

包装品の非線形ガタ振動に関する実験的検証

津田和城*・中嶋隆勝*・斎藤勝彦**

Experimental Verification on Non-linear Gap Vibration of Packaged Product

Kazuki TSUDA*, Takamasa NAKAJIMA*, Katsuhiko SAITO**

これまでに著者らは、ガタ（被包装物と緩衝材の隙間）がある包装貨物のモデルを用いた解析や実験により、振動テーブルから被包装物への振動伝達特性について検討してきた。そこでは、次の二つの現象がみられることを指摘している。一つは、貨物に作用する加速度がある値（限界入力加速度）を超えると被包装物の振動が急に大きくなる現象、もう一つは、被包装物の振動が大きくなる周波数帯（共振帯域）が広がる現象である。しかしながら、実際の包装物に作用する衝撃や振動により、ガタができ、振動伝達にこのような非線形特性がみられるかについては実証されていない。そこで、DVD&HDD レコーダーのダミーを用いた落下実験および振動実験により、これらについて検証した。その結果、ガタのない状態でも緩衝材によって振動伝達に非線形特性がみられることがわかった。さらに、落下衝撃による緩衝材の変形によってガタができ、ガタのある状態では振動伝達に強い非線形特性がみられることを確認した。

The characteristic of vibration transmissibility from the vibration table to the product was investigated by the analysis and the experiment with the model of the package with gaps (the space between the product and the cushioning materials). As a result, it has been indicated that the following two phenomena occur. One is that the vibration of the product increases rapidly, when the acceleration applied to the package is larger than one value (the critical input acceleration). The other is that the frequency range in which the vibration of the product increases (the resonant frequency range) spreads. However, it has not been verified whether the gaps are made, and these non-linearity of vibration transmissibility are seen by a shock and a vibration applied to the real package. Therefore, these are investigated by the drop experiment and the vibration one with the dummy of a DVD&HDD recorder. As a result, it has been clarified that the non-linearity is seen even in the condition without the gaps due to the cushioning materials. Then, it has been confirmed that the gaps are made by the deformation of the cushioning materials due to the shock of the drop, and the strong non-linearity of vibration transmissibility is seen in the condition with the gaps.

キーワード：包装、緩衝材、ガタ、落下、振動、非線形性、振動伝達

Keywords : Packaging, Cushioning, Gap, Drop, Vibration, Non-linearity, Vibration transmissibility.

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

**神戸大学 〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1
Kobe University 5-1-1 Fukaeminami, Higashinada, Kobe, Hyogo 658-0022, Japan

1. はじめに

振動試験は、振動が原因となる製品損傷（破損あるいは動作不良）を未然に防ぐことを目的としており、あらゆる製造業で必要な試験である。そのため、試験結果は、製品が現実に受ける振動環境での耐久性を正確に反映するものでなければならない。しかしながら、これまでに著者らは、多くの企業より依頼を受けて振動試験を行ってきたが、現在の規格に従った試験^{1) 2)}を行っても、実地での耐久性を正確に再現できない事例を経験している。このような事例の報告³⁾としては、紙系緩衝材を用いた貨物における製品損傷が挙げられる。これは包装用緩衝材をプラスチック系からリサイクルが容易な紙系に代替した貨物を輸送した際にみられる。そこでは、この原因の一つとして、ガタ（被包装物と緩衝材の隙間（以下、ガタと呼ぶ））が考えられている。

これまでに著者らは、このガタが被包装物に及ぼす影響を明らかにするために、構造物に含まれているガタの非線形振動に関する論文⁴⁾を参考にしながら、包装貨物にガタがある場合の、振動テーブルから被包装物への振動伝達特性について、簡易モデルを用いた解析^{5) 6)}や実験⁷⁾により検討してきた。そこでは、包装貨物に加わる振動加速度がある値（限界入力加速度）を超えると被包装物の振動が急に大きくなることや、被包装物の振動が大きくなる周波数帯（共振帯域）が広がることを指摘している。しかしながら、実際の包装物に作用する衝撃や振動によって、ガタができ、振動伝達にこのような非線形特性がみられるのかについては明確に実証されているとは言

い難い。そこで、実際の DVD & HDDレコーダーについて、それを模擬したダミーを用いた落下実験および振動実験を実施し、これらについて検証する。

2. 実験

ここでは、実験で用いた試料について説明するとともに、ガタのある状態での振動実験の前処置として実施した落下実験について述べる。次に、ガタのない状態およびある状態での、振動テーブルから被包装物への振動伝達特性を把握するために行った振動実験について説明する。

