

損傷境界曲線を用いた緩衝包装評価方法

川口和晃* 斎藤勝彦**

Evaluation Method for Cushioning Performance of Package using Damage Boundary Curve

Kazuaki KAWAGUCHI*, Katsuhiko SAITO**

緩衝包装設計は、包装貨物落下試験時に内容品に生じる衝撃加速度最大値が、内容品の損傷境界曲線から導かれた許容加速度未満になるように設計される。包装貨物落下試験にて、内容品に許容加速度以上の衝撃が発生する場合は、内容品が破損すると判断され、緩衝包装設計が見直される。しかしながら、落下試験時に生じた衝撃パルスと、損傷境界曲線を得るときに用いる衝撃パルスの形状が異なるため、許容加速度を超える衝撃パルスが即、内容品の破損に繋がるとは言い難い。

そこで本報告では、落下試験時に生じた衝撃パルスから損傷境界曲線を導出し、緩衝包装設計を評価する方法を検討した。これにより、落下試験の衝撃加速度最大値が許容加速度を超えていたとしても、内容品は破損しない安全領域があることと、許容加速度未満でも破損する場合があることが明らかとなった。このことは、従来評価法よりも正確に内容品の破損状態が評価できることにつながるため、本提案法を活用することで、包装設計の合理化が期待できる。

Peak acceleration on product by package drop test should be less than the critical acceleration from damage boundary curve of products. Conventionally cushioning package is redesigned when the peak of shock pulse at drop test becomes bigger than the critical acceleration due to expect the product damage. However this judgement of damage condition for product is premature because the shape of shock pulse between drop test and shock test for damage boundary curve is different.

In this paper, the new evaluation method of cushioning package using damage boundary curve derived by the shock pulse when drop test has been considered. Using this proposal method, the damage condition of product can be defined clearly compare to classical way. It means that we can recognize the safety area without any damages even if the peak acceleration by drop test is bigger than the critical acceleration. On the other hand, the damage area even if the peak acceleration by drop test becomes lower the critical acceleration is found by using the proposal method. Therefore, the proposal method will contribute the optimization of package design.

キーワード：包装設計、損傷境界曲線、落下試験、加速度計測、評価方法

Keywords：Package Design, Damage Boundary Curve, Drop test, Acceleration measurement, Evaluation method

* 神楽テクノロジー株式会社, SHINYEI TECHNOLOGY CO.LTD. 〒650-0047 神戸市中央区港島 6-5-2
6-5-2, Minatogima-Minamimachi, Chuo-ku, Kobe, 650-0047, JAPAN
TEL:078-304-6795, FAX:078-302-1225, Email:k-kawaguchi@stc.shinyei.co.jp

** 神戸大学 輸送包装研究室 Transport Packaging Laboratory, Kobe University

1. 緒言

緩衝包装設計の手順として、内容品の許容加速度を指標として緩衝包装設計を行ったのち、その包装保護性を評価するために包装貨物落下試験が実施される。

許容加速度は、損傷境界曲線（Damage Boundary Curve, DBC）から得られる。DBCの取得方法は、JISZ0119 にその試験方法が規定されている。本試験に関連する先行研究例には、より正確な DBC を得るための方法論¹⁾²⁾や、簡便に DBC を取得する提案³⁾⁴⁾がある。

次に、許容加速度を指標に設計された包装貨物は、その緩衝保護性能を評価するために落下試験が行われる。このとき、内容品の損傷を定量評価するため、内容品に生じる加速度が計測されることがある。一般に、落下試験時に発生した衝撃パルスの最大値が、内容品の許容加速度より小さい場合に、その包装設計は合格と判断される。

これまでに、包装貨物落下試験における衝撃加速度最大値のみを用いた合否判定方法では加速度計測条件の設定により、安定した評価が難しいことを示すとともに、衝撃応答解析を用いた新しい緩衝設計評価方法⁵⁾を提案した。これにより、落下試験に対する緩衝包装設計の妥当性は、従来よりも定量的に評価できることが示唆された。一方で、実際の流通過程では、内容品に生じる衝撃パルスの状態は様々に異なるが、上記提案法では入力衝撃パルスの最大加速度、速度変化が異なる場合の評価はできない。

