が発生するかどうかの推定結果を示している。図より、速度変化依存性および逆転現象が現れることがわかる。また、速度変化 17m/s 、加速度 300m/s^2 付近において、電源部DBCと電子基板部DBCの交差(DBC交差現象)も認められる。小さな交差であり、その影響は少ないが、DBC交差現象が発生する可能性を示すには十分である。

以上、実製品を用いた衝撃実験により、製品衝撃強さ評価において問題となる現象(「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC交差現象」)の存在を証明することができた。

2.3.2 段積み状態での衝撃強さ実験

製品が段積みされた状態を表した段積み実験モデルを用いて、衝撃強さ実験を行う。作成した段積み実験モデルをFig.2.3.5に示す。図のように、本実験モデルは、3枚のアルミニウム板(以下、質量部と呼ぶ)、ばね、および、ガイドから構成されており、各質量部が上下方向のみに動き、ばねと板が連結されていないため各質量部が飛び跳ねる状態を再現できる。本実験モデルを衝撃台に取り付け、台形波衝撃パルスを加え、各質量部に発生する加速度を測定する。入力衝撃パルスの最大整形加速度は、約 100m/s^2 とし、作用時間は約 17ms から約 66ms の範囲で変化させる。実験に使用した加速度センサーは、2.3.1で用いたセンサーと同等品である。質量部の外形、外寸法、および、質量をTable 2.3.2に、使用したばね寸法およびばね定数をTable 2.3.3に示す。

実験によって得られた入力衝撃パルス作用時間と各質量部の加速度伝達率との関係をFig.2.3.6に示す。図中の各点は、同一条件で5回ずつ行った実験結果の平均値であり、矢印により、それらの95%信頼区間を示している。また、それらの変動係数も算出している。各質量部への加速度伝達率の変動係数はすべて10%以内に収まっている。

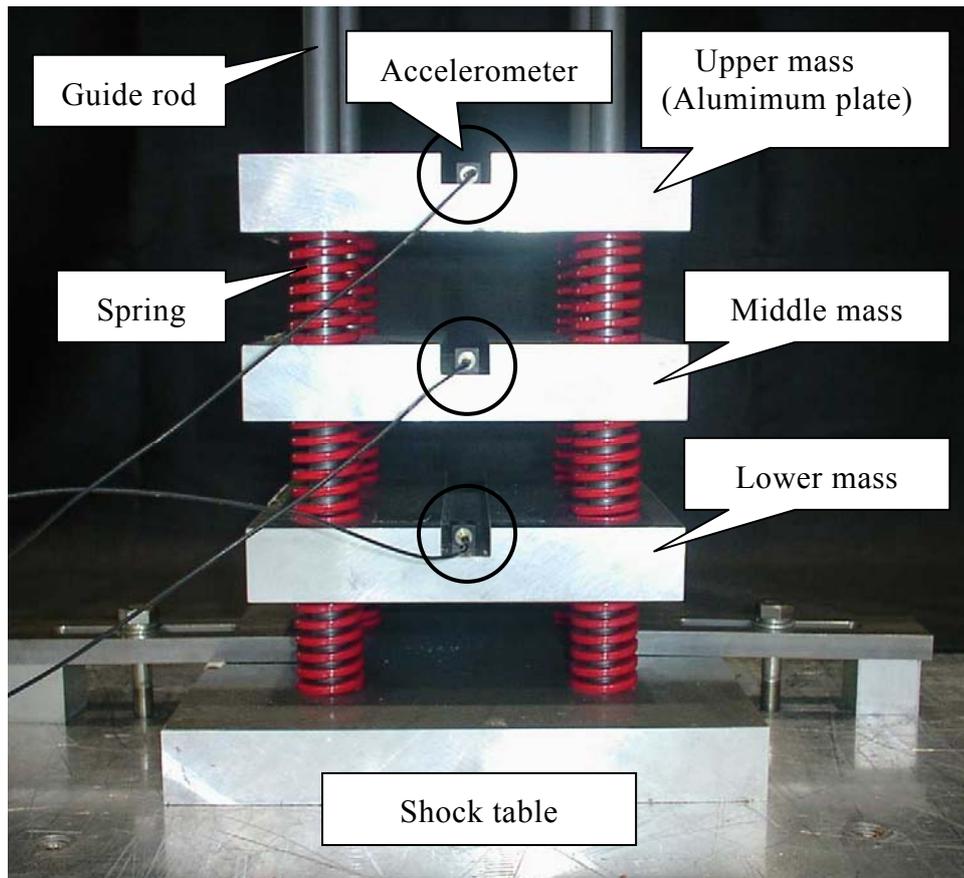


Fig.2.3.5 An equipment representing the stacked model (Model-3P).

Table 2.3.2 Specification of the aluminum plate.

Shape	Outer size	Mass
Rectangular box	180×180×30mm	2.58 kg

Table 2.3.3 Specification of the spring.

Length	Outer and inner diameter	Spring constant
45mm	30mm, 15mm	66N/mm

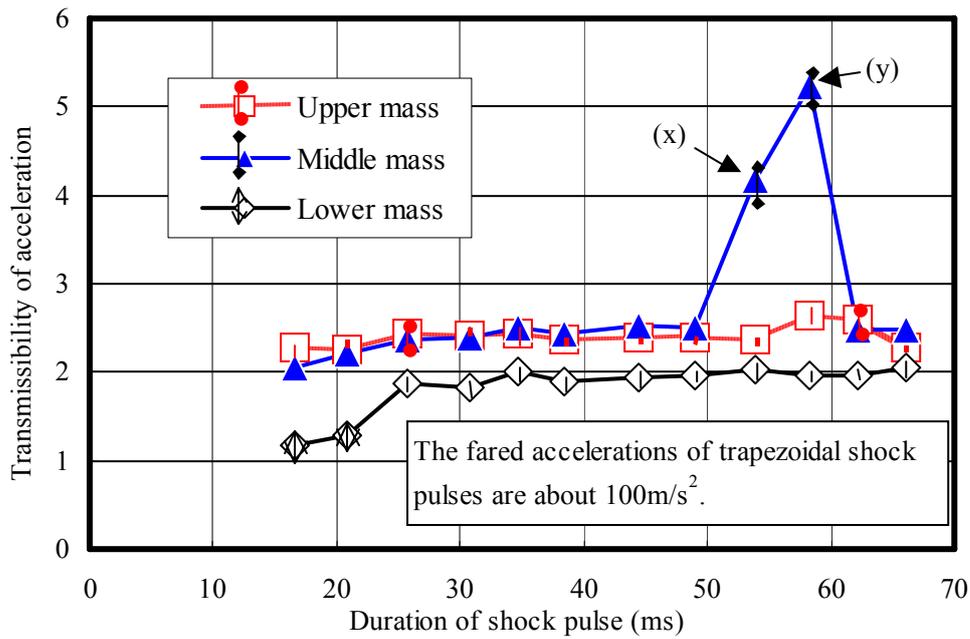


Fig.2.3.6 Shock response of trapezoidal shock pulse(100m/s^2) on the experimental model which expresses the situation that products are stacked.

Table 2.3.4 Scatter in measured transmissibility.

(a) Detail of the plot indicated by (x) in Fig.2.3.6

Duration (ms)	Transmissibility	Coefficient of variation (%)
52.8	3.73	6.9
54.6	4.32	
55.6	4.25	
54.4	4.47	
54.8	4.07	

(b) Detail of the plot indicated by (y) in Fig.2.3.6

Duration (ms)	Transmissibility	Coefficient of variation (%)
59.4	5.22	9.6
59.4	4.46	
57.8	5.33	
59.6	5.29	
58.6	5.87	

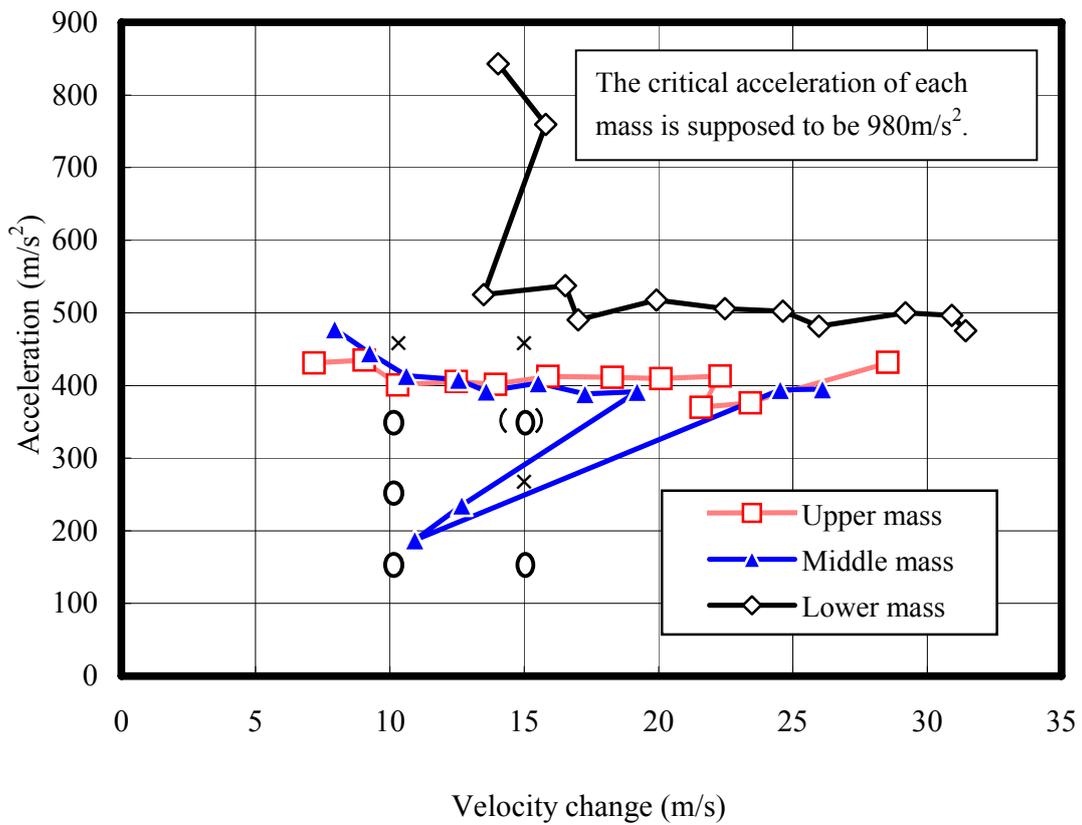


Fig.2.3.7 Damage Boundary Curve which is derived from the transmissibility measured in the experiment on the experimental model expressing the stacked products.

試験条件により加速度伝達率が約 2.5 倍まで変化していることを考慮すると、これらの変動係数は十分に小さな値であるといえる。

図より、中段質量部の SRS 上に大きな突起状の変化が確認できる。特に大きな加速度伝達率を示す点(x)および点(y) (Fig.2.3.6 に記載) の全測定値を Table 2.3.4 に示す。本データより、本現象 (SRS 上に大きな突起が現れる) の再現性は明らかである。また、本 SRS の形状は、Fig.2.2.18(a)に示した突起のある SRS 模式図と同様である。以上の結果から、DBC の形状も Fig.2.2.18(b)と同様の形状となり、本実験モデルにおいても、「速度変化依存性」および「逆転現象」が現れると推測される。

その結果を Fig.2.3.7 に示す。図中の×、○は、仮に該当する衝撃パルスを製品に加えれば、中段質量部に損傷が発生するかどうかを示している。図より、速度変化を 10m/s

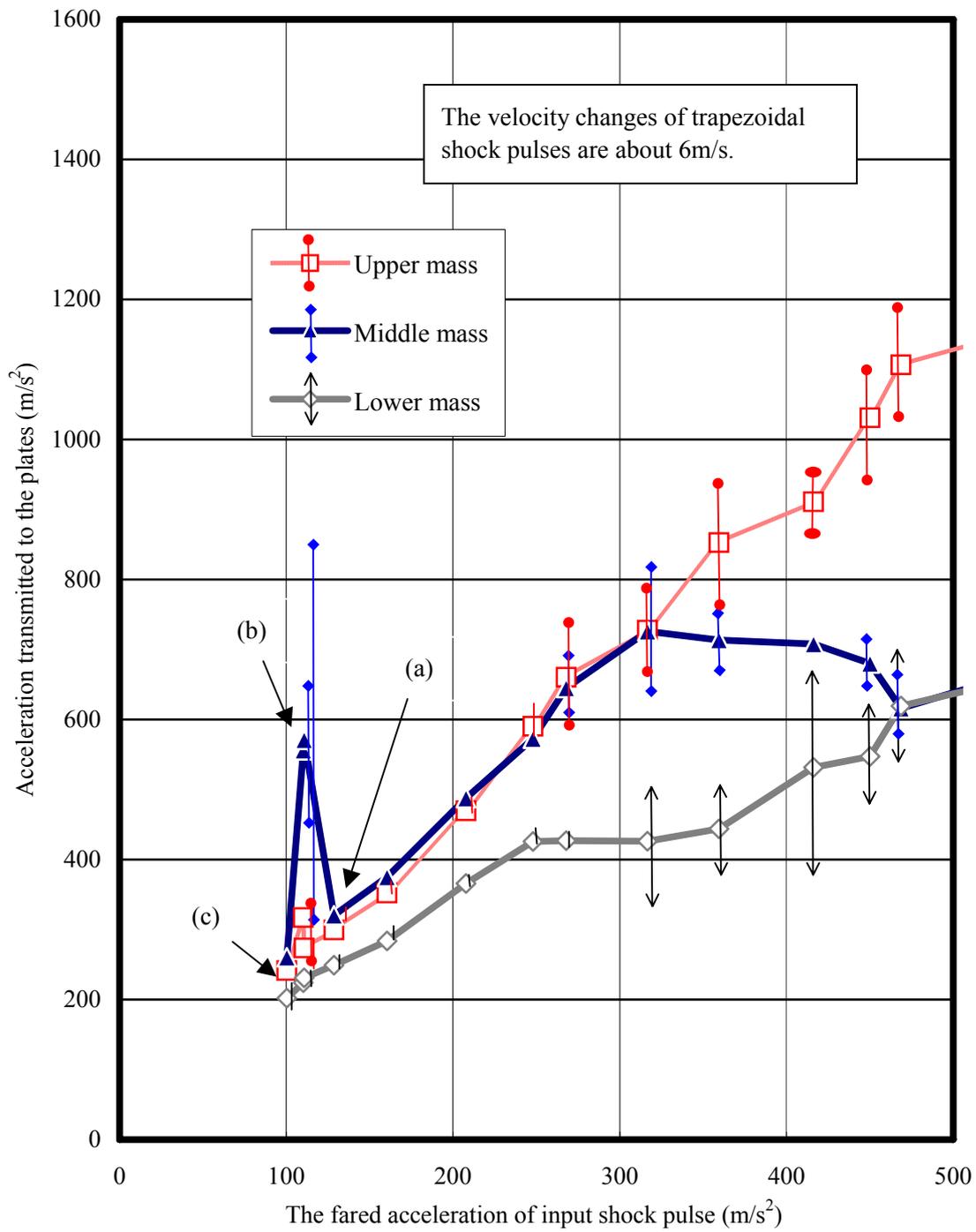


Fig.2.3.8 Shock responses of trapezoidal shock pulses(6m/s) on the experimental model which expresses the situation that products are stacked.
 (The reverse phenomenon appears in this experiment.)

Table 2.3.5 Scatter in measured shock response.

Input acceleration (m/s ²)	Maximum acceleration of shock response(m/s ²)	Coefficient of variation (%)
120	590	8.0
103	565	
109	634	
110	556	
112	510	
109	483	22.8
100	516	
122	771	
104	450	
115	560	

に設定して許容加速度試験を行うと、許容加速度は約 400m/s² となり、速度変化を 15m/s に設定すれば、許容加速度が約 250m/s² となることがわかる。すなわち、設定する速度変化により得られる許容加速度が変化する現象が現れる（問題点その1「速度変化依存性」）。また、速度変化を 15m/s に設定して許容加速度試験を行う場合、入力衝撃パルスの加速度を 200m/s² から 350m/s² まで一挙に大きくすると、下側の損傷領域が試験結果として反映されず、許容加速度を約 400m/s² と判断してしまう（問題点その2「逆転現象」）。以上、実測 SRS データから式(2.3.1)、式(2.3.2)を用いて DBC を導出することにより製品衝撃強さ評価において問題となる現象が存在することを確認できた。

次に、実際の許容加速度試験と同じ方法で、逆転現象が現れることを確認する。実験試料として段積み実験モデルを用い、速度変化約 6m/s の台形波衝撃パルスを加え、各質量部に伝搬する加速度を計測する。その結果を Fig.2.3.8 に示す。図の点(a)および点(b)で逆転現象（点(a)では、点(b)と比べて入力加速度が大きいにも関わらず、最大応答加速度は小さい）が発生している。これにより、実際の許容加速度試験で逆転現象を確認することができる。逆転現象の原因となる点(b)における再現性をできるだけ詳しく確認するため、他点では、5 回一組の測定を行うが、点(b)では、10 回（二組）の

測定を行う。その詳細を Table 2.3.5 に示す。これより本データの再現性は明らかである。

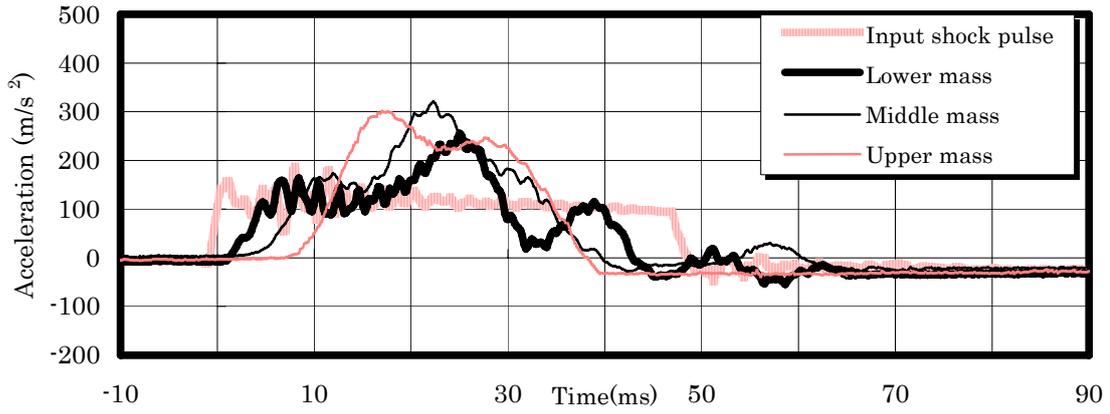
2.3.3 考 察

実製品（フロッピーディスク装置）を用いた衝撃実験の結果、先に見出した衝撃強さ評価で問題となる現象の存在を確認することができた。これは、本実験試料の構造が1自由度のばね質量系よりも複雑であるため、衝撃が複雑に伝搬したのが原因と考えられる。本結果は、一実験結果に過ぎないが、他の多くの製品についても、同様の現象が発生する可能性を示している。本速度変化依存性を考慮した上での衝撃強さ評価法の必要性が感じられる。当然、速度変化依存性のない製品も存在すると考えられるが、品質管理および安全性の面から考えると、一部の速度依存性のある製品に対して衝撃強さが誤って評価されることは大きな問題である。

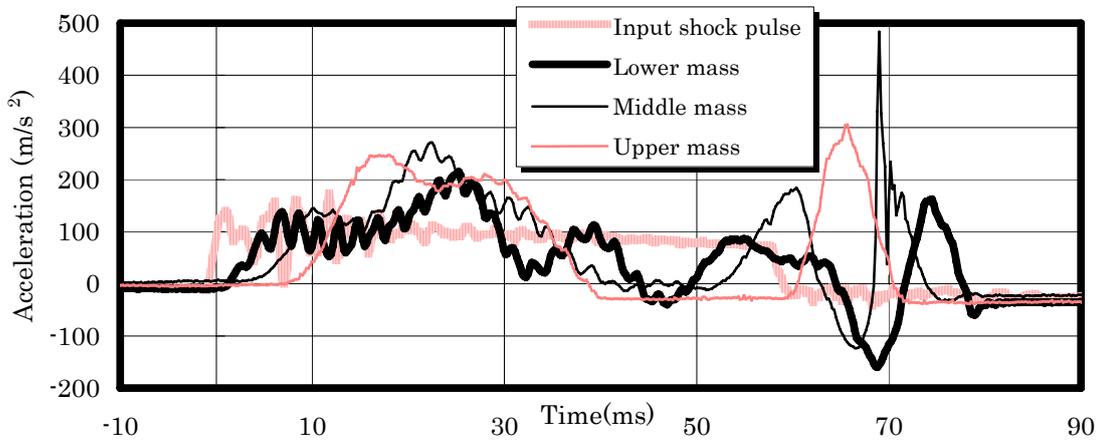
段積み実験モデルを用いた衝撃実験の結果、先に見出した衝撃強さ評価で問題となる現象の存在を確認することができた。Fig.2.3.8 の点(a)、点(b)、点(c)における各応答加速度の時刻歴をそれぞれ Fig.2.3.9(a)、(b)、(c)に示す。Fig.2.3.9(a)では、入力衝撃パルス作用後、目立った応答がないのに対して、Fig.2.3.9(b)では、大きな応答が発生している。これが逆転現象を引き起こした原因であると考えられる。Fig.2.3.9(b)での大きな応答発生の原因について、次のように考えられる。

Fig.2.3.9(a)および(c)では、衝撃パルス発生から約 60ms 後に、中段質量部に小さなピークが発生している。これとほぼ同時に Fig.2.3.9(b)の衝撃パルスが終了するため、(a)、(c)とは異なる各質量部間の相互作用が生まれ、大きな応答が発生したと考えられる。そのため、衝撃パルスの作用時間がさらに長くなっても、短くても、Fig.2.3.9(b)のような大きな応答は発生しない。さらに、Fig.2.3.9(b)での衝撃パルス作用後の中段質量部の応答が非常に鋭いピークとなっている原因に関しては、Fig.2.3.9(b)の衝撃により、使用したばねの変形量はその許容量を超え、底つき状態になった可能性が考えられる。

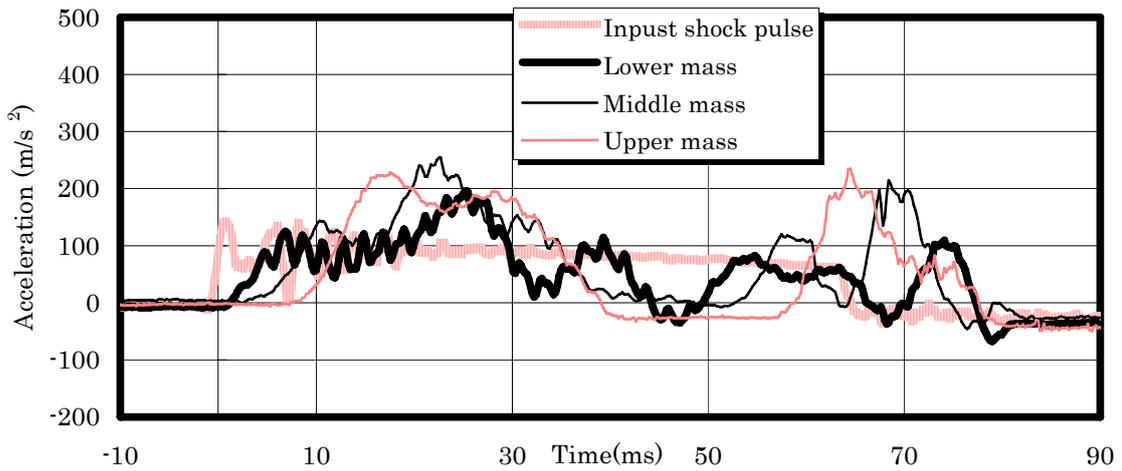
実製品では、その構造が複雑なため、原因を明らかにすることは困難であったが、段積み実験モデルでは、その構造が単純であり、段積みおよび飛びはねが主たる原因であるのは明らかである。実製品が段積みされた場合、製品内部への衝撃の伝搬も考慮する必要があるため、本結果がそのまますべての実製品の段積みにあてはまるとは言えないが、同様の現象が発生する可能性は高い。特に段積み状態では、これらの現象を考慮した上で衝撃強さを評価する必要性が強く感じられる。



(a) Input shock pulse : 48ms, 120m/s²



(b) Input shock pulse : 58ms, 100m/s²



(c) Input shock pulse : 64ms, 90m/s²

Fig.2.3.9 Shock responses of trapesoidal shock pulse in the experiment of stacked products.(All results are smoothed by the moving average during 2ms.)