2.1 試料

試料として、Fig.1に示すような DVD& HDDレコーダー入り貨物を模擬したダミー包装物を用いた。ここに、被包装物は形状や質量が実製品と同程度のアクリル製ダミーであり、段ボール製緩衝材と段ボール箱は、実貨物で使われているものと同品である。また、段ボール製緩衝材と段ボール箱は、ガタがないように包装設計され、振動実験前には標準状態（温度：23℃、相対湿度：50%）で24時間

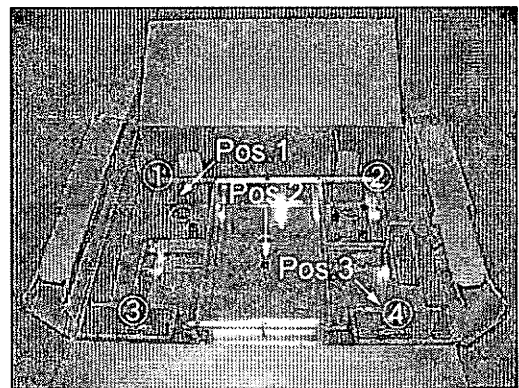


Fig. 1 Dummy of package of DVD& HDD recorder

以上さらしておく。ただし、実験は振動実験（ガタのない状態）、落下実験、振動実験（ガタのある状態）という順序で行うが、落下実験や振動実験を行った室内の温湿度は調整されていない。Table 1 にアクリル製ダミー、段ボール製緩衝材、段ボール箱の詳細を示す。また、緩衝材は Fig. 2 に示すような形状であり、落下前後の緩衝材は、Fig. 3 に示すような静的緩衝特性をもち、他の多くの緩衝材⁹⁾と同様に非線形性を有している。ただし、この緩衝特性は Fig. 4 に示すように、試験ジグ上にダミー包装物を天地逆にして置き、圧縮試験機を用いて底面から圧縮速度 10mm/min で荷重を加えたときの構造体緩衝材の圧縮特性である。

Table 1 Profile of dummy of DVD&HDD recorder, corrugated cushioning materials and corrugated box

	Dimension (mm)	Mass (kg)	Remarks
Dummy of DVD&HDD recorder	430 × 330 × 76	5.8	Acrylic
Corrugated cushioning materials	475 × 140 × 180	0.6 (0.3 × 2)	A flute
Corrugated box	545 × 490 × 205	1.1	A flute

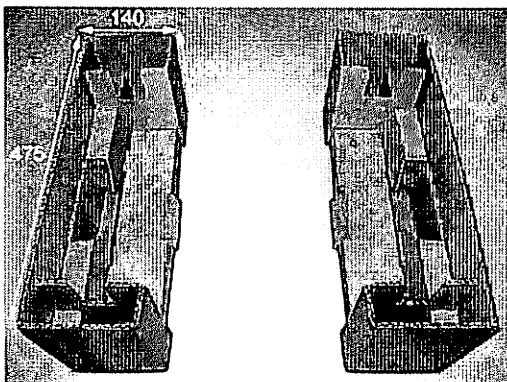


Fig. 2 Corrugated cushioning materials.

2.2 前処置（落下実験）

ガタのある状態での振動実験の前処置として、ダミー包装物の落下実験を実施する。Fig.5に示すように、落下試験機を用いてダミー包装物を自由落下させ、落下衝撃を加える。そして、実際の包装物に作用する落下衝撃によってガタができるかどうかについて検討する。

2.2.1 実験条件

実験条件は、落下高さ80cm（JIS Z 0200のレベル。（質量10kg未満⁹⁾）、底面落下1回である。

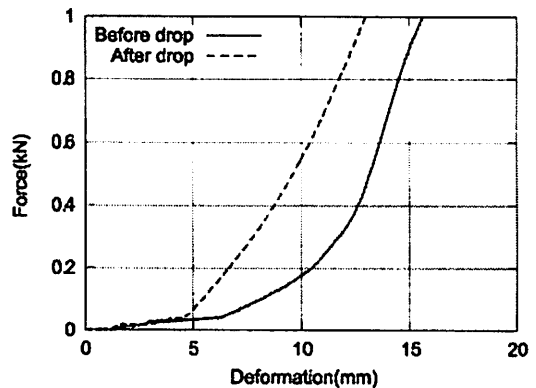


Fig. 3 Compression characteristics of corrugated cushioning materials before and after drop experiment