そこで本報では、包装貨物落下試験において、より安全な緩衝包装評価を行うことを目的とし、落下試験時に内容品に生じた衝撃パ

ルスから DBC を導出し、様々な衝撃パルス条件に対して、包装設計の安全性を評価する方法について検討する。

2. 損傷境界曲線による緩衝包装評価

2.1 落下試験結果による損傷境界曲線

内容品の DBC を求めるための試験方法は、JISZ0119 に規定されており、衝撃試験機を用いて実施される。ここでは、許容速度変化試験により許容速度変化 ΔV_c を特定したのち、台形波パルスを用いた許容加速度試験から許容加速度 A_c を把握し、その 2 点を L 字で描画することで DBC が特定できる。このとき、許容加速度試験において、台形波パルスが用いられる理由は、実際に発生可能なすべての衝撃パルスの中で、台形波が最も厳しい条件であることから、製品の流通環境で生じる、あらゆる形状の衝撃パルスに適応した許容加速度を求めるためである⁶⁾。このように得られた DBC は、包装貨物落下試験時に内容品に加わる衝撃加速度最大値が A_c 以下となるように緩衝包装設計を行うために活用される。以降、衝撃試験により得られる DBC を、DBC_sとする。

一方、包装貨物落下試験では、内容品に加速度ピックアップを取り付け、内容品に生じる衝撃パルスを測定し、その最大値が A_c 以上であれば、包装設計が見直される。このとき、実際の落下試験での衝撃パルス（以降、落下試験パルス）は、Fig.1 のように台形波状にならないことが殆どである。したがって、包装貨物落下試験において内容品に A_c 以上が生じたことが、直ちに破損に繋がるとは断言できない。そこで、落下試験パルスをもとに DBC

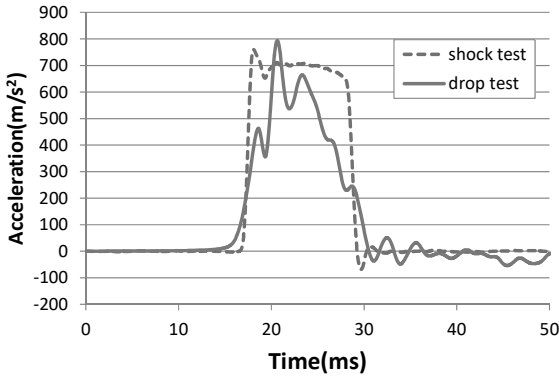


Fig.1 Difference of actual shock pulse shape between shock test and drop test

が導出できれば、その落下試験パルスが内容品に入力されたとき、内容品の破損条件が正確に判断できる。さらに、落下試験時以外の最大加速度や速度変化となる衝撃パルスが発生した場合、内容品が安全であるかについても評価できる。以降、落下試験パルスをもとに導出される DBC を、 DBC_d と呼称する。

2.2 緩衝包装評価のための損傷境界曲線 (DBC_s が既知である場合)

ここでは、DBC_s が既知であるとき、 DBC_d を得るための方法について述べる。

2.2.1 DBC_d 導出方法

内容品の破損部位を 1 自由度のバネマス系と仮定し、破損部位に生じる加速度が限界加速度を超えたときに、内容品が破損すると定義すると、DBC は以下の式で表現できる⁵⁾。

$$A_{in}(x) = \frac{a_c}{T_r(x)} \dots (1)$$

$$\Delta V(x) = A_{in}(x) \cdot D_e = \frac{a_c}{f_c} \cdot \frac{x}{T_r(x)} \dots (2)$$

