

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

中嶋隆勝*・斎藤勝彦**・久保雅義**・寺岸義春*

A non-linear study on the mechanical-shock fragility of stacked products

Takamasa NAKAJIMA*, Katsuhiko SAITO**, Masayoshi KUBO** and Yoshiharu TERAGISHI*

In order to evaluate the fragility of product exactly, we studied on the fragility of stacked products by using 2 kinds of non-linear models. The main results obtained are as follows.

- (1) In the case that products are damaged by shock load, the lower product is more fragile. And in the case that they are damaged by acceleration, the position of the damaged product depends on the shock pulse.
- (2) If a second peak or a third peak appear on the shock response by rectangular shock pulse, the shock spectrum and the damage boundary curve take the form of stairs.
- (3) Critical acceleration that would be evaluated by the shock fragility test will fluctuate, unless velocity change is determined by criteria such as the drop height in the transportation.
- (4) If there is a sudden change on the shock spectrum, the phenomenon that products aren't damaged by even higher acceleration than the critical acceleration may occur.

Keywords : Package, Transportation, Cushioning design, Shock, Mechanical-shock fragility, Non-linear model, Stack, Product

製品の衝撃強さを正確に評価するために、著者らは、前報での線形モデルによる検討に引き続き、2種類の非線形モデルでの数値解析により、段積みされた製品の衝撃強さを検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 製品が衝撃荷重によって破損する場合、下段の製品の方が破損し易く、加速度によって破損する場合、破損する製品の位置（段数）は衝撃パルスによって異なる。
- (2) 入力パルスが方形波の場合、応答波に2次、3次のピークが発生すると、その衝撃スペクトル及び損傷境界曲線は階段状に減少する。
- (3) 衝撃強さ試験で許容加速度を評価する場合、輸送環境での等価落下高さなどの現実的な基準により速度変化を設定しなければ、再現性のある結果が得られない。
- (4) 衝撃スペクトルに急激な変化がある場合、許容加速度以上の加速度でも破損しない逆転現象が発生する。

キーワード：包装、輸送、緩衝設計、衝撃、衝撃強さ、非線形モデル、段積み、製品

*大阪府立産業技術総合研究所（〒594-1157 和泉市あゆみ野2-7-1）：Technology Research Institute of Osaka Prefecture 2-7-1 Ayumino, Izumi, Osaka 594-1157, Japan

**神戸商船大学（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5丁目1-1）：Kobe University of Mercantile Marine 1-1 5chome, Fukaeminamimachi, Higainada-ku, Kobe 658-0022, Japan

1. 緒言

輸送が終わるとゴミとなる包装材料の使用量はできるだけ削減し、なおかつ、輸送中に発生する衝撃から製品を十分に保護する必要がある。そのためには、最適緩衝設計^{1)~6)}を実践することは言うまでもないが、その前提となる製品衝撃強さを正確に評価する⁷⁾⁸⁾ことも重要であり、そうすることによって、これまで以上に製品強度を活かした緩衝包装设计が実現できる。

前報⁹⁾では、段積みされた製品の衝撃伝達率及び衝撃強さについての基礎的な知見を得るため、線形モデル(2自由度ばね質量系)による衝撃応答の理論解析を行った。その結果、衝撃スペクトル及び損傷境界曲線の特徴を明らかにすることができた。また、それらの特徴は、製品の破損原因が衝撃荷重である場合と加速度である場合とでは、全く異なることがわかった。

本研究では、さらに現実に近い衝撃応答となる非線形モデルを用いた数値解析により、段積みされた製品の衝撃応答、衝撃伝達率及び損傷境界曲線について検討した。また、これらの検討を通して、衝撃強さ試験における問題点を明示し、その対策について提言した。

2. 製品及び衝撃のモデル化

Fig. 1 に示した4種類の製品モデルについて説明する。まず、初めの Model-O は現在、JIS、ASTM の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る。次に Model-A は2自由度ばね質量系であり、前報⁹⁾で理論解析を行い検討したモデルである。残る

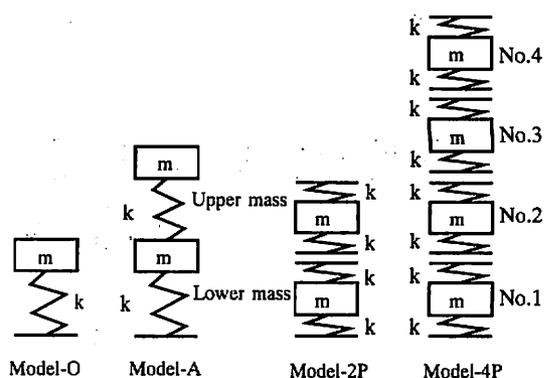


Fig.1 Mathematical Model for Products

Model-2P 及び Model-4P は、本研究で新たに解析する非線形モデルである。数値解析によってこれら非線形モデルの衝撃応答を計算し、衝撃スペクトル及び損傷境界線図を作成した。これらの非線形モデルが他のモデルと大きく異なる点は、製品に引張り力が発生しないという点である。ただし、製品が圧縮される時には、線形ばね質量系と同様に応答する。実際の段積み状態では衝撃により製品が多少飛び跳ねたりすることがあり、これらの挙動を表現するためには、このような非線形モデルが必要である。

Fig. 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(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る。製品が発泡プラスチック製緩衝材により包装された貨物落下衝撃を受けたときにこれに似た衝撃パルスが発生する。Fig. 2(b)は方形



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

Fig.2 Two kinds of shock pulse

波衝撃パルスである。1自由度のばね質量モデルにこの衝撃パルスを入力すると $T_0 \cdot f_c \geq 0.5$ の範囲で衝撃伝達率は一定 ($T_r = 2$) となる⁷⁾。一方、入力パルスが正弦半波やのこぎり波では衝撃伝達率は一定とならず⁷⁾、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 0119-1994 及び ASTM D 3332-88 では許容加速度を求めら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、衝撃伝達率もほぼ一定に保たれている⁷⁾。

3. 数値解析方法

(Model-2P、Model-4P)