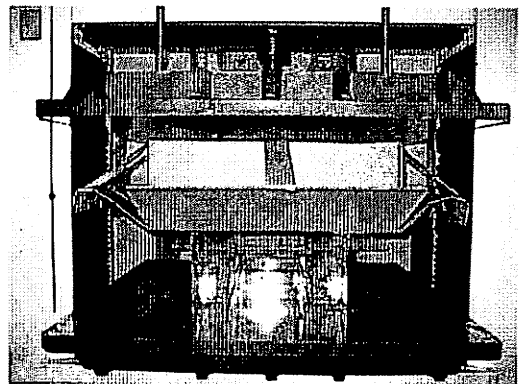


Fig. 4 Compression experiment of corrugated cushioning materials

2.2.2 実験結果

落下時のアクリル製ダミーの Pos. 1 (Fig. 1 参照) における加速度を計測すると、最大加速度(衝撃値)は 663m/s^2 であった。Fig. 6 に落下前後の段ボール製緩衝材の様子を示す。図より明らかなように、落下衝撃によって緩衝材の折り曲げ箇所は破れ、差し込み箇所は変形している。また、アクリル製ダミーの4つのコーナーにおける緩衝材の変形量(塑性変形量)を計測すると、①:9mm、②:4mm、③:6mm、④:4mmであった。このことから、実際の包装物に作用する落下衝撃によって段ボール製緩衝材は変形して完全に元に戻らないために、ガタができることがわかる。

2.3 振動実験

ガタのない状態およびある状態での振動テーブルから被包装物への振動伝達特性を把握するために、ダミー包装物の振動実験を実施する。Fig. 7 に示すように、振動試験機を用

いてダミー包装物を垂直方向に加振する。そして、ガタがあることで被包装物への振動伝達に非線形特性がみられるかどうかについて検討する。

2.3.1 実験条件

実験条件は、入力加速度 $4.9\sim 19.6\text{m/s}^2$ (2.45m/s^2 刻み)、加振周波数 $5\sim 100\text{Hz}$ (5Hz 刻み) であり、加振条件ごとにサンプリング周期 1ms で、60秒間継続して振動を計測した。また、落下前の試料がガタのない状態の包装物、落下後の試料がガタのある状態の包装物である。

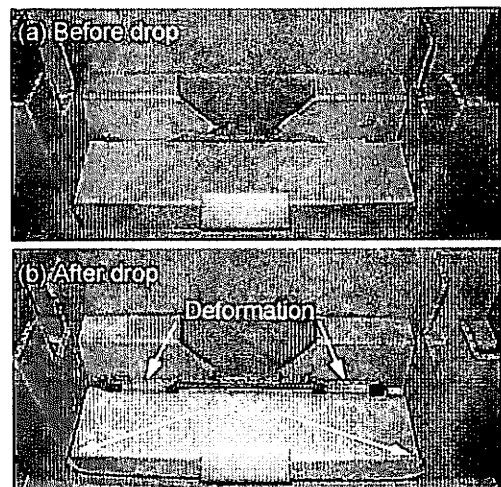


Fig. 6 Appearance of corrugated cushioning materials before and after drop experiment

