

ノート~~~~~

# 損傷境界曲線を用いた緩衝包装評価における ローパスフィルタの影響

川口和晃\* 齋藤勝彦\*\*

## Influence of Low-pass Filter on Cushioning Evaluation with Damage Boundary Curve

Kazuaki KAWAGUCHI\* Katsuhiko SAITO

流通過程で生じる様々な衝撃に対し、緩衝包装設計の保護性能を定量評価するため、包装貨物落下試験時の衝撃パルスから損傷境界曲線を導出する方法が提案されている。本報告では、実落下試験データを用いて、ローパスフィルタの遮断周波数が損傷境界曲線と合否判定結果に与える影響を確認した。その結果、損傷境界曲線は、遮断周波数の設定によって、損傷領域が異なることに加えて、緩衝設計の合否判定結果は、遮断周波数が低すぎる場合に、差異が生じる場合があることを明らかにした。合否判定の差異は、破損部位の固有振動数における応答加速度が、ローパスフィルタにより低く見積もられたことが要因であることを確認し、さらに遮断周波数の設定を、その固有振動数の3倍以上とすれば、正しい合否判定ができることを示した。

To evaluate a protective function of cushioning design against various shock events in transport, new evaluation method that Damage Boundary Curve is calculated using measured shock pulse when drop test has been proposed.

This paper shows the influence of cut-off frequency of low-pass filter to Damage Boundary Curve and pass/fail judgement by new evaluation method. As the result, damage area of Damage Boundary Curve was changed dependent on cut-off frequency. Also the difference of pass/fail judgement of cushioning design occurred when cut-off frequency of low-pass filter setting was too low because of the response peak acceleration at critical component calculated lower than the original value. Moreover we found the suitable cut-off frequency setting that should be over 3 times of natural frequency on critical component.

キーワード：包装設計、損傷境界曲線、落下試験、加速度計測、ローパスフィルタ

Keywords：Package Design, Damage Boundary Curve, Drop test, Acceleration measurement, Low-pass filter

\* 神栄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, Minatojima-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

緩衝包装设计が、その流通過程において生じる落下事象に対し、内容品を適切に保護できているかどうかを判断するために、包装貨物落下試験が行われる。特に電子機器分野では、試験時に内容品に発生する最大加速度を用いて緩衝設計の合否判定がなされる。これまで、最大加速度のみの合否判定方法では、衝撃パルス計測時のローパスフィルタの設定により、正しい合否判定が難しい場合があることを示し、衝撃応答解析による評価方法を提案した<sup>1)</sup>。

一方で、実際の流通過程では、包装貨物は落下試験による落下高さ以外にも、様々な衝撃を受けることが想定される。これらを考慮した緩衝設計の評価方法として、落下試験時に内容品に発生した衝撃パルスから損傷境界曲線 (Damage Boundary Curve, DBC) を導出する方法 (提案法)<sup>2)</sup>を考案したが、衝撃パルスに適用するローパスフィルタについて考察されていない。

ここでは、提案法において、衝撃パルス計測におけるローパスフィルタが DBC 算出およ

び合否判定に与える影響と、適切なフィルタリング条件について考察する。

## 2. ローパスフィルタが DBC に与える影響

実測される衝撃パルスには、本来発生した信号以外にも様々な周波数成分が含まれる。ローパスフィルタとは、衝撃パルス内に含まれる周波数成分のなかで、任意の周波数以上の利得 (入力加速度に対する応答加速度の比) を減衰させる信号処理方法である。このとき減衰させる基準となる周波数のことを、遮断周波数 ( $f_{LPF}$ ) とよぶ。このようなローパスフィルタは、衝撃パルスに含まれる不要なノイズ成分を除去し、本来発生した衝撃の形状を明らかにするために用いられる。

ここでは落下試験<sup>3)</sup> (使用機器: 加速度計測システム SMH500) で包装内容品に発生した衝撃パルスを用いて、ローパスフィルタ条件を変更した場合において算出される、衝撃応答スペクトル (Shock Response Spectrum, SRS)、衝撃伝達率 $T_r$ および DBC の差異について考察する。