実製品および段積み実験モデル共に、底面へ衝撃を加えたときの実験結果であるが、現実には、製品の角部または稜部に衝撃が加わる場合も想定される。これら角部または稜部へ衝撃が加わった場合、その伝搬は、底部の場合よりも複雑になる場合が多い。速度変化依存性は、加速度伝達率が一定とならないために発生する現象であることから考えて、角部または稜部についての衝撃試験でも、同様の速度変化依存性が発生する可能性が十分に考えられる。

2.4 結 言

製品衝撃強さ評価で問題となる現象を見出し、その存在を明らかにした。

はじめに、製品の衝撃応答を表したモデルを用いて、理論解析および数値解析を行った。その結果、問題となる現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」の存在を見出した。「速度変化依存性」とは、製品の許容加速度が速度変化に影響されて変化する現象である。また、「逆転現象」とは、一般に、製品が、衝撃パルスの変速率が同じ場合、加速度が高いほど破損しやすいのに反して、加速度が低い方が破損しやすくなる現象である。さらに、「DBC 交差現象」とは、製品内に複数の脆弱部品（または部位）が存在し、それらの DBC が互いに交差する現象であり、これにより、加えられる衝撃パルスによって、異なる部品（部位）が破損する可能性が発生する。

次に、これらの現象が現実に存在し、衝撃実験において発生することを確認するため、実製品（ミニフロッピーディスク装置）および製品が段積みされた状態を表した実験モデルについて衝撃実験を行った。その結果、現実に衝撃実験によって、製品衝撃強さ評価において問題となる現象が発生することが明らかになった。

参考文献

- 1) JIS C 0041-1995, 環境試験方法—電気電子—衝撃試験方法.
- 2) IEC 68-2-27, Basic environmental testing procedures Part2: Tests-Test Ea and guidance-Shock.
- 3) JIS Z 0119-1994, 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法.
- 4) ASTM D 3332-93, Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines.
- 5) Newton, R. E., Fragility Assessment –Theory and Test Procedure-, (1968), U.S.

Naval Post Graduate School.

- 6) Burgess, G. J., Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging Technology and Science, Vol. 1 (1988), 5.
- 7) 中嶋隆勝, 段積みされた製品の衝撃強さについての検討, 神戸商船大学大学院修士論文, (2000), 20-21.
- 8) たとえば、多谷虎男, 振動・衝撃の基礎理論とラプラス変換, 学会出版センター, (1984), 423.

第3章 新しい製品衝撃強さ評価法

3.1 緒言

製品衝撃強さ評価は、輸送過程で製品にどんな衝撃が加われば破損するのかを把握する技術であり、緩衝包装設計での設計目標の設定に相当する大切な作業である¹⁾。また、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る²⁾。

現在の衝撃強さ評価試験方法、JIS Z 0119³⁾および ASTM D 3332⁴⁾の骨子は、1960年代の後半、R. E. Newtonによってまとめられた⁵⁾。そして、その後、G. J. Burgessが、剛-塑性モデルにより、繰り返し衝撃が及ぼす DBC への影響を解析的に検討した⁶⁾。しかし、それ以外、製品衝撃強さ試験方法における問題点についての解析的研究はほとんど行われていない。

本章では、まず、製品衝撃試験規格である JIS C 0041⁷⁾および IEC 68-2-27⁸⁾では、現実問題として、製品に衝撃パルスが加わったときに製品が損傷するかどうかを推定することが困難であることを明らかにする。次に、その対策として、上記製品衝撃試験規格へ、製品が耐える衝撃の範囲（以下、保証範囲と呼ぶ）の概念の導入することにより、製品の損傷を推定できるようにした「保証範囲確認試験」を考案する。さらに、製品衝撃強さ評価試験規格である JIS Z 0119 および ASTM D 3332 では、先に見出した3つの現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」により、その衝撃強さが誤って評価されることを明らかにする。また、その対策として、これらの現象についても十分正確な評価が可能で、なおかつ、破壊に至る試料数が最低1台で済む新衝撃強さ評価法として、「DBC 評価法」を考案する。最後に、DBC 評価法について、市販の VCR（ビデオカセットレコーダーの略）を用いた衝撃強さ評価試験によりここで提案した評価法の実用性の確認を行う。

3.2 保証範囲確認試験の考案

3.2.1 JIS C 0041 の問題点および解決方法

JIS C 0041 および IEC 68-2-27 は、あらかじめ規定された衝撃パルスを製品に加えた後、製品における損傷の有無で合否判定を行う試験となっている。たとえば、最大整形加速度 500m/s^2 （ただし、最大整形加速度とは、計測された加速度から高周波ノイズ

を除去した後の加速度の最大値を意味する)、作用時間 11ms の台形波衝撃パルス (このとき、速度変化は 4.9m/s である) を製品に加え、損傷が認められなかったとする。このとき、一般に、整形加速度が 500m/s^2 以下でかつ速度変化が 4.9m/s 以下なら、いかなる衝撃パルス (Fig.3.2.1 の斜線で示した範囲: 以下、保証範囲と呼ぶ) が加えられても、製品に損傷が発生しないことが期待される。しかし、現実には、第 2 章で指摘した問題点により、DBC が Fig.3.2.2 に示したような形状となる可能性がある。そのため、入力衝撃パルスがこの保証範囲内であっても製品が破損することがある。第 2 章で示した問題点のうち、「速度変化依存性」および「逆転現象」を説明する模式図を Fig.3.2.2 に示す。ただし、図中の×、○はそれぞれ製品の予想される損傷の有無を示す。Fig.3.2.2(a) および(b)の推定結果には、速度変化依存性が現れている。その現象の詳細は第 2 章 2.2.4 (2)に示した。また、Fig.3.2.2(c)の推定結果には逆転現象が現れている。その現象の詳細は第 2 章 2.2.4 (3)に示した。なお、Fig.3.2.2 (a)は製品内の最弱部品の衝撃応答を 1 自由度のばね-質量系でモデル化したときの正弦半波衝撃パルスに対する製品の DBC を表す模式図であり、Fig.3.2.2(b)は製品の SRS (以下、SRS と呼ぶ) に突起状の変化が現れるときの DBC の模式図である。そして、Fig.3.2.2(c)は製品の SRS に階段状の変化が現れるときの DBC の模式図である。

ここで、保証範囲を表すパラメータとして、作用時間ではなく、速度変化としたのは、製品の衝撃応答は作用時間により大きく依存するが、現実の落下衝撃を考えた場合、この速度変化は落下高さとの相関性が高く、製品規格を決める場合、非常に都合がよいためである。製品が自由落下したとき、反発係数を r とすると、想定される落下高さの最大値を H_{\max} とそのときの速度変化 ΔV_{\max} の関係は次式で与えられる。

$$\Delta V_{\max} = (1+r) \sqrt{2gH_{\max}} \quad (3.2.1)$$

ただし、 g は重力加速度である。また、 r は 0 から 1 の範囲内にあり、不明の場合は、速度変化が十分に大きくなるように r を 1 とする。包装貨物のように緩衝材が使用されており、その緩衝材の r がすでに計測 (JIS K 6400-1997 に準拠) されている場合、そのデータを用いることができる。一般に、プラスチック製緩衝材を介して衝撃が加わる場合、 r はおよそ 0.3~0.7 である。

以上述べたような JIS C0041 の問題を解決するために、次のような新評価法の提案を行う。Fig.3.2.2 中で示したすべての×、○部で試験を行うことにより、速度変化依存性や逆転現象が発生する場合、たとえば、図中の×を含む斜線部の範

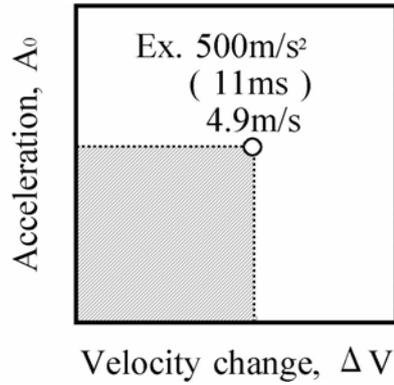
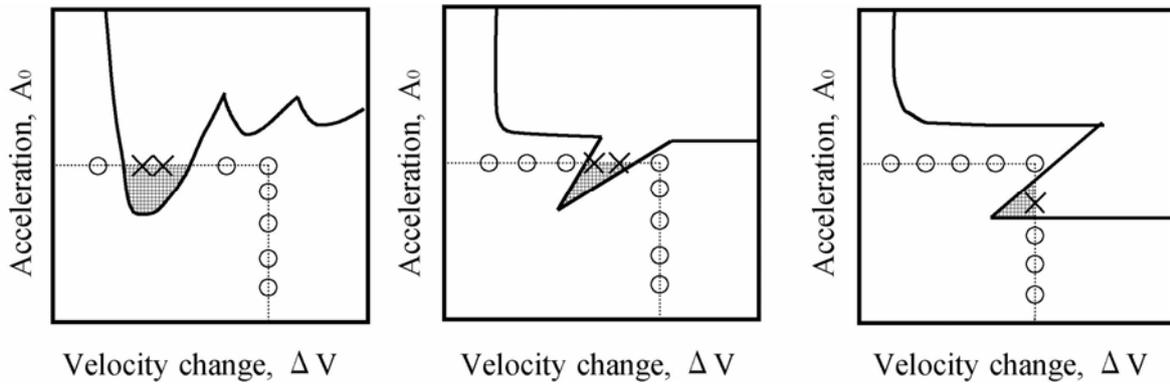
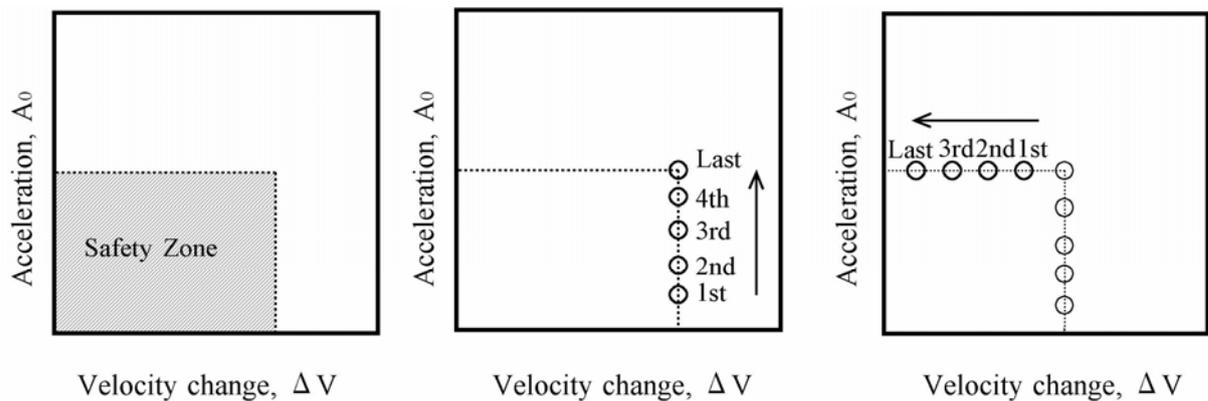


Fig.3.2.1 Region of the severity of shock pulse where we want to guarantee that products are never damaged.



- (a) Dependency on velocity change
Ex. Input shock response is a half-sine shock pulse.
- (b) Dependency on velocity change
Ex. Model-A and 4P for a rectangular shock pulse.
- (c) Reverse phenomenon
Ex. Model-A and 4P for a Rectangular shock pulse.

Fig.3.2.2 Test methods for checking the region to be able to guarantee non-damage of products.



- (a) To define the safety zone as a specification of the product. (b) To increase the acceleration of the input shock pulse. (c) To decrease the velocity change of the input shock pulse.

Fig.3.2.3 Procedure of the new test method, "Checking method of safety zone".

図のような、製品が破損する衝撃パルスが存在することが確認できる。しかし、この方法でも、これらの点と点の間をくぐり抜けるように DBC が往復する可能性が残るが、試験を行う点を増やすことにより、試験の信頼性を上げることができる。ただし、同じ試料に対してあまり多くの回数の衝撃を加えると疲労の蓄積により逆に試験の精度が低下してしまう可能性があるため、適当な試験回数に設定することが望ましい。

3.2.2 保証範囲確認試験の手順

提案する保証範囲確認試験の具体的な手順は以下のとおりである。

- ①製品規格として必要な、Fig.3.2.3(a)に示すような保証範囲を決定する。このとき保証すべき速度変化は、輸送中または使用中に想定される最大落下高さから、式(3.2.1)を用いて算出することができる。
- ②衝撃パルスの波形を決定する。実際に製品に加わる衝撃パルスの形状、衝撃試験機の性能などを考慮に入れ、より現実的な波形を選択する。

- ③保証範囲内の最大速度変化の衝撃パルスにて試験を行う（速度変化：一定、加速度：徐々に増加）。このとき、Fig.3.2.3(b)に示すように、試験機が発生できる最低の加速度の衝撃パルスから始め、一定の増分で加速度を上げていき、およそ5回程度で保証範囲の最大加速度に到達させる。
- ④保証範囲内の最大加速度の衝撃パルスにて試験を行う（加速度：一定、速度変化：徐々に減少）。このとき、Fig.3.2.3(c)に示すように、速度変化の下げ幅は一定にし、およそ5回程度で試験機が発生できる最低の速度変化の衝撃パルスに到達させる。
- ⑤最後まで製品に損傷が現れなければ、本範囲を製品が破損しない保証範囲とする。

必要に応じ、製品の底面だけでなく、3方向または6方向、さらに、製品の稜線部、角部についても同様の試験を行う。

3.3 DBC 評価法の考案

3.3.1 JIS Z 0119 の問題点および解決方法

JIS Z 0119 および ASTM D 3332 で規定されている試験方法の概略は次のとおりである。製品の DBC が Fig.3.3.1 で示すような形状をしているという仮定に基づき、まず、はじめに作用時間が 3ms 以下の正弦半波衝撃パルスを用いて、十分に小さな速度変化から徐々に速度変化を増し、製品が破損する許容速度変化を求める（許容速度変化試験：方法 A）。次に、衝撃パルスの速度変化を許容速度変化の 1.6 倍以上に設定し、十分に小さな加速度から徐々に加速度を増し、製品が破損する許容加速度を調べる（許容加速度試験：方法 B）。このとき、製品が破損するまでの試験回数は繰り返し衝撃による蓄積疲労の影響を避けるため多くとも 5～6 回が望ましい。

これらの試験方法では、製品の DBC が Fig.3.3.1 で示す形状となるという仮定の上に成立する方法であるため、前章で明らかにした速度変化依存性、あるいは、逆転現象を評価することができない。また、製品に衝撃を加えた後、製品破損の有無のみで判定を行っているため、破損部品（または部位）による衝撃強さの違いが評価できない。すなわち、DBC 交差現象を評価することができない。

以上の問題点を解決するためには、先に見出した 3 つの現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」が現れる製品についても正し

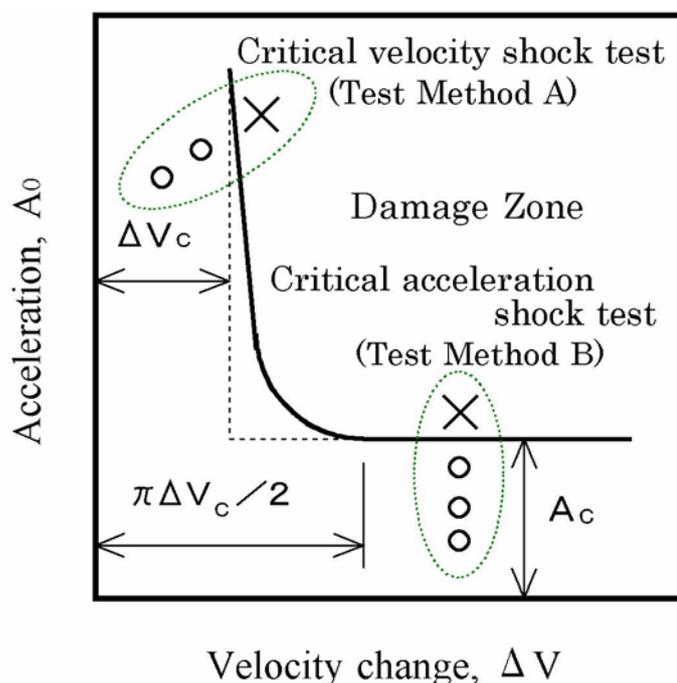


Fig.3.3.1 Damage boundary curve and the present test method, “Mechanical-shock fragility testing methods for packaging and products design.

く衝撃強さを評価するためには、新評価法を構築する必要がある。DBC 交差現象とは、第 2 章で述べたように製品内に破損するおそれのある部品（部位）が複数個存在するのに、ある特定の一部品（部位）が常に破損すると仮定したために現れる現象である。そのため、新評価法では、製品破損を観察する際、製品のどの部品（部位）が破損しているかを記録し、破損するおそれのあるすべての部品（部位）を調査し、各部品（部位）について、それぞれ具体的に DBC を導出する必要がある。また、速度変化依存性および逆転現象とは、製品の DBC が Fig.3.2.2 に示すように複雑な形状となるために現れる現象である。そのため、現評価法のようにあらかじめ DBC の形状を仮定してしまえば、1 自由度のばね質量系とは異なる衝撃応答特性を持つ製品（破損部品（部位））の衝撃強さは把握できない。そこで、製品が破損しない程度の加速度の衝撃パルスを製品に加えたときの、各破損部品（部位）の衝撃応答特性を実測することにより、各破損部品（部位）毎の DBC が具体的に導出できる評価法を構築する。

3.3.2 DBC 評価法の手順

(1) 破損部品（部位）（複数箇所）の確認

製品の輸送中または使用中に想定される最大落下高さから、式(3.2.1)を用いて、最大速度変化が求まる。この最大速度変化での製品の衝撃強さが実用上最も重要であり、評価精度が要求される。そのため、まず、この最大速度変化で許容加速度試験を行う。このとき、最初に加える衝撃パルスの加速度は十分小さな値とし、徐々に大きな加速度の衝撃パルスを加える。その結果、順次破損する製品の部品（部位）を確認し、各破損部品（部位）に記号（ここでは、A, B,・・・とした）を付す。その時の各破損部品（部位）に対する許容加速度（製品が破損しなかった最後の加速度と最初に破損したときの加速度の平均値）をそれぞれ a_{CA}, a_{CB}, \dots とする。入力加速度が十分に高くなるまで試験を続け、破損する可能性のある部品（部位）をすべて把握しておく（Fig.3.3.2 参照）。

(2) 各破損部品（部位）の衝撃応答計測

製品の各破損部品（部位）に、それぞれの破損形態に応じて加速度センサーまたはひずみゲージを貼り付け、入力衝撃パルスの加速度を一定とし各作用時間に対する伝達係数（ただし、伝達係数は、最大衝撃応答を入力衝撃パルスの最大加速度で除した値とし、特に、衝撃応答が加速度のときの伝達係数を加速度伝達率と呼び、衝撃応答がひずみのときの伝達係数をひずみ伝達係数と呼ぶことにする。）を計測する（Fig.3.3.3 参照）。

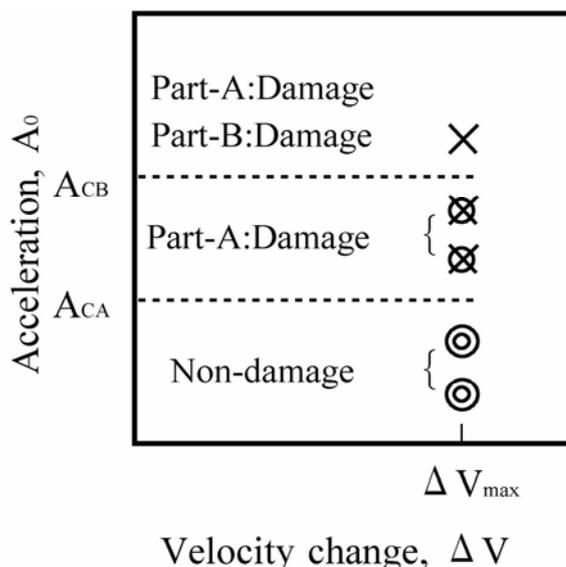


Fig.3.3.2 Search of fragile parts in a product to be damaged by shock pulse.