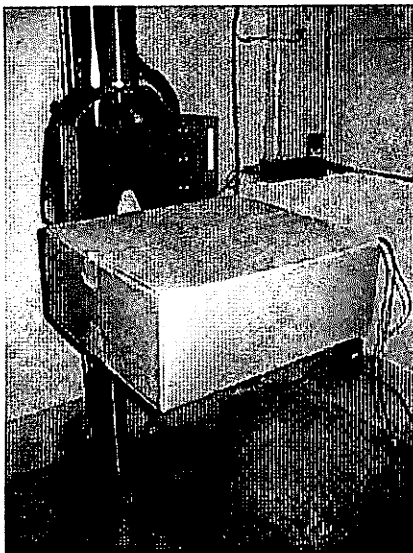


Fig. 5 Drop experiment

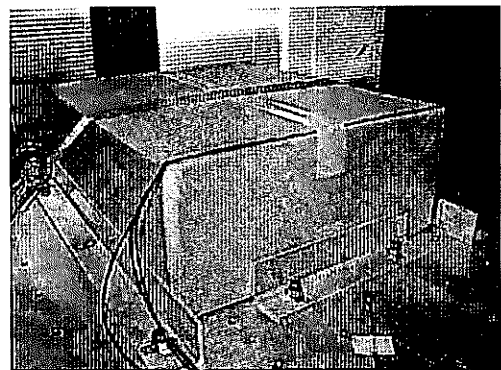


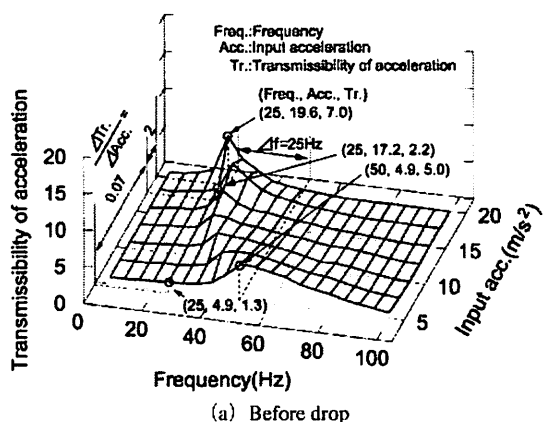
Fig. 7 Vibration experiment.

2.3.2 実験結果

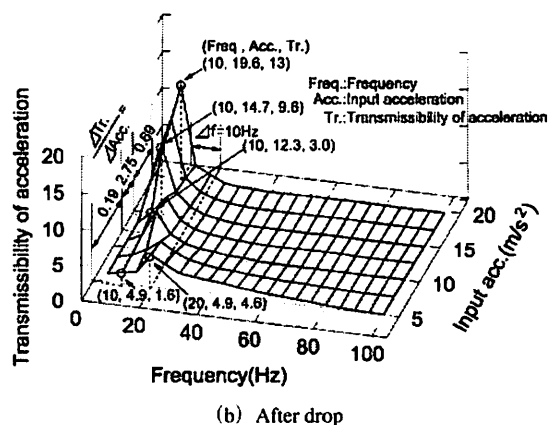
Fig. 8 に落下前後の亚克力製ダミーのPos. 1 における振動の、入力加速度、加振周波数と加速度伝達率 (Pos. 1 における最大加速度を振動テーブルの最大加速度 (設定値) で除した値) の関係を示す。図より明らかなように、入力加速度が大きくなるとともに、加速度伝達率が大きな領域は低周波域に変化しており、加速度伝達率が7より大きくなる場合が落下後にみられる。また、入力加速度に対する加速度伝達率の増加率 ($\Delta Tr./\Delta Acc.$ 、加速度伝達率の増分 $\Delta Tr.$ 、入力加速度の増分

$\Delta Acc.$) が大きくなっている領域がある (本研究では、このように増加率が大きくなる直前の入力加速度を限界入力加速度と定義している)。

次に、加速度伝達率が小さな領域と大きな領域の加速度波形に注目する。Fig. 9、10に落下前後の亚克力製ダミーのPos. 1 における振動の加速度波形を示す。ただし、Fig. 9、10はそれぞれ入力加速度7.35、19.6 m/s^2 の波形であり、Fig. 9 (a)は加振周波数10、50Hz、Fig. 9 (b)は加振周波数10、20Hz、Fig.10(a)、(b)は加振周波数10、25Hz の波形である。こ

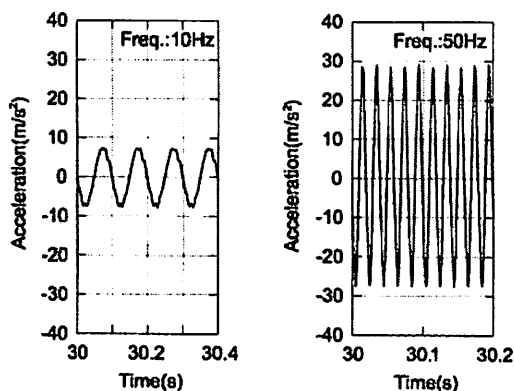


(a) Before drop

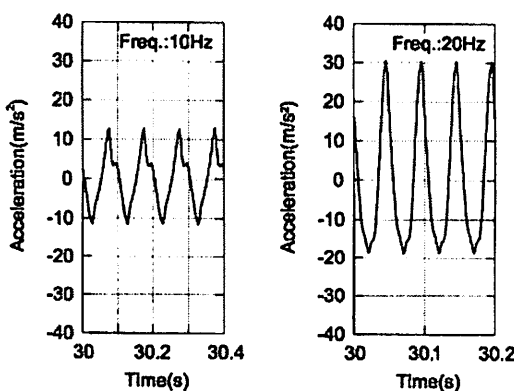


(b) After drop

Fig. 8 Relation among input acceleration, frequency of input vibration and transmissibility of acceleration



