一般論文

がたを有する被包装物の振動に関する理論的検討

津田和城* 中嶋隆勝*

Theoretical Investigation on Vibration of Package with Gap

Kazuki TSUDA* and Takamasa NAKAJIMA*

包装用緩衝材をプラスチック系から紙系に変更した場合、輸送中の振動により製品損傷が発生する可能性が指摘されている。この原因として、包装容器内の内容品と緩衝材の間に生じる隙間（以降、がたと呼ぶ）が考えられているが、製品損傷のメカニズムはいまだに明らかにされていない。

これまでに、内容品に損傷を引き起こしかねない二つの特異な振動現象の存在を、数値解析により明らかにした。しかし、数値解析結果は数値解析手法や時間ステップなどに依存する可能性があるため、結果の妥当性を検討しなければならない。

そこで本報では、数値解析と準理論解析の結果を比較し、数値解析の妥当性を確認している。両結果を比較すると、数値解析と同様に、二つの特異な振動現象の存在を確認できた。さらに、貨物応答振動の確率密度関数やパワースペクトル密度を比較すると、大きな違いが認められず、数値解析でも十分に貨物応答振動を評価できることがわかった。

キーワード：包装、輸送、製品損傷、振動、加速度、がた、非線形モデル

The cushioning materials used for packaging are shifing from plastics to papers. As a result, the damages of the contents in packaged freight have increased. These damages are supposed to be caused by gaps between the contents and the cushioning materials in the packaged freight. However, the relation between these damages and the gaps has not yet been clarified.

In our previous paper, it was clarified by numerical analysis that two unique vibration phenomena that can induce these damages exist. However, as the results of numerical analysis may depend on the discrete model and the parameters, the adequacy of the results has to be investigated.

In this paper, by comparing results of numerical analysis with ones of quasi-theoretical analysis, the adequacy of numerical analysis is confirmed. Comparing both results, it can be confirmed that the two unique vibration phenomena exist as well as in numerical analysis. Moreover, comparing both results by the PDF (ie. Probability Density Function) and the PSD (ie. Power Spectrum Density) of the transmitted vibration, it can be also confirmed that there is little difference. Therefore it is clarified that even numerical analysis can be enough effective to evaluate the transmitted vibration.

Keywords: Package, Transportation, Product damages, Vibration, Acceleration, Gap, Non-linear model

*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. はじめに

近年、環境への配慮から、包装用緩衝材の材質は変更され、プラスチック系からリサイクルが容易な紙系に移行している。その結果、環境に配慮した包装を実現しているが、従来にはなかった新たな製品損傷の問題が発生している[1]。この原因の一つとして、包装貨物内のがたが考えられる。紙系緩衝材は、プラスチック系緩衝材に比べ、貨物落下時の衝撃による永久変形が大きく、がたが発生することにより内容品に伝わる振動が非線形的に増幅する可能性が考えられる。しかし、このがたが内容品の振動応答にどのような影響を及ぼしているかは、いまだに明らかにされていない。

これまでに[2) 3)]、がたを有する被包装物の応答振動（以降、内容品の振動と呼ぶ）について数値解析を行い、貨物に加えられる振動の加速度がある値（以降、限界入力加速度と呼ぶ）を超えると急激に大きくなる現象や、共振現象を引き起こす振動数範囲が広帯域化する現象などを明らかにした。本研究では、数値解析よりも精度の高い解析方法、すなわち、モデルの状態ごとに運動方程式を立て厳密解を求める準理論解析を行い[4)]、数値解析で現れた現象が同様に発生することを確認する。さらに、貨物内容品の傷つき性を評価する上で、解析精度の劣る離散的な解析手法でも、十分な解析精度が得られるかについて、応答振動の確率密度分布およびパワースペクトル密度（以降、PSD（Power Spectrum Density）と呼ぶ）を比較することにより検討した。

2. 包装貨物のモデル

内容品の振動を把握する準理論解析を行うために、前報[2) 3)]の数値解析で対象としたがたを有する包装貨物のモデルを用いる。包装貨物のモデルとして、上下に緩衝材が設けられ、内容品と緩衝材の間にがたを有する包装貨物を対象とし、これをFig. 1に示すようにがたをもつ一自由度系にモデル化した。解析に用いたモデルの各定数をTable 1に示す。