$$\therefore x = f_c \cdot D_e \dots (3)$$

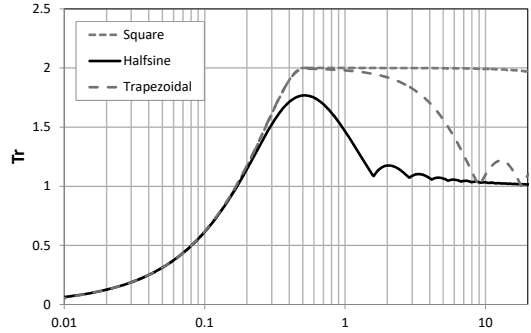


Fig.2 Difference of Shock Transmissibility($T_r(x)$) by shock pulse shape

ここで、 A_{in} 、 ΔV 、 D_e はそれぞれ、入力衝撃パルスの最大加速度、速度変化、有効作用時間、 a_c 、 f_c はそれぞれ破損部位の限界加速度と固有振動数、 $T_r(x)$ は衝撃伝達率である。 $T_r(x)$ は、横軸に f_c と D_e の積、縦軸に入力衝撃パルスの最大値と、それが f_c に伝達するときの応答加速度の最大値の比率で表現され、その形状は Fig.2 のように入力衝撃パルスに依存する⁷⁾。

したがって、脆弱部位の a_c 、 f_c および $T_r(x)$ が特定できれば、式(1)、式(2)にそれらを代入することで、DBC が得られる。

脆弱部位の a_c 、 f_c は、DBC_s が既知であれば以下の式⁸⁾から同定できる。ただしここでは、DBC_s で用いる衝撃パルスは便宜上、矩形波とみなしている。

$$a_c = 2A_c \dots (4)$$

$$f_c = \frac{A_c}{\pi \Delta V_c} \dots (5)$$

次に $T_r(x)$ の特定には、落下試験時に内容品の衝撃パルスを計測したのち、衝撃応答スペクトル⁷⁾ (Shock Response Spectrum, SRS) を算出する。SRS とは、最大加速度 A_{in} とする入力衝撃パルスが、さまざまな固有振動数 f_n の

バネマス系へ伝達するとき、それぞれの系の応答加速度最大値 $A_{out}(f_n)$ を示す(Fig.3)。

ここで、 $A_{out}(f_n)$ を入力衝撃パルスの A_{in} で除算すると、その伝達率 $T_r(f_n)$ は以下のように表現できる。

$$T_r(f_n) = \frac{A_{out}(f_n)}{A_{in}} \dots (6)$$

このとき $A_{out}(f_n) = a_c$ 、 $f_n = f_c$ とみなしたうえで、入力衝撃パルスの D_e を式(3)に代入し、式(6)に適用することで $T_r(x)$ が得られる。

$$T_r(x) = \frac{A_{out}(x)}{A_{in}} \dots (7)$$

したがって、落下試験パルスを計測し、その A_{in} および D_e と、落下試験パルスから得られる SRS より、 $T_r(x)$ が特定できる。ただし前述の通り、落下試験パルスは理想パルスとは異なり、様々な周波数を含む複雑な波形になるため、ここでの D_e は、式(7)を用いることとした。

$$D_e = \frac{\Delta V_t}{A_{in}} \dots (8)$$

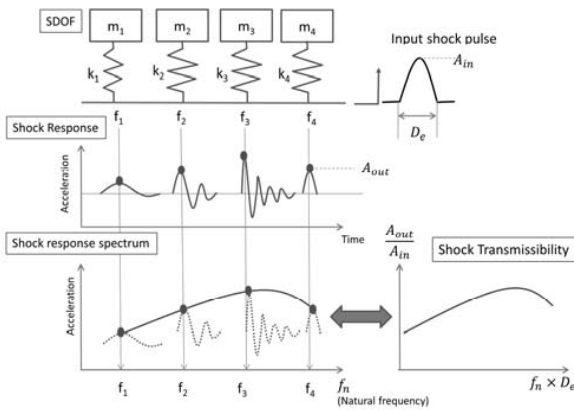


Fig.3 Relationship between SRS and Shock Transmissibility

ここで ΔV_t は落下試験パルスの速度変化である。

最後に $T_r(x)$ および式(4)、式(5)を、式(1)、式(2)に代入することで DBC_d が得られる。 DBC_d グラフ上に落下試験パルスの最大加速度と速度変化を図示することで、緩衝設計が内容品にとって安全であるかの判断とともに、落下衝撃パルス以外の衝撃が内容品に加わったときの内容品の破損の有無も確認できる。Fig.4 に DBC_s から DBC_d 導出までの概要を示す。