(a) Before drop



(b) After drop

Fig. 9 Time history of acceleration of dummy (Input acceleration: 7.35 m/s^2)

ここで、ダミーの振動状態を考えると、ダミーが下の緩衝材と接している状態（状態Ⅰ）、上下の緩衝材に接していない状態（状態Ⅱ）、上の緩衝材に接している状態（状態Ⅲ）の3つに分類できる。

Fig. 9 より明らかなように、加振周波数 20Hz 以外の波形では正負のピーク値が同程度であり、状態Ⅰもしくは状態Ⅱである。また、Fig.10(a)に示す加振周波数が 25Hz の加速度波形では、加速度が $-10 \sim -20 \text{ m/s}^2$ のところで形状が変化し、状態Ⅰと状態Ⅲを繰り返している。この波形から明らかなように、

共振しているところでは、振幅が大きくなるため、緩衝材の非線形性がみられる。さらに、Fig.10(b)に示す加振周波数 10Hz の加速度波形は他のものと明らかに異なり、状態Ⅰ、状態Ⅱ、状態Ⅲを繰り返している。このような振動は、ダミーの飛び跳ねによってダミーと上下の緩衝材が衝突を繰り返す、衝突振動である（本研究では、このような振動をガタ振動と呼ぶ）。この波形からわかるように、低周波で入力加速度が大きくなると、ダミーの飛び跳ねが起りやすくなり、ガタ振動になる。

3. 考察

ここでは、緩衝材やガタの影響によってダミーへの振動伝達が変化することについて考察する。ただし、以降の図は Fig. 8 の加速度伝達率の 3次元プロットを、入力加速度、加振周波数に対してそれぞれ 2次元プロットし直したものである。

3.1 緩衝材による振動伝達の変化

Fig.11(a)に落下前後の加振周波数 25Hzにおける入力加速度と加速度伝達率の関係（加速度応答）、Fig.11(b)に落下前の入力加速度 4.9、9.8、19.6 m/s^2 における加振周波数と加速度伝達率の関係（周波数応答）を示す。図(a)より明らかなように、ガタのない状態でも入力加速度が 17.2 m/s^2 を超えると、加速度伝達率が急激に増大している（入力加速度に対する加速度伝達率の増加率は 2 であり、 17.2 m/s^2 が限界入力加速度に相当する）。また、図(b)に示すように、ガタのない状態でも入力加速度が大きくなるとともに共振周波

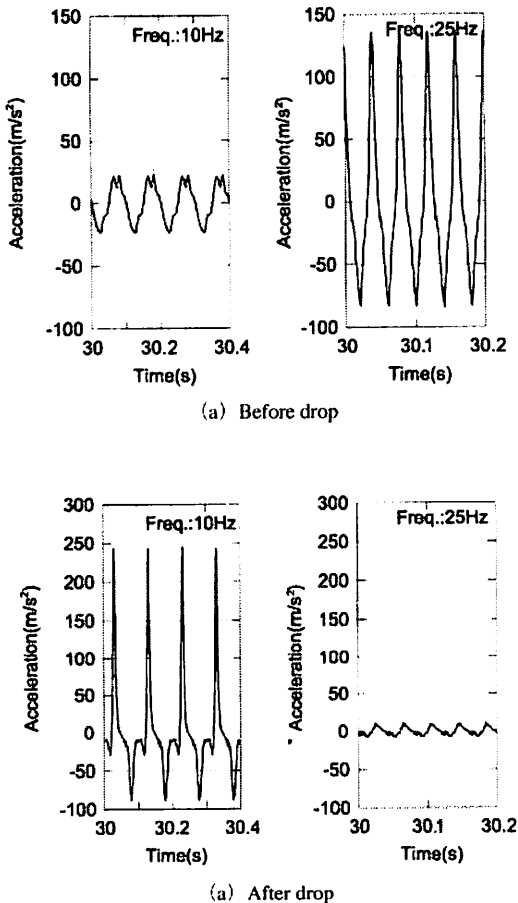


Fig. 10 Time history of acceleration of dummy (Input acceleration: 19.6 m/s^2)