3. 準理論解析方法

内容品の振動を把握する準理論解析を行うために、内容品の運動方程式を求める。ただし、内容品の振動状態は、Fig. 2に示すように3つの状態に分類できる。状態Ⅰは、内容品が下のばねに接している状態、状態Ⅱは、内容品が上下のばねに接していない状態、状態Ⅲは、内容品が上のばねに接している状態を示す。これらの各振動状態における内容品の運動方程式を求めて、各振動状態での初期条件から解を求め、全体の振動状態を把握す

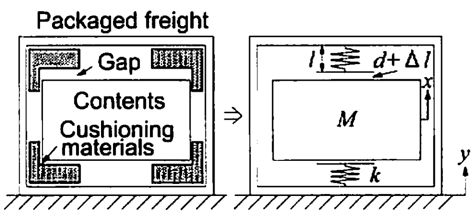

Fig. 1　Model of packaged freight

Table 1　モデルの各定数

内容品の質量 M	10kg
ばねの自然長 l	50mm
ばね定数 k	122.5kN/m

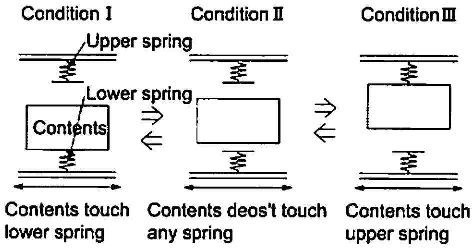

Fig. 2 Vibration condition of contents

る。ある状態における初期条件は、前の状態での終期条件と同等に設定し、各状態での終期条件を求める際に二分法を用いる。そのため、この手法は、完全な理論解析ではなく、準理論解析となる。

3.1 各振動状態の運動方程式

各振動状態の運動方程式を立て、解を導出する。Fig. 1 に示すように、入力振動に相当する振動台（外枠は共に動く）の変位を y とし、応答振動に相当する貨物内容品の変位を x として運動方程式を立てる。詳細は以下の通りである。

慣性力 Mx''、粘性減衰力 $c\,(x'-y')$、ばねに生じる力 F 及び重力 Mg についての力の釣り合いから、式(1)が成り立つ。ばねに生じる力 F は、フックの法則より式(2)で表される。

$$Mx''+c\,(x'-y')+F=-Mg \qquad (1)$$

$$F=k\,(x-y) \qquad x-y<0 \qquad (2a)$$

$$F=0 \qquad 0<x-y<d \qquad (2b)$$

$$F=k\,(x-y-d) \qquad d<x-y \qquad (2c)$$

ただし、M は内容品の質量、c は緩衝材の減衰係数、k は緩衝材のばね定数、F はばねに生じる力、g は重力加速度、d はがたの大きさ、x'' は内容品の加速度、x' は内容品の速度、x は内容品の変位、y' は振動台の速度、y は振動台の変位を表す。また、式(2a)は状態Ⅰ、式(2b)は状態Ⅱ、式(2c)は状態Ⅲにおけるばねに生じる力を表す。式(3)、式(4)においても、同様に添え字a、b、c は、それぞれ状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲを表している。

さらに、式(1)に式(2)を代入し、内容品と振動台の相対変位 z（$=x-y$）を用いて x を消去することにより、内容品と振動台の相対変位で分類すると、式(1)は式(3)となる。

$$Mz''+cz'+kz+Mg=-My'' \qquad z<0 \qquad (3a)$$

$$Mz''+cz'+Mg=-My'' \qquad 0<z<d \qquad (3b)$$

$$Mz''+cz'+k(z-d)+Mg=-My'' \qquad d<z \qquad (3c)$$

さらに、入力振動 $y''(t)=a\sin(\omega t)$、$y'(t)=-(a/\omega)\cos(\omega t)$、$y(t)=-(a/\omega^2)\sin(\omega t)$、粘性係数 $c=0$ とおくと、

$$Mx''+kx=-\left(Mg+k\frac{a}{\omega^2}\sin(\omega t)\right) \quad z<0 \qquad (4a)$$

$$x''=-g \qquad 0<z<d \qquad (4b)$$

$$Mx''+kx=kd-\left(Mg+k\frac{a}{\omega^2}\sin(\omega t)\right) \qquad d<z \qquad (4c)$$