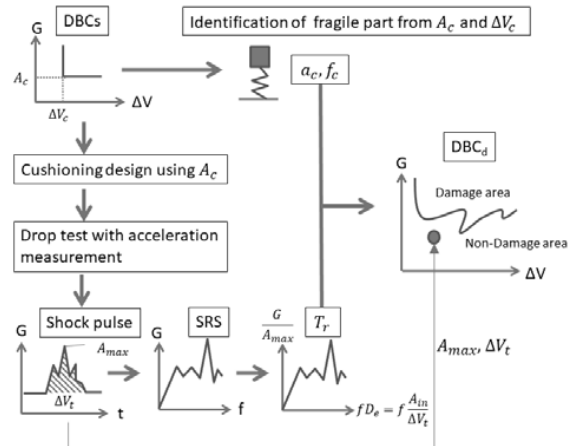


Fig.4 Outline of derivation for DBC_d

2.2.2 実測データに基づく DBC_d 算出

以降、具体的な DBC_d 導出のケーススタディを考える。

与条件として、内容品の DBC_s を $A_c = 800m/s^2$ 、 $\Delta V_c = 3m/s$ とし、包装貨物落下試験を落下高さ 60 cm とする。落下試験時に包装貨物内に発生した落下試験パルスは、既報⁹⁾にて計測された加速度波形(Fig.5、 $A_{max} = 1166m/s^2$ 、 $\Delta V_t = 4.43m/s$ 、試験落下高さ 60cm、パルプモールド成形緩衝材)を用いる。

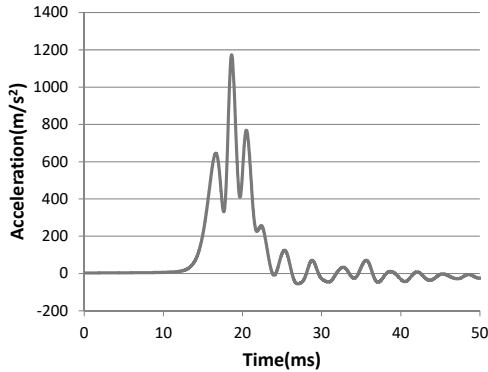


Fig.5 Example of shock pulse on package by drop test from 60cm height

まず脆弱部位の a_c 、 f_c は、DBC_sの与条件を式(4)、式(5)に代入すると、それぞれ1600m/s²と84Hzとなる。次に、Fig.5のSRSはFig.6(a)となり、式(7)から $T_r(x)$ はFig.6(b)のように得られる。一般に、Fig.5のような複雑な衝撃パルスからSRSを算出する場合は専用解析ソフトウェアが用いられる。ここでは解析ツールとしてショックマネージャSMS-500(神栄テクノロジー製)を利用した。

以上から、 a_c 、 f_c と $T_r(x)$ を式(1)、(2)に代入することで、DBC_dはFig.7のように導かれる。さらにここでは緩衝性能評価のために、Fig.5の A_{max} と ΔV_t の関係も図示した。

2.2.3 考察

内容品で発生した A_{max} が A_c よりも大きくなっているため、従来の最大加速度のみでの評価の場合、この緩衝設計は不合格と判断される。一方で本提案では、Fig.7より、落下試験パルスはDBC_dの非破損領域にあるため、緩衝包装設計は合格と判断できる。この結論の違いは、DBC_sとDBC_dで生じる衝撃パルス形状の違いにより、内容品内部への衝撃伝達特性が異なることによる。Fig.8はDBC_sとDBC_d

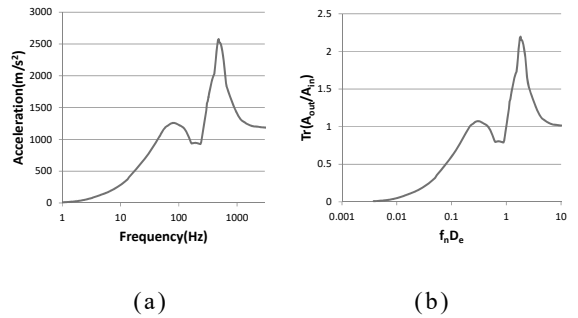


Fig.6 Shock response spectrum(a) and shock transmissibility(b) analyzed from shock pulse by drop test

