

一般論文

## 非ガウス型ランダム振動が包装内容品の応答に与える影響 —数値計算による検討—

細山 亮\*、斎藤 勝彦\*\*、中嶋 隆勝\*

### Effect of Non-Gaussian Random Vibration on Packaging Response Using Numerical Simulation

Akira HOSOYAMA\*, Katsuhiko SAITO\*\* and Takamasa NAKAJIMA\*

従来のランダム振動試験では、発生する加速度瞬時値（任意の時刻における加速度の値）の確率密度分布はガウス分布であるのに対し、実輸送では衝撃的な振動も発生するため非ガウス分布となることが多い。そこで、従来よりも実際に即した振動試験を行うために非ガウス型ランダム振動試験を提案してきた。提案法と従来法では、発生する加速度瞬時値の確率密度分布が異なるため、包装内容品の挙動に違いが現れることが予想される。しかし、非ガウス型ランダム振動が緩衝材を通じて包装内容品に伝わる際、どのように振動特性が変化するか検討されておらず、非ガウス型ランダム振動試験を行う意義は必ずしも明確ではない。本研究では、まず初めに包装内容品の挙動を定性的に理解することが重要であると考え、包装品の解析モデルを作成し、その挙動を数値計算により算出した。その結果、入力振動の非ガウス性は包装内容品にも影響することがわかった。

The probability density function of the instantaneous acceleration value generated by the current vibration testing system is always Gaussian. On the other hand, that of the instantaneous acceleration value occurring during an actual transportation is often non-Gaussian. Therefore, we proposed a new method for non-Gaussian vibration testing with a goal of more appropriate vibration testing. The proposed method is different from the traditional method in the probability density function of the instantaneous acceleration value. Hence it is expected that there is a difference between them in a behavior of contents of packaging. However, the significance of non-Gaussian random vibration is not altogether clear because it is not investigated what kind of effect non-Gaussian random vibration has on the response of contents of packaging when it is transmitted to the contents through cushioning material. In this paper we consider the importance of understanding the movement of the contents qualitatively, and calculate the response acceleration by constructing an analytical model of packaging. Consequently, it was found that the non-Gaussian nature of input vibrations was transmitted to contents of packaging.

キーワード：包装、輸送、振動試験、非ガウス分布、尖度、応答

Keywords : Packaging, Transportation, Vibration Test, Non-Gaussian Distribution, Kurtosis, Response

\*地方独立行政法人 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

Technlogy 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. 緒言

包装貨物振動試験は、包装内容品の保護性を事前に確認するための試験の一つであり、試験機の性能向上とともに、一定振動試験、掃引振動試験、ランダム振動試験へと変遷してきた。現在、ランダム振動試験が一般的に行われているが、その加速度瞬時値（任意の時刻における加速度の値）の確率密度分布は常にガウス分布であり、実輸送で生じる衝撃的な振動を再現できないことが指摘されている<sup>1)~3)</sup>。

これまでに筆者らは、実輸送時の振動特性を忠実に再現するために、実輸送と振動試験における加速度瞬時値の確率密度分布の違いに着目し、非ガウス型ランダム振動生成法を提案した<sup>4)</sup>（以下、提案法と呼ぶ）。また、提案している非ガウス型ランダム振動試験、現状のランダム振動試験および実輸送において蓄積する疲労を比較し、提案法の有効性を実験的に検証した<sup>5)</sup>。ここでは、包装内容品の振動疲労を定量的に評価するためのモデルを作製し、非ガウス型ランダム振動試験が現状のランダム振動試験より精度の高い試験ができる可能性を示した。

このように、提案法では従来よりも実際に即した振動を与えることができるため、精度の高い試験を行うことができると考えられる。しかし、非ガウス型ランダム振動が緩衝材などを通じて包装内容