3.1 各定数の設定

前報⁹⁾と同様、各製品の物理定数は、飲料用のスチール缶 (340 g 入り) を参考にして次のように設定した。

ばね定数 $k = 423 \text{ N/m}$ 、質量 $m = 390 \text{ g}$
直径 66 mm、長さ 98 mm

また、損傷境界曲線を作成する際、製品単体の許容衝撃荷重は 520 N に設定し、許容加速度は 980 m/s^2 に設定した。

3.2 衝撃応答の数値計算

まず、各質量部 (製品) の初期位置を決め、微小時間間隔 (時間ステップ) 毎に衝撃応答を計算していく。本数値計算では時間ステップは $1 \mu\text{s}$ とした。その計算は次の手順で行う。(1) 互いに接触しあう製品間に働く荷重及び製品と衝撃テーブル間に働く荷重の力の釣り合い及び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、実際に各製品が運動する加速度を算出する。

(2) 各製品の加速度及び衝撃テーブルに加わる衝撃パルス (加速度) を 2 回積分することによって、次の時間ステップでの変位増分を算出する。

(3) 現在の変位に変位増分を加えることにより、次の時間ステップでの各製品の変位を求める。

(4) 各製品間又は製品・衝撃テーブル間に重なりが発生した場合、そこには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。(1)へ戻り、次の時間ステップにおける衝撃応答の計算を行う。

3.3 衝撃スペクトル

衝撃スペクトルの縦軸は衝撃荷重伝達率又は加速度伝達率とし、次のように定義した。

$$\text{衝撃荷重伝達率} = \frac{\text{発生した最大衝撃荷重}}{\text{最大入力加速度} \times \text{総質量}}$$

$$\text{加速度伝達率} = \frac{\text{発生した最大加速度}}{\text{最大入力加速度}}$$

また、衝撃スペクトルの横軸は固有振動数 $f_c = \sqrt{k/m}$ と衝撃作用時間 T_0 の積とした。

本数値計算では入力パルスの最大加速度を 490 m/s^2 に設定し、作用時間を変えることによって、衝撃スペクトルを作成した。しかし、本モデルには非線形性があるため、入力パルスの最大加速度を変えると、衝撃伝達率も変わってしまう可能性がある。このため、最大加速度を 980 m/s^2 とした場合の衝撃スペクトルも作成し、それらの差を比較した。その結果、目立った差は認められず、ほとんどの部分でよく一致していた。

3.4 損傷境界線図

前報⁹⁾と同様、製品が衝撃荷重によって破損する場合（例えば、製品の外壳が破損する場合）と、伝搬された加速度によって製品内の最弱部品が破損する場合とに分けて検討した。損傷境界線図の作成には、入力パルスの最大加速度を 490 m/s^2 に設定して算出された衝撃スペクトルを用いた。

4. 数値解析結果

本研究で新たに行った解析は Model-2P 及び Model-4P のみであるが、Model-O 及び Model-A の解析結果も含め、Table 1、Table 2、Table 3 にまとめた。

4.1 製品外壳の破損

製品の外壳が破損する原因は、製品に伝達される加速度ではなく、衝撃荷重である場合が多い。ここでは、衝撃応答（衝撃荷重）及び衝撃スペクトル、損傷境界線図などの数値解析結果について述べる。2つの非線形モデル Model-2P 及び Model-4P を比較したところ特に目立った傾向の違いは存在しなかった。そのため、Model-4P の結果についてのみ記述することにする。

4.1.1 衝撃応答（荷重）

前報⁹⁾で述べた線形モデルでは、製品間及び製品・衝撃テーブル間に引張り力が発生するが、本非線形モデルでは、引張り力が発生しないため、Fig. 3 からわかるように製品

Table 1 Transmissibility of shock pulse

Cause of damage	Shock load		Acceleration		
	Shock pulse	Rectangular	Half-sine	Rectangular	Half-sine
Model-O (Linear)		$0.5 < T_0 \cdot f_c$ $T_r=2.0$	$T_0 \cdot f_c=0.85(\text{Peak})$ $T_r=1.75$	$0.5 < T_0 \cdot f_c$ $T_r=2.0$	$T_0 \cdot f_c=0.85(\text{Peak})$ $T_r=1.75$
Model-A (Linear)		$0.8 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=2.0$ (Lower mass)	$T_0 \cdot f_c=1.4(\text{Peak})$ $T_r=1.7$ (Lower mass)	$0.6 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=2.2 \sim 2.7$ (Upper mass)	$T_0 \cdot f_c=1.2(\text{Peak})$ $T_r=2.1$ (Upper mass)
Model-2P (Non-linear)		$0.8 < T_0 \cdot f_c < 1.8$ $T_r=1.9(\text{Lower mass})$ $2.1 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=2.2(\text{Lower mass})$	$T_0 \cdot f_c=1.2(\text{Peak})$ $T_r=1.65$ (Lower mass)	$0.6 < T_0 \cdot f_c < 2.0$ $T_r=2.3(\text{Upper mass})$ $2.1 < T_0 \cdot f_c < 6.0$ $T_r=2.7(\text{Lower mass})$ $6.1 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=2.7(\text{Lower mass})$	$T_0 \cdot f_c=0.75(\text{Peak})$ $T_r=2.1$ (Upper mass)
Model-4P (Non-linear)		$1.4 < T_0 \cdot f_c < 3.8$ $T_r=1.9 (T-1)$ $4.0 < T_0 \cdot f_c < 6.5$ $T_r=2.1 (T-1)$ $6.8 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=2.4 (T-1)$	$T_0 \cdot f_c=2.3(\text{Peak})$ $T_r=1.6 (T-1)$	$1.0 < T_0 \cdot f_c < 2.8$ $T_r=2.4 \sim 2.5 (\text{No.3,4})$ $4.0 < T_0 \cdot f_c < 5.7$ $T_r=3.3 \sim 3.4 (\text{No.2,3,4})$ $6.9 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=5.1 (\text{No.1})$	$1.0 < T_0 \cdot f_c < (10)$ $T_r=2.1 (\text{No.4})$