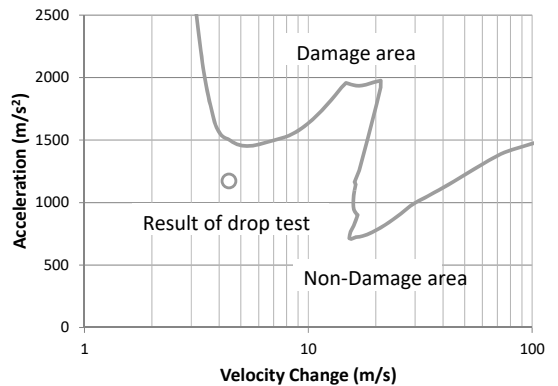


Fig.7 Damage Boundary Curve and test result by drop test

の算出元となった $T_r(x)$ の比較である。DBC_sに比べDBC_dの $T_r(x)$ の応答加速度が小さくなっている範囲(斜線部)が確認できる。Fig.9は前項で求めた a_c 、 f_c と、Fig.8の2つの $T_r(x)$ から算出したDBC_sとDBC_dである。DBC_dにはFig.8の斜線部に起因する安全領域(Fig.8斜線部、 A_c を超えても内容品が破損しない範囲)がある。このように、台形波では破損する条件であっても、 $T_r(x)$ の違いにより、内容品は安全と判断できる領域が生じる。