となる。ただし、a は入力振動の最大振動加速度、ω は入力振動の角振動数、t は振動の経過時間を表す。ここでは、がたが及ぼす応答振動への影響について基本的な傾向を調べることを目的としているため、粘性による影響は無視することにしたが、粘性による影響を考慮した上で解を導出することも容易にできる。

3.2 運動方程式の解

式(4)より導出した各振動状態における内容品の変位 x、速度 x'、加速度 x'' を式(5)～(13)に示す。

■ 状態Ⅰの運動方程式の解

$$x=A_{\mathrm{I}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)+B_{\mathrm{I}}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-\left(\frac{Ma}{k-M\omega^2}+\frac{a}{\omega^2}\right)\sin(\omega t)-\frac{Mg}{k} \quad (5)$$

$$x'=-A_{\mathrm{I}}\sqrt{\frac{k}{M}}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)+B_{\mathrm{I}}\sqrt{\frac{k}{M}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-\left(\frac{Ma\omega}{k-M\omega^2}+\frac{a}{\omega}\right)\cos(\omega t) \quad (6)$$

$$x''=-A_{\mathrm{I}}\frac{k}{M}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-B_{\mathrm{I}}\frac{k}{M}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-\left(\frac{Ma\omega^2}{k-M\omega^2}+a\right)\sin(\omega t) \quad (7)$$

■ 状態Ⅱの運動方程式の解

$$x=-\frac{gt^2}{2}+A_{\mathrm{II}}t+B_{\mathrm{II}} \quad (8)$$

$$x'=-gt+A_{\mathrm{II}} \quad (9)$$

$$x''=-g \quad (10)$$

■ 状態Ⅲの運動方程式の解

$$A_{\mathrm{III}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)+B_{\mathrm{III}}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-\left(\frac{Ma}{k-M\omega^2}+\frac{a}{\omega^2}\right)\sin(\omega t)+d-\frac{Mg}{k} \quad (11)$$

$$x'=-A_{\mathrm{III}}\sqrt{\frac{k}{M}}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)+B_{\mathrm{III}}\sqrt{\frac{k}{M}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-\left(\frac{Ma\omega}{k-M\omega^2}+\frac{a}{\omega}\right)\cos(\omega t) \quad (12)$$

$$x''=-A_{\mathrm{III}}\frac{k}{M}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)-B_{\mathrm{III}}\frac{k}{M}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t\right)+\left(\frac{Ma\omega^2}{k-M\omega^2}+a\right)\sin(\omega t) \quad (13)$$

ただし、A_i、B_i（i＝Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）は解の係数である。

3.3 解の係数 A_i、B_i の決定

解の係数は初期条件（変位と速度の関係）より、次のように決定できる。

■ A_{I}、B_{I} の決定

$$z(t_i)=x(t_i)-y(t_i)=0 \quad (14)$$

$$z'(t_i)=x'(t_i)-y'(t_i)=z'(t_i) \quad (15)$$

式(5)、式(6)をそれぞれ式(14)、式(15)に代入して整理すると、解の係数は、

$$A_{\mathrm{I}}=x(t_i)\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)-x'(t_i)\sqrt{\frac{M}{k}}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)-\sqrt{\frac{M}{k}}\frac{ka}{(k-M\omega^2)\omega}\cos(\omega t_i)\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)+\left\{\frac{ka}{(k-M\omega^2)\omega^2}\sin(\omega t_i)+\frac{Mg}{k}\right\}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right) \quad (16)$$

$$B_{\mathrm{I}}=\frac{1}{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)}\left\{x(t_i)-A_{\mathrm{I}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)+\frac{ka}{(k-M\omega^2)\omega^2}\sin(\omega t_i)+\frac{Mg}{k}\right\} \quad (17)$$

