一般論文

がたを有する被包装物の振動に関する数値的検討

津田和城* 中嶋隆勝*

Numerical Investigation on Vibration of Package with Gap

Kazuki TSUDA* and Takamasa NAKAJIMA*

振動試験は品質の確保が要求されるさまざま業界で広く実施されており、振動が原因で発生する製品や部品の破損あるいは動作不良など（製品損傷）を未然に防ぐことを目的としている。当然ながら、この試験は製品や部品が現実に受ける振動環境を正確に反映するものでなければならない。

著者らはこれまで多くの振動試験を行ってきたが、規格に従った試験にもかかわらず、現実の振動環境が正確に反映されない事例をいくつか経験している。そこで、このような事例が生じてしまう試験の問題点を明らかにするために、がたを含む包装貨物を例に取り上げ、がたが内容品の振動に及ぼす影響を数値的に検討した。その結果、規格には考慮されていない、製品損傷を引き起こす可能性がある内容品の特異な振動現象の存在を確認した。つまり、この現象が輸送時あるいは試験時に起きると、内容品の振動耐久性を正しく評価できず、現実の振動環境を正確に反映できないことを述べた。

キーワード：輸送、非線形振動、強制振動、包装、がた、加速度、製品損傷

The vibration tests are conducted in various industries which the security of the quality is required. The purpose is to prevent product damages due to vibration ; damages of product and parts, trouble etc. It is proper that these tests have to reflect exactly the vibration environment which product and parts suffer in real.

We have conducted a lot of vibration tests. We have experienced some cases that the test doesn't reflect the real vibration environment exactly, despite the test according to the standard. Therefore in order to clarify the problem of the tests which cause these results, we investigated the effect on the vibration of contents by a gap numerically, taking packaged freight with a gap as an example. Consequently, we confirmed the existence of the original vibration phenomena of contents which may cause product damages. These phenomena are not taken into account in the standard. If these phenomena occur during transportation or tests, we can't evaluate the vibration durability of contents exactly. As a result, we can't conduct the tests which reflect the real vibration environment exactly.

Keywords : Transport, Nonlinear Vibration, Forced Vibration, Package, Gap, Acceleration, Product Damages.

*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

1. 緒　言

振動試験は、あらゆる製造業で必要な試験であり、振動が原因となる製品や部品の破損事故、あるいは動作不良事故などを未然に防ぐことを目的としている。たとえば、医薬品のラベルが輸送中の振動で擦れるだけで医療過誤の原因となりかねない。その他、一見ささいな不具合でも、被害を受ける立場からすると大きな問題であり、それが続けば、製造者の信頼が失われ、経営上大きな損失につながる。このように、振動試験は製造者にとって非常に重要な試験であり、試験結果は、製品や部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、著者らは、これまで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振動試験を行っても、実地での振動を十分正確に再現されない事例を多く経験しており、試験の重要性に反して、試験の信頼性には問題点があると感じてきた。

そこで、振動試験における問題点を明らかにするため、一例としてがたを含む包装貨物の振動を取り上げ、がたが内容品の振動に及ぼす影響を検討する。

これまでのがたに関する研究としては、包装分野では、紙系緩衝材の評価方法[1]に関する研究が行われている。これは、がたによる製品損傷の問題を生じやすい紙系緩衝材の実験的な評価方法について述べた研究であり、実験を中心に進められているが、がたと内容品の振動の関係については検討されていない。また、その他の分野では、構造物（配管系[2]、宇宙構造物[3]、縦型ポンプ[4]）に含まれているがたの非線形振動に関する研究が行われている。しかし、本研究で取り上げているがたが内容品の振動に及ぼす影響ついて論じたものは報告されていない。

本研究では、輸送振動による内容品の損傷を未然に防ぐことを目的とし、がたを有する被包装物の振動について数値的に検討を行い、現在の包装貨物に対する振動耐久性評価方法の問題点を指摘する。

2. がたによる製品損傷の問題

前述の 1. で述べた製品損傷の問題は、プラスチック系緩衝材から紙系緩衝材に変更した包装貨物を輸送する際に発生している。輸送の際に発生する問題の原因としては、輸送中に生じる振動が考えられる。そこで、振動耐久性を評価できる振動試験を行い、問題の再現を試みたが、確認できなかった。そのため、包装貨物の易損性を評価できるさまざまな試験を組み合わせて問題の再現を試みた結果、落下試験及び振動試験を連続的に行うことにより、はじめて再現できることが明らかとなった[1]。このことから、この問題は、落下等の衝撃により内容品と緩衝材の間に生じるがたに起因した問題であると推測される。すなわち、プラスチック系緩衝材に比べ、紙系緩衝材は復元性が乏しいため、衝撃により内容品と緩衝材の間にがたを生じやすい。その結果、緩衝材による内容品の固定が不十分な状態で輸送が行われ、想定外の荷重が内容品に加わり、従来にはなかった製品損傷の問題が発生すると考えられる。製品損傷の流れを Fig. 1 に示す。