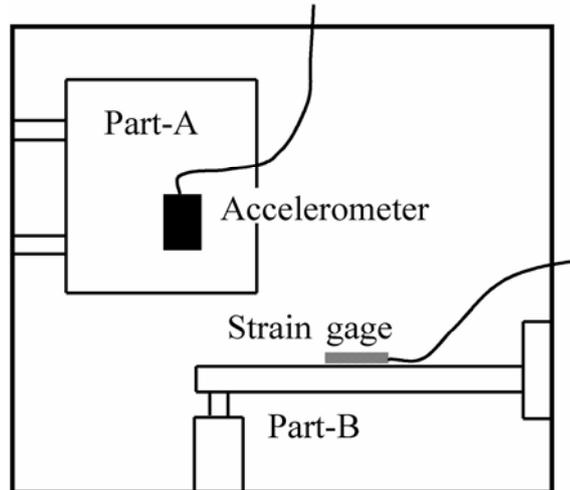


Fig.3.3.3 Attachment of sensors (accelerometer and strain gage) on the damaged parts in a product.

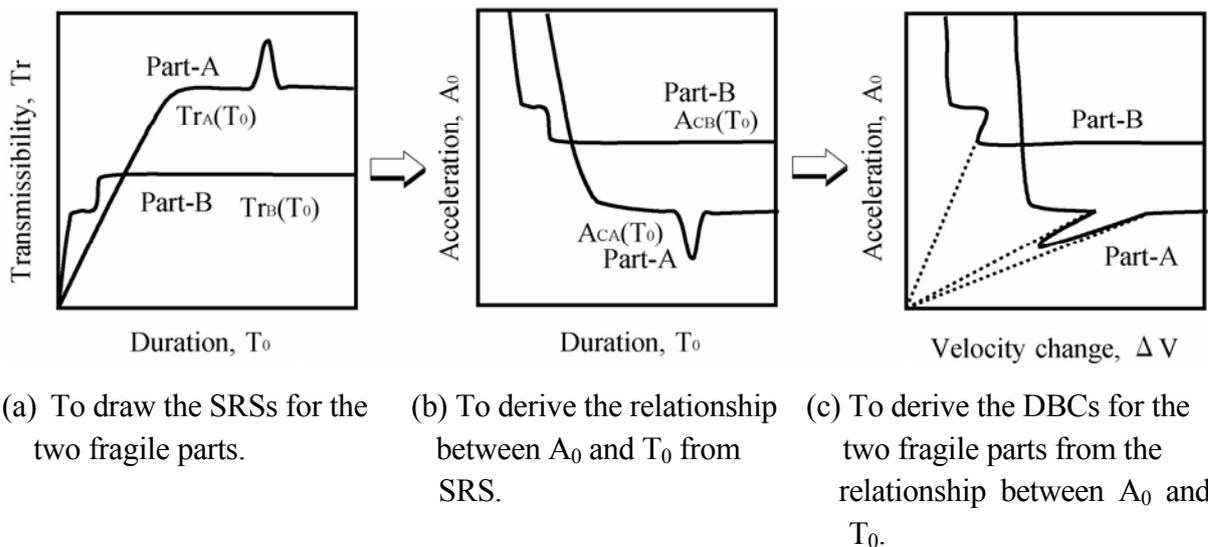


Fig.3.3.4 Transformation from SRS to DBC.

これにより、これらの伝達係数が入力衝撃パルスの加速度に依存しないと仮定すると、衝撃パルスの作用時間と伝達係数の関係が導出できる。その模式図を Fig.3.3.4(a) に示す。SRS の横軸は一般に系の固有振動数と作用時間の積で表されるが、製品の固有振動数は一定であるので、本図は SRS の横軸の固有振動数を固定したときのものとして見なすことができる。したがって、本図から製品の衝撃応答の特性が把握できる。こ

ここで設定した仮定が1自由度のばね-質量系において成立することは、JIS C 0041, JIS Z 0119, IEC 68-2-27 の解説で台形波、正弦半波などの SRS が記されていることから明らかであるが、実際の製品には非線形性を含んだ応答をするものもあり注意が必要である。ただし、1自由度のばね-質量系を理論的基礎としている JIS Z 0119 および ASTM D 3332 と比較すると、SRS を実測している本試験方法の方がより現実的で正確に DBC を予測できることは明らかである。

(3) 破損部品（部位）強度の予測

最大速度変化で、破損部品（部位）ごとの製品の許容加速度を 3.3.2.1 で測定する。そのときの破損部品（部位）A および B (Fig.3.3.3 参照) の許容加速度はそれぞれ A_{Cia} ($i = A, B$) である。また、そのときの速度変化を ΔV_{Cia} ($i = A, B, \dots$) とすると、これら許容加速度に対応する衝撃パルスの作用時間 T_{0ia} ($i = A, B$) は次式より算出できる。

$$T_{0ia} = \Delta V_{Cia} / A_{Cia} \quad (i = A, B, \dots) \quad (3.3.1(a))$$

$$T_{0ia} = (\Delta V_{Cia} / A_{Cia}) \cdot (\pi / 2) \quad (i = A, B, \dots) \quad (3.3.1(b))$$

ただし、添字 0 は衝撃パルスの作用時間であることを表し、添字 i ($i = A, B, \dots$) は破損部品（部位）を表す。また、添字 a は許容加速度試験結果であることを表している。式(3.3.1(a))は、台形波衝撃パルスに関する作用時間の算出方法で、式(3.3.1(b))は、正弦半波衝撃パルスに関するものである。

さらに、3.3.2.2 で測定した各破損部品（部位）A, B の伝達係数 $Tr_i(T_0)$ ($i = A, B, \dots$) と、衝撃パルスの最大加速度から、各破損部品（部位）が受ける加速度およびひずみの最大値が算出される。したがって、部品（部位）A は加速度で破損し、部品（部位）B はひずみで破損すると仮定すると、それぞれの強度 a_{CA}, ε_{CB} は次式により算出できる。

$$a_{CA} = A_{CAa} \times Tr_A(T_{0Aa}) \quad (3.3.2(a))$$

$$\varepsilon_{CB} = A_{CBa} \times Tr_B(T_{0Ba}) \quad (3.3.2(b))$$

各部品単体での試験（衝撃試験、曲げ試験など）によって、 a_{CA}, ε_{CB} が実測できれば、本結果と比較することにより、本評価の信頼度をさらに向上させることができる。

(4) DBC の導出

作用時間 T_0 の衝撃パルスが製品に加えられたときの各破損部品（部位）の伝達係数は $Tr_A(T_0)$, $Tr_B(T_0)$ である（Fig.3.3.4(a)参照）。このとき各破損部品（部位）の許容加速度を $A_{CA}(T_0)$, $A_{CB}(T_0)$ として表すと、これらは次式から算出される。

$$A_{CA}(T_0) = a_{CA} / Tr_A(T_0) \quad (3.3.3(a))$$

$$A_{CB}(T_0) = \varepsilon_{CB} / Tr_B(T_0) \quad (3.3.3(b))$$

これより、破損部品（部位）ごとの許容加速度と衝撃パルス作用時間の関係がわかる（Fig.3.3.4(b)参照）。次に、Fig.3.3.4(b)上の各点での衝撃パルス速度変化を算出すると、Fig.3.3.4(b)を許容加速度－速度変化のグラフに変換でき、DBC が作成できる（Fig.3.3.4(c)参照）。

$$\Delta V_{CA} = A_{CA}(T_0) \times T_0 \quad (\Delta V_{CA} = (A_{CA}(T_0) \cdot T_0) \cdot (2/\pi)) \quad (3.3.4(a))$$

$$\Delta V_{CB} = A_{CB}(T_0) \times T_0 \quad (\Delta V_{CB} = (A_{CB}(T_0) \cdot T_0) \cdot (2/\pi)) \quad (3.3.4(b))$$

上式は、台形波衝撃パルス（ただし、括弧内は正弦半波衝撃パルス）に関する速度変化の算出方法である。

(5) 衝撃の方向

製品の使用環境や構造上最も弱いと思われる方向を考慮して、製品に衝撃を加える方向を決めるが、必要に応じて、3方向または6方向、さらに、稜線方向、角方向についても同様の試験を行い各方向について DBC を作成する。

3.4 DBC 評価法の実験的検証

3.4.1 DBC 評価法による衝撃強さ評価試験

(1) 実験試料および動作・外観確認

市販のビデオカセットレコーダー（以下、VCR と略す）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 3.4.1 に示す。

許容加速度試験では、Table 3.4.2 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する。

(2) 許容加速度試験

JIS Z 0200⁹⁾に貨物質量と輸送レベル、落下高さの関係が記載されているので、これを参考にして試験に用いる衝撃パルスの速度変化を以下のように決定する。

Table 3.4.1 Mass and outer size of specimen (VCR).

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

Table 3.4.2 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

Table 3.4.3 Results of critical acceleration shock test.

A₀ m/s²	ΔV m/s	T₀ 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

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

$$\Delta V_{\max} = (1 + r) \sqrt{2 g H_{\max}} \quad (3.4.1)$$

ただし、 g は重力加速度である。

また、衝撃パルスの加速度は、約 200m/s^2 から始め、 200m/s^2 の増分で 1000m/s^2 になるまで試験を続けた。試験結果を Table 3.4.3 に示す。

破損部品は、歯車（部品 A とする）およびカップラー（部品 B とする）であり、それぞれの破損状況を Fig.3.4.1(b)および Fig.3.4.2(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、破損確率が 50% となる許容加速度を調べることにする（破損確率と DBC の関係については、第 4 章にて詳しく記述する）。そのため、許容加速度を、その部品（部位）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する。また、各許容加速度に対応する作用時間を、その部品（部位）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する。この理由は次のとおりである。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われるため、加速度と作用時間が反比例する。しかし、通常平均により許容加速度と作用時間を算出すると、加速度と作用時間の反比例の関係が成立しなくなる。その対策として、許容加速度については、二つの加速度の平均値を用いて算出し、作用時間に関しては、それぞれの加速度に対応する作用時間についての調和平均（データの逆数に関する平均値の逆数）を算出することにする。これにより、許容加速度とそれに対応する作用時間の間に反比例の関係が成立し、反比例の定数、すなわち、許容加速度試験で設定した速度変化と、許容加速度、作用時間について整合性を保つことができる。このようにして、各部品の許容加速度および作用時間はそれぞれ 684m/s^2 、8.44ms と算出される。

$$A_{CA}(8.44) = 684 \quad A_{CB}(8.44) = 684 \quad (3.4.2)$$

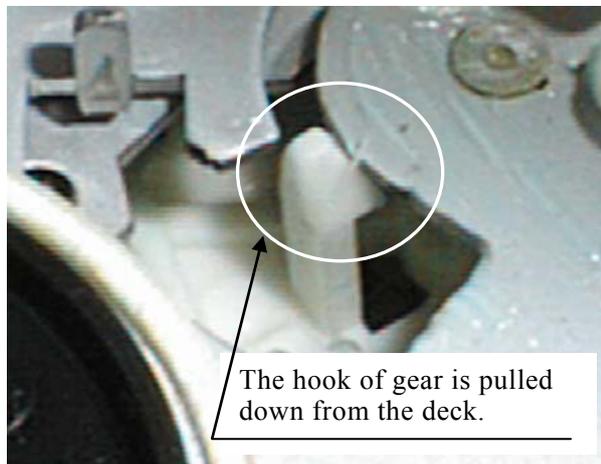
ここに、許容加速度 $A_{Ci}(T)$ ($i = A, B$) の A_C は許容加速度を表し、添字 i (A およ



(a) The gear in the deck of VCR.



The gear is hooked normally.



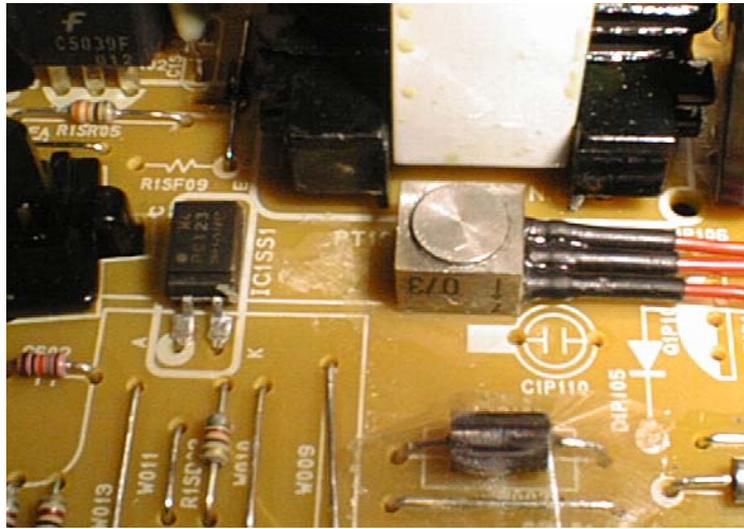
The hook of gear is pulled down from the deck.

(b) The gear pulled down from the deck.

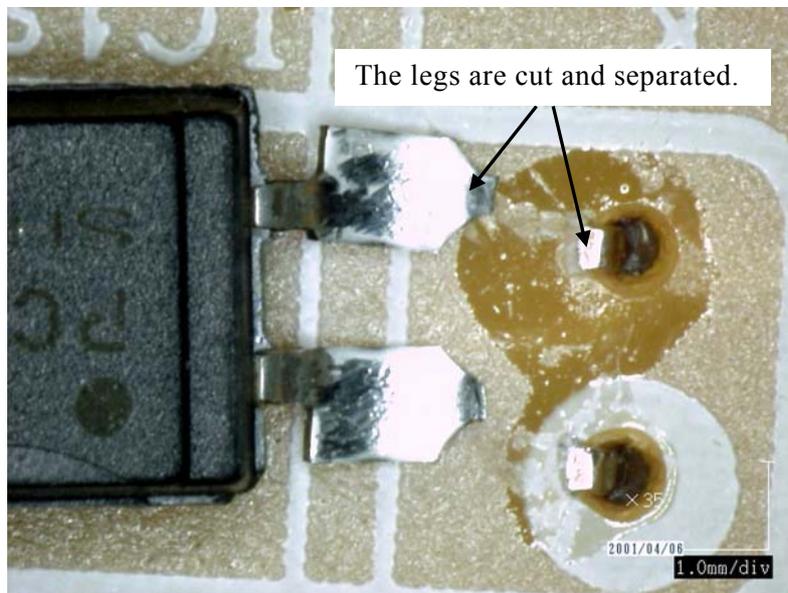


(c) The accelerometer set near the gear.

Fig. 3.4.1 The gear pulled down and the accelerometer set ear the gear.

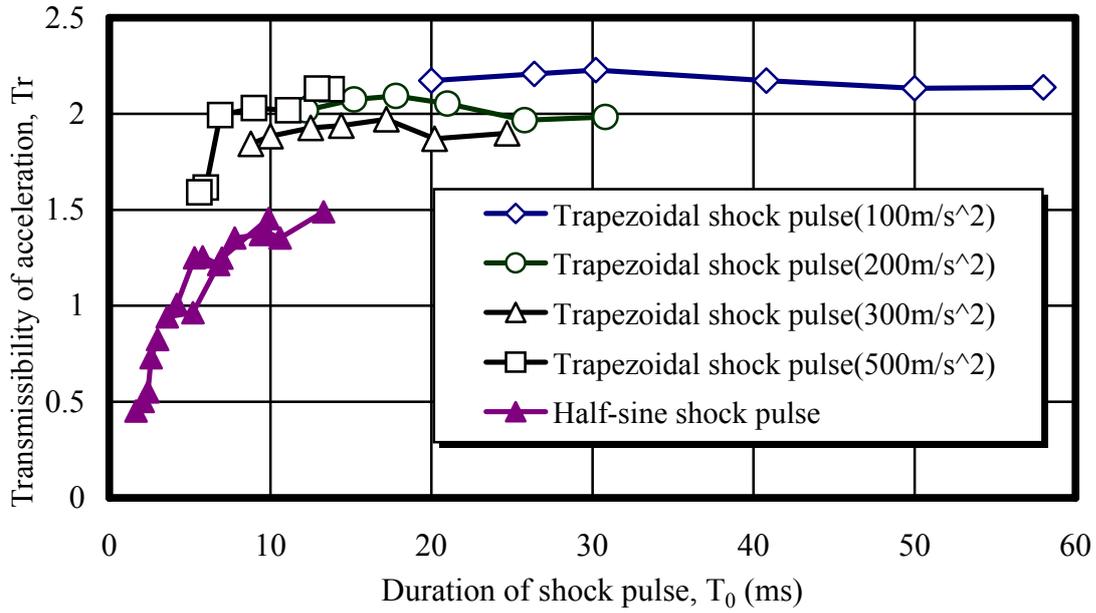


(a) The coupler on the circuit-board and the accelerometer set near the coupler.

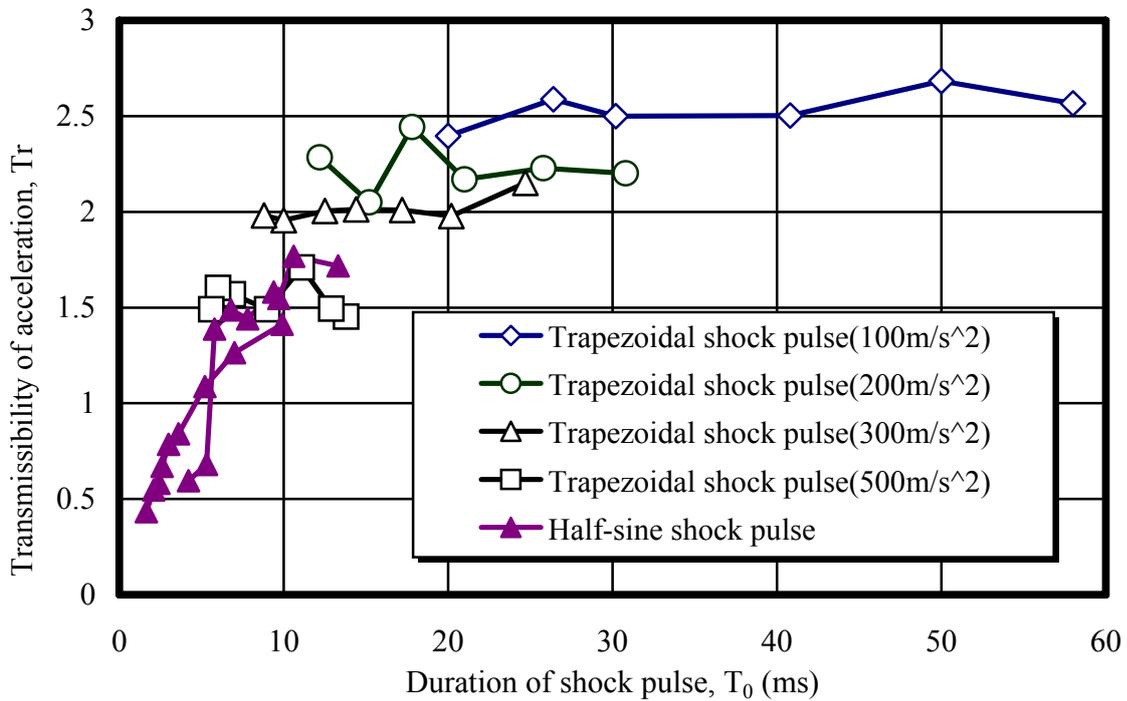


(b) The broken legs of the coupler.

Fig.3.4.2 The broken legs of the coupler and the accelerometer set near the coupler.



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



(b) SRS of the coupler on the circuit-board of VCR.

Fig.3.4.3 Results of SRS measurement on damaged parts.