となる。

■ A_{II}、B_{II} の決定

$$z(t_i)=x(t_i)-y(t_i)=\{i=\mathrm{I}:0,\ i=\mathrm{III}:d\} \quad (18)$$

$$z'(t_i)=x'(t_i)-y'(t_i)=z'(t_i) \quad (19)$$

式(8)、式(9)をそれぞれ式(18)、式(19)に代入し、整理すると、解の係数は、

$$A_{\mathrm{II}}=y'(t_i)+z'(t_i)+gt_i \quad (20a)$$

$$B_{\mathrm{II}}=y(t_i)+\frac{1}{2}gt_i^2+A_{\mathrm{II}}t_i \quad (21a)$$

$$A_{\mathrm{II}}=y'(t_i)+z'(t_i)+gt_i \quad (20b)$$

$$B_{\mathrm{II}}=y(t_i)+d+\frac{1}{2}gt_i^2+A_{\mathrm{II}}t_i \quad (21b)$$

となる。ただし、式(20a)、式(21a)は、前の振動状態が状態Ⅰの場合であり、式(20b)、

式(21b)は、前の振動状態が状態Ⅲの場合である。

■ A_{III}、B_{III}の決定

$$z(t_i)=x(t_i)-y(t_i)=d \quad (22)$$

$$z'(t_i)=x'(t_i)-y'(t_i)=z'(t_i) \quad (23)$$

式(11)、式(12)をそれぞれ式(22)、式(23)に代入し、整理すると、解の係数は、

$$A_{\mathrm{III}}=x(t_i)\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)-x'(t_i)\sqrt{\frac{M}{k}}\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)-\{d-\frac{ka}{(k-M\omega^2)\omega^2}\sin(\omega t_i)-\frac{Mg}{k}\}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)-\frac{ka}{(k-M\omega^2)\omega}\sqrt{\frac{M}{k}}\cos(\omega t_i)\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right) \quad (24)$$

$$B_{\mathrm{III}}=\frac{1}{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)}\{x(t_i)-A_{\mathrm{III}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{M}}t_i\right)+\frac{ka}{(k-M\omega^2)\omega^2}\sin(\omega t_i)-d+\frac{Mg}{k}\} \quad (25)$$

となる。

ここで、t_i (i＝0、1、…) は前の状態から現在の状態に遷移した時刻を示し、$z'(t_i)$ は運動の連続性から遷移する直前の状態の終期速度 $z'(t_i)$ より与えられる。よって、未知数は係数 A_i、B_i のみとなり、二式の連立方程式を解き、内容品の運動が把握できる。ここまでの計算は、理論的に導出できる。

3.4 状態遷移時刻 t_{i+1} の算出

現在の振動状態から次の振動状態に遷移する時刻 t_{i+1} は、以下に示す各振動状態の終期条件を用いて算出するが、理論的には導出できないため、数値解析的に算出する必要がある。

■ 状態Ⅰの終期条件

状態Ⅰの終期条件は、常に状態Ⅱに遷移することから次のようになる。

$$z(t_{i+1})=x(t_{i+1})+\frac{a}{\omega^2}\sin(\omega t_{i+1})=0 \quad (22)$$

$$z'(t_{i+1})=x'(t_{i+1})+\frac{a}{\omega}\sin(\omega t_{i+1})>0 \quad (23)$$

$$t_{i+1}>t_i \quad (24)$$

ただし、未知数 t_{i+1} は、終期条件を満たす最小の値である。

■ 状態Ⅱの終期条件

状態Ⅱの終期条件は、状態Ⅰに遷移する場合と状態Ⅲに遷移する場合の二通りが存在する。

状態Ⅰへ遷移する場合

$$z(t_{i+1})=x(t_{i+1})+\frac{a}{\omega^2}\sin(\omega t_{i+1})=0 \quad (25a)$$

$$z'(t_{i+1})=x'(t_{i+1})+\frac{a}{\omega}\sin(\omega t_{i+1})<0 \quad (26a)$$

$$t_{i+1}>t_i \quad (27b)$$

状態Ⅲへ遷移する場合

$$z(t_{i+1})=x(t_{i+1})+\frac{a}{\omega^2}\sin(\omega t_{i+1})=d \quad (25b)$$

$$z'(t_{i+1})=x'(t_{i+1})+\frac{a}{\omega}\sin(\omega t_{i+1})>0 \quad (26b)$$

$$t_{i+1}>t_i \quad (27b)$$

ただし、式(25a)、式(26a)は状態Ⅰに遷移する場合であり、式(25b)、式(26b)は状態Ⅲに遷移する場合である。

■ 状態Ⅲの終期条件

状態Ⅲの終期条件は、常に状態Ⅱに遷移することから次のようになる。

$$z(t_{i+1})=x(t_{i+1})+\frac{a}{\omega^2}\sin(\omega t_{i+1})=d \quad (28)$$

$$z'(t_{i+1})=x'(t_{i+1})+\frac{a}{\omega}\sin(\omega t_{i+1})<0 \quad (29)$$

$$t_{i+1} > t_i \tag{30}$$

以上の終期条件を用いて二分法により t_{i+1} を算出する。このようにして、貨物内容品の振動応答を、状態遷移時刻 t_{i+1} を除く、すべての範囲で理論的に導出することができる。これにより、離散的解析手法による解析精度を検討する。