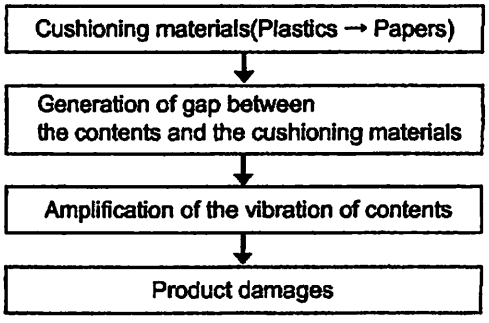


Fig. 1 Flowchart of product damages

3. 包装貨物のモデル化

内容品の振動解析を行うために、包装貨物のモデルとして、上下に緩衝材が設けられた包装貨物を対象とし、これを Fig. 2 に示すようにがたをもつ一自由度系にモデル化した。ただし、ばねの一端は外枠に連結しているが、他端は内容品に連結しておらず、内容品が振動応答してばねと接触すると反力を生じる。また外枠は、振動発生機に接続して振動できるようになっている振動台に固定されているものとする。

なお、Fig. 2 に示すばねは線形ばねを用い、ばねの設定は、ばねの自然長 50 mm、ばね定数 122.5 kN/m とした。この場合、ばねの自然長とばね定数は、質量 10 kg の内容品が高さ 1 m から落下したときに、最大ひずみが 0.8、内容品に伝わる加速度が 490 m/s^2 になるように緩衝包装設計手法[5] より導出した値である。また、モデルの固有振動数は、がたがない場合には 17.6 Hz となる。ただし、外枠及びばねの質量は無視した。

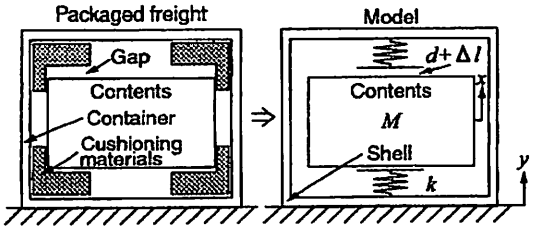


Fig. 2 Model of packaged freight

4. 数値解析方法

内容品の振動を把握する数値解析方法として、ヴェルレ法[6] を用い、逐次、微小時間ステップごとに内容品の振動を計算し、全体の内容品の振動を把握する。

まず、数値解析手順としては、Fig. 2 に示すように、入力として外枠の変位である y に正弦波振動の変位励振を与え、出力として内容品の変位である x を計算する。詳細は以下の通りである。

(1) 内容品の変位 x_t と外枠の変位 y_t を式(1)に代入して、ばねの変形量 z_t を計算する。式(1)の(i)、(ii)、(iii)は、それぞれ、内容品が下のばねに接する場合、内容品がばねに接しない場合、内容品が上のばねに接する場合を表す。

$$z_t = \begin{cases} y_t - x_t + \Delta l & \text{(i)} \\ 0 & \text{(ii)} \\ -(y_t - x_t + d + \Delta l) & \text{(iii)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \text{(i)} & -\Delta l & \leqq y_t - x_t < & l - \Delta l \\ \text{(ii)} & -(\Delta l + d) & \leqq y_t - x_t < & -\Delta l \\ \text{(iii)} & -(l + \Delta l + d) & \leqq y_t - x_t < & -(\Delta l + d) \end{pmatrix}$$

ただし、x_t は時刻 t における内容品の変位、y_t は時刻 t における外枠の変位、z_t は時刻 t におけるばねの変形量、l はばねの自然長、Δl は内容品の自重によるばねの変形量、d はがたの大きさを表す。

(2) ばねから内容品に加わる荷重 kz_t と内容品に働く重力 mg を考慮した式(2)に、(1)で

求めたばねの変形量 z_t を代入して、内容品に加わる荷重 f_t を求める。

$$f_t = kz_t - mg \quad (2)$$

ただし、f_t は時刻 t における内容品に加わる荷重、k はばね定数、m は内容品の質量、g は重力加速度を表す。

(3) ニュートンの運動方程式から、(2)で求めた荷重 f_t を式(3)に代入して内容品に伝わる加速度 $\ddot{x}_t$ を求める。

$$\ddot{x}_t = \frac{f_t}{m} \quad (3)$$

ただし、$\ddot{x}_t$ は時刻 t における内容品の加速度を表す。

(4) 現在及び微小時間ステップ前の内容品の変位 x_t、x_{t+1} と(3)で求めた加速度 $\ddot{x}_t$ を式(4)に代入して、微小時間ステップ後の内容品の変位 x_{t+1} を求める。

$$x_{t+1} = 2x_t + x_{t-1} + \ddot{x}_t \Delta t^2 \text{ subject to } t > 0 \quad (4a)$$

$$x_{t+1} = x_t + \dot{x}_t \Delta t + \frac{\ddot{x}_t t^2}{2} \text{ subject to } t = 0 \quad (4b)$$

ただし、Δ_t は微小時間ステップ、$\dot{x}_t$ は時刻 t における内容品の速度を表す。

(5) (1)に戻り、次の微小時間ステップにおける内容品の変位を計算する。

なお、数値解析において、ばねのひずみが1.0となった場合、内容品が破損するものと判断し、計算を中止した。これは現実に、内容品の底づきが発生した場合には、製品損傷を引き起こすためである。