び B) は破損した部品 (部位) 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) SRS 計測

試料内の各破損部品 (歯車およびカプラー) 付近にそれぞれ加速度センサーを貼り付け (Fig.3.4.1(c)および Fig.3.4.2(a)参照)、次に、試料 (VCR) を衝撃台上に固定する。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する。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率 Tr とし、得られた Tr と作用時間 T の関係 (SRS と称す) を Fig.3.4.3 に示す。

(4) 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 $A_{Ci}(T_{0ia})$ とし、SRS 計測で得られた部品 i の加速度伝達率を $Tr_i(T_0)$ とすると、作用時間 T_0 に対する部品 i の許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ は、次式で得られる。

$$A_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_{0ia}) \times Tr_i(T_{0ia}) / Tr_i(T_0) \quad (3.4.3)$$

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。

$$\Delta V_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_0) \times T_0 \quad (\text{台形波衝撃パルス}) \quad (3.4.4a)$$

$$\Delta V_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_0) \times T_0 \times 2 / \pi \quad (\text{正弦半波衝撃パルス}) \quad (3.4.4b)$$

得られた $A_{Ci}(T_0)$ および $\Delta V_{Ci}(T_0)$ を T の大きさ順にプロットし、直線をつなぐと、Fig.3.4.4 に示す DBC が得られる。

(5) 考 察

a DBC の形状

歯車、カプラー共に、速度変化が約 3.2m/s 付近で、DBC がほぼ垂直となり、1 自由度ばね質量系の 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。

b 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.3.4.3(a)) を見ると、入力衝撃パルスの加速度を 100m/s^2 から 500m/s^2 に変化しても、伝達係数（ここでは、加速度伝達率）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.3.4.3(b)) を見ると、入力衝撃パルスの加速度が 100m/s^2 から 500m/s^2 に変化すると、加速度伝達率が最大約±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場合）、カッ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。

c 問題となる現象の存在

歯車部の SRS (Fig.3.4.3(a)) を見ると、作用時間に対して加速度伝達率の変化は 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、カップラー部の SRS (Fig.3.4.3(b)) を見ると、作用時間に対して加速度伝達率は徐々に増加する傾向にあり、特に作用時間が 50ms では加速度伝達率が約 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。歯車部およびカップラー部の DBC (Fig.3.4.4) 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るためである。ただし、カップラー部には「速度変化依存性」が存在するため、Fig.3.4.4 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。

d 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。

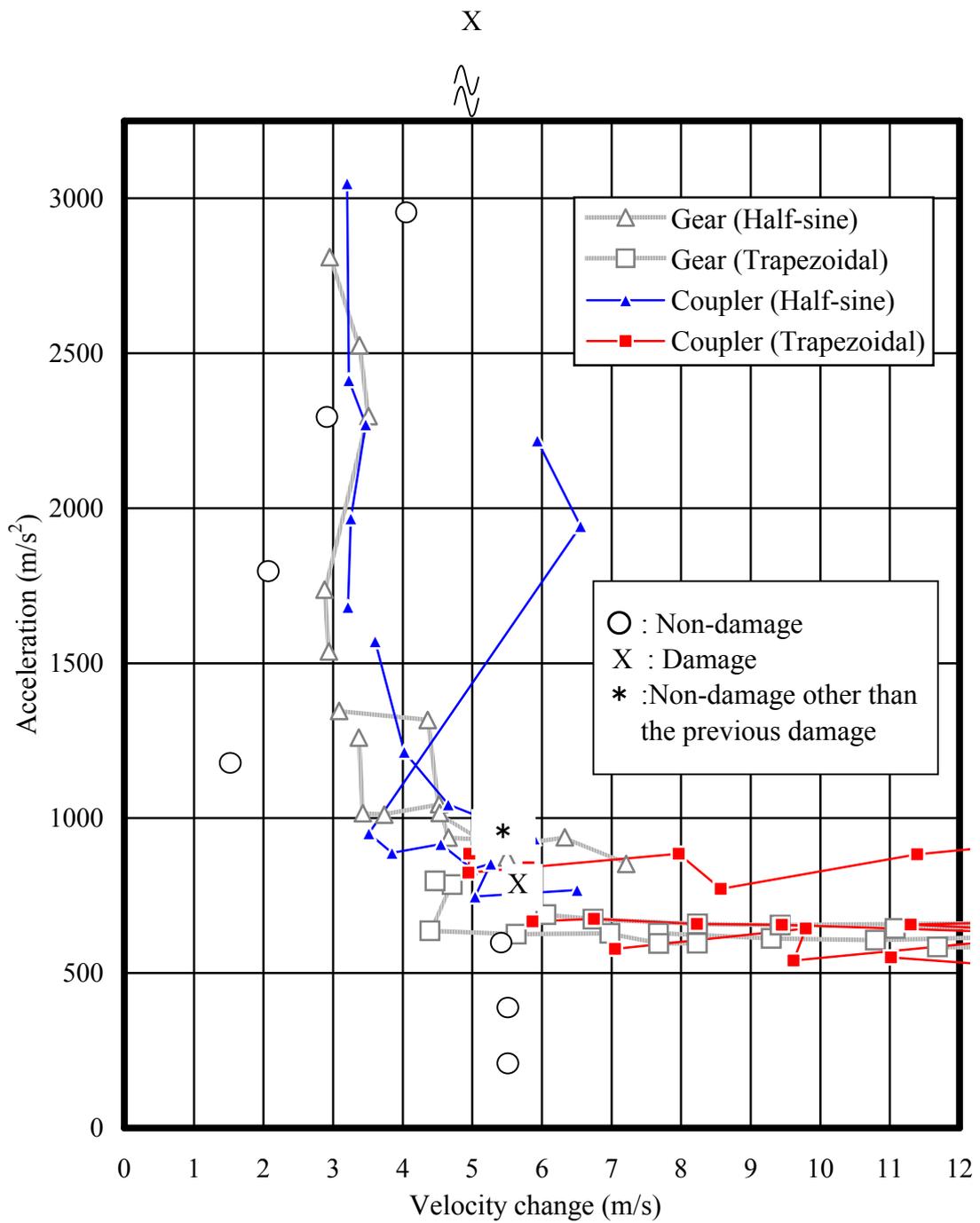


Fig. 3.4.4 DBC of the specimen (VCR) for the each damaged part.

Table 3.4.4 Results of critical velocity shock test.

A₀ m/s²	ΔV m/s	T₀ 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.

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しなければならない。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、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。ただし、プリンターによる結果出力に多くの時間がかかったため、出力方法の見直しにより、多少の時間短縮は可能である。その他、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（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）ため、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。

3.4.2 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 3ms 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 3.4.4 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 3.2m/s）となったが、実際には多少高め（4.96m/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（951m/s²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。

3.5 結 言

現在、規格化されている試験方法では、先に見出した 3 つの現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」が原因となり、製品衝撃強さを誤評価する可能性を明らかにし、その対策として新試験方法を考案した。

製品衝撃試験の規格 JIS C 0041 および IEC 68-2-27 は、ある規定の衝撃パルス

を加え、合否を判断するだけの試験方法であり、規定外の衝撃パルスが製品に加えられたとき、製品破損の有無を予測することができない。そこで、製品が耐える衝撃パルスのきびしさについて保証範囲の概念を導入した「保証範囲確認試験」を考案した。本評価法は、先に見出した現象に対して適用可能であり、製品破損の有無を保証することができる。

製品衝撃強さ試験規格 JIS Z 0119 および ASTM D 3332 は、R. E. Newton により導出された 1 自由度のばね質量系の DBC が理論的な基礎となっているが、現実には、製品の衝撃伝搬経路は複雑であり、DBC の形状も複雑となる。また、これらの試験方法では、破損対象となる部品（部位）は唯一であり、その他の脆弱部品（部位）の存在は想定されていない。しかし、現実には、製品内に複数の脆弱部品（部位）が存在するケースが多く、脆弱部品（部位）毎に DBC を導出する必要がある。以上の点を考慮し、製品内のすべての脆弱部品（部位）について許容加速度および SRS を計測することにより、各破損部品（部位）毎の DBC が導出できる「DBC 評価法」を考案した。これにより、製品の衝撃強さ、すなわち、DBC の部品毎の評価が可能になっただけでなく、先に見出した現象も把握できるようになった。

さらに、考案した DBC 評価法に従って、実製品（ビデオカセットレコーダー）の衝撃強さ評価を行い、本評価法により十分正確に衝撃強さが評価でき、実用上問題ないことを確認した。

参考文献

- 1) たとえば、中嶋隆勝，段積みされた製品の衝撃強さについての検討，神戸商船大学修士論文，(2000)，7-11.
- 2) たとえば、石川，長竹，井門，携帯電話開発へのシミュレーションの適用，FUJITSU, **51**, 5, (09,2000), 335-340.
- 3) JIS Z 0119-1994, 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法.
- 4) ASTM D 3332-93, Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines.
- 5) Newton, R. E., Fragility Assessment –Theory and Test Procedure–, (1968), U.S. Naval Post Graduate School.
- 6) Burgess, G. J., Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging

Technology and Science, Vol. 1 (1988), 5.

- 7) JIS C 0041-1995, 環境試験方法—電気電子—衝撃試験方法.
- 8) IEC 68-2-27, Basic environmental testing procedures Part2: Tests-Test Ea and guidance-Shock.
- 9) JIS Z 0200-1999, 包装貨物—評価試験通則.

第4章 確率 DBC 評価法

4.1 緒言

第3章では、ある一台の試料について、第2章で見出した3つの現象が現れても十分に精度良く製品の衝撃強さを評価できる評価法について検討した。しかし、製品の衝撃強さにばらつきがある場合、これらの評価法では、市場に出荷される数多くの製品について衝撃強さを把握することはできない。また、現在の製品衝撃強さ評価法を築き上げてきた、R.E.Newton¹⁾、および、G.J.Burgess²⁾らによっても、これらのばらつきを評価する手法に関する研究は行われていない。しかし、市場に大量に出荷される製品のばらつきを調べ、製品の破損確率を考慮した衝撃強さ評価の重要性は明らかであり、対策を講じる必要がある。そこで、DBC 評価法に確率論を導入することにより、製品の破損確率に応じた DBC が導出できる新評価法（以下、確率 DBC 評価法と呼ぶ）の開発に取り組んだ。また、確率 DBC 評価法の実用性を確認する目的で、ミニフロッピーディスクの衝撃実験を行い、実製品の確率 DBC を導出し、製品衝撃強さのばらつきの把握を試みた。そして、確率 DBC の分析結果から、市場において現実に発生する製品の破損クレームが、実験室で行われる製品衝撃強さ試験では発生しないという現象（以下、市場クレームの非再現性と呼ぶ）を発見し、その発生メカニズムを解明した。

4.2 DBC 評価法への確率論の導入

4.2.1 製品衝撃強さのばらつき

製品衝撃強さにばらつきをもたらす要因として次の二点が考えられる。一つは、破損する部品（部位）そのものの強度のばらつきであり、もう一つは、製品に加わる衝撃パルスが破損部品（部位）に伝搬されるとき伝達特性に関するばらつきである。したがって、製品の衝撃に対する破損確率を把握するためには、まず、製品内の脆弱なすべての部品（部位）の強度およびそのばらつきを調べ、次に、それらの部品（部位）の衝撃応答特性に関するばらつきを調べる必要がある。

本試験方法では、DBC 評価試験と同様、まず、許容加速度試験により、破損部品（部位）とそれらの許容加速度を調べる。次に、強度試験（曲げ試験、圧縮試験、衝撃試験など）によって各部品（部位）の強度およびばらつきを調べる。最後に、各破損部品（部位）の伝達係数（ただし、伝達係数は、最大衝撃応答を入

力衝撃パルスの最大加速度で除した値とし、特に、衝撃応答が加速度のときの伝達係数を加速度伝達率と呼ぶことにする。)を計測し、そのばらつきも調べておく。それらのデータに基づき各破損部品(部位)の確率 DBC を導き出し、衝撃パルスに対する破損確率を算出する。

4.2.2 許容加速度試験

DBC 評価試験と同様に、まず、式(4.2.1)を用いて、製品の輸送中または使用中に想定される落下高さの最大値 H_{\max} と落下時の反発係数 r から、製品に生じる速度変化 ΔV_{\max} を求める。

$$\Delta V_{\max} = (1+r) \sqrt{2gH_{\max}} \quad (4.2.1)$$

次に、試料(製品)を衝撃台上に固定し、算出した最大速度変化で許容加速度試験を行う。このとき、最初に加える衝撃パルスの加速度は十分小さな値とし、徐々に大きな加速度の衝撃パルスを加える。そして、順次破損する製品の部品(部位)を確認し、各破損部品(部位)に記号 i ($i=A, B, \dots$)を付す(Fig.4.2.1 参照)。各破損部品(部位)に対する許容加速度(規定の衝撃パルスを製品に加え、徐々にその加速度を上げたとき、製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の平均値)をそれぞれ $A_{Ci}(T_{0ia})$ ($i=A, B, \dots$)とし、 T_{0ia} ($i=A, B, \dots$)はそれぞれの部品(部位)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する(詳細は、第3章 3.4.1 (2)を参照)。入力加速度が十分に高くなるまで試験を続け、破損する可能性のある部品(部位)をすべて把握しておく。

4.2.3 破損部品(部位)の強度試験(確率論導入)

許容加速度試験で破損したすべての部品(部位)と同等の試料を複数個(破損確率推定の精度に関わるため試料数は多い程良く、少なくとも5個以上が望ましい)用意し、それらの破損状況に応じ、曲げ試験または圧縮試験、衝撃試験を行う。各試験により、破損部品(部位)の許容ひずみ ε_{Ci} ($i=A, B, \dots$)または許容加速度 a_{Ci} ($i=A, B, \dots$)を調べ、それらの平均値 $E(\varepsilon_{Ci})$ または $E(a_{Ci})$ 、および、分散 $V(\varepsilon_{Ci})$ または $V(a_{Ci})$ を算出する。

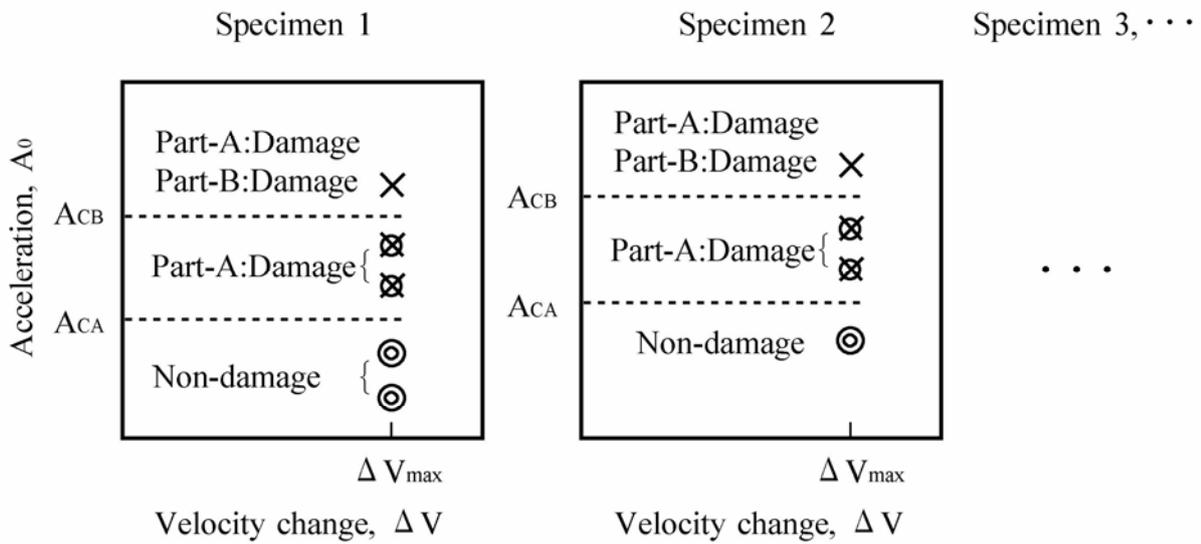


Fig.4.2.1 Search of fragile parts in a product to be damaged by shock pulse and calculation of the average critical accelerations.

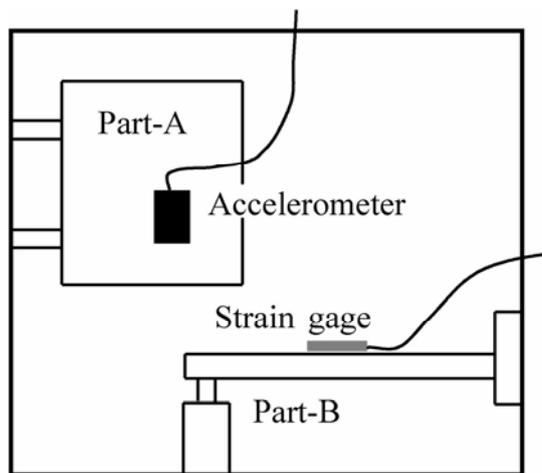


Fig.4.2.2 The attachment of sensors (accelerometer and strain gage) on the damaged parts in a product, and calculation of the average transmissibilities.

4.2.4 SRS の計測（確率論導入）

破損していない新しい試料（製品）を複数個（破損確率推定の精度に関わるため試料数は多い程良く、少なくとも5個以上が望ましい）用意する。そして、全試料に対して、まず、許容加速度試験で破損したすべての部品（部位）に加速度センサーまたはひずみゲージを貼付する（Fig.4.2.2 参照）。次に、試料（製品）を衝撃台上に固定し、低加速度でさまざまな作用時間（衝撃試験機の可能な全範囲）の衝撃パルスを衝撃台に発生させ、それらの衝撃応答を計測する。得られたデータに基づき、最大応答加速度またはひずみを入力最大整形加速度で除したものを伝達係数 Tr_i ($i=A, B, \dots$) とし、作用時間毎に、 $Tr_i(T_0)$ の平均値 $E(Tr_i(T_0))$ および分散 $V(Tr_i(T_0))$ を算出する。これにより衝撃応答スペクトル（以下、SRS と呼ぶ）が作成できる。一般に、SRS の縦軸は加速度伝達率であり、横軸は固有振動数と作用時間の積である。しかし、ここでは、製品の固有振動数を測定しないため、横軸を衝撃パルスの作用時間とした。

4.2.5 確率 DBC の導出

(1) 破損部品（部位）強度と伝達係数の関係

4.2.3 および 4.2.4 より、製品内の破損部品（部位）の強度 (a_{ci} または ϵ_{ci}) および伝達係数 $Tr_i(T)$ がわかったので、次式により、各破損部品（部位）に対する製品の許容加速度が算出できる。

$$A_{ci}(T_0) = a_{ci} / Tr_i(T_0) \quad (i = A, B, \dots) \quad (4.2.2)$$

また、このときの速度変化はその衝撃パルスの波形毎に次式で算出される。

$$\Delta V_{ci}(T_0) = A_{ci}(T_0) \cdot T_0 \quad (\text{台形波衝撃パルス}) \quad (4.2.3a)$$

$$\Delta V_{ci}(T_0) = A_{ci}(T_0) \times T_0 \times 2 / \pi \quad (\text{正弦半波衝撃パルス}) \quad (4.2.3b)$$

以上のように、製品の許容加速度は、破損部品（部位）の強度 a_{ci} と伝達係数 $Tr_i(T)$ の関数で表すことができる。次に、 a_{ci} および $Tr_i(T_0)$ の平均値および分散から $A_{ci}(T)$ の平均値および分散を算出する方法を検討する。

(2) 独立 2 変数関数の平均値および分散

互いに独立な 2 変数 x_1, x_2 の平均値 μ_{xi} ($i = 1, 2$) および分散 σ_{xi}^2 ($i = 1, 2$) が既知の場合、関数 $y = g(x_1, x_2)$ の平均値 μ_y および分散 σ_y^2 は次のように導き出される³⁾。この導出過

程で関数 $g(x_1, x_2)$ が 1 次近似されており、その精度に関する検討が必要である。しかし、輸送包装において一般的に確保されている試料数は少なく、現段階で信頼性に関してそれほど厳しい評価精度が要求されていない。このような状況から判断して、本研究では、一次近似が妥当であるとみなすことにする。

変数 (x_1, x_2) の同時確率密度関数を $f(x_1, x_2)$ とし、周辺確率密度関数をそれぞれ $f_1(x_1)$, $f_2(x_2)$ とすると、 x_1 と x_2 は互いに独立なので次式が成立する。

$$f(x_1, x_2) = f_1(x_1) f_2(x_2) \quad (4.2.4)$$

また、 $g(x_1, x_2)$ を一次近似し、次式が成り立つものとする。

$$g(x_1, x_2) \doteq g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}) + \sum_{i=1}^2 (\partial g / \partial x_i)_{\mathbf{x}} (x_i - \mu_{x_i}) \quad (4.2.5)$$

ただし、 $\sum_{i=1}^2$ は、 $i=1,2$ についての総和を表す。

平均値の定義にしたがって、平均値 μ_y は次式で表される。

$$\mu_y = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x_1, x_2) f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (4.2.6)$$

式(4.2.5)を式(4.2.6)に代入し、整理すると、次式が導出される。

$$\begin{aligned} \mu_y \doteq & g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \\ & + \sum_{i=1}^2 [(\partial g / \partial x_i)_{\mathbf{x}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{x_i f(x_1, x_2) - \mu_{x_i} f(x_1, x_2)\} dx_1 dx_2] \end{aligned} \quad (4.2.7)$$

さらに、確率密度関数の全区間での積分値が 1 という性質から上式第 1 項の積分値は 1 となる。また、平均値の定義式から、第 2 項は 0 となる。その結果、次式が導かれる。

$$\mu_y \doteq g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}) \quad (4.2.8)$$

分散 σ_y^2 は次式で表される。

$$\sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{g(x_1, x_2) - \mu_y\}^2 f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (4.2.9)$$

式(4.2.5)および式(4.2.7)を式(4.2.8)に代入し、整理すると、

$$\sigma_y^2 \doteq \sum_{i=1}^2 \{(\partial g / \partial x_i)_{\mathbf{x}}\}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_{x_i})^2 f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \} + 2(\partial g / \partial x_1)_{\mathbf{x}}^2$$

$$\times (\partial g / \partial x_2)_{\mathbf{x}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - \mu_{x1})(x_2 - \mu_{x2}) f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (4.2.10)$$