4. 数値解析と準理論解析の比較

包装容器内の内容品に伝わる振動加速度（以降、応答加速度と呼ぶ）の解析が、準理論解析と同様の高い精度で、数値解析でも十分に振動応答特性評価が可能であることを確認する。

4.1 入力振動条件

入力振動、すなわち、包装容器を設置する振動台の振動は、最大加速度が 9.8 m/s^2、振動周波数が 5 Hz の正弦波とし、$t=0$ のとき、変位および加速度が 0 となるように設定する。また、$t=0$ での内容品の速度（以下、内容品の初期速度と呼ぶ）は、振動台と同じ値に設定する。ただし、内容品の初期状態による解析結果のばらつきも把握するため、初期速度を 10% 下げた値に設定した数値解析（時間ステップ 1 μs）も行う。

4.2 応答加速度の波形

準理論解析及び数値解析（時間ステップ 100 μs、1 μs）により得た応答加速度、ならびに、内容品の初期速度を 10% 下げたときの数値解析（時間ステップ 1 μs）により得た応答加速度を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) は時間区間が 0～3 s の応答加速度であり、Fig. 3(b) は時間区間が 100～103 s の応答加速度である。ただし、がたの大きさは 20 mm である。また、準理論解析で定義した振動状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲは、内容品と緩衝材（ばね）との接触状態による分類であるが、内容品へ加え

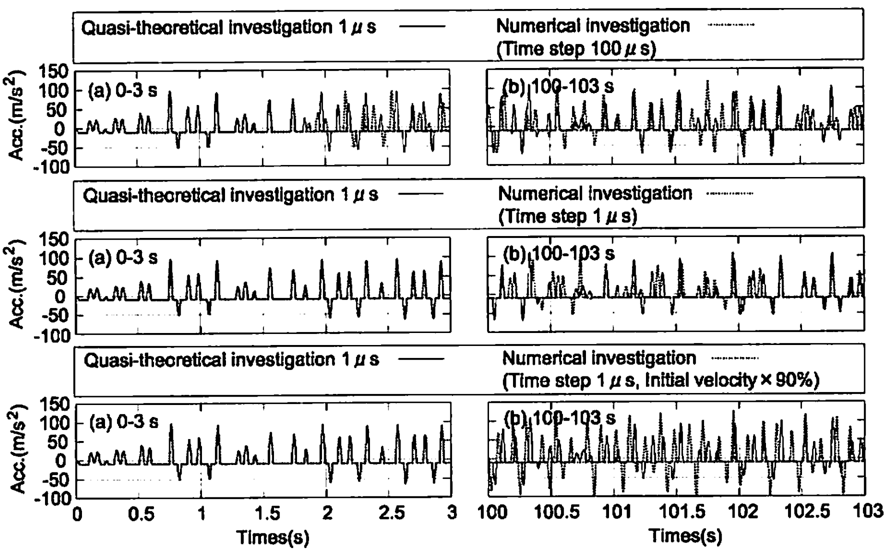

Fig. 3　Acceleration waves of contents

られる外力（ばね力）について考えると、応答加速度が$-9.8\ m/s^2$より大きい場合は状態I、$-9.8\ m/s^2$の場合は状態II、$-9.8\ m/s^2$より小さい場合は状態IIIであると理解できる。

図より明らかなように、数値解析と同様に準理論解析においても、包装容器内で内容品の飛び現象（振動状態II）が発生し、その後、振動状態Iあるいは振動状態IIIへと遷移することがわかる。そして、内容品の飛び現象（振動状態II）が発生する結果、内容品が下のばね上に落下（振動状態Iへの遷移）する際、通常の正弦波とは大きく異なる衝突的な加速度が内容品に発生することがわかる。これらの飛び現象は、前報[2) 3)]で指摘した限界入力加速度を超えると応答加速度が急激に増大する現象や、共振現象がある一つの振動数で起きるのではなく、ある振動数帯域において発生する現象（共振現象の広帯域化）といった、これまで評価試験の現場ではよく経験されていたが、理論的には十分に把握してこなかった現象を引き起こす原因となる現象である。このことから、前報[2) 3)]での限界入力加速度の存在や、共振現象の広帯域化などの妥当性が準理論解析によっても裏付けられる。