次に、数値解析結果の評価基準として、製品損傷に大きく影響していると考えられる内容品に伝わる加速度に着目した。すなわち、振動台の振動加速度である入力加速度に対して、内容品に伝わる加速度である出力加速度は、どの程度かを把握するために、出力加速度の最大値と入力加速度の最大値の比を加速度伝達率と称して式(5)に示し、内容品の振動に関する一つの評価基準とした。

$$Tr = \frac{\ddot{x}_{max}}{\ddot{y}_{max}} \quad (5)$$

ただし、Tr は加速度伝達率を表す。

主な数値解析条件を Table 1 に示す。ただし、数値解析での時間ステップを 0.1 ms、計算時間を 500 s とした。時間ステップをこのように設定したのは、数値解析では、計算結果すなわち数値解析結果である出力加速度は、設定する時間ステップに依存するためである。Fig. 3 に、時間ステップと出力加速度の最大値の関係について検討した結果を示す。ただし、数値解析条件は、入力加速度の最大値 9.8 m/s^2、振動周波数 5 Hz、がたの大きさ 20

Table 1 Conditions of numerical analyses

入力の変位励振	正弦波
入力加速度の最大値	0.98、1.96、…、29.4 m/s^2
振動周波数	1、2、…、50 Hz
がたの大きさ	0、10、…、100 mm
時間ステップ	0.1 ms
計算時間	500 s

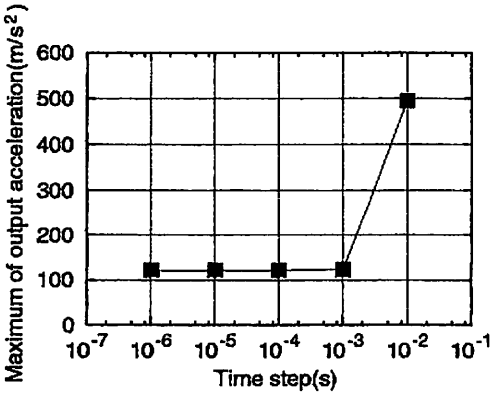


Fig. 3 Relation between time step and maximum of output acceleration

mm である。時間ステップが 1 ms より小さい場合、依存関係が非常に小さく、出力加速度の最大値も一定値に近づくので、余裕を考慮して時間ステップを 0.1 ms とした。

5. 数値解析結果及び考察

がたが内容品の振動に及ぼす影響を明らかにするために、Table 1 の数値解析条件で数値解析を行い、加速度伝達率に対する以下の3つの影響について検討した。さらに、数値解析結果より明らかとなった現象について、再度、検討するとともに、内容品への振動伝達について PSD (Power Spectral Density) 解析による評価を行った。

5.1 入力加速度の影響

数値解析によって得られた入力加速度の最大値と加速度伝達率の関係を Fig. 4 に示す。Fig. の(a)、(b)、(c)は、それぞれ振動周波数が5、25、50 Hz の結果である。

図より明らかなように、がたがない場合には、いずれの振動周波数においても、入力加速度の最大値の変化にかかわらず、加速度伝達率は一定である。しかし、がたがある場合には、振動周波数が 5、25 Hz (Fig. (a)、(b)) において、入力加速度の最大値がある値から 0.98 m/s^2 変化すると、加速度伝達率は 10 以上増加し、急激に変化している。さらに、その傾向は、がたが大きくなるとともに強くなる。ここで、加速度伝達率が急激に変化する直前の入力加速度の最大値を限界入力加速度とすると、限界入力加速度以下では、加速度伝達率は一定であるが、限界入力加速度を超えると、加速度伝達率は急激に変化し、以降、

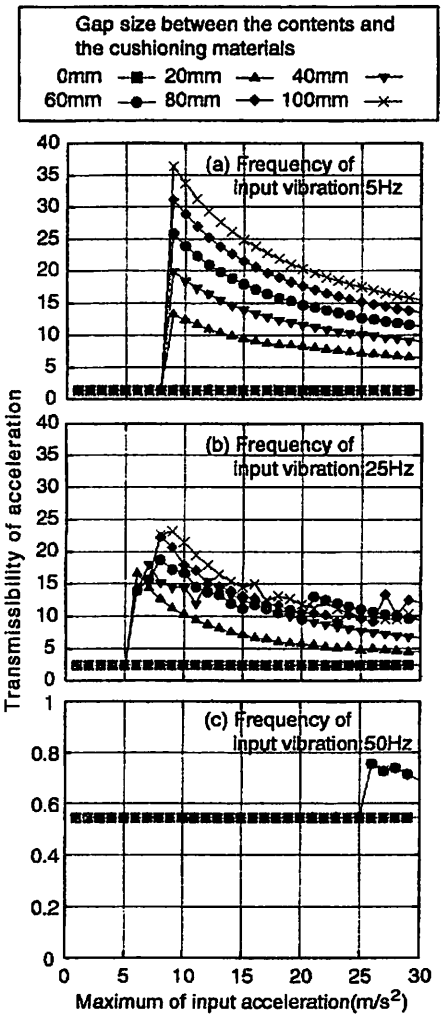


Fig. 4 Relation between maximum of input acceleration and transmissibility of acceleration