数は低下している。さらに、1自由度の線形振動系の周波数応答と比較すると、各入力加速度での周波数応答曲線の幅は広がっている。(ここで、加速度伝達率の大きな周波数帯を共振帯域と呼ぶことにすると、各入力加速度での共振帯域は広帯域化している)。

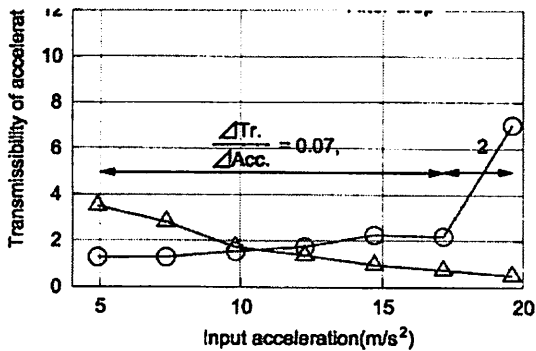
次に、入力加速度の増加とともに共振周波数が低下する原因を考えてみると、緩衝材の非線形性が影響していると思われる。この影響を明らかにするには、入力加速度の増加による緩衝特性の変化や、加振中のガタの有無についてさらに詳しく検討する必要があるた

め、本論文では詳述を避ける。

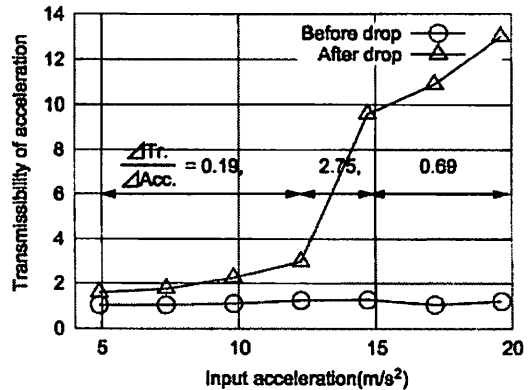
以上のことから、ダミー包装物においては、ガタのない状態でもダミーへの振動伝達に非線形特性がみられることがわかる。

3.2 ガタによる振動伝達の急激な変化

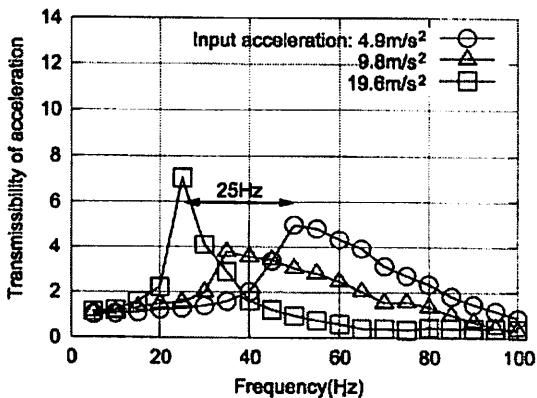
Fig.12(a)に落下前後の加振周波数 10Hzにおける入力加速度と加速度伝達率の関係(加速度応答)、Fig.12(b)に落下後の入力加速度 4.9、9.8、19.6m/s²における加振周波数と加速度伝達率の関係(周波数応答)を示す。図



(a) Acceleration response (Frequency of input vibration: 25Hz)

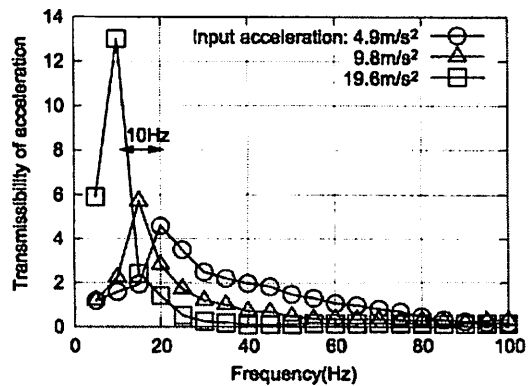


(a) Acceleration response (Frequency of input vibration: 10Hz)



(b) Frequency response before drop

Fig. 11 Relation among input acceleration, frequency of input vibration and transmissibility of acceleration.