次に、各解析で得られた加速度波形の違いに注目する。Fig. 3(a)では、各解析結果はほぼすべて同じ波形であり、重なりあっているが、Fig. 3(b)に示す時間区間100～103 sでは、各解析結果のずれは明らかである。これは、対象とする振動が、非線形応答振動であることが原因であり、非線形性の一つの特徴として、初期条件など少しの違いにより、その後の結果が大きく異なるという初期値敏感性の事例がよく取り上げられる。しかし、その非線形性により、振動の厳しさ、すなわち、振動が内容品に損傷を及ぼす可能性の評価が大きく変動するのであれば、がたが存在する場合、再現性のある振動耐久性評価ができないという結論に達してしまう。そこで、加速度応答の波形を比較するだけではなく、振動の厳しさを表現する二つの手法、すなわち、振動加速度の確率密度関数及びPSDを用いて、各解析により得られた振動の厳しさを評価することにより、がたが存在する場合でも十分な再現性をもつ振動耐久性評価が可能であることを確認する。

4.3 確率密度関数による比較

応答加速度の波形について、時間ステップで各時刻の加速度をすべて読みとり、ヒストグラムを作成する。このとき、横軸は、加速度のレベルをいくつかの階級に分類したものとし、その階級の幅とデータ数で縦軸を基準化したグラフ（一般に、確率密度関数と呼ぶ）を作成する。Fig. 4に4.2で得られた準理論解析及び数値解析（時間ステップ100 μs、1 μs）による応答加速度、ならびに、初期速度を10%下げたときの応答加速度についての確率密度関数を示す。ただし、対象とした応答加速度の時間区間は0～1000 sであり、階級の幅はすべて$1\ m/s^2$としている。また、入力振動及びがたの大きさは、応答加速度の波形を算出したときと同じ条件である。

Fig. 4(a)～(d)を比較すると、すべての確率密度関数が同じ形状となっている。したがって、応答加速度の確率密度から振動の厳しさを判断すれば、すべて同等の振動であると言える。よって、応答加速度の波形にはずれがあるが、振動耐久性評価の観点からは、す

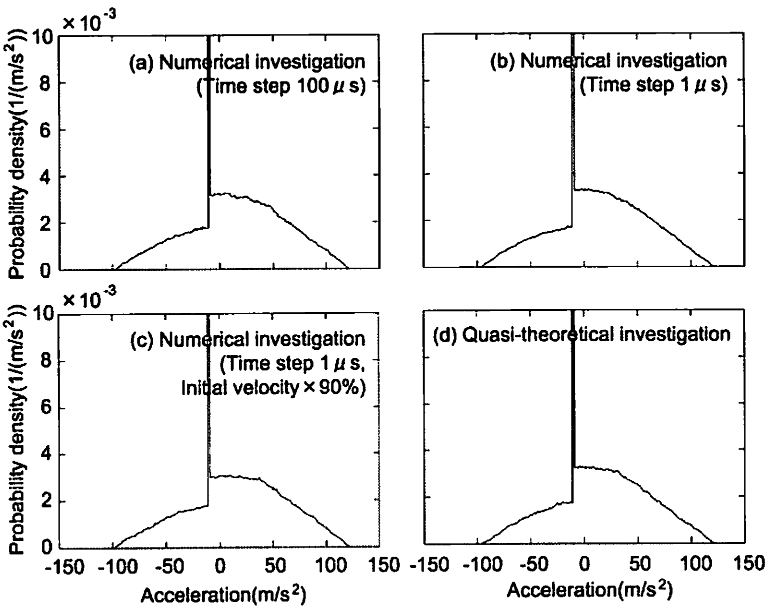

Fig. 4　Probability density distribution of vibration of contents (Vibration time 0～100 s)

べて同等であり、解析条件や初期条件に多少の違いがあっても問題はないと考えられる。

Fig. 4 (a)～(d)の$-9.8\ \mathrm{m/s^2}$あたりにおけるピークは、準理論解析で定義した振動状態Ⅱに相当する部分であり、ピークの左側は振動状態Ⅲに相当し、右側は振動状態Ⅰに相当する。