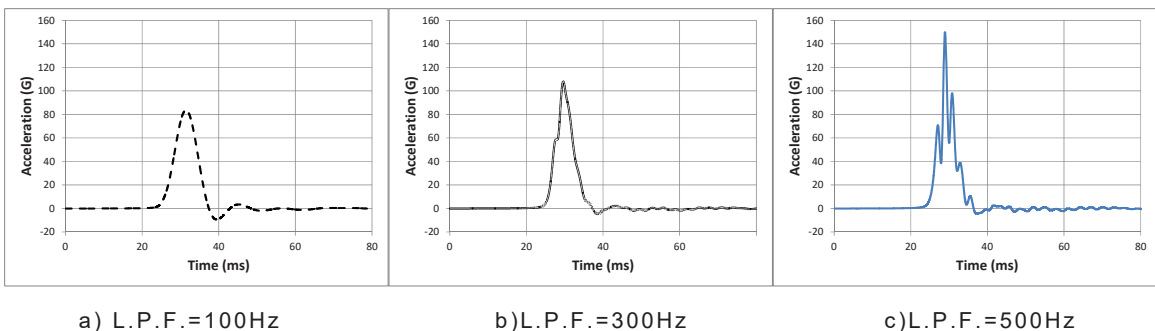


Fig.1 Influence of low-pass filter (L.P.F.) on shock pulse

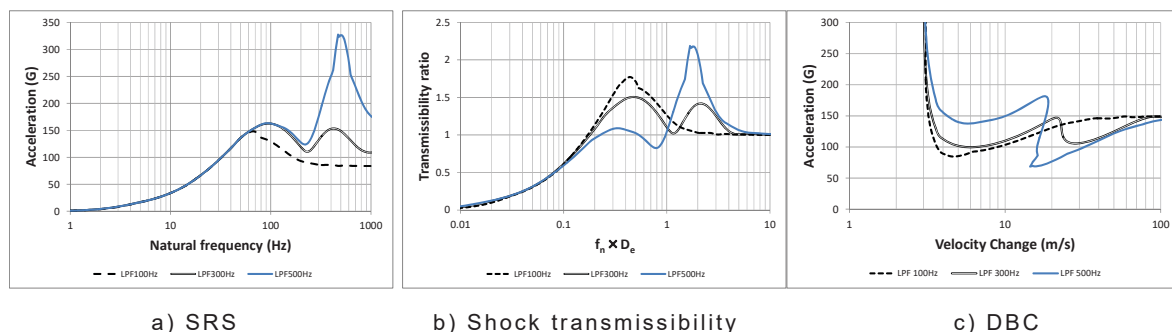


Fig.2 Influence of low-pass filter on shock analysis result

Fig.1 は落下高さ 80 cmからダミー貨物（パルプモールド緩衝材利用）を落下させたとき、貨物内部に発生した衝撃パルスに対して、それぞれ $f_{LPF}$ を 100Hz、300Hz、500Hz としたときの衝撃パルスである。このように同一の衝撃パルスであっても、 $f_{LPF}$ が高くなるほど、最大加速度は大きくなる。このことが、最大加速度のみを使用した緩衝設計評価では、正しい合否判定が難しくなる要因である。

Fig.2 に Fig.1 から算出されるそれぞれの SRS、 $T_r$ および DBC を示す。

SRS とは、任意の衝撃パルスが、様々な固有振動数をもつバネマスモデルに入力されたとき、それぞれのモデルに発生する最大応答加速度を数値解析する手法で、入力衝撃パルスから算出することができる。Fig.2 a)より、低周波数帯では、いずれの $f_{LPF}$ も同じ応答加速度を示すが、高周波数帯においては、 $f_{LPF}$ が低いほど、ローパスフィルタの影響で応答加速度が低減することがわかる。

$T_r$ とは、任意の有効衝撃作用時間 $D_e$ となる入力衝撃パルスが、それぞれのバネマスモデルに入力したときの各モデルの利得を示す。 $T_r$ は入力衝撃パルスの最大加速度、有効作用時間が既知であれば、SRS から算出することができる。Fig.2b)は Fig.2a)をもとに算出し

た $T_r$ である。ここでの $D_e$ は、Fig.1 における衝撃パルスの速度変化から最大加速度を除算して求めた。これより、 $f_n D_e$ がおよそ 1 以下の範囲では、 $f_{LPF}$ が小さいほど伝達率が大きくなり、 $f_n D_e$ が 1 より大きい範囲では、その傾向が逆転する傾向にあることがわかる。

Fig.2c)は、Fig.2b)から導出した DBC の例である。DBC 導出条件は、内容品の許容加速度 $A_c$ を 100G、許容速度変化 $\Delta V_c$ を 3m/s とし、既報<sup>2)</sup>の手順に基づいた。これより、 $f_{LPF}$ によって損傷領域が異なり、その特徴は相対的に低い速度変化では $f_{LPF}$ が高いほど、損傷領域の下限値が大きくなる。この特徴は、 $T_r$  (Fig.2b)がローパスフィルタに影響されたために生じている。このように、同じ衝撃パルスでも、ローパスフィルタの $f_{LPF}$ 設定により、導出される DBC の形状は異なる。