Table 2 Position of the damaged product

Cause of damage	Shock load		Acceleration		
	Shock pulse	Rectangular	Half-sine	Rectangular	Half-sine
Model-A (Linear)		Lower mass	Lower mass	Upper mass	Upper mass
Model-2P (Non-linear)		Lower mass	Lower mass	It depends on shock pulse.	Upper mass
Model-4P (Non-linear)		Lower mass (T-1)	Lower mass (T-1)	It depends on shock pulse.	Upper mass (No.4)

Table 3 Characteristics of damage boundary curve

Cause of damage	Shock load		Acceleration	
	Rectangular	Half-sine	Rectangular	Half-sine
Model-A (Linear)	A_c is nearly constant.	A_c varies to about 1.6 times magnitude of the minimum.	A_c varies to about 1.2 times magnitude of the minimum.	A_c varies to about 1.85 times magnitude of the minimum.
Evaluation	(A)	(B)	(B)	(B)
Model-2P (Non-linear)	Fluctuation of A_c is staged and about 13% of A_c .	A_c varies to about 1.85 times magnitude of the minimum.	Fluctuation of A_c is staged and about 5~10% of A_c .	A_c varies to about 1.75 times magnitude of the minimum.
Evaluation	(B')	(B)	(B'*)	(B)
Model-4P (Non-linear)	Fluctuation of A_c is staged and about 10% of A_c .	A_c varies to about 1.5 times magnitude of the minimum.	A_c varies to about a half of the maximum.	A_c is nearly constant.
Evaluation	(B')	(B)	(B'*)	(X)

<Evaluation>

(A) It is possible to evaluate the fragility of products by usual shock test.

(B) A_c varies with ΔV .

(') Since A_c decrease monotonously with increasing ΔV , it is possible to evaluate the fragility of products by fixing the velocity change to an adequate value.

(*) Since A_c is not unique at a certain ΔV , it is necessary to start the test from a sufficient low acceleration and to set the increment of the acceleration to be small sufficiently in evaluating the fragility of products.

(X) A_c remains constant. But it may be dangerous to evaluate the fragility of products by this half-sine shock pulse because this A_c is larger than A_c that is evaluated by rectangular shock pulse.

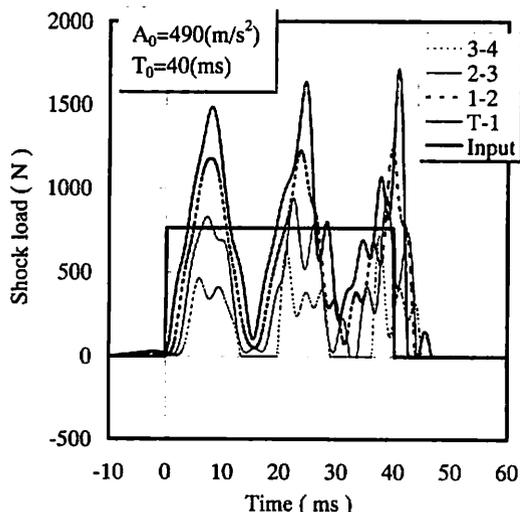


Fig.3 Shock response of Model-4P by rectangular shock pulse

の飛び跳ね状態（製品3と製品4間に荷重が0となる瞬間がある）が表現されている。こ

のことから、本非線形モデルの方がより現実的に段階みされた製品の衝撃応答を表現していることがわかる。

Fig. 3 に示すように、方形波衝撃パルスの作用時間が長い場合、2次、3次のピークが発生する。これらのピークは1次、2次のピークの値を上回るため、次のような現象が発生する。2次ピークが発生する直前で終了する衝撃パルスの場合、応答波の最大値は1次ピークの値となる。一方、衝撃パルスの作用時間がそれよりも少し長くなると、2次ピークが1次ピークよりも大きな値となるため、応答波の最大値が急激に増大する。5.1で詳細に述べるが、この現象が原因となって、衝撃スペクトル、損傷境界曲線が階段状になる。