4.4 PSD 解析による比較

Fig. 5 に準理論解析及び数値解析（時間ステップ 100 μs、1 μs）による応答加速度、ならびに、初期速度を 10% 下げたときの応答加速度の PSD 解析結果を示す。ただし、対象とした応答加速度の時間区間は 0～1000 s であり、PSD は 0.1 Hz ごとに平均した値である。また、入力振動及びがたの大きさは、応答加速度の波形を算出したときと同じ条件である。

Fig. 5 (a)～(d) を比較すると、PSD の形状はほぼ同じである。したがって、PSD から判断すると、準理論解析結果と数値解析結果は、応答加速度の波形は異なるが、振動の厳しさについては、ほぼ同等であると言える。

ここで、ランダム振動試験について振り返ると、試験条件は PSD と振動周波数の関係、及び試験時間で規定されており[5]、入力振動の波形自体については規定されていない。実際、多くの振動試験機によりランダム振動加振を行った際も、発生する振動波形は毎回異なる波形であり、それによる振動の厳しさの違いは指摘されていない。このことからも、応答加速度の波形ではなく、PSD 解析による比較の妥当性がわかる。

以上、がたを有する被包装物の振動応答を解析する際、解析手法や初期条件によって、応答加速度の波形自体は異なったものとなる

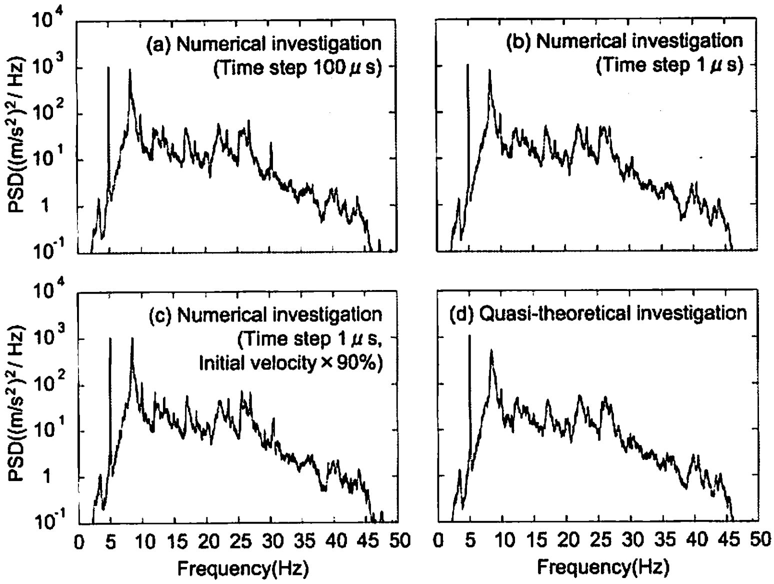

Fig. 5 Results of PSD analysis

が、それらの確率密度関数および PSD 解析結果はすべて同じ形状となり、振動耐久性評価に用いる上で、どの手法を用いても問題ないことがわかった。

5. おわりに

包装容器内の内容品と緩衝材の間にがたを有する場合における内容品の振動について離散的解析手法である数値解析を用いる妥当性を検討するため、解析精度の高い準理論解析を行い、数値解析結果と比較した。その結果、明らかになった結論を以下にまとめる。

(1) 数値解析と同様に準理論解析においても、内容品の特異な振動現象（限界入力加速度の存在や共振帯域の広帯域化）の発生原因である内容品の飛び現象は発生する。

(2) 解析手法や初期値の違いにより、応答加速度の波形自体は異なった形状となるが、確率密度関数による比較、ならびに PSD 解析による比較を行った結果、すべてほぼ同じ振動の厳しさである。

6. 謝辞

この研究に関して貴重な助言をいただきました神戸大学の斎藤勝彦助教授に感謝いたします。また、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）高松幸一、包装技術、**35**(4)、336-341 (1997)

2）津田和城、中嶋隆勝、斎藤勝彦、寺岸義

春、高田利夫、日本包装学会第12回年次大会予稿集、p.12-13（2003）
3）津田和城、中嶋隆勝、日本包装学会誌、14(1)、35-47(2005)
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）JIS Z 0232：2004 包装貨物－振動試験方法

（原稿受付 2005 年 1 月 14 日）
（審査受理 2005 年 3 月 2 日）