となる。さらに、式(4.2.4)を代入し、第1項を分散の定義式を用いて整理し、第2項を平均値の定義式などを用いて整理すると、第2項は0となる。その結果、次式が導かれる。

$$\sigma_y^2 \doteq \sum_{i=1}^2 \{ (\partial g / \partial x_i)_{\mathbf{x}}^2 \sigma_{x_i}^2 \} \quad (4.2.11)$$

(3) 製品の許容加速度の平均値および分散

製品の許容加速度の平均値および分散をそれぞれ式(4.2.8)および式(4.2.11)を用いて算出する。式(4.2.2)を $y = g(x_1, x_2)$ にあてはめると、許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ は、

$$A_{Ci}(T_0) = g(a_{Ci}, Tr_i(T_0)) = a_{Ci} / Tr_i(T_0) \quad (4.2.12)$$

として表せる。

次に、式(4.2.8)を用いて、許容加速度の平均値 $E(A_{Ci}(T_0))$ を導出する。

$$\begin{aligned} E(A_{Ci}(T_0)) &\doteq g(E(a_{Ci}), E(Tr_i(T_0))) \\ &= E(a_{Ci}) / E(Tr_i(T_0)) \end{aligned} \quad (4.2.13)$$

また、点 $\mathbf{x} = (E(a_{Ci}), E(Tr_i(T_0)))$ とし、式(4.2.11)に代入すると、許容加速度の分散 $V(A_{Ci}(T_0))$ が次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} V(A_{Ci}(T_0)) &\doteq (\partial g / \partial E(a_{Ci}))_{\mathbf{x}}^2 V(a_{Ci}) + (\partial g / \partial E(Tr_i(T_0)))_{\mathbf{x}}^2 V(Tr_i(T_0)) \\ &= \{ V(a_{Ci}) / E(Tr_i(T_0))^2 \} + \{ E(a_{Ci})^2 V(Tr_i(T_0)) / E(Tr_i(T_0))^4 \} \end{aligned} \quad (4.2.14)$$

ただし、 $E(a_{Ci})$ および $V(a_{Ci})$ には 4.2.3 で算出した値を代入し、 $E(Tr_i(T_0))$ および $V(Tr_i(T_0))$ には 4.2.4 で算出した値を代入する。

さらに、許容加速度試験結果 $A_{Ci}(T_{0ia})$ とそれに対応する伝達係数の平均値 $E(Tr_i(T_{0ia}))$ を次式に代入することにより、破損部品(部位)強度を推定することができる。推定値 E_x を $E(a_{Ci})$ と比較することにより、破損部品(部位)強度に関する評価精度が確認できる。

$$E_x = A_{Ci}(T_{0ia}) E(Tr_i(T_{0ia})) \quad (4.2.15)$$

また、破損部品（部位）の強度試験結果の平均値 $E(a_{Ci})$ および分散 $V(a_{Ci})$ を式(4.2.16)に代入し、得られた変動係数 η と、式(4.2.15)で得られた破損部品（部位）の推定値 E_x を式(4.2.17)に代入することにより、破損部品（部位）強度の分散を推定することができる。推定値 V_x を $V(a_{Ci})$ と比較することにより、破損部品（部位）強度の分散に関する評価精度が確認できる。

$$\eta = \sqrt{V(a_{Ci})} / E(a_{Ci}) \quad (4.2.16)$$

$$V_x = (E_x \cdot \eta)^2 \quad (4.2.17)$$

(4) 破損確率の推定

4.2.5.3において、製品の許容加速度の平均値および分散が算出できるようになった。ここでは、製品の許容加速度が正規分布³⁾またはワイブル分布³⁾に従うと仮定することにより、製品の確率 DBC を導き出す。

a 正規分布を用いた推定

標準正規分布の分布関数 $\Phi(u)$ より、下側確率およびパーセント点³⁾は次のとおりである。

Table 4.2.1 Probability and percent point of normal standard distribution

Probability	Percent point
0.5 (50%)	0
0.1 (10%)	-1.28
0.001 (0.1%)	-3.09

これにより、製品の部品（部位） i に関する破損確率が 50%,10%,0.1%となる確率 DBC 上の点の座標 ($\Delta V_C, A_{Ci}$)が次のように算出できる。

破損確率 50%となる許容加速度

$$A_{Ci} = E(A_{Ci}(T_0)) \quad (4.2.18a)$$

破損確率 10%となる許容加速度

$$A_{Ci} = E(A_{Ci}(T_0)) - 1.28 \sqrt{V(A_{Ci}(T_0))} \quad (4.2.18b)$$

破損確率 0.1%となる許容加速度

$$A_{Ci} = E(A_{Ci}(T_0)) - 3.09\sqrt{V(A_{Ci}(T_0))} \quad (4.2.18c)$$

また、各許容加速度および作用時間に対応する速度変化 ΔV_C は式(4.2.3)より求まる。

よって、計測したすべての T に対して上記座標 $(\Delta V_C, A_{Ci})$ がプロットでき、近似曲線をつなぐことにより、各破損部品(部位)に対する確率 DBC が作図できる。さらに、すべての破損部品(部位)に対する確率 DBC を重ね合わせることで、製品全体の確率 DBC が把握できる。

また、製品に加速度 A_0 作用時間 T_0 の衝撃パルス(波形は許容加速度試験および衝撃応答計測で用いたもの)が入力したときの、各破損部品(部位)についての破損確率 $P_i(A_0, T_0)$ は標準正規分布関数 $\Phi(u)$ を用いて次のように算出できる。

$$P_i(A_0, T_0) = \Phi((A_0 - E(A_{Ci}(T_0))) / \sqrt{V(A_{Ci}(T_0))}) \quad (4.2.19)$$

これより、製品全体の破損確率 $P(A_0, T_0)$ は次式により算出できる。

$$P(A_0, T_0) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - P_i(A_0, T_0)) \quad (4.2.20)$$

ただし、 $\prod_{i=1}^2$ は、 $i=1, 2$ についてのすべての積を表す。

b ワイブル分布を用いた推定

一般に、変動係数 η とワイブル分布形状母数 α には次の関係が成り立つ³⁾。

$$\eta \doteq \alpha^{-0.93} \quad (4.2.21)$$

また、破損部品(部位) i についての作用時間 T の衝撃パルスに対する許容加速度の変動係数を $\eta_i(T_0)$ とすると、次式(変動係数の定義式)に平均値 $E(a_{Ci}(T_0))$ および分散 $V(a_{Ci}(T_0))$ を代入することにより、 $\eta_i(T_0)$ が求まる。

$$\eta_i(T_0) = \sqrt{V(A_{Ci}(T_0))} / E(A_{Ci}(T_0)) \quad (4.2.22)$$

式(4.2.21)および式(4.2.22)より、破損部品(部位) i についての作用時間 T に対する形状母数 $\alpha_i(T)$ が求まる。

$$\alpha_i(T_0) \doteq \{\sqrt{V(A_{Ci}(T_0))} / E(A_{Ci}(T_0))\}^{-1/0.93} \quad (4.2.23)$$

また、一般に平均値 μ とワイブル分布の形状母数 α 、尺度母数 β には次の関係が成り立つ³⁾。

$$\mu = \beta \Gamma(1 + 1/\alpha) \quad (4.2.24)$$

ただし、 $\Gamma()$ は、ガンマ関数である。

式(4.2.23)および式(4.2.24)より、破損部品（部位） i についての作用時間 T_0 に対する尺度母数 $\beta_i(T_0)$ が求まる。

$$\beta_i(T_0) = E(A_{Ci}(T_0)) / \Gamma(1 + 1/\alpha_i(T_0)) \quad (4.2.25)$$

式(4.2.23)および式(4.2.25)より、ワイブル分布関数³⁾のすべての母数（ $\alpha_i(T_0)$ および $\beta_i(T_0)$ ）が決定した。よって、これらをワイブル分布関数に代入することにより、破損部品（部位） i についての作用時間 T_0 、加速度 A_0 の衝撃パルス（波形は許容加速度試験および衝撃応答計測で用いたもの）に対する破損確率 $P_i(A_0, T_0)$ が次式のとおり算出できる。

$$P_i(A_0, T_0) = 1 - \exp[-\{a/\beta_i(T_0)\}^{\alpha_i(T_0)}] \quad (4.2.26)$$

さらに、製品全体の破損確率 $P(A_0, T_0)$ は式(4.2.20)により算出できる。

次に、破損確率が P となる確率 DBC の導出について検討する。式(4.2.26)を変形して A_0 を求める形にし、 $P_i(A_0, T_0)$ に P を代入すれば、破損確率が P となる許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ を次のとおり導き出せる。

$$A_{Ci}(T_0) = \beta_i(T_0) \{-\log_e(1-P)\}^{1/\alpha_i(T_0)} \quad (4.2.23)$$

このときの速度変化 ΔV_c は式(4.2.3)より算出できる。以上のとおり、破損確率が P となる許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ およびそのときの速度変化が算出でき、これにより確率 DBC を描くことができる。

4.3 実製品の確率 DBC の推定

Fig.4.3.1 に示すフロッピーディスク装置については、第2章および第3章で、SRS を計測しており、許容加速度に速度変化依存性があることも確認している。ここでは、SRS データ（ただし、作用時間 6~15ms についての加速度伝達率は本章で新規に計測したものであり、入力加速度はそれぞれ約 200, 300, 600m/s² とし

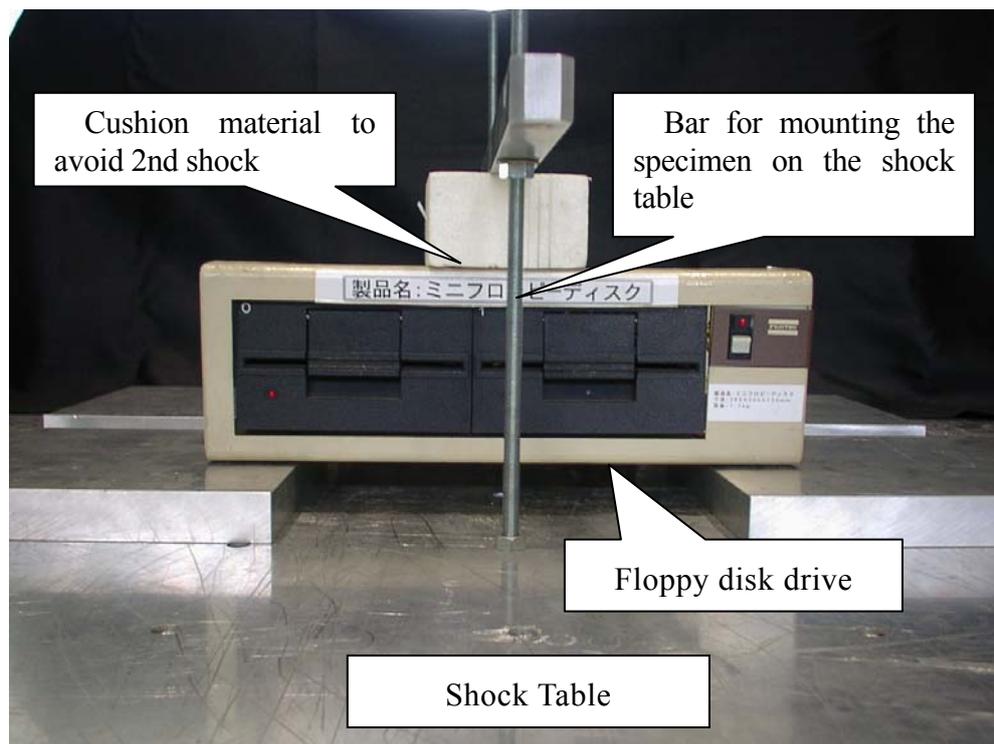


Fig.4.3.1 The specimen (Floppy disk unit) mounted on the shock table.

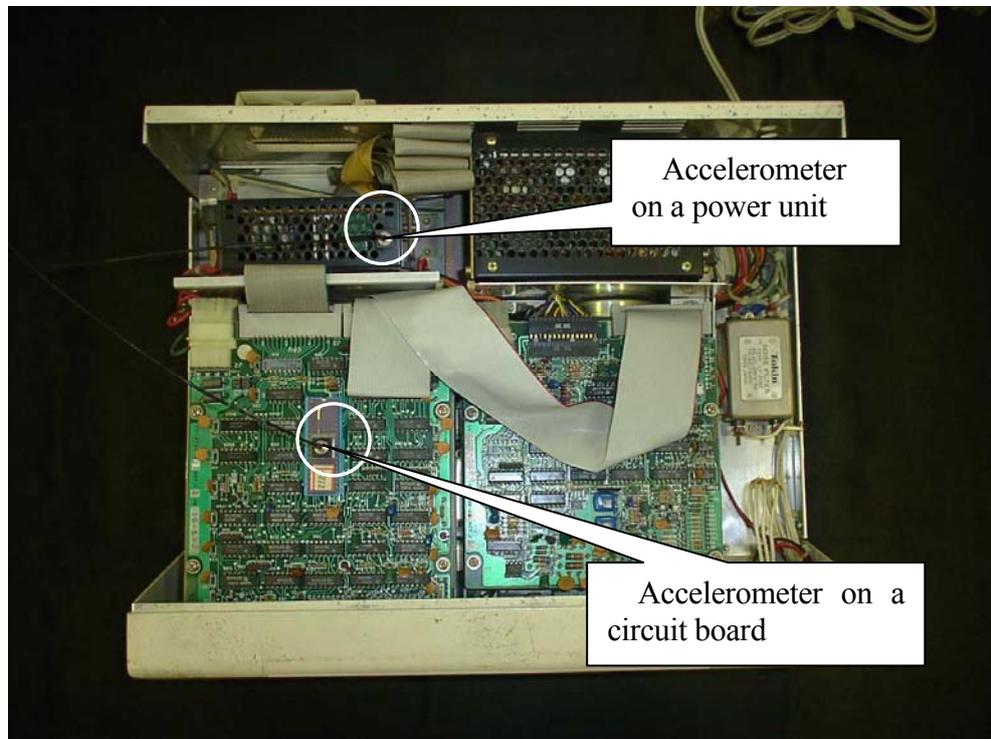


Fig.4.3.2 Accelerometers set on a power unit and on a circuit board of Floppy disk drive.

ている)を用いて、実際の製品の確率 DBC を導出する。ただし、許容加速度試験および破損部品(部位)の強度試験は実際には行っていないため、確率 DBC 導出に必要なデータ ($E(a_{Ci})$ 、 $V(a_{Ci})$ など)を仮の値に設定した。さらに、SRS は、5 台以上の試料について計測するように 4.2.4 に記載したが、ここでは、同一の試料について各 5 回計測を行い、そのデータに基づいて $Tr_i(T)$ の平均値および分散を算出した。

4.3.1 破損部品(部位)および $A_{Ci}(T_{0ia})$ の設定

許容加速度試験を速度変化 5.0m/s(この値は反発係数 0.3 での高さ約 75cm からの落下に相当する)にて行った結果、製品(フロッピーディスク装置)の電源部 ($i=A$)が初めに破損し、次に、電子基板部 ($i=B$)が破損したと仮定した。さらに、その時の $A_{CA}(T_{A0a})$ および $A_{CB}(T_{B0a})$ はそれぞれ 450m/s^2 、 300m/s^2 と仮定した。

4.3.2 $E(a_{Ci})$ 、 $V(a_{Ci})$ の設定

破損部品(部位)強度のばらつきが各部品(部位)への加速度伝達率のばらつきに比べ十分に小さいと仮定し、ここでは、 $V(a_{Ci})$ を 0 と設定した。また、 $E(a_{Ci})$ は式(4.2.15)に 4.3.1 で設定した値 $A_{CA}(T_{0A})$ 、 $A_{CB}(T_{0B})$ 、および、次の 4.3.3 で得られる値 $E(Tr_i(T_{0i}))$ を代入して算出する。

4.3.3 SRS の計測

Fig.4.3.1 で示したフロッピーディスク装置(試料)内の電源部および電子基板部に加速度センサーを取り付けた状態で(Fig.4.3.2 参照)、試料に衝撃パルスを加え、各部品に伝搬する加速度を計測した。伝搬した加速度の最大値を入力した衝撃パルスの加速度の最大値で除した値を加速度伝達率とし、同じ衝撃パルスに対する応答を各 5 回ずつ計測し、加速度伝達率の平均値 $E(Tr_i(T_0))$ および分散 $V(Tr_i(T_0))$ を算出した。Fig.4.3.3 にその結果(SRS)を示す。図中のプロットは $E(Tr_i(T_0))$ であり、 $V(Tr_i(T_0))$ より算出した各データの 95%信頼区間も示している。本図より、加速度伝達率のばらつきは、電子基板部よりも電源部の方が大きいことが確認できる。

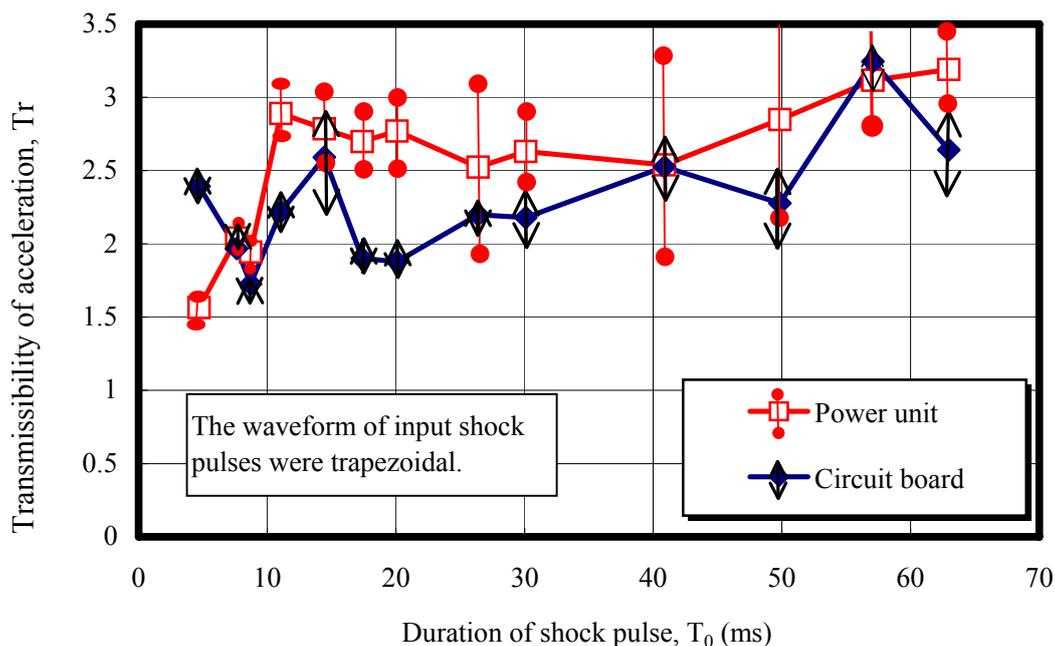


Fig.4.3.3 SRS and its 95% confidence interval of power unit and circuit board.

4.3.4 実製品の確率 DBC

ここでは、製品の許容加速度のばらつきが正規分布に従っていると仮定し確率 DBC を導出する。4.3.2 では各破損部品の強度の平均値 $E(a_{ci})$ および分散 $V(a_{ci})$ が決まり、4.3.3 では各破損部品の加速度伝達率の平均値 $E(Tr_i(T_0))$ および分散 $V(Tr_i(T_0))$ が得られた。これらを式(4.3.13)および式(4.3.14)に代入することにより、試料の許容加速度の平均値 $E(A_{ci}(T_0))$ および分散 $V(A_{ci}(T_0))$ を算出した。次に、式(4.3.18a)～式(4.3.18c)に $E(A_{ci}(T_0))$ および $V(A_{ci}(T_0))$ を代入し、設定された破損確率となる許容加速度を算出した。最後に、算出した許容加速度に対応する速度変化を式(4.3.3)から算出し、Fig.4.3.4 に示す確率 DBC を導出した。

4.3.5 「市場クレームの非再現性」の理論的導出

Fig.4.3.4 の確率 DBC より、破損確率 50%では電源部よりも電子基板部の方が低い加速度で破損し、一方、破損確率 0.1%では（速度変化が 5m/s 以上の範囲）、両者の許容加速度にあまり大きな差がないことがわかる。これには、両者の加速度伝達率のばらつきの差が大きく影響している。破損確率が 50%の確率 DBC では、

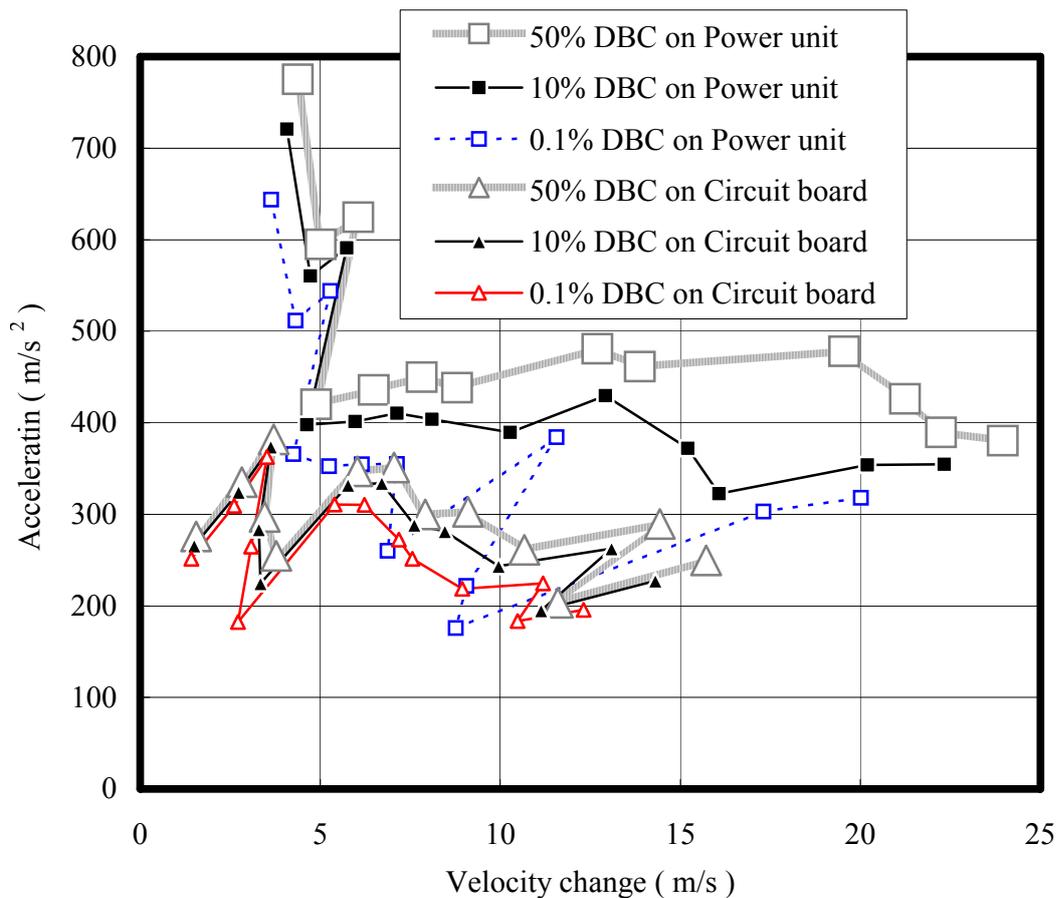


Fig.4.3.4 Probability DBC of a floppy disk unit.