品に伝わる際、振動特性がどのように変化するのか、もしくは変化しないのかについて検討しておらず、非ガウス型ランダム振動試験を行う意義は必ずしも明確ではない。

本研究では、まず初めに包装内容品の挙動を定性的に理解することが重要であると考え、包装品を単純な1自由度系でモデル化し、非ガウス型ランダム振動入力に対する包装内容品の応答加速度を数値計算により算出する。応答加速度から包装内容品に蓄積する疲労を求めることで、非ガウス型ランダム振動が包装内容品に及ぼす影響を明らかにする。

## 2. 包装貨物のモデル化

### 2.1 1自由度バネ-マス-ダンパーモデル

包装貨物の挙動を解析するために、Fig.1のように、包装内容品の上下に緩衝材が配置された包装貨物を想定し、包装内容品を剛体、緩衝材をバネとダンパーでモデル化する。このモデルにおいて、入力の絶対変位を  $z$ 、応答の絶対変位を  $x$ 、相対変位を  $u (= x - z)$ 、剛体質量を  $m$ 、バネ定数を  $k$ 、減衰係数を  $c$  とおくと、系の運動方程式は以下の式で表される。

$$m(\ddot{u} + \dot{z}) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

ここで、モデルのパラメータ  $m$ 、 $c$ 、 $k$ 、および振動台の加速度  $\ddot{z}$  が与えられると、 $u$  が得られる。したがって、製品の応答加速度  $\ddot{x}$  は、式(2)により算出される。

$$\ddot{x} = \ddot{u} + \ddot{z} \quad (2)$$

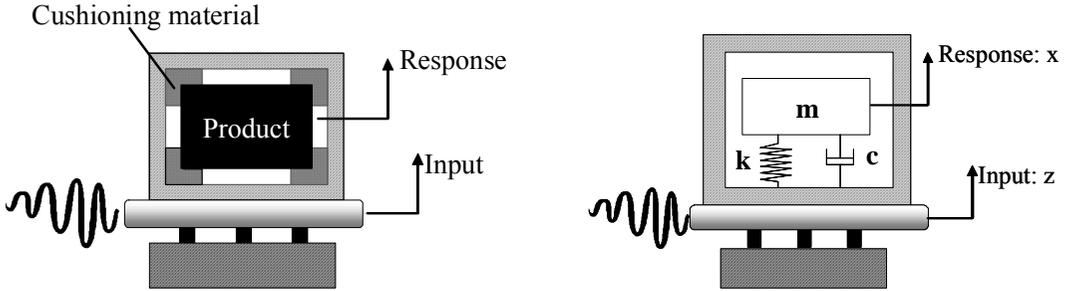


Fig.1 Analytical model for packaging

## 2.2 モデルのパラメータ設定

包装内容品の質量が 15kg、落下高さが 60cm、質量部に伝わる最大加速度が  $300 \text{ m/s}^2$  になる場合を想定して、モデルのバネ定数  $k$  および減衰係数  $c$  を設定する。ただし、減衰比  $\zeta$  については緩衝材としてプラスチック系緩衝材を想定し、従来の研究<sup>6)~8)</sup>を参考に 0.15 とする。

Fig.2 に示すモデルにおいて、衝突速度を  $v$ 、固有角振動数を  $\omega$  とおくと、落下時に生じる最大加速度  $\ddot{x}_{\max}$  は式(3)で表すことができる<sup>6)</sup>。

$$\ddot{x}_{\max} = \left| \frac{2\zeta^2 - 1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \right| \cdot \exp\left( \frac{-\zeta\pi}{2\sqrt{1 - \zeta^2}} \right) \cdot v \cdot \omega \quad (3)$$

$\omega$  については、質量部に伝わる最大加速度  $\ddot{x}_{\max}$  が  $300 \text{ m/s}^2$ 、落下高さが 60cm という条件から、式(3)より  $\omega=115(\text{rad/s})$  と設定できる。バネ定数  $k$  については、包装内容品の質量  $m$  を 15kg と想定しているので、 $k=m\omega^2$  より  $k=198375(\text{N/m})$  と求まる。減衰係数  $c$  については  $c=2m\zeta\omega$  より  $c=517.5(\text{Ns/m})$  と求まる。本研究では、このようにして設定したバネ定数と減衰係数を用いて数値計算を行う。