一方、Fig. 4 に示すように、正弦半波衝撃

パルスが入力されると、その作用時間に大きく依存した形の応答波が発生することがわかる。

4.1.2 衝撃スペクトル及び損傷境界曲線

下の段の製品ほど衝撃伝達率 (Fig. 5, Fig. 6 参照) は大きく、損傷境界曲線 (Fig. 7,

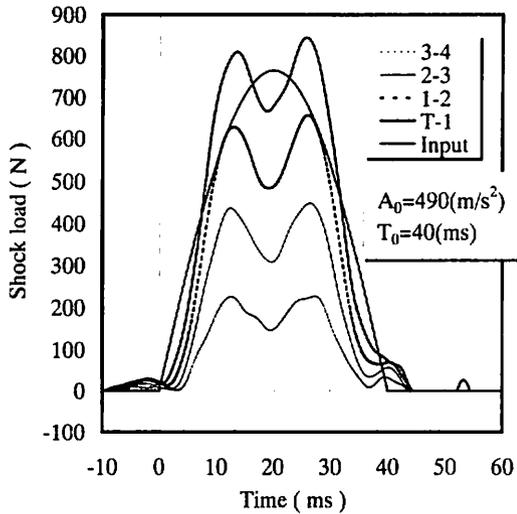


Fig.4 Shock response of Model-4P by half-sine shock pulse

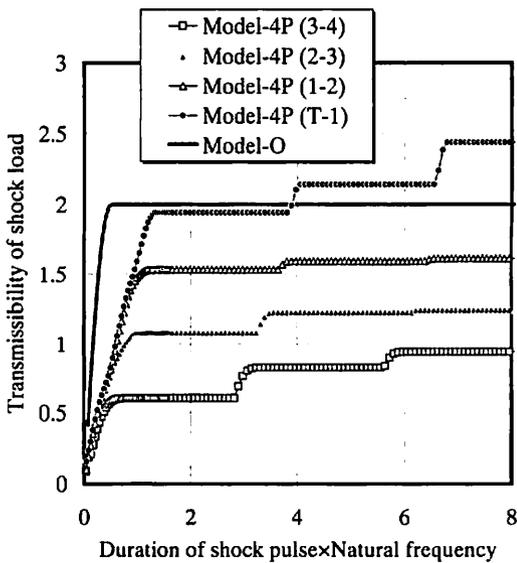


Fig.5 Shock spectrum of Model-4P by rectangular shock pulse

Fig. 8 参照) の許容加速度は小さくなる傾向がある。これは入力パルスが方形波でも正弦半波でも共通して存在する傾向である。

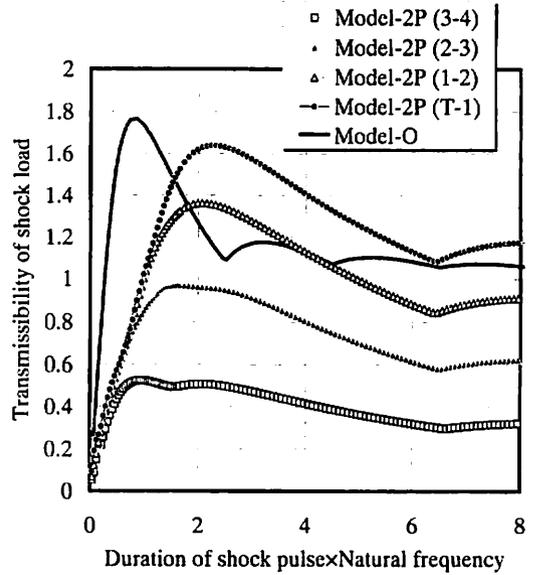


Fig.6 Shock spectrum of Model-2P by half-sine shock pulse

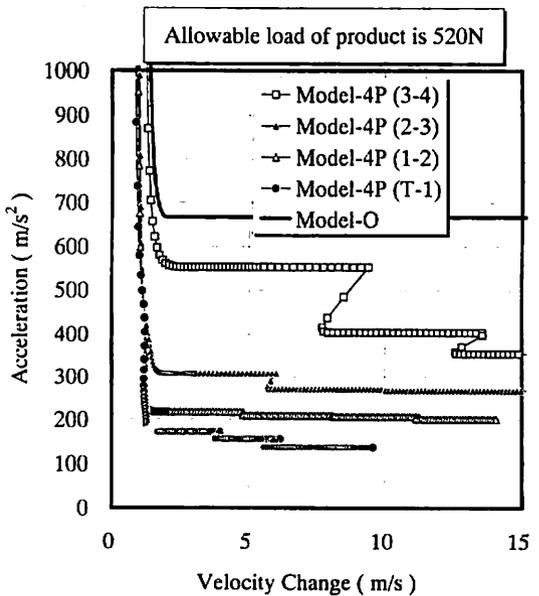


Fig.7 Damage boundary curve of Model-4P by rectangular shock pulse

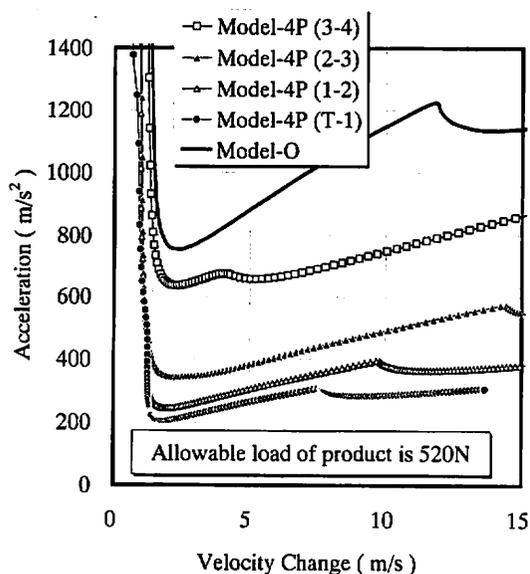


Fig.8 Damage boundary curve of Model-4P by half-sine shock pulse

また、入力パルスが方形波の場合、衝撃伝達率は階段状に単調増加し、許容加速度は階段状に単調減少する (Fig. 7 参照) 傾向が存在する。具体的な衝撃伝達率は Table 1 に示したとおりである。

4.2 伝搬した加速度による破損

例えば、内部に非常に壊れやすい部品を有する製品に衝撃パルスが入力される場合、衝撃荷重ではなく、製品に伝達される加速度が破損の原因となることがほとんどである。ここでは、段積みされた製品に伝達される加速度及び衝撃スペクトル、損傷境界線図などの数値解析結果について述べる。

2つの非線形モデル Model-2P 及び Model-4P を比較したところ、入力パルスが正弦半波の場合、衝撃スペクトル及び損傷境界線に相違点が認められた。ここでは、Model-2P についても数値解析結果のグラフを示し、

その特徴について述べることにする。

4.2.1 衝撃応答 (加速度)

方形波衝撃パルスが Model-4P に入力した時の応答波は Fig. 9 に示すように、非常に複雑でいくつものピークが発生している。これら多数のピークは衝撃スペクトル及び損傷境界曲線が複雑な形状となる主な原因である。このことについては、5. 考察で詳しく説明する。

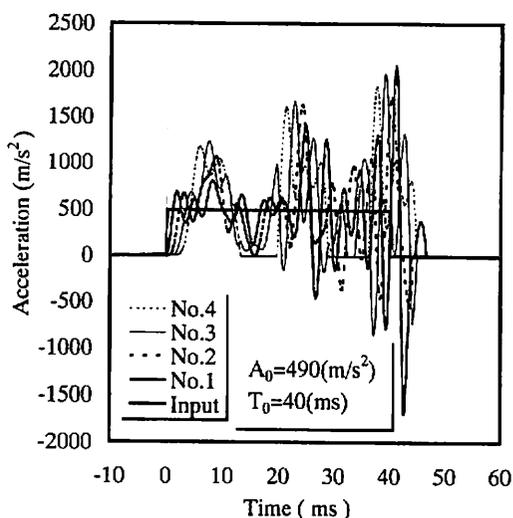


Fig.9 Shock response of Model-4P by rectangular shock pulse

正弦半波衝撃パルスが Model-4P に入力した場合、Fig. 10 に示すように衝撃荷重の場合と同様、入力パルスの作用時間に大きく依存した形の応答波が発生する。

4.2.2 衝撃スペクトル及び損傷境界曲線

衝撃伝達率は、Table 1 に示したとおりである。これより、最大衝撃伝達率は、Model-2P、Model-4P とともに Model-O よりも大きな値となることがわかる。入力パルスが方形波の場合、衝撃伝達率 (Fig. 11、Fig. 12 参照) は、階段状で、ほとんど単調に増加する。こ