式(4.3.18a)に示すように、製品の許容加速度は、ばらつき（分散）の影響を受けない。そのため、許容加速度は電子基板部よりも部品強度の高い電源部の方が高い値となる。一方、破損確率が0.1%の確率 DBC では、式(4.3.14c)に示すように、製品の許容加速度に、ばらつき（分散）が大きく影響するため、電源部の許容加速度が大幅に低下し、両者の許容加速度に明らかな差がなくなっている。

実際の製品出荷前に行う衝撃試験においても、ばらつきを考慮せずに衝撃強さ評価を行えば、製品の最弱部品は電子基板部のみと判断され、電源部については、その対策を講じることなく出荷されてしまう。これが原因で後にクレームが発生することになる。ここでは、実製品の一例としてフロッピーディスク装置を用い、

破損部品の強度など多くの仮定の上で確率 DBC を導出したが、一般の製品についても同様の問題が発生する可能性がある。

また、逆に、大量の製品がすでに市場に出回っている場合、「市場で一部の製品に発生する破損部品（部位）と、衝撃試験を行った結果、発生する破損部品（部位）とが異なる」という事例、すなわち、市場クレームの非再現性を著者らはこれまでに多く経験し、これらの現象について明快な理論的説明をつけることはできなかった。しかし、確率 DBC 評価法を用いた製品衝撃強さの評価および考察により、「市場クレームの非再現性」が破損部品（部位）の強度および伝達係数のばらつきによって理論的に説明できるようになった。

このように、確率 DBC 評価法は、製品を市場出荷する前段階での「市場クレームの非再現性」の把握を可能にする。したがって、これまでの衝撃強さ評価法では見過ごしてしまう部品（部位）についても、その製品が必要とする信頼度に応じた適切な対策を講じることができ、製品の緩衝包装設計を行う上でも、確率 DBC 評価は有力な評価手段である。

4.4 結 言

市場に大量に出荷される製品全体の衝撃強さを総合的に評価するためには、製品のばらつきを含めた評価精度を向上させる必要がある。そのため、第3章で考案した DBC 評価法に確率論を導入することによって、製品内の各脆弱部品強度のばらつき、および、各脆弱部品への衝撃の伝達特性のばらつきから、設定した破損確率での製品の衝撃強さ、すなわち、確率 DBC を導出する評価法が開発された。また、これまで、「市場クレームの非再現性」が、著者が企業から依頼されて行った数多くの衝撃試験においてしばしば発生しており、その発生原因は不明であった。しかし、確率 DBC 評価法を用いた衝撃強さ評価およびその考察により、「市場クレームの非再現性」の存在が理論的に明らかになっただけでなく、製品出荷の前段階でその現象の発生予測が可能となった。

参考文献

- 1) Newton, R. E., Fragility Assessment –Theory and Test Procedure-, (1968), U.S. Naval Post Graduate School.
- 2) Burgess, G. J., Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging

Technology and Science, Vol. 1 (1988), 5.

3) 市川昌弘, 構造信頼性工学, 海文堂出版, (1988), 11-20.

第5章 「DBC 評価法」 類型の考案および体系化

5.1 緒 言

第3章では、DBC 評価法を考案し、その実用性を確認した。これにより、第2章で見出した3つの現象が現れても、十分に精度良く製品衝撃強さを評価できるようになった。また、第4章では、DBC 評価法に確率論を導入した確率 DBC 評価法を考案した。これにより、市場に出る製品全体について衝撃強さ評価が可能となり、これまで説明不可能であった「市場クレームの非再現性」の理論的導出が可能となった。

しかし、企業が製品衝撃強さ評価を行う上で問題となるのは、評価精度のみとは限らない。破壊できる試料数の不足、あるいは、使用できる試験機や計測機器の制約、各製品への適合性などさまざまな問題が存在する。たとえば、JIS C 0041¹⁾で必要な正弦半波衝撃パルスを発生できる衝撃試験機が広く普及しているが、その作用時間を自由に調整できるタイプは、あまり普及していない。一方、JIS Z 0119²⁾で必要な台形波衝撃パルスを発生できる衝撃試験機は、規格制定後、まだ10年程度であり、規格そのものも十分に普及しているとは言い難い状態である。さらに、衝撃応答の計測に関しては、多少の専門知識がなければ計測機器を使いこなすことが困難なため、計測技術修得に多少の時間が必要である。

本章では、DBC 評価法がより多くの企業で活用され、製品の衝撃破損事故の削減に積極的に寄与するための研究を行った。評価現場で使用可能な設備および要求される評価精度など種々の要求に応じるため、DBC 評価法の類型を数種類考案し、それらの中から、各評価現場・事例に最適な評価法が適切に選択できるよう、それら試験方法の特徴を分類し、体系的にまとめた。

5.2 SRS による DBC の導出法

5.2.1 「 A_c ・SRS 法」

第3章で考案した「DBC 評価法」は A_c (許容加速度) および SRS を測定し、それらのデータから DBC を導出する方法である。ここでは、DBC 導出に用いたデータ名を用いて、「 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。

- ①（許容加速度試験）JIS Z 0119²⁾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品（部位）の許容加速度を把握する。この時、加える衝撃パルスは、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。破損した部品（部位） i ($i=A,B,\dots$) の許容加速度を $A_{Ci}(T_{0ia})$ とし、その時の速度変化を $\Delta V_{Ci}(T_{0ia})$ とする。ただし、添字 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品（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（ただし、伝達係数は、最大衝撃応答を入力衝撃パルスの最大加速度で除した値とし、特に、衝撃応答が加速度のときの伝達係数を加速度伝達率と呼ぶことにする。）を計測し、計測された作用時間 T_0 に対する破損部品（部位） i の伝達係数を $Tr_i(T_0)$ とする。
- ③（DBC 算出）①で得られた $A_{Ci}(T_{0ia})$ を基点として②で得られた $Tr_i(T_0)$ から、任意の作用時間 T_0 における許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ が式(5.2.1)より算出される。また、これに対応する速度変化 $\Delta V_{Ci}(T_0)$ は式(5.2.2)で得られる。

$$A_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_{0ia}) Tr_i(T_{0ia}) / Tr_i(T_0) \quad (5.2.1)$$

$$\Delta V_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_0) T_0 \kappa \quad (5.2.2)$$

ただし、 κ は、衝撃パルス波形が方形波、または、台形波の場合、それぞれ、 $\kappa=1.0$ 、 $\kappa \doteq 1.0$ であり、正弦半波の場合、 $\kappa=2/\pi$ である。

本手法により導出した VCR（ビデオカセットレコーダーの略）の DBC を Fig.5.2.1 に再掲載する。

5.2.2 「 $\Delta V_C \cdot$ SRS 法」

「 $A_C \cdot$ SRS 法」では、許容加速度試験で測定した $A_{Ci}(T_{0ia})$ 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 $A_{Ci}(T_{0iv})$ を基点として DBC を導出することも可能である。「 $A_C \cdot$ 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 $\Delta V_{Ci}(T_{0iv})$ の測定精度よりも $A_{Ci}(T_{0ia})$ の測定精度が重要であるためである。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、 $\Delta V_{Ci}(T_{0iv})$ 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 を導出する方が実質的に精度のよいデータが得られる。本手法は、「 $A_C \cdot$ SRS 法」（5.2.1 参照）の

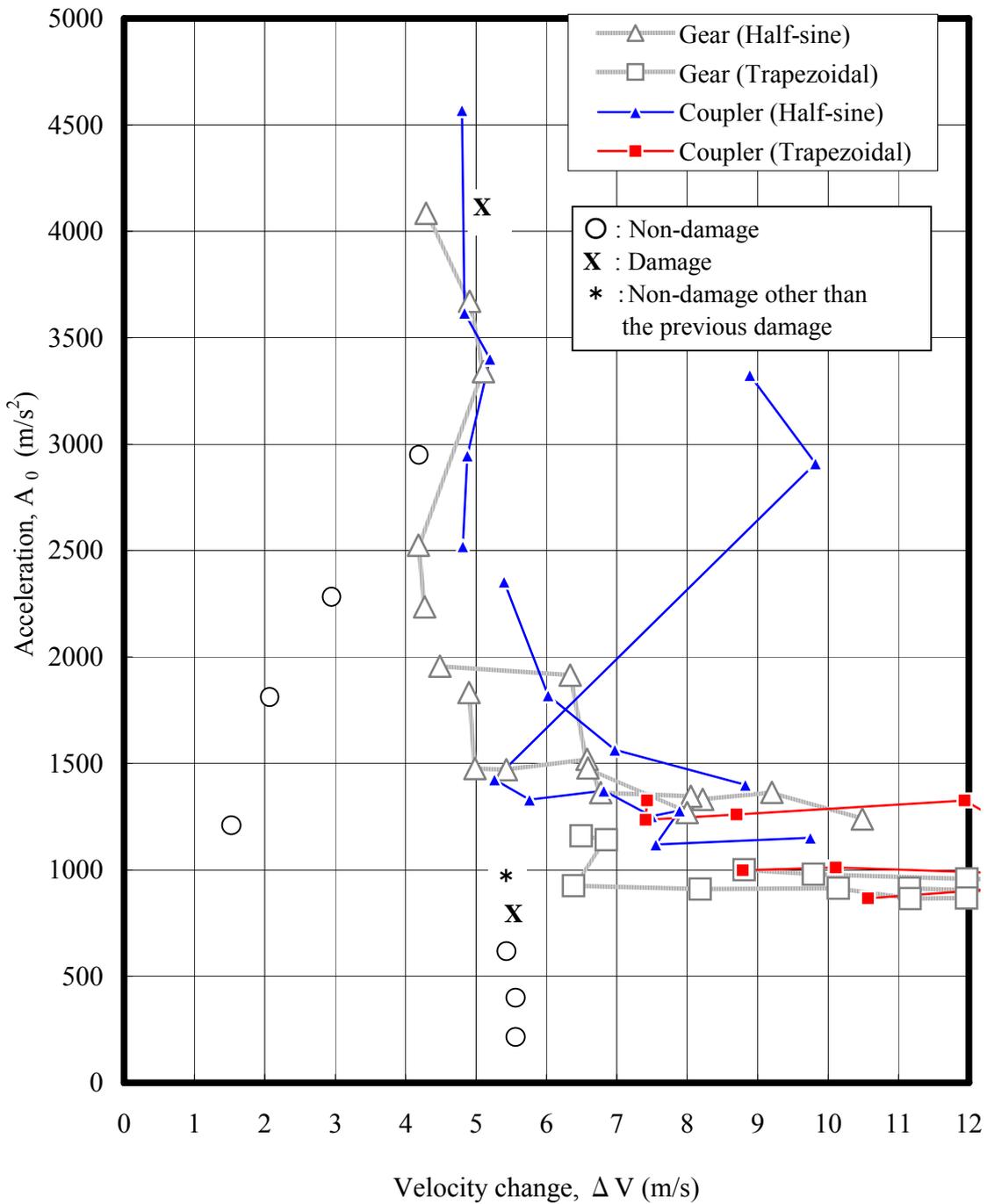


Fig.5.2.2 The DBC derived from ΔVC and SRS according to " $\Delta VC \cdot SRS$ method".

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品（部位）の許容速度変化を把握する。ただし、破損部品（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。また、添字 v は許容速度変化試験結果を表す。

②（SRS 計測） 5.2.1 手順②と同じ。

③（DBC 導出） 5.2.1 手順③と同じ。ただし、 T_{0ia} は T_{0iV} に置き換える。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig.5.2.2 に示す。手順①では、5.2.1 と同型の別試料を用い、手順②では、5.2.1 手順②の結果（SRS データ）を用いた。図中の○、X、*は、許容速度変化試験および許容加速度試験の結果であり、具体的数値を Table 5.3.1 および Table 5.3.2 に示す。

5.3 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 について許容加速度試験を行い破損した部品（部位）について、SRS 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。

5.3.1 実験試料および破損部品（部位）

実験試料（VCR）の質量および外寸法を Table 5.3.3 に示す。また、破損部品は、製品デッキ内の歯車部および基板上のカプラーである。これらの部品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。

5.3.2 固有振動数の計測

試料内の歯車（部品 A）およびカプラー（部品 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 5~100Hz 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、各部品付近に発生する振動を計測した。計測した振動の PSD を Fig.5.3.1 に示す。図より、カプラー（部品 B）部の PSD には、顕著なピーク（46.5Hz, $445\text{m}^2/\text{s}^3$ ）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（部品 A）部の PSD には、ピーク（61.3Hz,

Table 5.3.1 Results of critical acceleration shock test

A₀ m/s²	Δ V m/s	T₀ 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

Table 5.3.2 Results of critical velocity shock test

A₀ m/s²	Δ V m/s	T₀ 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.

Table 5.3.3 Mass and outer size of specimen (VCR)

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

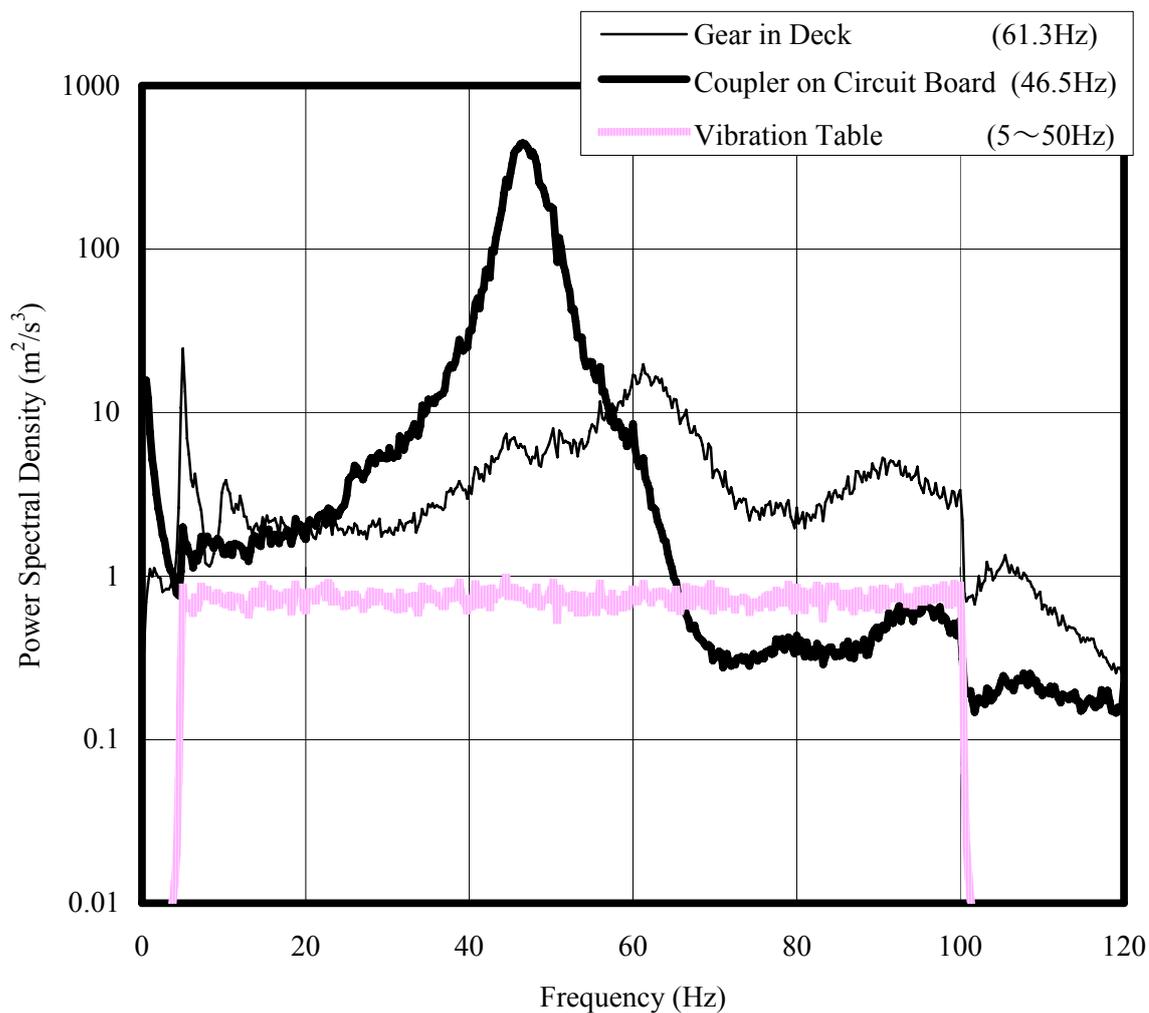


Fig.5.3.1 Resonance search by random vibration
(PSD of vibration near the gear and the coupler in VCR)

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

5.3.3 SRS の計測

試料内の歯車 (部品 A) およびカプラー (部品 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、各部品に伝搬する加速度を計測した。縦軸を伝達係数とし、

横軸を $f_c \cdot T_0$ (f_c には 5.3.2 で計測した固有振動数 f_c を代入) とし、各破損部品の SRS を作成した。本図を実測 SRS とし、Fig.5.3.2 に実測 SRS およびモデル SRS を示す。

5.3.4 実測 SRS とモデル SRS

実測 SRS は 5.3.3 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、得られた各部品の実測 SRS とモデル SRS を比較検討する。

Fig.5.3.2(a)の歯車 (部品 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、 $f_c \cdot T_0 < 0.25$ で両者がよく一致しているのに対し、 $f_c \cdot T_0 > 0.5$ 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。

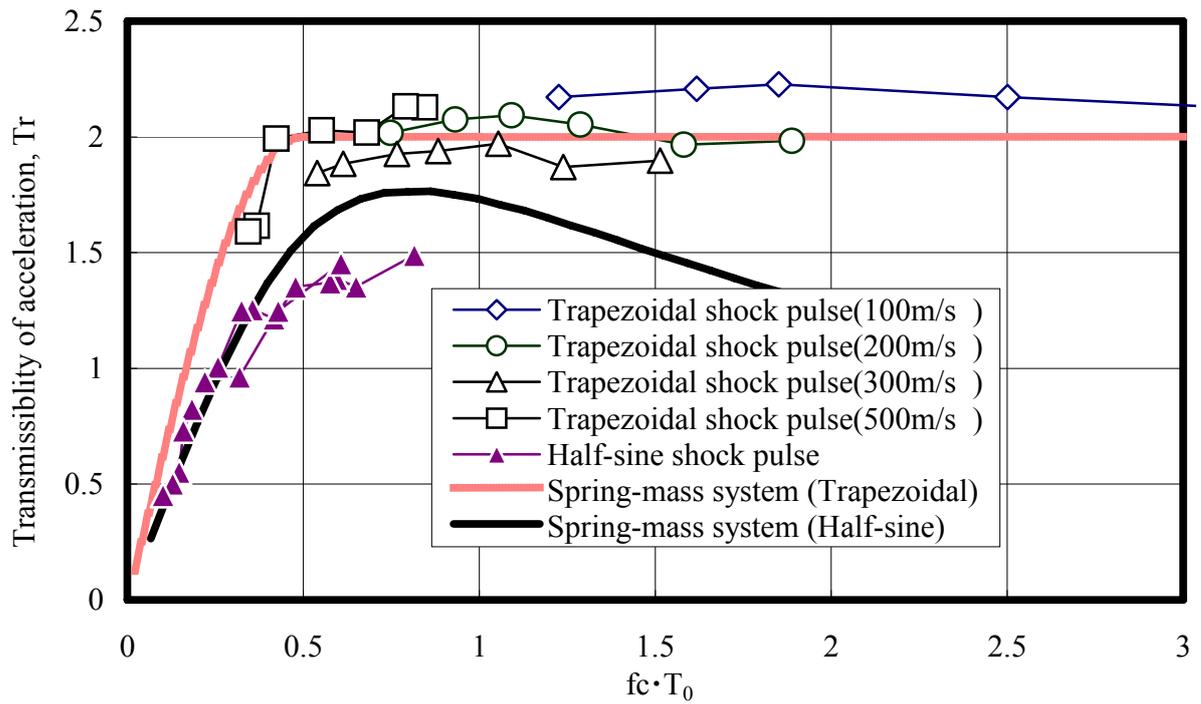
Fig.5.3.2(b)のカプラー (部品 B) 部の SRS について見る。台形波衝撃パルスに対する SRS は、 $f_c \cdot T_0 > 2.0$ で実測 SRS がモデル SRS よりも約 25%以上大きな値となっている。