一方で、DBC_dがDBC_sを下回る箇所も見られる。これは、Fig.8にあるように、落下試験パルスの $T_r(x)$ が2倍を超えている箇所(クロ

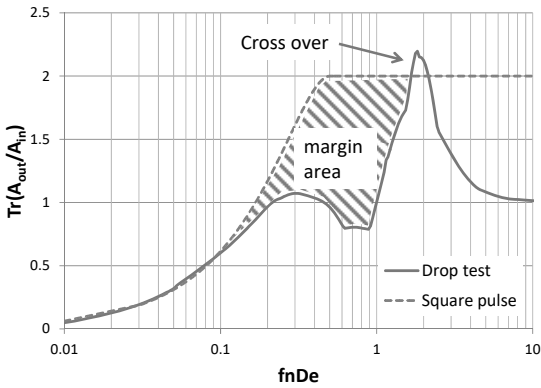


Fig.8 Difference of T_r between drop test result and square pulse by shock test

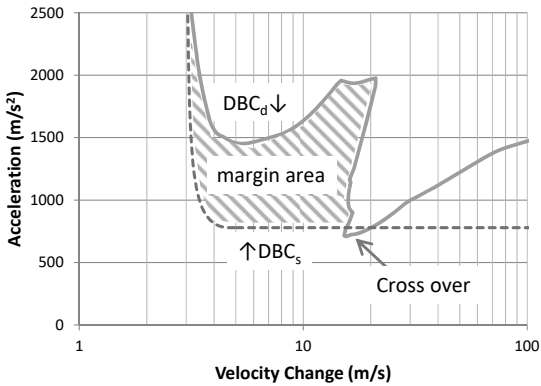


Fig.9 Comparison of DBC_d and DBC_s

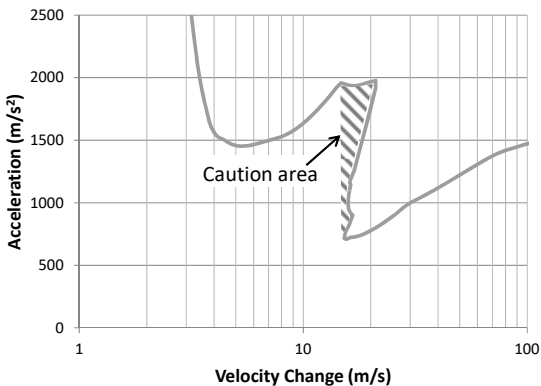


Fig.10 Caution area on DBC_d

スオーバー)があるためであり、落下試験パルスがこの範囲に該当する場合は A_c 以下であ

っても、内容品は破損するため、緩衝設計を見直さなければならない。

さらに、同じ速度変化でも最大加速度が低くなる場合に、破損領域に入る領域 (Fig.10内の斜線部、以降、警戒領域と呼称) が認められる。落下試験時の衝撃パルスが、この領域内に入る場合、落下試験には合格と判断できるが、実際の物流現場で内容品が破損する可能性が考えられる。これは例えば、実際の物流環境で貨物が傾いた状態での落下や、落下面に緩衝材となるような素材があった場合、速度変化が同じでも低い加速度が発生することで、内容品に不具合が生じる可能性があることを示す。したがって、警戒領域に入るような包装設計となる場合は、落下試験には合格したとしても、事前に緩衝設計を見直すことで、より安全な包装設計となることが期待される。

このように、 $T_r(x)$ の違いにより、脆弱部の損傷領域は変化する。本提案により、従来の落下試験パルスの最大加速度のみによる評価や、衝撃応答評価⁵⁾では、見分けることができなかった破損条件が明確になる。

ただし上記のことは、今回の提案方法では、 $T_r(x)$ が落下高さや方向に依存せず、同じ特性を持つことが前提となっている。落下条件別の $T_r(x)$ の特性把握については、今後の検討課題である。

なお、Fig.7のような複雑な形状となる DBC は、中嶋らによって、内容品の非線形性が要因となることが解明されている⁵⁾。すなわち、今回の DBC_d も、入力側の衝撃パルスに様々な周波数が含まれることで、 $T_r(x)$ が複雑な形状

になったため、警戒領域(Fig.10)が発現したといえる。

2.3 緩衝包装評価のための損傷境界曲線

(内容品の DBCs が未知である場合)

2.3.1 DBC_d 導出方法

実際の包装設計現場では、DBC_s が明らかにされず、 A_c しか指定されない場合もある。以降は、このような場合の DBC_d 導出方法について検討する。

脆弱部位の a_c 、 f_c の関係は、内容品の ΔV_c が未知である場合、1 つに特定できない。そこで、まずは f_c が取り得る範囲を考える。 f_c と ΔV_c には式(5)の関係があることから、 ΔV_c の下限値 ($\Delta V_{cmin.}$) を設定できれば、 f_c の上限値が特定できる。 $\Delta V_{cmin.}$ は、たとえば DBC_s を特定するための衝撃試験機の一般的な制御範囲を考慮すると、2m/s とできる。これより、 $\Delta V_c = \Delta V_{cmin.}$ として式(5)に代入することで、 f_c の上限値が得られる。

次に f_c の下限値は、許容加速度が得られる範囲、すなわち矩形波 $T_r(x)$ において、式(4)が成立する条件である式(9)を考えればよい。ここで D_e は $A_{in} = A_c$ として式(8)を式(9)に代入する。

$$f_c D_e \geq \frac{1}{2} \dots (9)$$

以上の関係を式(5)に代入して整理すると、検討すべき f_c の検討範囲は、式(10)となる。

$$\frac{A_c}{2\Delta V_t} \leq f_c \leq \frac{A_c}{\pi\Delta V_{cmin.}} \dots (10)$$

以上から、ここで検討すべき f_c と a_c の関係は、式(4)と式(10)となる。実際に DBC_d を算出するためには、式(10)の全体をカバーできるように複数の f_c を選定する。これは、式(10)を等

間隔で 5 分割した f_c を採用するなどが考えられる。たとえば、式(10)にて 50Hz から 150Hz となったとき、 f_c は 50Hz、75Hz、100Hz、125Hz、150Hz が採用できる。このように、 f_c と a_c の関係を特定できれば、2.2 と同様の手順で、 f_c 毎に DBC_d を算出し、それらすべての DBC_d と落下試験パルスと比較することで、緩衝包装設計の保護性を確実に評価できる。Fig.11 に DBC_d 導出までの流れを示す。ただし、上記 f_c の最適な分割方法は今後検討の余地がある。