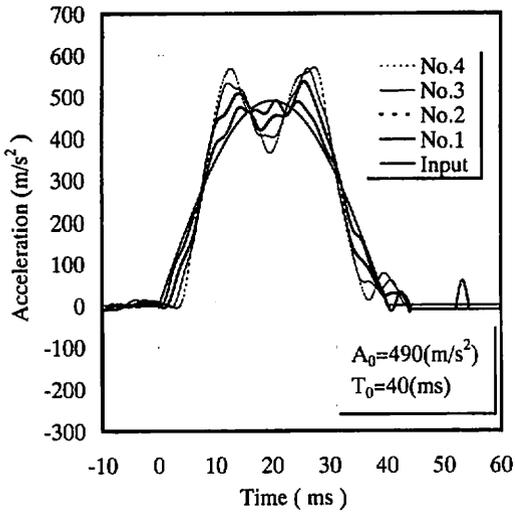


Fig.10 Shock response of Model-4P by half-sine shock pulse

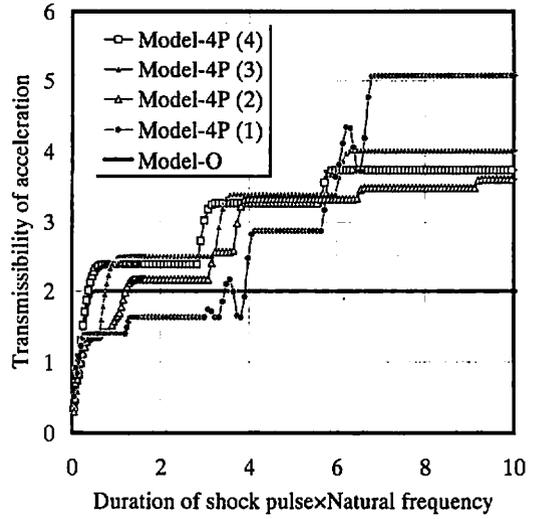


Fig.12 Shock spectrum of Model-4P by rectangular shock pulse

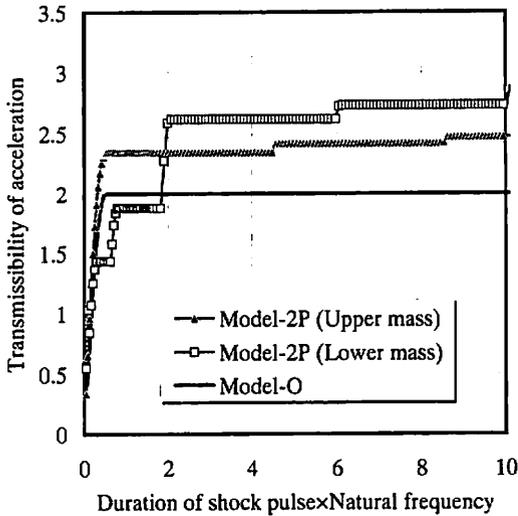


Fig.11 Shock spectrum of Model-2P by rectangular shock pulse

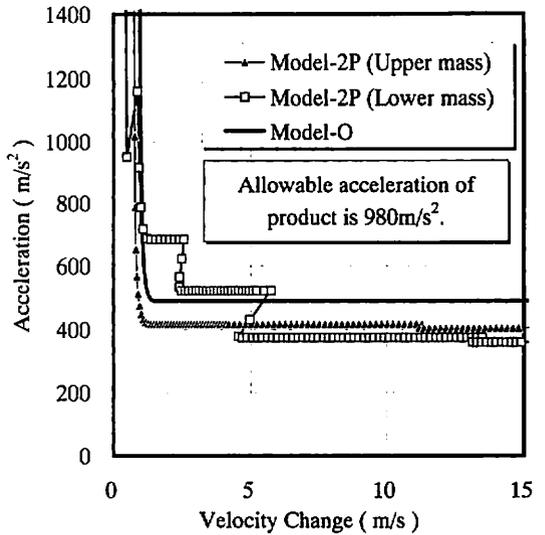


Fig.13 Damage boundary curve of Model-2P by rectangular shock pulse

れに対して損傷境界曲線 (Fig. 13、Fig. 14 参照) は、階段状に単調減少する傾向がある。

また、Fig. 11~14 の最下段の製品に注目すると、衝撃伝達率及び損傷境界曲線は急激に変化 (それぞれ増加及び減少) する特徴が認められる。このため、速度変化が大きくなると、最下段の製品が、上段の製品よりも先

に破損する。これらは Model-2P、Model-4P に共通して存在する傾向である。

一方、Fig. 15、Fig. 16 に見られるように、入力パルスが正弦半波の場合、Model-2P、Model-4P はともに最大衝撃伝達率が 2.1 と同じ値になるが、その範囲は異なり、Model-