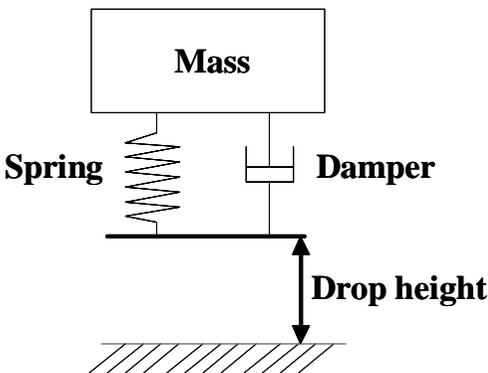


Fig.2 One-degree-of-freedom spring-mass-damper model

## 3. 数値計算

数値計算には、Maplesoft 社製の MapleSim<sup>9)</sup>を使用した。MapleSim は、自動車や航空宇宙産業などでよく用いられており、包装分野においても実績がある<sup>10) 11)</sup>ため、本ソフトを選定した。

本研究では、非ガウス型ランダム振動を生成するために、これまで提案してきた方法<sup>4)</sup>を用いる。提案法はフーリエ解

析後の位相の設定に特徴がある。従来のランダム振動生成法では、位相は 0 から  $2\pi$  までの値が一様乱数で与えられていたが、提案法では位相を以下の式で与える。

$$\phi_k = \phi_{k-1} + t_{gr}(k\Delta f)2\pi\Delta f \quad (4)$$

ここで、 $\phi_k$  は k 次成分の位相、 $t_{gr}$  は群遅延時間、 $\Delta f$  は周波数分解能を示す。いま、 $t_{gr}$  が標準偏差  $\sigma$  の正規分布に従う確率変数として与えられるとき、 $\sigma$  の値に対応した非ガウス型ランダム振動を生成することが出来る。具体的には、 $\sigma$  により非ガウス性を表す指標である尖度を制御することができる。

ここでは、まず提案法<sup>4)</sup>を用いて、尖度を 3、5 および 7 に設定したときの時刻歴データを各 10 種類ずつ作成する。その際、 $t_{gr}$  を毎回乱数によって生成しなおすことにより、同じ尖度の値でもそれぞれ異なる波形を持つ時刻歴データとなるようにする。Fig.3 に時刻歴データを生成する際に用いたパワースペクトル密度（以下 PSD と略す）を示す。

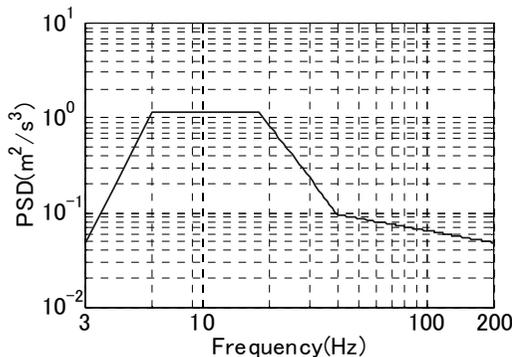


Fig.3 Acceleration PSD of input vibration (JIS Z 0232:2004)