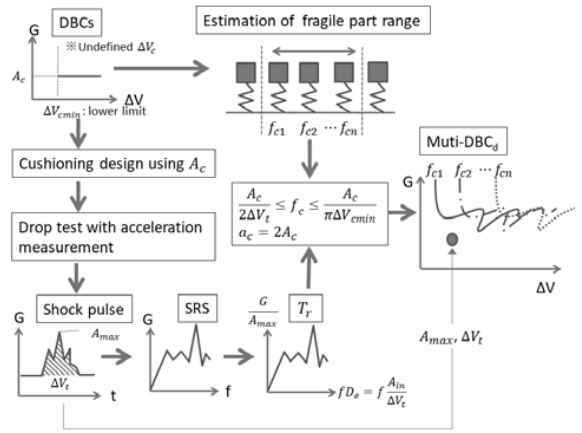


Fig.11 Outline of derivation for multiple DBC_d

2.3.2 DBC_d 導出例と考察

ΔV_c が未知である場合に対する DBC_d の具体的な導出例を以下に示す。

$A_c = 800 \text{ m/s}^2$ とし、緩衝包装設計後の落下試験パルスは Fig.5 ($\Delta V_t = 4.43 \text{ m/s}$) とする。まず、 $\Delta V_{min} = 2 \text{ m/s}$ 、 A_c を式(10)に代入すると f_c の範囲は 88Hz から 125Hz となる。ここで、 f_c は式(10)の範囲を等間隔で 5 等分すると、88Hz、98Hz、107Hz、116Hz、125Hz (小数点以下四捨五入) となる。また、 a_c は式(4)から 1600 m/s^2 となる。

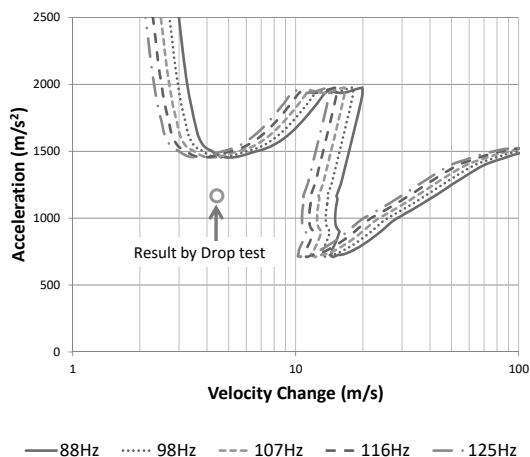


Fig.12 DBC_d calculated by multiple frequencies with result by drop test

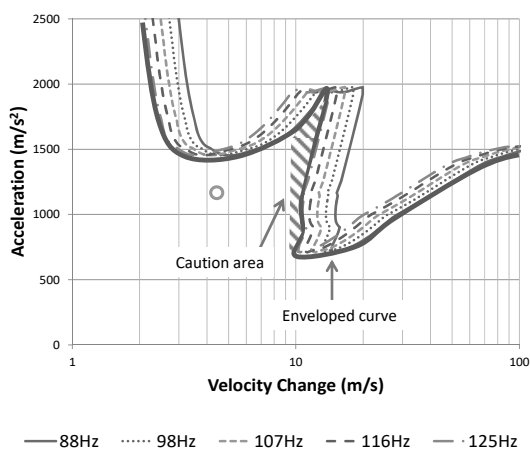


Fig.13 Caution area from enveloped curve

$T_r(x)$ は Fig.6(b)であるので、 DBC_d は、固有振動数毎に 2.2 と同様の手順で算出できる。

Fig.12 に、各 DBC_d と Fig.5 の結果を図示する。

これより、2.2 と同様、Fig.5 の衝撃パルスはいずれの DBC_d においても、非損傷領域にあり、警戒領域にも入っていないことから、安全であると判断できる。なお、今回は該当しないが、警戒領域を考慮する場合は、得られた全ての DBC_d を包絡する曲線(Fig.13 の太線)から判断する必要がある。