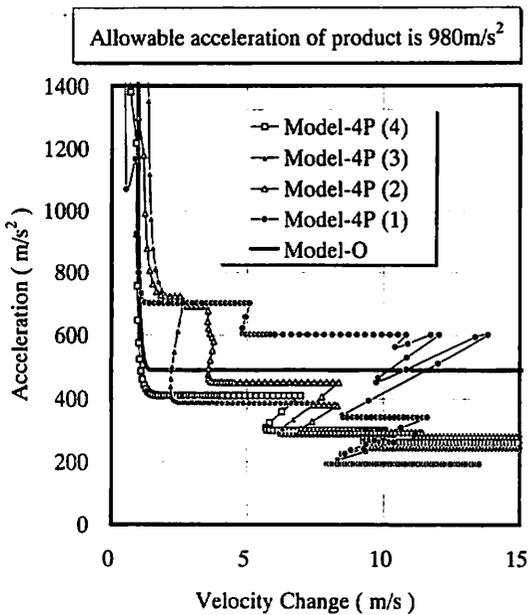


Fig.14 Damage boundary curve of Model-4P by rectangular shock pulse

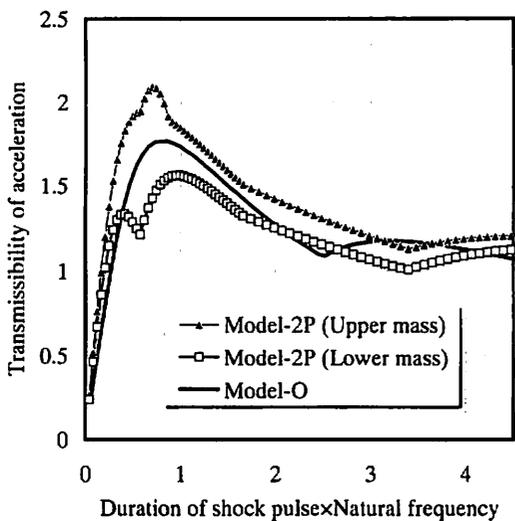


Fig.15 Shock spectrum of Model-2P by half-sine shock pulse

2Pでは Model-Oと同様にある一点 ($T_0 \cdot f_c = 0.75$)で衝撃伝達率が最大となるのに対し、Model-4Pでは広範囲 ($1.0 < T_0 \cdot f_c$)で最大値となる。また、損傷境界曲線も同様、速度

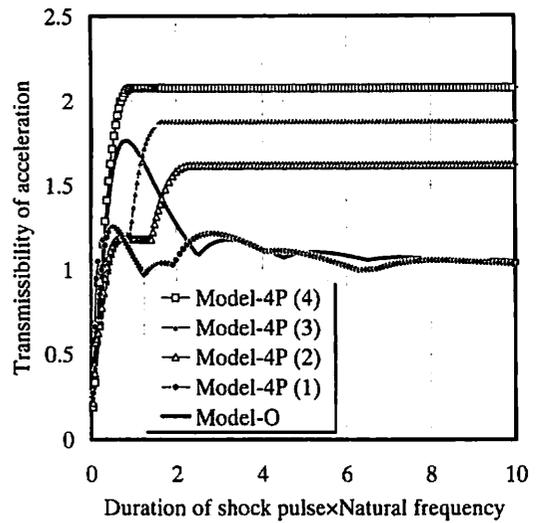


Fig.16 Shock spectrum of Model-4P by half-sine shock pulse

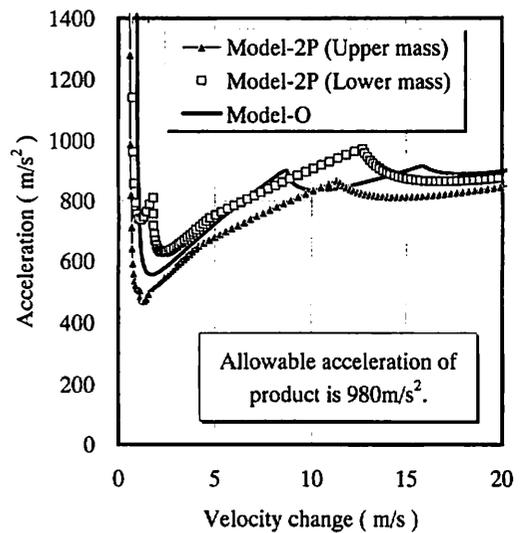


Fig.17 Damage boundary curve of Model-2P by half-sine shock pulse

変化がある程度大きければ、Model-4Pの許容加速度は一定の値となる (Fig. 18 参照)。しかし、Model-2Pでは一定とならない (Fig. 17 参照)。このことから、段積みされる段数が多くなれば、入力パルスが正弦半波であっても許容加速度は一定の値となる傾向がある

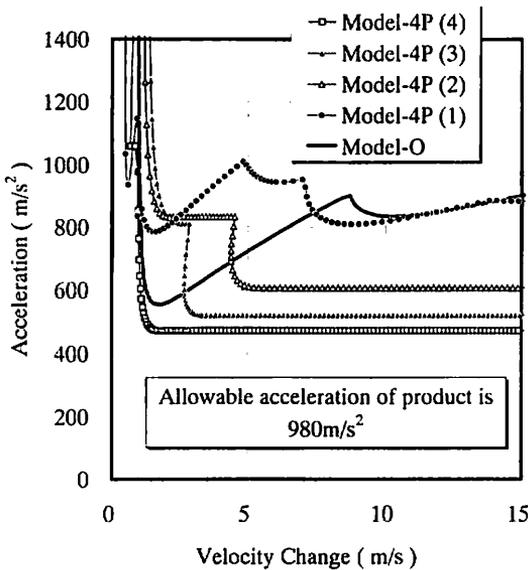


Fig.18 Damage boundary curve of Model-4P by half-sine shock pulse

ことが推測される。

5. 考察

5.1 応答波のピークと衝撃スペクトルの関係

Fig. 19(a)のように応答波に複数のピークが存在する場合について考える。本数値計算結果では、Fig. 3及びFig. 9がこれに相当する。

入力パルスが方形波の場合、その作用時間を T_0 とすると、時間区間 $[0, T_0]$ における

応答波の形状は、作用時間がそれ以上長くなっても変化しない。これは、時間 T_0 以後に入力される衝撃が過去に遡って応答波に影響を及ぼさないためである。

このため、1次ピークが発生して、次の2次ピークが発生するまでの間の衝撃伝達率は一定となる。同様に、2次ピークが発生して、次の3次ピークが発生するまでの間の衝撃伝達率も一定となる。これが、衝撃スペクトルが Fig. 19(b)のように階段状に単調増加するメカニズムである。実際、Model-2P、Model-4Pの方形波衝撃パルスに対する応答波（衝撃荷重 (Fig. 3 参照) 及び加速度 (Fig. 9 参照)) には、複数のピークが存在しており、これらの衝撃スペクトルは Fig. 5 及び Fig. 12 で示したように階段状に単調増加する。