加速度伝達率は減少しながらも大きな値である。また、振動周波数が 50 Hz (Fig. (c)) では、入力加速度の最大値が変化しても、加速度伝達率は 1 より小さく、振動周波数が 5、25 Hz において見られた急激な増加傾向を示さない。

加速度伝達率が急激に増加する原因として、内容品と緩衝材の衝突が影響していると考えられる。すなわち、上向きに 9.8 m/s^2 を超

える加速度が内容品に伝わると、包装容器内で内容品の飛び現象が起こり、その後、内容品がばね上に落下する際、衝突的な荷重が発生し、急激に加速度伝達率が増加すると考えられる。

Fig. 5 に一例として、飛び現象が起きている場合の加速度の入出力を示す。ただし、数値解析条件は、入力加速度の最大値 9.8 m/s^2、振動周波数 5 Hz、がたの大きさ 20 mm である。Fig. において、出力加速度が − 9.8 m/s^2 の時が、包装容器内で内容品が飛んでいる状態であり、出力加速度の変化は、衝突時の内容品と緩衝材の相対速度に依存している。すなわち、衝突時の内容品と緩衝材の位相差は、出力加速度の変化に大きく依存していることから、内容品と緩衝材が衝突するタイミングが、加速度伝達率の変化に大きく関係していることがわかる。

5.2 がたの影響

数値解析によって得られたがたの大きさと加速度伝達率の関係を Fig. 6 に示す。Fig. の (a)、(b)、(c)は、それぞれ入力加速度の最大値が 4.9、7.8、9.8 m/s^2 の結果である。いずれ

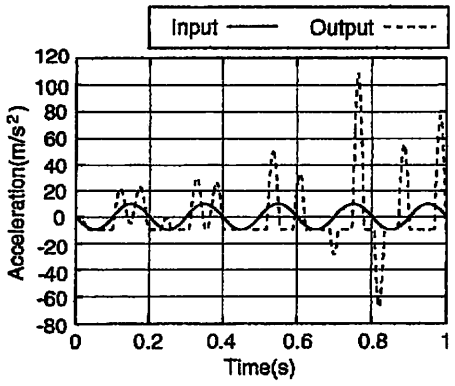


Fig. 5 Input acceleration and output acceleration

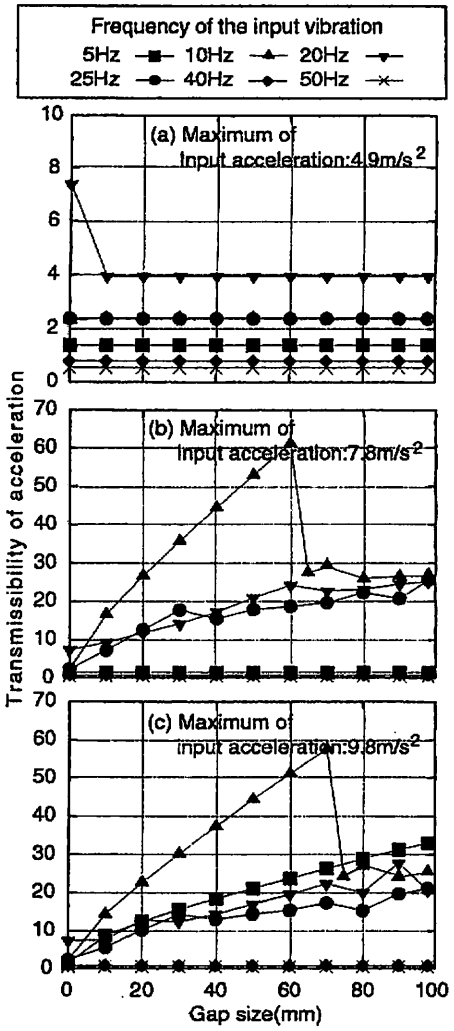


Fig. 6 Relation between gap size and transmissibility of acceleration

の振動周波数においても、入力加速度の最大値が限界入力加速度以下になる 4.9 m/s^2 (Fig. (a)) では、がたの変化にかかわらず、加速度伝達率は一定である。しかし、振動周波数 10、20、25 Hz において、入力加速度の最大値が限界入力加速度を超える 7.8、9.8 m/s^2 (Fig. (b)、(c)) では、がたが大きくなるとともに、加速度伝達率は増加傾向を示す。

5.3 振動周波数の影響

数値解析によって得られた振動周波数と加速度伝達率の関係を Fig. 7 に示す。Fig. の(a)、(b)、(c)は、それぞれ入力加速度の最大値が 4.9、7.8、9.8 m/s^2 の結果である。さて、加速度伝達率が 10 以上となる周波数帯を共振帯域とすると、いずれの入力加速度においても、がたがない場合に比べ、がたがある場合には、共振帯域は広がり、加速度伝達率が最大となる周波数は小さくなる。また、入力加速度の最大値が大きくなるとともに、共振帯域は広がる傾向にある。さらに、振動周波数において、入力加速度の最大値が限界入力加速度を超える 7.8、9.8 m/s^2 (Fig. (b)、(c)) では、加速度伝達率が最大となる周波数は、がたが大きくなるとともに小さくなり、その時の加速度伝達率は増加傾向を示す。