(b) Frequency response before drop

Fig. 12 Relation among input acceleration, frequency of input vibration and transmissibility of acceleration.

(a)より明らかなように、ガタのある状態では入力加速度が 12.3m/s^2 を超えると、加速度伝達率が急激に増大している（入力加速度に対する加速度伝達率の増加率は2.75であり、 12.3 m/s^2 が限界入力加速度に相当する）。また、図(b)に示すように、ガタのある状態では入力加速度が大きくなるとともに、共振周波数は低下し、加速度伝達率は急激に増大している。さらに、1自由度の線形振動系の周波数応答と比較すると、各入力加速度での周波数応答曲線の幅は広がっている（各入力加速度での共振帯域は広帯域化している）。しかしながら、ガタのない状態とある状態での共振帯域を比較すると、ダミー包装物を用いた実験では、モデルを用いた解析でみられたようなガタによる共振帯域の広帯域化（ガタにより共振帯域が広がり、共振帯域での伝達率は、他の周波数帯と比べて非常に大きくなる現象）は認められない。

次に、ガタのある状態で加速度伝達率が急激に増大する原因を考えてみると、アクリル製ダミーの飛び跳ねが影響していると思われる。Fig.10(b)の加振周波数 10Hz の加速度波形からもわかるように、ダミーの飛び跳ねによりダミーと緩衝材が衝突することによってPos. 1における振動加速度が急激に大きくなっている（加速度伝達率が増大している）からである。

以上のことから、ダミー包装物においてもガタがある状態ではダミーは飛び跳ね、ダミーへの振動伝達に強い非線形特性がみられることがわかる。

4. 結論

実際の包装物に作用する衝撃や振動によってガタができ、被包装物への振動伝達に非線形特性がみられるかどうかを実証するために、DVD&HDD レコーダー入り貨物を模擬したダミー包装物の落下実験や振動実験を行った。その結果、明らかになった結論を以下にまとめる。

- (1) 落下衝撃によって段ボール製緩衝材は塑性変形することにより、被包装物と緩衝材の間にガタができる。
- (2) これまでのモデルを用いた解析と異なり、ガタのない状態でも被包装物への振動伝達に非線形特性（限界入力加速度、共振帯域の広帯域化、共振周波数の低下）がみられ、加振条件により加速度伝達率は大きく変化している（伝達率は0.3~7である）。
- (3) これまでのモデルを用いた解析と同様に、ガタのある状態では被包装物の飛び跳ねによって被包装物への振動伝達に強い非線形特性（限界入力加速度、共振帯域の広帯域化、共振周波数の低下）がみられ、加振条件により加速度伝達率は大きく変化している（伝達率は0.1~13である）。

現在の振動試験では、被包装物への振動伝達の非線形特性を考慮していない。そのため、限界入力加速度、共振帯域の広帯域化や共振周波数の低下のような現象が起きると、実輸送と室内試験の結果が一致しない可能性が高くなる。

今後、正確な振動試験を実施していくためには、このような現象を考慮した新たな試験手法が必要であると考えられる。

5. 謝辞

この研究を進めるにあたり、ご協力いただきました大阪府立産業技術総合研究所の寺岸義春主任研究員、高田利夫主任研究員にお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) JIS Z 0232:2004 包装貨物 - 振動試験方法
- 2) ASTM D 999 Standard Methods for Vibration Testing of Shipping Containers (2001)
- 3) 高松幸一、包装技術、4、336-341 (1997)
- 4) 早坂靖、岡本紀明、服部敏雄、金久保貴史、小峰博文、小野田淳次郎、伊藤宏、日本機械学会論文集、59 (C563)、41-48 (1993)
- 5) 津田和城、中嶋隆勝、日本包装学会誌、14 (1)、35-47 (2005)
- 6) 津田和城、中嶋隆勝、日本包装学会誌、14 (3)、181-190 (2005)
- 7) 津田和城、中嶋隆勝、斎藤勝彦、日本航海学会論文集、114、201-207 (2006)
- 8) 輸送・工業包装の技術、フジ・テクノシステム、559-562 (2002)
- 9) JIS Z 0200:1999 包装貨物 - 評価試験方法通則
(審査受付2006年8月7日)
(審査受理2006年9月27日)