5.2 衝撃スペクトルと損傷境界曲線の関係

方形波衝撃パルスの衝撃スペクトルが Fig. 19(b)のように階段状になっている場合、その損傷境界曲線は、Fig. 19(c)のような形状になる。この理由は次の式から理解できる。

$$A_{ci} = a_c \cdot T_{ri} \quad (1)$$

$$\Delta V_{ci} = A_{ci} \cdot T_0 = a_c T_0 / T_{ri} \quad (2)$$

ここで、添え字 i は応答波における i 次のピ

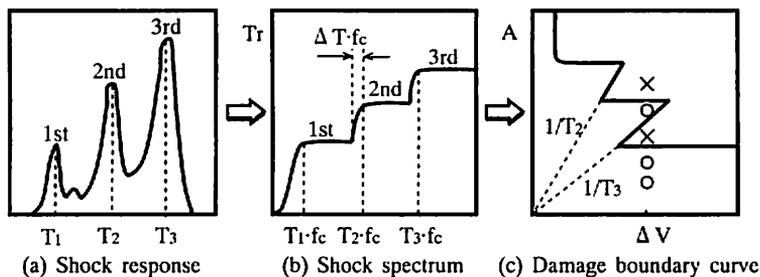


Fig.19 The influence of multiple peaks of shock response on the shock spectrum and the damage boundary curve

ークを表し、添え字 c はその変数の許容値を表している。

次に、衝撃スペクトル上の急激に変化している 2 点

$$((T_2 - \Delta T)_{fc}, Tr_1), ((T_2 - \Delta T)_{fc}, Tr_1)$$

について考える。これらの点を式(1)及び式(2)を用いて損傷境界曲線上での座標に変換すると、

$$\begin{aligned} & ((T_2 - \Delta T)_{ac}/Tr_1, ac/Tr_1), \\ & (T_2 ac/Tr_1, ac/Tr_1) \end{aligned} \quad (3)$$

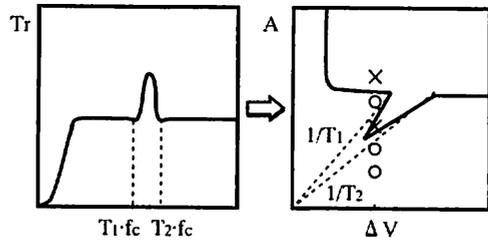
となる。

Fig. 19 (b) の段差の部分 (衝撃伝達率に変化している部分) は非常に短い時間間隔 ΔT での変化である。ここで、 $\Delta T \div 0$ とみなすと、式(3)より、この段差の部分は、損傷境界曲線では、原点を通る直線上の変化に置き換えられる。換言すると、時間間隔 ΔT の間に傾きが $1/(T_0 - \Delta T)$ から $1/T_0$ へ変化する。このとき、 T_0 に対して ΔT が十分に小さければ、 $1/(T_0 - \Delta T) \div 1/T_0$ である。以上のことから、損傷境界曲線は Fig. 19 (c) のような形状となる。

次に、Fig. 20 (a) のように突起を有する衝撃スペクトルについて考える。本数値計算結果では、Fig. 12 の(1) (最下段の製品) に一部これに相当する突起が存在する。さらに、前報⁹⁾ に遡ると、Model-A の衝撃荷重についての衝撃スペクトル (前報⁹⁾ Fig. 4 参照) 及び伝搬加速度についての衝撃スペクトル (前報⁹⁾ Fig. 8 参照) の共に上段質量部にこれに相当する突起が存在した。

先程と同様に考え、衝撃スペクトル上の突起部の始点、ピーク、終点をそれぞれ

$$(T_1 fc, Tr_1), (T_P fc, Tr_P), (T_2 fc, Tr_2)$$



(a) Shock spectrum (b) Damage boundary curve

Fig.20 The relationship between the shock spectrum and the damage boundary curve

式(1)と式(2)を用いて、これらの点に対応する損傷境界曲線上の点の座標を求めると、それぞれ

$$\begin{aligned} & (T_1 ac/Tr_1, ac/Tr_1), (T_P ac/Tr_P, ac/Tr_P), \\ & (T_2 ac/Tr_2, ac/Tr_2) \end{aligned}$$

これらの各点と原点を結んだ直線の傾きはそれぞれ $1/T_1$, $1/T_P$, $1/T_2$ であり、 $T_1 < T_P < T_2$ より、 $1/T_1 > 1/T_P > 1/T_2$ となる。さらに、 Tr_P が Tr_1, Tr_2 よりも明らかに大きいことから、Fig. 20 (a) のような衝撃スペクトル上の突起は、Fig. 20 (b) のような形の損傷境界曲線に変換される。

ここで、注意しなければならない点は、このように損傷境界曲線が変化している部分 (例えば、Fig. 19 (c)、Fig. 20 (b) 参照) で、許容加速度を評価する衝撃強さ試験を行う場合、加速度が高くても破損せず、加速度を下げると破損してしまう逆転現象が発生する可能性があるということである。Fig. 19 (c) 及び Fig. 20 (b) に記載されている \circ 及び \times はそれぞれ製品が破損しなかったこと及び破損したことを示している。

5.3 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法 (設定する速度変化)

Table 3 に示したように、衝撃荷重で製品

が破損する場合、Model-A については通常の試験方法である程度正確に衝撃強さを評価することができる (A)。また、加速度で製品が破損する場合、Model-4P の許容加速度は正弦半波衝撃パルスを用いて評価すると安定した値が得られる (X)。

しかし、これ以外の場合、許容加速度が、設定する速度変化によって変化してしまうため、試験するときの速度変化を何らかの基準で決定し、再現性のある試験方法に改善する必要がある。現在の JIS 試験方法では、速度変化を許容速度変化の 1.6 倍以上に設定するように決まっているだけであり、2 次ピークなどによる影響は考慮されていない。ここで、その改善策の一つを提言する。

まず、輸送環境の調査又は包装貨物—評価試験方法通則 (JIS Z 0200-1994) の表 5 (落下試験の落下高さ)、社内規格での落下高さなどを参考にして、輸送環境に見合った等価落下高さ H を決める。次に、製品質量、使用する緩衝材などの条件から反発係数 e を測定又は推定する。例えば、段ボール製緩衝材のように復元力の小さなものは小さな値に設定し、発泡プラスチックのように十分な復元力がある場合は大きめに設定する。ただし、全くわからない場合は、十分安全側になるように $e = 1$ とする。これらの値から、輸送過程で発生する最大速度変化は、次式で求まる。

$$\Delta V = \sqrt{2gH} \cdot (1+e)$$

Model-2P、Model-4P に方形波衝撃パルスを入力した場合、製品が衝撃荷重、加速度どちらで破損する場合でも、損傷境界曲線の許容加速度は単調減少する。このため、設定した速度変化よりも小さな速度変化の衝撃が加