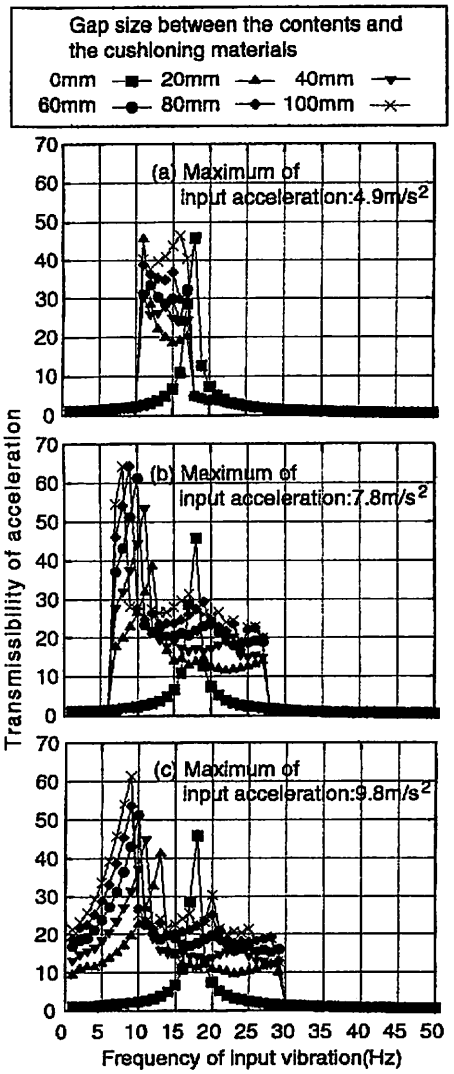


Fig. 7 Relation between frequnecy of input vibration and transmissibility of acceleration

がたの存在により共振帯域が広がる原因として、内容品の飛び現象の発生が挙げられる。Fig. の(b)、(c)より、がたがない場合とある場合の周波数応答曲線を比較すると、がたがない場合の周波数応答曲線において、上向きに 9.8 m/s^2 を十分に超える加速度が内容品に伝わる周波数帯（例えば Fig. (b)では、振動周波数が 6～28 Hz）で、がたがある場合の周波数応答曲線が急激に変化していることがわかる。これは内容品の飛び現象に十分な加速度が内容品に伝わる条件下では、がたがない場合には、上下の緩衝材により内容品の飛び現象は抑えられる。しかし、がたがある場合には、従来では共振と判断していなかった周波数帯でも、内容品の飛び現象が起こる。その結果、内容品と緩衝材は衝突して内容品に生じる振動加速度が大きくなり、共振と判断している。そのため、がたの存在により共振帯域が広がると考えられる。また、入力加速度の最大値が大きくなると、共振帯域が広がる原因として、入力加速度の最大値が大きくなると、飛び現象の発生に十分な加速度が内容品に伝わる周波数帯は広がり、結果として内容品の飛び現象が起こる周波数帯も広がるためと考えられる。

5.4 限界入力加速度への影響

以上の数値解析結果から、加速度伝達率には、入力加速度の最大値、がたの大きさ及び振動周波数がそれぞれ影響していることがわかる。これらが限界入力加速度に及ぼす影響を把握するために、新たに数値解析を行った結果を以下に示す。

5.4.1 入力加速度とがたの影響

Fig. 8 は、振動周波数を 5 Hz に固定した場合における入力加速度の最大値、がたの大きさ及び加速度伝達率の関係を示す。Fig. において、限界入力加速度とがたの大きさの関係に着目すると、がたが変化しても限界入力加速度は一定である。この原因として、入力加速度すなわち外枠の振動が大きくなると、ばねの変形量は増加する。その結果、ばねから内容品に加わる荷重が増加し、内容品に伝わる加速度は大きくなる。がたがある場合には、この加速度が 9.8 m/s^2 を超えると、内容品の飛び現象が起こる。その結果、内容品と下のばねが衝突し、加速度伝達率が急激に増加する。この急激な増加が起こる直前の入力加速度を限界入力加速度と仮定すると、限界入力加速度は、がたの大きさに関係なく入力加速度のみに依存する。そのため、限界入力加速度が一定になる傾向が強いと考えられる。

5.4.2 入力加速度と振動周波数の影響

Fig. 9 は、がたの大きさを 20 mm に固定した場合における入力加速度の最大値、振動周波数及び加速度伝達率の関係を示す。ただし、最大ひずみが 1.0 以上の場合は、内容品の底づきの発生を意味している。Fig. において、限界入力加速度と振動周波数の関係に着目すると、限界入力加速度は、振動周波数ごとに異なり、振動周波数に依存していると考えられる。しかし、振動周波数がある値を超えると、加速度伝達率は急激な増加傾向を示さなくなり、振動周波数に依存しなくなる。