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。

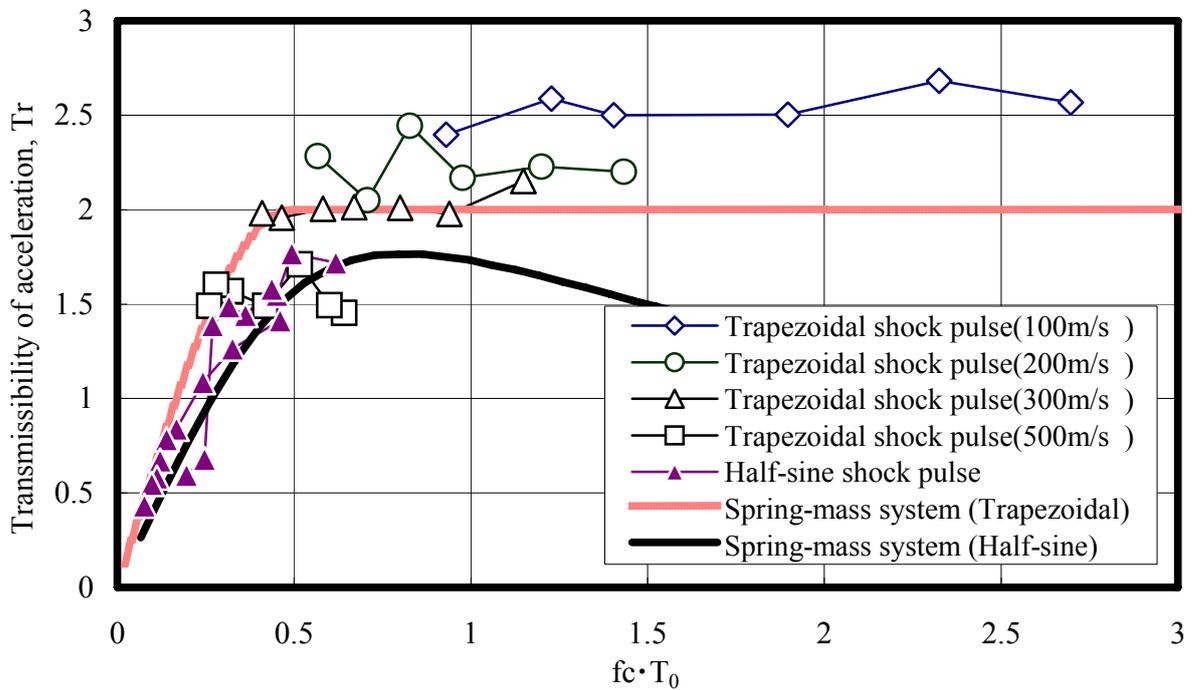
VCR に関する SRS 計測結果、実測 SRS とモデル SRS とにおける差異が一部認められた。これは、現実の製品を 1 自由度のばね質量系では表現しきれないことに起因する。このことは、本研究において「 $A_c \cdot SRS$ 法」を提唱してきた大きな要因であるが、実際の試験現場では、要求される評価精度の程度はさまざまであり、これら実測 SRS とモデル SRS の違いを許容誤差の範囲として認めてもさしつかえない場合がある。このような場合のために、「実測 SRS とモデル SRS が一致する」という仮定の下、簡易的に DBC が導出できる評価法を考案した。5.4 および 5.5 で、これらの評価法について述べる。

5.4 固有振動数からの DBC の導出法

「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



(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.5.3.2 The results of measurement of SRS and the SRS of spring-mass system.

の導出方法が異なるだけで、他は、「 $A_C \cdot SRS$ 法」「 $\Delta V_C \cdot SRS$ 法」とほぼ同じである。まず、製品の破損部品（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 $Tr(f_C \cdot T_0)$ に f_C を代入して、破損部品（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。

5.4.1 「 $A_C \cdot f_C$ 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） 5.2.1 手順①と同じ。
- ②（ f_C 計測） すべての破損部品（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品（部位） i の固有振動数 f_{Ci} と見なす（5.3.2「固有振動数の計測」を参照）。これにより、各破損部品（部位）の伝達係数 $Tr(f_{Ci} \cdot T_0)$ が T_0 のみの関数となる。
- ③（ DBC 導出） ①で得られた $A_{Ci}(T_{0ia})$ と②で得られた $Tr(f_{Ci} \cdot T_0)$ （このとき f_{Ci} は既知）から、任意の作用時間 T_0 における許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ が式(5.4.1)で与えられる。また、これに対応する速度変化は式(5.2.2)より算出できる。

$$A_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_{0ia}) Tr_i(f_{Ci} \cdot T_{0ia}) / Tr_i(f_{Ci} \cdot T_0) \quad (5.4.1)$$

モデル SRS の伝達係数 $Tr(f_C \cdot T_0)$ は、すでに明らかにされおり、台形波衝撃パルスの場合、式(5.4.2a)および式(5.4.2b)で与えられる。

$$Tr(f_C \cdot T_0) = 2 \sin(\pi f_C \cdot T_0) \quad (f_C \cdot T_0 < 0.5) \quad (5.4.2a)$$

$$Tr(f_C \cdot T_0) = 2 \quad (f_C \cdot T_0 \geq 0.5) \quad (5.4.2b)$$

また、正弦半波衝撃パルスの場合は Table 5.4.1 に示すとおりである。さらに、 $0 < f_C \cdot T_0 < 0.5$ の範囲については、式(5.4.3)を用いて算出することもできる。

$$Tr(f_C \cdot T_0) = 2 \cos(\pi f_C T_0) \frac{2 f_C T_0}{1 - (2 f_C T_0)^2} \quad (5.4.3)$$

本手法により導出した VCR の DBC を Fig.5.4.1 に示す。手順①では、5.2.1 手順①の結果を用いた。手順②では、「5.3.2 固有振動数の計測」で得た固有振動数を用いた。図中の○、X、*は、許容速度変化試験および許容加速度試験の結果であり、具体的

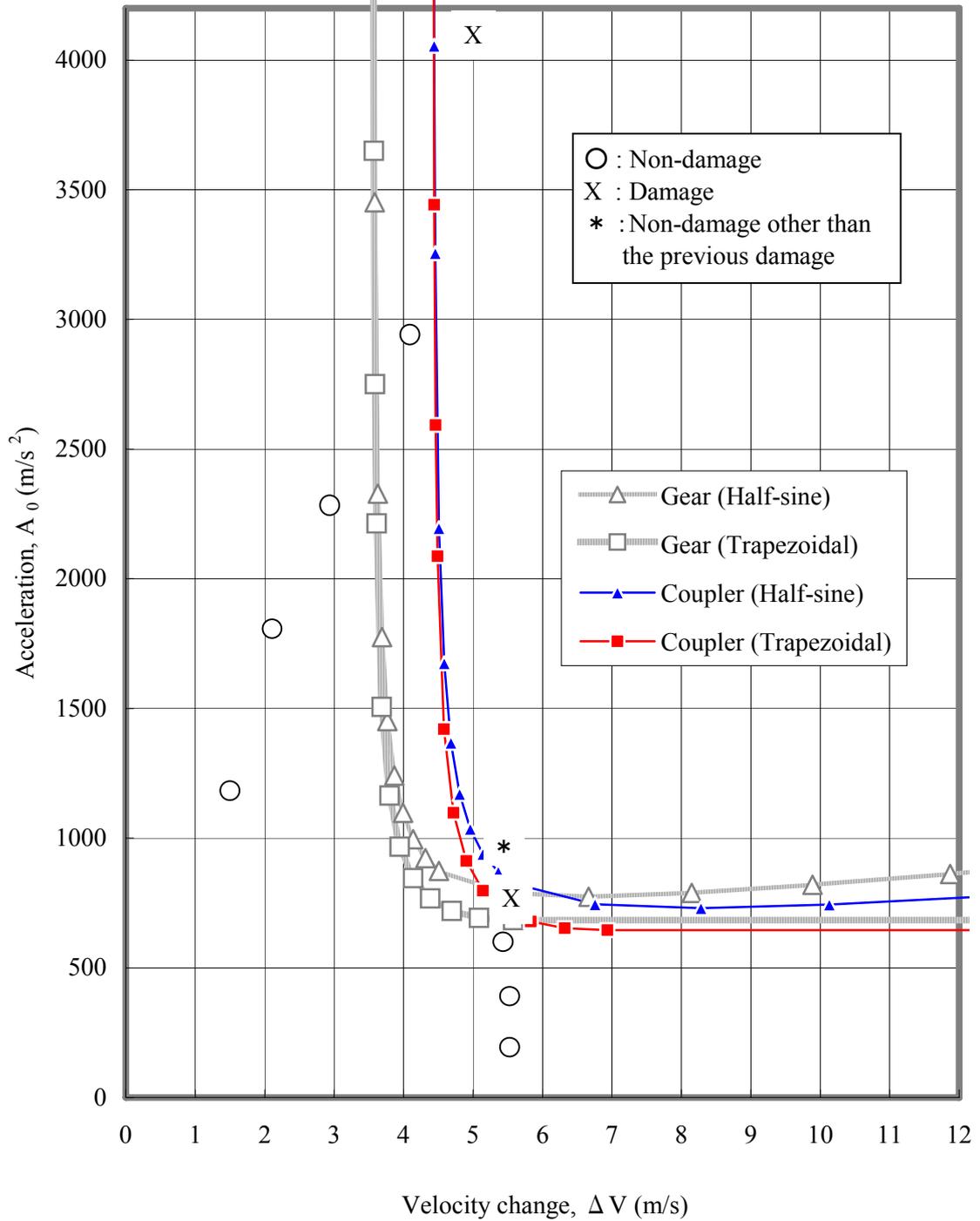


Fig.5.4.1 The DBC derived from A_C and f_C according to " $A_C \cdot f_C$ method".

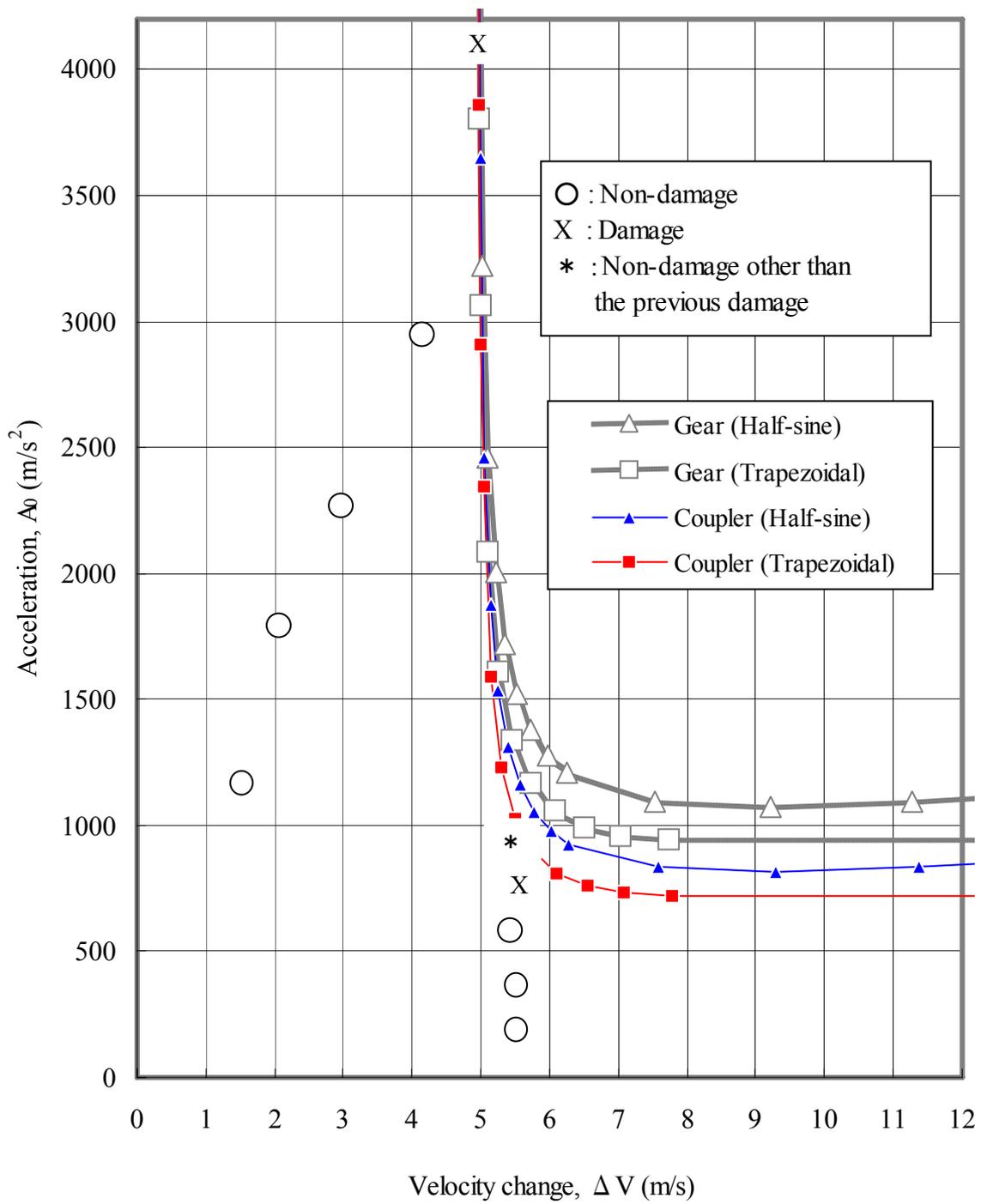


Fig.5.4.2 The DBC derived from ΔV_C and f_C according to “ $\Delta V_C \cdot f_C$ method”.

数値は Table 5.3.1 および Table 5.3.2 のとおりである。

5.4.2 「 $\Delta V_C \cdot f_C$ 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) 5.2.2 手順①と同じ。
- ② (f_C 計測) 5.4.1 手順②と同じ。
- ③ (DBC 導出) 5.4.1 手順③と同じ。ただし、 T_{0ia} は T_{0iv} に置き換える。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig.5.4.2 に示す。手順①では、5.2.2 手順①の結果を用いた。手順②では、「5.3.2 固有振動数の計測」で得た固有振動数を用いた。図中の○、X、*は、許容速度変化試験および許容加速度試験の結果であり、具体的数値は Table 5.3.1 および Table 5.3.2 のとおりである。

5.5 ΔV_C 、 A_C からの DBC の導出法

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、破損部品（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（第 4 章と同様）だけでなく、

$$\left[\Delta V_{Ci}(T_{0iv}) = a_{Ci} / (2\pi f_{Ci}) \right] \quad (5.5.1)$$

および

$$A_{Ci}(T_{0ia}) = a_{Ci} / 2 \quad (5.5.2)$$

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 が各破損部品（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(5.5.1)および式(5.5.2)において、添字 i は破損部品（部位）を意味する。また、 $V_{Ci}(T_{0iv})$ 、 $A_{Ci}(T_{0ia})$ 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品（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_{Ci} は破損部品（部位） i に伝搬した加速度の許容値を表す。 f_{Ci} は破損部品（部位） i の固有振動数を示す。式(5.5.1)、式(5.5.2)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³⁾。

5.5.1 導出理論

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

$$a_{Ci} = A_{Ci}(T_0) \times Tr_i(f_{Ci} \cdot T_0) \quad (5.5.3)$$

式(5.5.2)に式(5.5.3)を代入すると、次式が得られる。

$$A_{Ci}(T_0) = 2 A_{Ci}(T_{0ia}) / Tr_i(f_{Ci} \cdot T_0) \quad (5.5.4)$$

式(5.5.1)、式(5.5.2)より $a_{i\max}$ を消去すると、次式が得られる。

$$f_{Ci} = A_{Ci}(T_{0ia}) / \{ \pi V_{Ci}(T_{0iv}) \} \quad (5.5.5)$$

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 $Tr(f_{Ci} \cdot T_0)$ は Table 5.4.1 および式(5.4.3)で与えられる。よって、式(5.5.4)に式(5.5.5)を代入することにより $A_{Ci}(T_0)$ が得られる。また、 $A_{Ci}(T_0)$ に対応する速度変化は式(5.2.2)より算出できる。

5.5.2 「 $\Delta V_C \cdot A_C$ 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品（部位）の許容速度変化を把握する。破損した部品（部位） i ($i=A, B, \dots$) の速度変化を $\Delta V_{Ci}(T_{0iv})$ とし、その時発生する最大加速度を $A_{Ci}(T_{0iv})$ 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高くなるまで続け、破損する可能性がある脆弱部品（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。破損部品（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 $A_{Ci}(T_{0ia})$ 、その時の速度変化を $\Delta V_i(T_{0ia})$ とする。
- ③（DBC 導出） ①で得られた $\Delta V_{Ci}(T_{0iv})$ と②で得られた $A_{Ci}(T_{0ia})$ から式(5.5.5)を用いて固有振動数 f_{Ci} が算出できる。 $Tr(f_{Ci} \cdot T_0)$ は、入力が台形波衝撃パルスの場合

Table 5.4.1 Transmissibility of model SRS for half-sine shock pulse

$f_c \cdot T_0$	$Tr(f_c \cdot T_0)$	$f_c \cdot T_0$	$Tr(f_c \cdot T_0)$
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

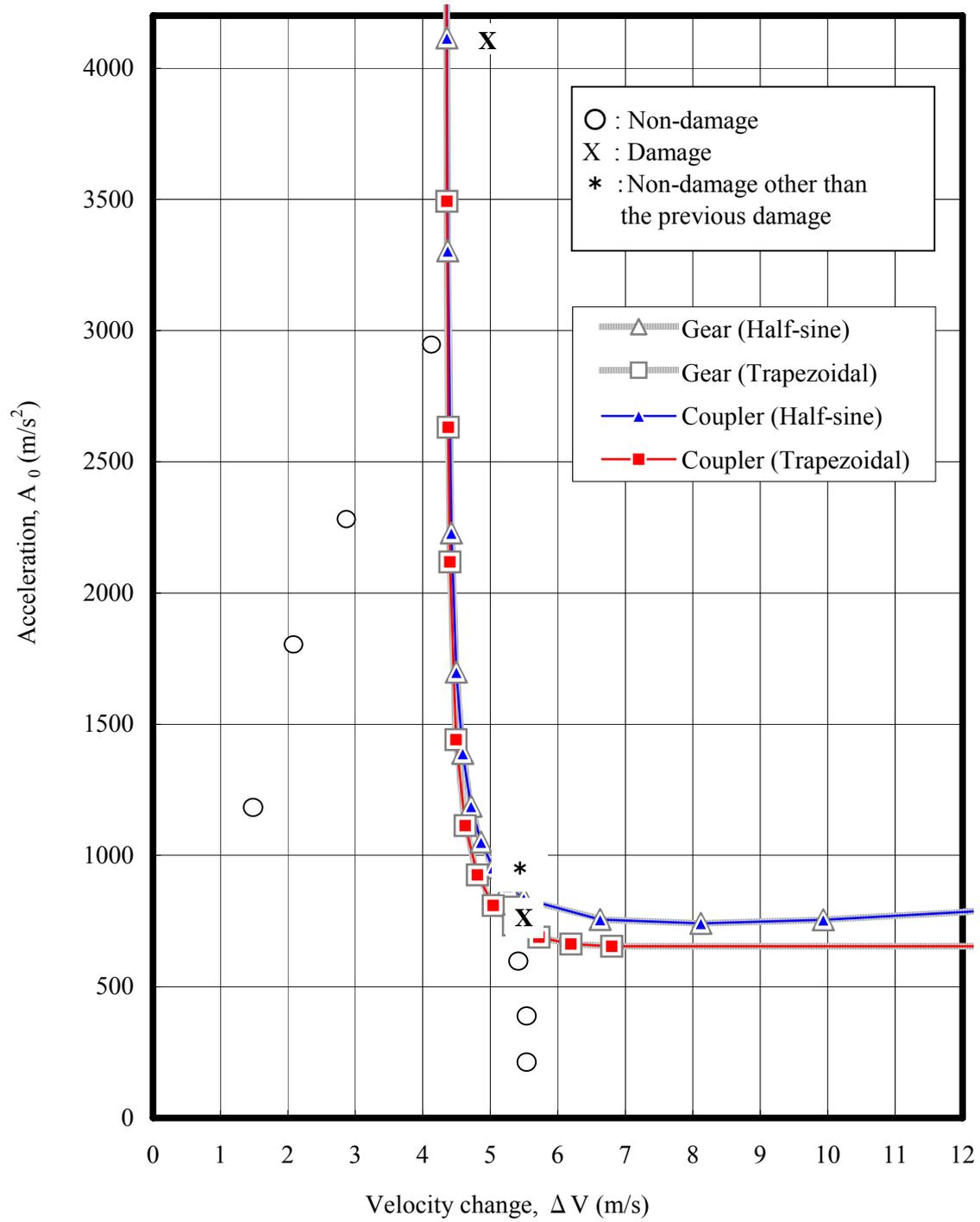


Fig.5.5.1 The DBC derived from ΔV_C and A_C according to “ $\Delta V_C \cdot A_C$ method”.