わっても、評価した許容加速度以下では製品が破損することはない。

また、正弦半波衝撃パルスによる損傷境界曲線よりも方形波衝撃パルスによる損傷境界曲線の方が許容加速度が低い値となっている。以上のことから、これらのモデルに対しては、提言した方法で十分安全側に評価することができる。

5.4 包装設計のための製品衝撃強さ試験方法 (入力パルスの加速度の初期値及び増分)

5.2 で述べた逆転現象は、小さなものを含めると、Model-2P、Model-4P に方形波衝撃パルスが入力した場合、製品の破壊原因が衝撃荷重、加速度のどちらの場合でも発生する現象である。特に、Model-4P の最下段の製品についてこの逆転現象が顕著に認められ、速度変化が 8 m/s 以上であると加速度が約 200 m/s² で最下段の製品が破損してしまうにもかかわらず、例えば、速度変化 10 m/s、加速度 550 m/s² では最下段の製品は破損しない。段積みされた全製品についてみても、速度変化 8 m/s、加速度 280 m/s² では段積みされているどの製品も破損しない。

このような逆転現象は、段積みされた製品だけの問題ではなく、衝撃スペクトルに急激な変化が現れるすべての製品 (例えば、方形波衝撃パルスによる衝撃応答で 2 次、3 次のピークが発生する製品) について共通する問題である。この逆転現象によって、許容加速度を過大評価しないためには、十分小さな加速度から試験を始め、加速度の増分を十分に小さくして試験を進めていく必要がある。

6. 結論

段積みされた製品を表した非線形モデル (Model-2P 及び Model-4P) の衝撃応答を数値解析することによって、衝撃伝達率及び損傷境界曲線の段積みによる効果、衝撃強さ試験における問題点などを明らかにすることができた。また、試験方法についての提言も行った。得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 衝撃荷重で製品が破損する場合、線形モデルでの解析結果と同様に、上段より下段の製品の方が破損し易い傾向がある。

また、入力パルスが正弦半波で、加速度により製品が破損する場合、線形モデルでの解析結果と同様に、下段より上段の製品の方が破損し易い傾向がある。しかし、入力パルスが方形波の場合、破損する製品の位置 (段数) は特定できず、その作用時間や加速度によって変化することがわかった。

(2) Model-2P、Model-4P に方形波衝撃パルスを入力すると、応答波 (衝撃荷重、加速度ともに) に 2 次、3 次のピークが発生する。そのため、衝撃スペクトルの衝撃伝達率は階段状に増加し、損傷境界曲線の許容加速度は階段状に減少することがわかった。

(3) 方形波衝撃パルスを用いて、Model-2P、Model-4P の許容加速度を求める際、設定する速度変化の値によって得られる許容加速度が変化する。このため、現在の試験方法 (JIS Z 0119-1994) では十分な再現性が得られない可能性がある。そこで、輸送過程での貨物の落下高さ及び貨物落下時の反発係数を計測又は推定することにより、現実の輸送環境に適した速度変化を設定し、許容加速度を測定することを提言する。

(4) 衝撃スペクトルが急激に変化する製品、例えば、応答波に複数のピークが発生する製品の衝撃強さを評価する際、次の点に注意しなければならない。設定された速度変化の値によっては、ある高い加速度では製品が破損しないにもかかわらず、それよりも低い加速度で製品が破損してしまうという逆転現象が現れる。そのため、許容加速度を求める際、十分に低い加速度から試験を始め、加速度を徐々に上げていくという手順をとる必要がある。

本研究は、JIS 試験方法として制定され、現在普及しつつある包装設計のための製品衝撃強さ試験方法における問題点を数値解析によって検討したものである。数値解析の対象は、スチール缶が段積みされた状態を参考にして決めた製品モデルのみにとどめているが、衝撃応答と衝撃スペクトル及び損傷境界曲線の関係についての考察も含めて、現在の JIS 試験方法での問題点は十分に示されたと考えられる。今後、製品の衝撃強さについて実験を含めた検討を行っていきたい。

記号表

m	: 製品の質量
k	: 製品のばね定数
T_0	: 衝撃パルスの作用時間
A_0	: 衝撃パルスの最大加速度
ΔV	: 衝撃パルスの速度変化
f_c	: 1 自由度ばね質量系の固有振動数
T_r	: 衝撃伝達率
ΔV_c	: 許容速度変化
A_c	: 許容加速度
a_c	: 製品単体での許容加速度
H	: 等価落下高さ

e : 反発係数

g : 重力加速度

T-1 : 衝撃テーブルと製品 1 との間に発生する荷重を示す。(Model-4P の場合)

i-j : 製品 i と製品 j との間に発生する荷重を示す。(Model-4P の場合)

No. i、製品 i : 下から i 段目の製品を示す。(Model-4P の場合)

<引用文献>

- 1) 豊田実、星野茂雄、“緩衝包装設計ハンドブック”、日本生産性本部、p. 511 (1969)
- 2) 中嶋隆勝、野上良亮、寺岸義春、高田利夫、日本機械学会論文集C編、**59**(558)、624(1993)
- 3) 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、**2**(2)、85(1993)
- 4) 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、**3**(3)、141(1994)
- 5) 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、**4**(2)、104(1995)
- 6) 中嶋隆勝、寺岸義春、高田利夫、野上良亮、日本包装学会誌、**4**(4)、274(1995)
- 7) Newton, R. E. 'Fragility assessment, theory and test procedure'. MTS Systems Corp. Report 160. 06,(1976)
- 8) Gary J. Burgess, Packaging Technology and Science, **1**(1)、5-10(1988)
- 9) 中嶋隆勝、斎藤勝彦、久保雅義、寺岸義春、日本包装学会誌、**8**(3)、123(1999)
(原稿受付 1999 年 4 月 26 日)
(審査受理 1999 年 9 月 30 日)