### 3. ローパスフィルタが緩衝設計合否判定に与える影響

ここでは、提案法の緩衝性能合否判定方法に対する $f_{LPF}$ の影響と、適切なフィルタリング方法について考察する。なお、試験データは前項と同じものを利用した。

提案法による緩衝設計の合否判定は、落下試験時の衝撃パルスの最大加速度と速度変化

を、導出された DBC にプロットし、落下試験結果が損傷領域に当てはまるかどうかで判断する (Fig.3)。ここでは、内容品の条件が異なる場合を考慮するため、内容品の  $A_c$  と  $\Delta V_c$  を任意に変化させたときに、 $f_{LPF}$  が合否判定に与える影響を確認する。

Table1 は、Fig.2b) をもとにして、 $f_{LPF}$  毎に、 $A_c$  を 50G、75G、100G、 $\Delta V_c$  を 1m/s、2m/s、3m/s、4m/s としたときに算出される DBC を用いた合否判定結果を示す。これより、 $A_c$  が 50G、100G のときは、いずれの条件でも合否判定に差異は生じないが、 $A_c$  が 75G かつ  $\Delta V_c$  が 2m/s、3m/s のとき、 $f_{LPF}$  によって合否判定が逆転する。

衝撃パルスが DBC の損傷領域内となる条件は、SRS における最大応答加速度が、損傷部位の限界加速度  $a_c$  を上回る場合である。ここで、内容品の  $A_c$  と  $\Delta V_c$  を求める衝撃強さ試験<sup>4)</sup>において、便宜上、入力衝撃パルスを矩形波とすると、損傷部位の固有振動数  $f_c$  と  $a_c$  は式(1)(2)で算出できる。

$$a_c = 2A_c \dots (1)$$

$$f_c = \frac{a_c}{2\pi\Delta V_c} = \frac{A_c}{\pi\Delta V_c} \dots (2)$$

Fig.4 は、Fig2a) に対して、合否判定に差異

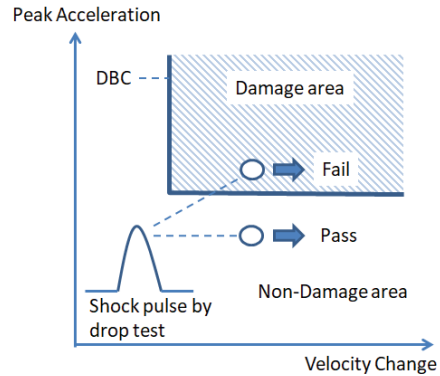


Fig.3 Pass/fail judgement using DBC

が生じた  $A_c$  と  $\Delta V_c$  の組み合わせから算出された  $f_c$  と  $a_c$  の関係を示す。これより、 $f_{LPF}$  が 100Hz の SRS からは、いずれの条件でも応答加速度が  $a_c$  を下回っている。一方で  $f_{LPF}$  が 300Hz、500Hz の場合は、応答加速度が  $a_c$  を上回る。この違いが、Table1 の合否差異要因である。これは  $f_{LPF}$  が 100Hz の SRS では、本来評価すべき  $f_c$  の応答加速度を過剰に減衰させているためであり、誤った判定であることを意味する。

このように、必要以上に  $f_{LPF}$  を下げた状態で提案法を利用すると、合否判定を見誤る危険がある。このことを予防するために、ここでは破損部位の  $f_c$  を求めたのち、 $f_{LPF}$  を設定する方法を考える。まず、 $f_c$  は式(2)より既知となる。さらにこれまで、SRS における任意の周

Table1 Influence of low-pass filter toward pass/fail judgement

$f_{LPF}$	$A_c$	$\Delta V_c$			
		1m/s	2m/s	3m/s	4m/s
100Hz	50G	Fail	Fail	Fail	Fail
	75G	Pass	Pass	Pass	Pass
	100G	Pass	Pass	Pass	Pass
300Hz	50G	Fail	Fail	Fail	Fail
	75G	Pass	Fail	Fail	Pass
	100G	Pass	Pass	Pass	Pass
500Hz	50G	Fail	Fail	Fail	Fail
	75G	Pass	Fail	Fail	Pass
	100G	Pass	Pass	Pass	Pass