5.5 内容品への振動伝達の変化

対象としている包装貨物には、がたという非線形要素が含まれているため、内容品には振動周波数や系の固有振動数以外の振動成分が発生する可能性がある。そこで、数値解析

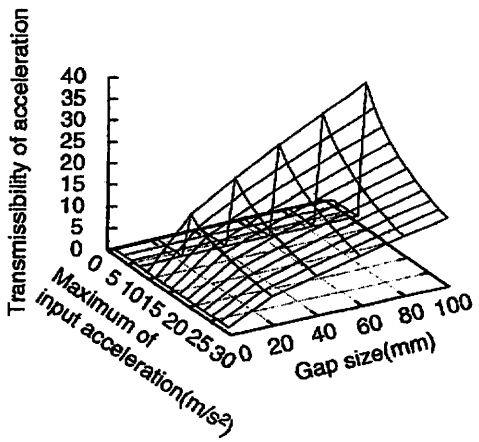


Fig. 8 Relation among maximum of input acceleration, gap size and transmissibility of acceleration (Frequency of input vibration : 5 Hz)

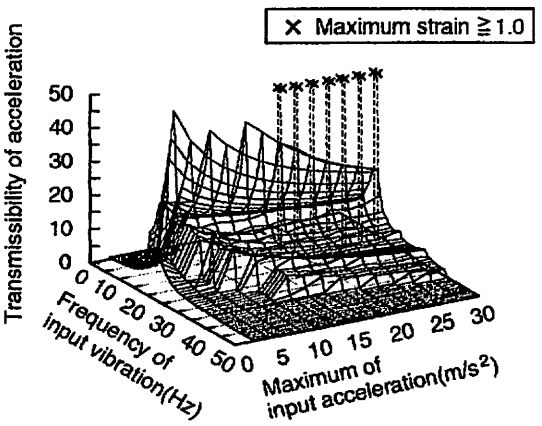


Fig. 9 Relation among maximum of input acceleration, frequency of input vibration and transmissibility of acceleration (Gap size : 20 mm)

で求めた内容品に伝わる加速度の PSD 解析を行い、内容品に伝わる振動の周波数及び振動の変化を検討する。

5.5.1 がたと PSD の関係

Fig. 10は、がたがない場合とある場合における内容品に伝わる加速度の PSD 解析結果を示す。Fig. の(a)、(b)は、それぞれ入力加速度の最大値が 7.8、9.8 m/s^2、振動周波数 5 Hz、がたの大きさ 0、20 mm の結果である。

Fig. (a)のように、入力加速度の最大値が限界入力加速度以下では、がたがない場合とある場合の結果がほぼ一致していることから、内容品に伝わる加速度の周波数はほぼ同じで、振動周波数だけでなく系の固有振動数と同じ振動成分が発生している。しかし、Fig. (b)のように、入力加速度の最大値が限界入力加速度を超える条件では、がたがない場合には、内容品に伝わる加速度の周波数は、Fig. (a)と同様に、振動周波数や系の固有振動数と同じ振動成分であるが、がたがある場合には、これらの周波数以外の振動成分が発生している。

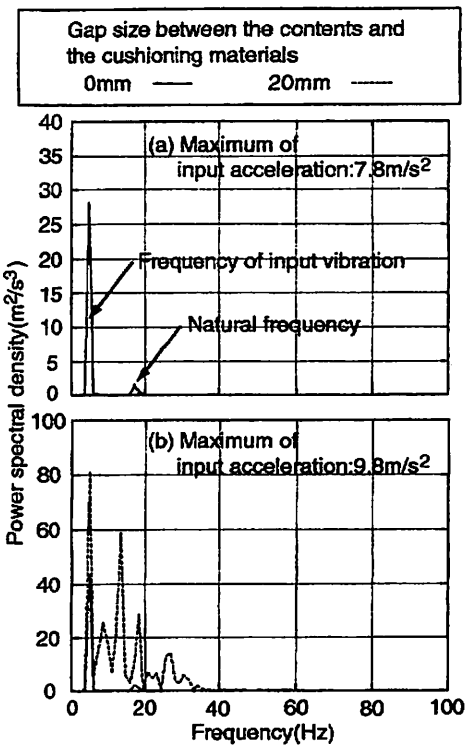


Fig. 10 Results of PSD analysis on output acceleration

本来、がたがない線形モデルで発生する振動成分は、振動周波数のみである。しかし、対象モデルでは、がたがない場合でも内容品の自重によりばねは変形し、微小なガタが生じて線形モデルにならないため、系の固有振動数と同じ振動成分が発生していると考えられる。

以上の結果から、内容品と緩衝材の間にがたがある場合には、入力加速度の最大値が限界入力加速度を超えると、振動周波数だけでなく系の固有振動数、さらには、これらの周波数以外の振動成分をもつ振動が内容品に伝わることがわかる。

5.5.2 がたと振動の関係

入力加速度の最大値が 9.8 m/s^2、振動周波数が 5 Hz、がたの大きさが 0、20、…、100 mm の場合における内容品に伝わる加速度を PSD 解析し、その PSD を周波数について積分した値の実効値とがたがない場合を基準にしたときの値を Table 2 に示す。ただし、この PSD の積分値は、PSD の面積を表すとともに、加速度の 2 乗平均を意味している。

表に示すように、がたがない場合に比べ、がたがある場合には、実効値は非常に大きくなっていることから、加速度伝達率と同様に、

Table 2 Integral values on PSD (Maximum of input acceleration : 9.8 m/s^2)

Gap size (mm)	0	20	40	…	100
$Power_{rms}$ (m/s^2)	7.8	21	20.1	…	20.1
Ratio	1.0	2.7	2.6	…	2.6