合、式(5.4.2)または Table 5.4.1 より、また、入力が正弦半波衝撃パルスの場合、式(5.4.3)より与えられる。したがって、式(5.5.4)の $A_{Ci}(T_{0ia})$ と $Tr(f_{Ci} \cdot T_0)$ が既知となり、任意の作用時間 T_0 の衝撃パルスに対する許容加速度 $A_{Ci}(T_0)$ が算出できる。また、これに対応する速度変化は式(5.2.2)で得られる。

本手法により導出した VCR の DBC を Fig.5.5.1 に示す。図で示す DBC 導出に、5.2.2 手順①の結果、および、5.2.1 手順①の結果を用いた。したがって、 $\Delta V_{Ci}(T_{0ia})$ は、輸送中の最大速度変化 ΔV_{max} に設定されている。そのため、 $\Delta V_{Ci}(T_{0ia})$ が $\Delta V_{Ci}(T_{0iv})$ の 1.6 倍以上であるという前提条件は満たしていない。実際の評価試験ではこの点に十分注意が必要である。図中の○、X、*は、許容速度変化試験および許容加速度試験の結果であり、具体的数値は Table 5.3.1 および Table 5.3.2 のとおりである。

5.6 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。

5.6.1 各評価法の特徴の整理

各評価法の手順を Table 5.6.1 にまとめた。また、各長所および短所を Table 5.6.2 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。

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、

Table 5.6.1 Procedures of each DBC evaluation method.

DBC evaluation methods	Step 1 (Test)	Step 2 (Test)	Step 3 (Derivation of DBC)
JIS Z 0119	$\Delta V_c (T_{0v})$	$A_c(T_{0a})$	$A_c(T_0) = A_c(T_{0a}) \quad (\Delta V_c (T_0) > \Delta V_c(T_{0v}))$ $\Delta V_c(T_0) = \Delta V_c(T_{0v}) \quad (A_c(T_0) > A_c(T_{0a}))$
$A_c \cdot SRS$	$A_{Ci} (T_{0ia})$	$Tr_i(T_0)$	$A_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_{0ia}) \times Tr_i (T_{0ia}) / Tr_i (T_0)$ $\Delta V_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_0) \times T_0 \times \kappa$
$\Delta V_c \cdot SRS$	$A_{Ci} (T_{0iv})$	$Tr_i(T_0)$	$A_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_{0iv}) \times Tr_i (T_{0iv}) / Tr_i (T_0)$ $\Delta V_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_0) \times T_0 \times \kappa$
$A_c \cdot f_c$	$A_{Ci} (T_{0ia})$	$f_{Ci} \rightarrow$ $Tr_i (f_{Ci} \cdot T_0)$	$A_{Ci} (T_0) = A_{Ci}(T_{0ia}) \times Tr_i(f_{Ci} \cdot T_{0ia}) / Tr_i(f_{Ci} \cdot T_0)$ $\Delta V_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_0) \times T_0 \times \kappa$
$\Delta V_c \cdot f_c$	$A_{Ci} (T_{0iv})$	$f_{Ci} \rightarrow$ $Tr_i (f_{Ci} \cdot T_0)$	$A_{Ci}(T_0) = A_{Ci}(T_{0iv}) \times Tr_i(f_{Ci} \cdot T_{0iv}) / Tr_i(f_{Ci} \cdot T_0)$ $\Delta V_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_0) \times T_0 \times \kappa$
$\Delta V_c \cdot A_c$	$\Delta V_{Ci}(T_{0iv})$	$A_{Ci} (T_{0ia})$	$f_{Ci} = A_{Ci} (T_{0ia}) / \{ \pi \Delta V_{Ci} (T_{0iv}) \}$ $f_{Ci} \rightarrow Tr_i (f_{Ci} \cdot T_0)$ \downarrow $A_{Ci} (T_0) = A_{Ci}(T_{0ia}) \times Tr_i(f_{Ci} \cdot T_{0ia}) / Tr_i(f_{Ci} \cdot T_0)$ $\Delta V_{Ci} (T_0) = A_{Ci} (T_0) \times T_0 \times \kappa$

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 5.6.2 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
$A_c \cdot SRS$	1 specimens	possible	Possible	possible
$\Delta V_c \cdot SRS$	1 specimens	possible	Possible	possible
$A_c \cdot f_c$	1 specimens	impossible	Possible	possible
$\Delta V_c \cdot f_c$	1 specimens	impossible	Possible	possible
$\Delta V_c \cdot A_c$	2 specimens	impossible	Possible	possible

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

Table 5.6.3 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
$A_c \cdot SRS$	necessary	unnecessary	(necessary)**
$\Delta V_c \cdot SRS$	necessary	unnecessary	(necessary)**
$A_c \cdot f_c$	necessary	necessary	unnecessary
$\Delta V_c \cdot f_c$	necessary	necessary	unnecessary
$\Delta V_c \cdot A_c$	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.

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。

5.6.2 必要な機器の整理

各評価法に必要な機器を Table 5.6.3 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られ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生じさせる機能はある）、さらに、振動試験機もない場合、「 $A_c \cdot SRS$ 法」、「 $\Delta V_c \cdot SRS$ 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。

5.6.3 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、問題となる部品（部位）がすべて破損しない場合がある。このような場合、「 $A_C \cdot SRS$ 法」や「 $A_C \cdot f_C$ 法」では、すべての破損部品（部位）の DBC が導出されない。その対策として、「 $A_C \cdot SRS$ 法」と「 $\Delta V_C \cdot SRS$ 法」（あるいは、「 $A_C \cdot f_C$ 法」と「 $\Delta V_C \cdot f_C$ 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）5.2.1 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、5.2.2 手順①と同じ手順で試験を行い、新たに破損する部品（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）5.2.1 手順②、または、5.4.1 手順②と同じ。
- ④ (a)（SRS→DBC 算出）③で SRS を計測した場合、①で破損した部品（部位）については、5.2.1 手順③に従い、②で破損した部品（部位）については、5.2.2 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で破損した部品（部位）については、5.4.1 手順③に従い、②で破損した部品（部位）については、5.4.2 手順③に従う。

5.7 結 言

第 3 章において考案した DBC 評価法が、単に一つの評価法として研究者の間で知られる程度に留まらず、より多くの企業で活用され、製品の衝撃破損事故件数の削減に寄与するため、破損部品（部位）の固有振動数を利用した評価法など、新たに 4 つの「DBC 評価法」類型を考案した。さらに、各企業が利用できる試験機・計測機器の種類に制約がある場合や、多少評価精度を下げても、簡易的に衝撃強さ評価を行いたい場合など、各評価現場におけるさまざまな要望に対して

最適な評価法の選択が可能となるように、これらの評価法の類型を体系化した。各評価法類型の特徴は以下のとおりである。

「 A_C ・SRS 法 (DBC 評価法)」: A_C および SRS を計測する。「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の長い衝撃パルス、たとえば、緩衝包装された貨物に加わった衝撃に対する衝撃強さ評価に適している。

「 ΔV_C ・SRS 法」: ΔV_C および SRS を計測する。「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の短い衝撃パルス、たとえば、携帯型機器単体での落下衝撃に対する衝撃強さ評価に適している。

「 A_C ・ f_C 法」: A_C および f_C を計測する。「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の長い衝撃パルスに対する衝撃強さ評価に適している。

「 ΔV_C ・ f_C 法」: ΔV_C および f_C を計測する。「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の短い衝撃パルスに対する衝撃強さ評価に適している。

「 ΔV_C ・ A_C 法」: ΔV_C および A_C を計測する。「DBC 交差現象」を把握することができる。衝撃・振動に対する応答を計測する必要がない。

参考文献

- 1) JIS C 0041-1995, 環境試験方法—電気電子—衝撃試験方法.
- 2) JIS Z 0119-1994, 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法.
- 3) Burgess, G. J., Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging Technology and Science, Vol. 1 (1988), 5.

第6章 結 論

本論文は、輸送包装のための製品衝撃強さ評価技術の向上を目的とし、研究成果をまとめたものである。本成果は、開発製品の出荷前段階での品質管理、ならびに、出荷後に衝撃破損事故が発生した際の再現実験で活用される。また、対象となる製品には、使用中、落下衝撃が想定される製品だけでなく、輸送中の貨物落下による破損の可能性を有するあらゆる製品が含まれている。本論文は、6章から構成されており、各章で述べた成果を総括すると以下の通りである。

第1章では、製品衝撃強さ評価法に関する研究の背景および目的、方針、概要について述べた。

第2章では、製品衝撃強さ試験で問題となる現象を見出し、その存在を明らかにした。

はじめに、製品の衝撃応答を表したモデルを用いて、理論解析および数値解析を行った。その結果、製品衝撃強さ試験で問題となる3つの現象、すなわち、「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」の存在を見出した。「速度変化依存性」とは、製品の許容加速度が速度変化に影響されて変化する現象である。また、「逆転現象」とは、一般に、製品が、衝撃パルスの速度変化が同じ場合、加速度が高いほど破損しやすいのに反して、加速度が低い方が破損しやすくなる現象である。そして、「DBC 交差現象」とは、製品内に複数の脆弱部品（または部位）が存在し、それらの DBC が互いに交差する現象であり、これにより、加えられる衝撃パルスによって、異なる部品（部位）が破損する可能性が発生する。

次に、これら現象が現実に存在し、衝撃実験において発生することを確認するため、実製品（ミニフロッピーディスク装置）および製品が段積みされた状態を表した実験モデルについて衝撃実験を行った。その結果、現実に衝撃実験によってこれらの現象が発生することが明らかになった。

第3章では、第2章で見出した3つの現象が原因で引き起こされる衝撃試験方法の問題点を明らかにした。さらに、その対策として新試験方法を考案し実用性を確認した。

まず、製品衝撃試験の規格 JIS C 0041 および IEC 68-2-27 は、ある規定の衝撃パルスを加え、合否を判断するだけの試験方法であり、規定外の衝撃パルスが製品に加えられたとき、製品破損の有無を予測することができない。そこで、製品

が耐えうる衝撃パルスのきびしさについて保証範囲の概念を導入した「保証範囲確認試験」を考案した。本評価法は、第3章で見出した3つの現象に対して適用可能であり、製品破損の有無を保証することができる。

次に、製品衝撃強さ試験規格 JIS Z 0119 および ASTM D 3332 は、R. E. Newton により導出された1自由度のばね質量系の DBC が理論的な基礎となっているが、現実には、製品の衝撃伝搬経路は複雑であり、DBC の形状も複雑となる。また、これらの試験方法では、破損対象となる部品（部位）は唯一であり、その他の脆弱部品（部位）の存在は想定されていない。しかし、現実には、製品内に複数の脆弱部品（部位）が存在する 경우가多く、各脆弱部品（部位）毎に DBC を導出する必要がある。以上の点を考慮し、製品内のすべての脆弱部品（部位）について許容加速度および SRS を計測することにより、各破損部品（部位）毎の DBC が導出できる「DBC 評価法」を考案した。これにより、製品の衝撃強さ、すなわち、DBC の各部品毎の評価が可能になっただけでなく、先に見出した現象も把握できるようになった。

さらに、考案した DBC 評価法に従って、実製品（ビデオカセットレコーダー）の衝撃強さ評価を行った。その結果、本評価法により十分正確に衝撃強さが評価でき、実用上問題ないことが確認できた。

第4章では、製品衝撃強さのばらつきを把握する評価法および「市場クレームの非再現性」について検討した。ここで、「市場クレームの非再現性」とは、市場において現実に発生する製品の破損クレームが、実験室で行われる製品衝撃強さ試験では発生しないという現象であり、著者らが、企業から依頼されて行った数多くの衝撃試験においても、同様の現象がしばしば発生しており、その発生原因は不明であった。

市場に出る製品全体についての衝撃強さ評価精度、すなわち、製品のばらつきを含めた評価精度を向上させるため、DBC 評価法に確率論を導入し、製品内の各脆弱部品強度のばらつき、および、それらの部品への衝撃の伝達特性のばらつきから、製品の破損確率に応じた DBC が導出できる評価法を考案した。これにより、「市場クレームの非再現性」が導出され、その現象の存在が理論的に明らかになっただけでなく、製品出荷の前段階で、その現象の発生予測が可能となった。

第5章では、考案した DBC 評価法が、単に一つの評価法として研究者の間で理解されるに留まらず、より多くの企業で活用され、製品の衝撃破損事故件数の

削減に寄与するため、破損部品（部位）の固有振動数を利用した評価法など、新たに4つの「DBC 評価法」類型を考案した。さらに、これらの評価法の類型を体系化することにより、各企業が利用できる試験機・計測機器の種類に制約がある場合や、多少評価精度を下げてでも、簡易的に衝撃強さ評価を行いたい場合など、各評価現場におけるさまざまな要望に対して最適な評価法の選択が可能となるようにした。各評価法類型の特徴は以下のとおりである。

「 A_c ・SRS 法（DBC 評価法）」： A_c および SRS を計測する。「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の長い衝撃パルス、たとえば、緩衝包装された貨物に加わった衝撃に対する衝撃強さ評価に適している。

「 ΔV_c ・SRS 法」： ΔV_c および SRS を計測する。「速度変化依存性」および「逆転現象」、「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の短い衝撃パルス、たとえば、携帯型機器単体での落下衝撃に対する衝撃強さ評価に適している。

「 A_c ・ f_c 法」： A_c および f_c を計測する。「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の長い衝撃パルスに対する衝撃強さ評価に適している。

「 ΔV_c ・ f_c 法」： ΔV_c および f_c を計測する。「DBC 交差現象」を把握することができ、作用時間の短い衝撃パルスに対する衝撃強さ評価に適している。

「 ΔV_c ・ A_c 法」： ΔV_c および A_c を計測する。「DBC 交差現象」を把握することができる。衝撃・振動に対する応答を計測する必要がない。

以上のように、輸送包装のための製品衝撃強さ評価に関する研究を行い、現在の試験方法の問題点を明らかにした。また、それらの問題点を解消する新評価法を考案しただけでなく、確率論導入による評価精度の向上を図った。さらに、新評価法の類型を考案し、それら試験方法を体系化した。これにより、各企業の現場に応じた最適な評価法の選択が可能となった。

記号表

A_0 : 衝撃パルスの最大加速度。

A_i ($i=1, 2, \dots$): 応答波における i 次ピーク加速度。

A_C : 製品の許容加速度。

A_{Ci} ($i=1, 2, \dots$): 応答波における i 次ピークが原因となる製品の許容加速度。

A_{Ci} ($i=1, P, 2$): SRS 上の突起部の始点($i=1$)、ピーク($i=P$)、終点($i=2$)に関連する製品の許容加速度。

A_{Ci} ($i=A, B, \dots$): 製品内の部品 (部位) i に関する許容加速度。

A_{Cia} ($i=A, B, \dots$): 許容加速度試験によって得られた製品内の部品 (部位) i に関する許容加速度。

A_{Civ} ($i=A, B, \dots$): 許容速度変化試験によって得られた製品内の部品 (部位) i に関する許容速度変化に対応する衝撃パルスの加速度。

a_{Ci} ($i=A, B, \dots$): 部品 (部位) i に伝搬する加速度の許容値。

a : π / T_0

c : 粘性減衰係数。

$E(x)$: x の平均値。

E_x : 破損部品 (部位) 強度の推定値

f_i ($i=1, 2, \dots$): 衝撃台・質量部間、または、質量部・質量部間に生じる衝撃荷重。添字 i は衝撃台側より $1, 2, \dots$ とする。

$f(x_1, x_2)$: 同時確率密度関数。

$f_i(x_i)$ ($i=1, 2$): 周辺確率密度関数。

f_C : 固有振動数。

f_{Ci} : 破損部品 (部位) i の固有振動数。

g : 重力加速度。

$g(x_1, x_2)$: 独立 2 変数関数。

H_{\max} : 輸送または使用中に製品が想定される落下高さの最大値、または、等価落下高さ。

k : Model-O 及び Model-A、Model-4P のばね定数。

k_i ($i=1, 2, \dots$): 製品モデルのばね定数。添字 i は衝撃台側より $1, 2, \dots$ とする。

m_i ($i=1, 2, \dots$): 製品モデルの質量部の質量。添字 i は衝撃台側より $1, 2, \dots$ と

する。

P : 製品全体の破損確率。

P_i ($i=A, B, \dots$) : 破損部品 (部位) i に関する破損確率。

r : 製品落下衝撃時の反発係数。すなわち、衝突速度に対する反発速度の比。

s : ラプラス変換時の複素常数

T_0 : 衝撃パルスの作用時間。

T_i ($i=1, 2, \dots$) : 応答波における i 次ピーク発生時間。

T_i ($i=1, P, 2$) : SRS 上の突起部の始点($i=1$)、ピーク($i=P$)、終点($i=2$)に関連する衝撃パルスの作用時間。

T_{0ia} ($i=A, B, \dots$) : 許容加速度試験で得られた部品 (部位) i の許容加速度に対応する衝撃パルスの作用時間。

T_{0iv} ($i=A, B, \dots$) : 許容速度変化試験で得られた部品 (部位) i の許容速度変化に対応する衝撃パルスの作用時間。

t : 経過時間。

Tr : 伝達係数。ただし、応答波が加速度の時、加速度伝達係数。

Tr_i ($i=1, 2, \dots$) : 伝達係数。ただし、応答波が加速度の時、加速度伝達率。

Tr_i ($i=1, 2, \dots$) : 応答波における i 次ピークが原因となる加速度伝達率。

Tr_i ($i=1, P, 2$) : SRS 上の突起部の始点($i=1$)、ピーク($i=P$)、終点($i=2$)の加速度伝達率。

$U()$: ステップ関数。

$V(x)$: x の分散。

V_x : 破損部品 (部位) 強度の分散に関する推定値

ΔV : 衝撃パルスの速度変化。

ΔV_C : 製品の許容速度変化。

ΔV_{Ci} ($i=A, B, \dots$) : 製品内の部品 (部位) i に関する許容速度変化。

ΔV_{Cia} ($i=A, B, \dots$) : 許容加速度試験によって得られた製品内の部品 (部位) i に関する許容加速度に対応する衝撃パルスの速度変化。

ΔV_{Civ} ($i=A, B, \dots$) : 許容速度変化試験によって得られた製品内の部品 (部位) i に関する許容速度変化。

ΔV_{max} : 等価落下高さおよび反発係数から導出された衝撃パルスの速度変化。

x_0 : 衝撃テーブルの変位。

x : 製品モデルの質量部の変位。

x_i ($i=1, 2, \dots$) : 製品モデルの質量部の変位。添字 i は衝撃台側より $1, 2, \dots$ とする。

x_i ($i=1, 2$) : 互いに独立な 2 変数とする。

y : 製品モデルの質量部の衝撃台に対する相対変位。

y : 独立 2 変数関数 ($y=g(x_1, x_2)$)。

α, β : Model-A では、 $x^2 + (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{22}^2)x + \omega_{11}^2 \omega_{22}^2 = 0$ の 2 負根の絶対値の平方根を α および β とし、Model-B では、 $x^2 + 2\zeta \omega x + \omega^2$ の 2 根を α および β とした。

α : ワイブル分布の形状母数

β : ワイブル分布の尺度母数

$\Gamma()$: ガンマ関数

ε_{ci} ($i=A, B, \dots$) : 部品 (部位) i に伝搬するひずみの許容値。

η : 変動係数。

ζ : 減衰比。

κ : 衝撃パルス波形固有の係数。たとえば、方形波の場合 $\kappa=1.0$ 、正弦半波の場合 $\kappa=2/\pi$ である。

μ_{xi} ($i=1, 2$) : x_i の平均値。

μ_y : y の平均値。

σ_{xi}^2 ($i=1, 2$) : x_i の分散。

σ_y^2 : y の分散。

$\Phi()$: 標準正規分布関数

ω : 固有角振動数 ($\omega^2=k/m$)。

ω_{ij} ($ij=11, 12, 22$) : 固有角振動数 ($\omega_{ij}^2=k_j/m_i$)。

\sim : ラプラス変換後の関数を表す。

$\dot{\quad}$: 1 階微分係数を表す。

$\ddot{\quad}$: 2 階微分係数を表す。

∂ : 偏微分を表す。

\int : 積分を表す。

$\sum_{i=1}^2$: $i=1, 2$ に関する総和を表す。

$\prod_{i=1}^2$: $i=1, 2$ に関するすべての積を表す。

謝 辞

終わりに臨み、本論文に関連する一連の研究の遂行、ならびに、本論文の執筆にあたり、ご懇切なるご指導ならびにご鞭撻を賜りました神戸商船大学商船学部附属船貨輸送研究施設 助教授 斎藤勝彦博士に心から感謝申し上げます。また、本論文に関連する一連の研究の遂行に対して、貴重なるご助言とご教示を賜りました神戸商船大学商船学部附属船貨輸送研究施設 教授 久保雅義博士に深く感謝申し上げます。

さらに、本研究の細部にわたり懇切なるご指導、ご高配を賜りました神戸商船大学商船学部 教授 丸尾健二博士、海技大学校 教授 藤栄嘉隆博士に深く感謝いたします。また、本論文の査読および校正を頂いた神戸商船大学商船学部 教授 西岡俊久 博士に深くお礼申し上げます。

本研究は大阪府立産業技術総合研究所の研究業務として行ったものであり、研究を実施する上で、数多くの有益なご助言を賜りました大阪府立産業技術総合研究所 評価技術部包装技術グループ リーダー主任研究員 寺岸義春氏に深く感謝いたします。また、本研究を実施する上で、多大な便宜をお図りいただきました元上司、現 社団法人大阪府工業協会技術顧問 野上良亮氏、大阪府立産業技術総合研究所評価技術部 部長 曾根匠博士、同所同部 副部長 増井清徳博士、同所同部包装技術グループ 主任研究員 高田利夫氏、同所同部同グループ 研究員 津田和城氏、ならびに、関係各位に厚くお礼申し上げます。