波数範囲の応答加速度を維持するための $f_{LPF}$ 推奨設定は、任意の固有振動数の3倍以上とすればよいことが確認されている<sup>1)</sup>。このことと、式(2)より、落下試験の衝撃パルスからDBCを算出する場合の適切な $f_{LPF}$ 設定値は、式(3)となる。

$$f_{LPF} \geq 3f_c = \frac{3A_c}{\pi\Delta V_c} \dots (3)$$

たとえば $A_c = 735\text{m/s}^2$  (75G)、 $\Delta V_c = 3\text{m/s}$ の場合、 $f_{LPF}$ は式(3)より、234Hz以上となる。この $f_{LPF}$ を適用した衝撃パルスから算出したSRS(Fig.5)から、その応答加速度は $a_c$ を上回っている。Fig.6にFig.5から導出したDBCに落下試験結果を図示した。これより、落下試験結果は損傷領域に入っていることから、この緩衝設計は不合格と判断できる。

#### 4. 結語

DBCによる緩衝包装評価方法において、衝撃パルス計測時のローパスフィルタの影響について確認した。その結果、ローパスフィルタの遮断周波数が過剰に低い場合においては提案法の合否判定に差が生じることがわかった。このことを予防するために、破損部位の固有振動数を求めた上で、その3倍以上の遮断周波数を適用すれば、誤判定は回避できることを示唆した。

#### <参考文献>

- 1) 川口和晃、衝撃応答解析を用いた緩衝包装设计評価方法、日本包装学会誌 28(4), p.255, (2019)
- 2) 川口和晃、斎藤勝彦、損傷境界曲線を用いた緩衝包装評価方法、日本包装学会誌 30(2), p.139, (2021)

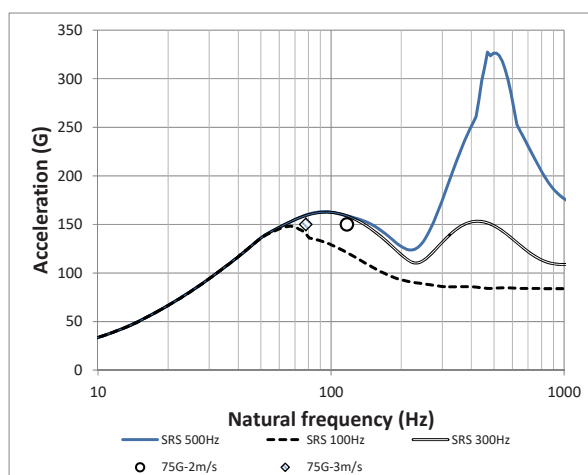


Fig.4 SRS by each filtering with  $a_c$  of fragile component

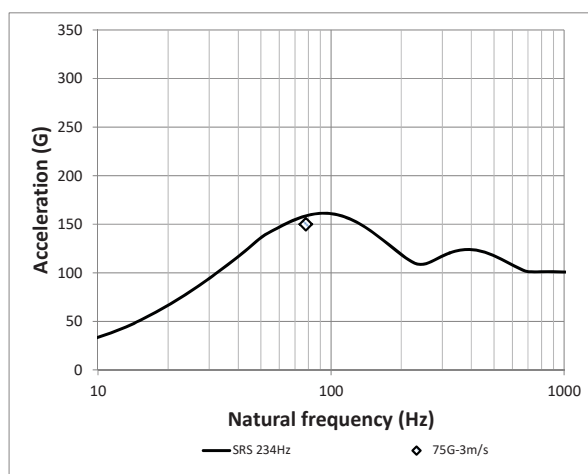


Fig.5 SRS by 234Hz filtering

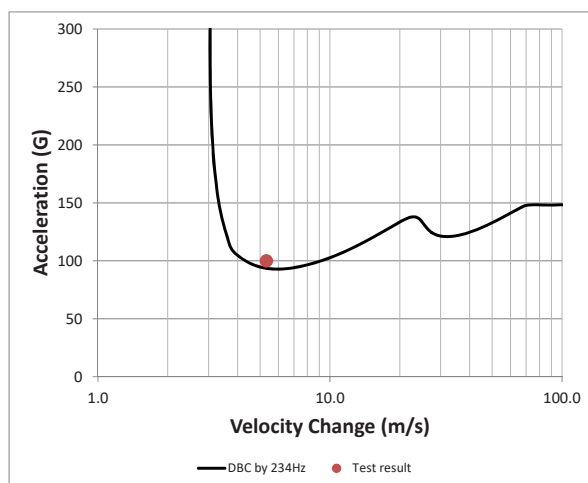


Fig.6 Test result with DBC by 234Hz filtering

- 3) 川口和晃、斎藤勝彦、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)
- 4) JISZ0119:2002

(原稿受付 2021 年 10 月 4 日)

(採録受理 2021 年 11 月 12 日)