がたの存在により内容品に伝わる加速度は、急激に大きくなる。

以上の結果から、内容品と緩衝材の間にがたがある場合には、入力加速度の最大値が限界入力加速度を超えると、内容品に伝わる振動は、非常に大きくなることがわかる。

6. 包装貨物振動試験の問題点

以上の数値解析結果及び考察から、限界入力加速度の存在や共振帯域の広帯域化といった現象の存在を指摘した。これらの現象は、現在の包装貨物振動試験の規格では考慮されていない。したがって、がたがあるにもかかわらず、現在の規格どおりに試験を実施してしまえば、想定外の負荷が製品に加えられることになり、誤った評価結果が得られることがわかる。以下にこれらの現象と包装貨物振動試験の関係を述べる。

6.1 限界入力加速度の存在

本数値解析では限界入力加速度は、約5～10 m/s^2 であり、JIS Z 0200 に定められている包装貨物の振動試験で一般的に用いられている加速度 7.35 m/s^2 に極めて近い値である。そのため、7.35 m/s^2 の加速度で試験する場合、供試品の限界入力加速度が 7.35 m/s^2 より小さければ、加速度伝達率が急激に増加し、製品損傷を引き起こす可能性が高くなる。しかし、実際の輸送環境で生じる振動加速度が、限界入力加速度以下の場合には、加速度伝達率は急激に増加せず、製品損傷を引き起こさないと考えられる。また、供試品の限界入力加速度が 7.35 m/s^2 より大きければ、逆も同様に考えられる。

すなわち、実際の輸送環境と等価であるはずの試験を行っているにもかかわらず、実際の輸送環境と試験の振動耐久性評価結果が異なることになる。

以上の考察から、製品出荷前に行われる振動耐久性評価試験では、包装貨物に伝える振動加速度の設定が限界入力加速度よりも高いか、低いかによって結果は大きく異なるため問題である。

6.2 共振帯域の広帯域化

本数値解析では、がたを有する場合、共振帯域は広帯域化する。すなわち、内容品に強い振動が伝わる共振現象に似た現象が、点ではなく帯域で起きている。さらに、入力加速度の最大値が大きくなると、共振帯域は広がる傾向にある。これらの現象を共振帯域の広帯域化と呼ぶことにすると、共振帯域が広帯域化するか否かによって、実際の輸送環境と試験の振動耐久性評価結果が異なる場合がある。Fig. 7 を例に説明すると、実際の輸送環境の加速度が 4.9 m/s^2 すなわち Fig. 7 (a)であり、試験での加速度が 9.8 m/s^2 すなわち Fig. 7 (c)であるとすれば、製品の共振点が 25 Hz の場合、実際の輸送環境では内容品が共振しないにもかかわらず、試験では共振することになる。そのため、実際の輸送環境では問題ないにもかかわらず、試験では損傷を引き起こす可能性がある。

以上の考察から、共振帯域が広帯域化する場合、製品出荷前に行われる振動耐久性試験では、実際の輸送環境では起こりえない損傷が発生するため問題である。

7. 振動実験及び振動解析による問題点の検証

Fig. 2 に示す包装貨物のモデルを模擬した実験装置による振動実験及び緩衝材の粘性を新たに加えたモデルによる振動解析を行い、前述の 6. で述べた包装貨物振動試験の問題点（限界入力加速度の存在及び共振帯域の広帯域化）が存在することを再検証した。

まず、振動実験ではFig. 11 に示す実験装置を用いた。ただし、上の板は内容品を、下の板は外枠を、ばねは緩衝材を表し、内容品を表す板より上の空間はがたを模擬している。また、ばねと板は連結しておらず、上の板には質量 2.58 kg のアルミニウム板を、ばねにはばね定数 66 kN/m のものを使用した。この実験装置の下の板を振動試験機の振動台上に固定し、上下方向に正弦波振動を与え、上下の板に生じる振動加速度を計測した。

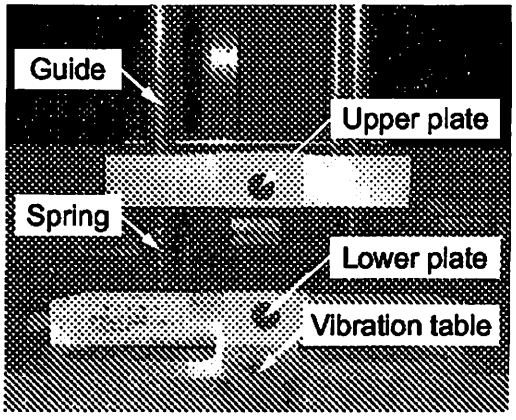


Fig. 11 Experimental equipment

Table 3 Transmissibility of acceleration
(Frequency of input vibration : 10 Hz)

Lower plate acc. (m/s^2)	6.35	8.83	12.1	13.7	16.9
Upper plate acc. (m/s^2)	6.39	8.26	103	96.6	178
Transmissibility	1.0	0.94	8.5	7.1	11