3. 提案法の実施手順

本提案を利用する手順を以下に示す。

3.1 DBC_s が既知である場合

1. 包装貨物落下試験時、内容品に加速度ピックアップを取り付け、衝撃パルスを測定する。
2. 1. で得た衝撃パルスから SRS 解析を実施し、式(7)、式(8)をもとに $T_r(x)$ を求める。
3. a_c 、 f_c を式(4)、式(5)から算出する。
4. a_c 、 f_c と $T_r(x)$ を式(1)、式(2)に代入し、 DBC_d を算出する。
5. 1. の衝撃パルスの最大加速度、速度変化を DBC_d に図示し、非損傷領域であることを確認できれば緩衝包装設計は合格とし、損傷領域にあれば緩衝設計を見直す。ただし、試験結果が警戒領域に存在する場合は、緩衝包装設計の見直しを検討する。

3.2 DBC_s が未知である場合

1. 包装貨物落下試験時、内容品に加速度ピックアップを取り付け、衝撃パルスを測定する。
2. 1. で得た衝撃パルスから SRS 解析を実施し、式(7)、式(8)をもとに $T_r(x)$ を求める。
3. 式(10)の範囲をカバーできる複数の f_c をとる。たとえば式(10)を 5 分割する f_c を採用する。 a_c は式(4)から求める。
4. 3. で設定した複数の a_c 、 f_c の関係と、3. の $T_r(x)$ を式(1)、式(2)に代入し、複数の DBC_d を得る。
5. 4. で得た複数の DBC を、包絡した DBC_d に対し、1. の衝撃パルスの最大加

速度、速度変化をプロットし、非破損領域に存在すれば緩衝包装設計は合格とする。このとき、損傷領域にあれば緩衝設計を見直す。ただし、試験結果が警戒領域に存在する場合は、緩衝包装設計の見直しを検討する。

4. 結語

本提案では、包装貨物落下試験時に内容品に生じる衝撃パルスから損傷境界曲線を導出し、緩衝包装設計の安全性を評価する方法を提案した。

これにより、落下試験で生じた衝撃パルスの最大値が許容加速度を超えたとしても、内容品が損傷しない範囲（安全領域）や、許容加速度未満でも内容品が損傷する可能性があることを明確にできた。さらに、内容品に生じる衝撃パルスと同じ速度変化でも最大加速度が小さくなる場合には、内容品が損傷する範囲（警戒領域）を確認できるようになる。このことは、落下試験には合格しても、実際の流通環境において破損するリスクがあることを示している。

以上から、本提案を利用することで、従来の方法よりも正確に緩衝包装設計を評価でき、余分な費用（再設計のための時間とその人件費、緩衝材増加のための費用など）の削減が期待される。さらに、落下試験は合格とされても、流通環境での内容品破損が予測できるようになることから、出荷前に包装設計による事前対策が可能となり、流通時の不具合防止にも貢献すると考えられる。

<参考文献>

- 1) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義春、「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 11(4)、p.217(2002)
- 2) Shogo Horiguchi, Katsuhiko Saito, Test method for enhanced mechanical shock fragility statistics accuracy、Packag. Technol. Sci. 32(4): p.199(2019)
- 3) 中嶋隆勝、落下試験機による損傷境界曲線導出法の提案、日本包装学会誌 20(2)、p.99(2011)
- 4) 川口和晃、1 試料による正弦半波衝撃パルスを用いた簡易衝撃強さ試験方法の提案、日本包装学会誌 29(4)、p.299、(2020)
- 5) 川口和晃、衝撃応答解析を用いた緩衝包装設計評価方法、日本包装学会誌 28(4)、255-261、(2019)
- 6) JISZ0119:2002、付属書 1
- 7) 斎藤勝彦編集、「実務者のための力学的輸送包装設計ハンドブック」、テクノシステム(株)出版、p.130、(2018)
- 8) 斎藤勝彦、長谷川淳英、輸送包装の基礎と実務、幸書房、p.21(2008)
- 9) 川口和晃、安全な高さでの自由落下試験による包装貨物限界落下高さ衝撃加速度推定、日本包装学会誌 23(5)、p.373(2014)

(原稿受付 2021年1月25日)

(審査受理 2021年3月9日)