Table 3 に振動周波数 10 Hz における上下の板に生じる振動加速度の最大値及び加速度伝達率を示す。表より明らかなように、振動加速度 8.83 m/s^2 を超えると上の板に発生する振動加速度は急激に大きくなり、加速度伝達率は増加する。このことから振動実験においても限界入力加速度の存在を確認することができる。

次に、振動解析では Fig. 12 に示すように Fig. 2 の包装貨物のモデルに緩衝材の粘性を加えたモデル及び前述の 4. で述べた数値解析方法を用いた。ただし緩衝材の減衰比は 0.05 に設定し、その他の設定は前述の 2. で述べた通りである。Fig. 13(a)に振動周波数 5 Hz における入力加速度の最大値と加速度伝達率の関係、Fig. 13(b)に入力加速度の最大値 11.8 m/s^2 における振動周波数と加速度伝達率の関係を示す。

Fig. (a)より明らかなように、振動加速度 9.8 m/s^2 を超えると加速度伝達率は急激に増加する。また、Fig. (b)に示すように、がたがない場合に比べ、がたがある場合には共振帯域は広がる。このことから緩衝材の粘性を考慮した振動解析においても限界入力加速度の存在や共振帯域の広帯域化を確認することができる。

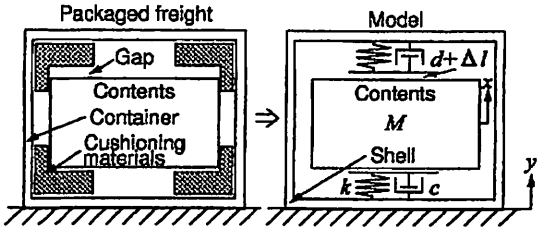
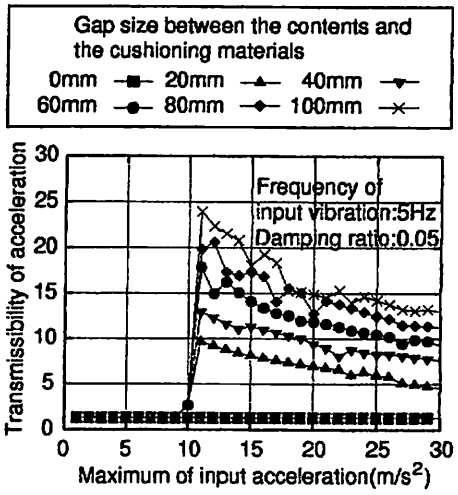
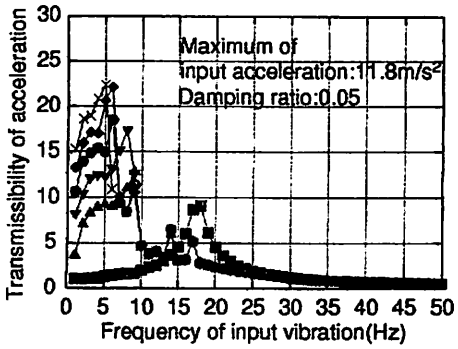


Fig. 12 Model of packaged freight



(a) Relation between maximum of input acceleration and transmissibility of acceleration



(b) Relation between frequency of input vibration and transmissibility of acceleration

Fig. 13 Results of numerical analyses

8. 結　論

がたを有する被包装物の数値解析により、入力加速度の最大値と加速度伝達率の関係、がたの大きさと加速度伝達率の関係及び振動周波数と加速度伝達率の関係をそれぞれ明らかにし、現在の包装貨物振動試験の問題点を指摘した。得られた結果を以下にまとめる。

(1) がたを有する場合、内容品に伝わる加速度は、入力加速度の最大値、振動周波数及びがたの大きさに依存し、入力加速度の最大値が限界入力加速度を超えると、内容品に伝わる加速度は急激に増加し、製品損傷を与える可能性が高くなる。

(2) がたを有する場合、内容品の周波数応答曲線は、入力加速度の最大値、振動周波数及びがたの大きさに依存し、共振帯域は広がる傾向にある。さらに、その傾向は入力加速度の最大値が大きくなるとともに強くなる。

(3) がたを有する場合、内容品に伝わる加速度の急激な変化には、包装容器内の内容品の飛び現象が関係し、この急激な変化が起こると、現在の包装貨物振動試験では製品の振動耐久性を正しく評価することができない。

9. 謝　辞

本研究を遂行するにあたり、貴重なご助言をいただきました神戸大学 助教授 斎藤勝彦氏に感謝いたします。また、多大なご協力をいただきました大阪府立産業技術総合研究所 主任研究員 寺岸義春氏、主任研究員 高田利夫氏にお礼申し上げます。

＜参考文献＞

1）高松幸一、包装技術、**4**、336-341 (1996)
2）鈴木浩平、青木　繁、大山哲司、日本機械学会論文集、**53** (C490)、1141-1146 (1987)
3）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)
4) 岩壷卓三、奥田靖裕、川井良次、日本機械学会論文集、**50**(C454)、970-978 (1982)
5) "新・包装技術便覧1" (日本包装技術協会編)、日本生産性本部、p.2110-2114 (1995)
6) 片岡洋右、"分子動力学とモンテカルロ法"、講談社、p.18-20 (1994)

(原稿受付 2004 年 11 月 15 日)
(原稿受付 2004 年 12 月 28 日)