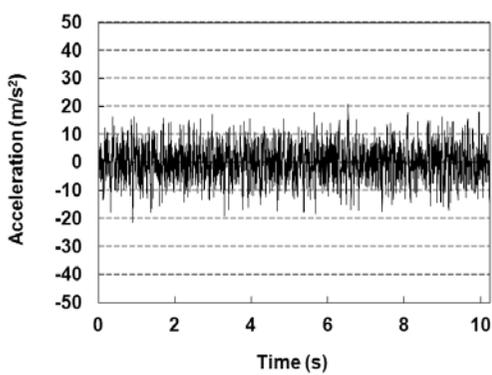
次に、生成した合計 30 種類の時刻歴データを入力加速度として数値計算を行い、各尖度に対する包装内容品の応答加速度を求める。包装内容品の応答加速度から加速度実効値（以下 RMS と略す）、尖度および包装内容品の蓄積疲労の平均値を各尖度ごとに求め、尖度の違いが包装内容品の応答に及ぼす影響について比較検討を行う。なお、蓄積疲労は次式を用いて算出する。

$$\beta = \sum N_i S_i^\alpha \quad (5)$$

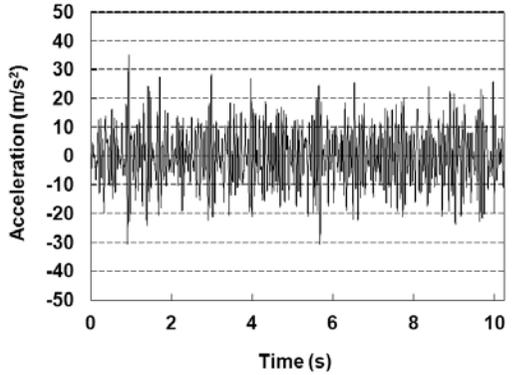
ここで、 $\beta$  は蓄積疲労、 $N$  は頻度、 $S$  は加速度レベル、 $\alpha$  は加速係数を表す。式(5)の  $S$  と  $N$  の算出には、ピークカウント法<sup>12)</sup>を用いる。加速係数については、JIS E 4031 を参考に  $\alpha=4$  と設定する<sup>13)</sup>。蓄積疲労の比較は、入力加速度の尖度を 3 に設定した場合の値を 1 として、尖度を 5 および 7 に設定した場合の蓄積疲労を算出する。なお、これらの計算において時間ステップ  $\Delta t$  を 0.001s、データ数を 10240 点と設定した。

#### 4. 結果と考察

Fig.4、Fig.5 および Fig.6 に、尖度を 3、5 および 7 に設定したときの入力加速度とそれに対する包装内容品の応答加速度を示す。なお、ここで示しているのは各尖度に対して得られた 10 種類の数値計算結果の一つである。入力加速度と応答

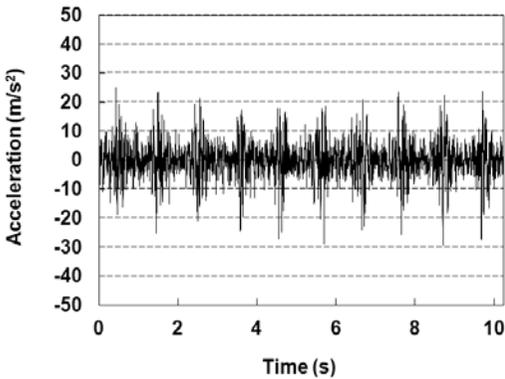


(a) Input vibration  
(Kurtosis=3.0, Acceleration RMS=5.8m/s<sup>2</sup>)

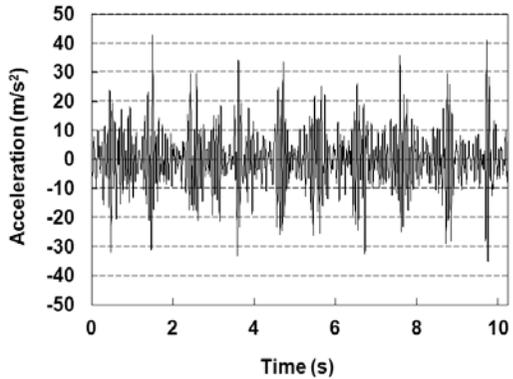


(b) Response vibration  
(Kurtosis=2.9, Acceleration RMS=9.5m/s<sup>2</sup>)

Fig.4 Time series of input & response vibration (Input kurtosis=3)

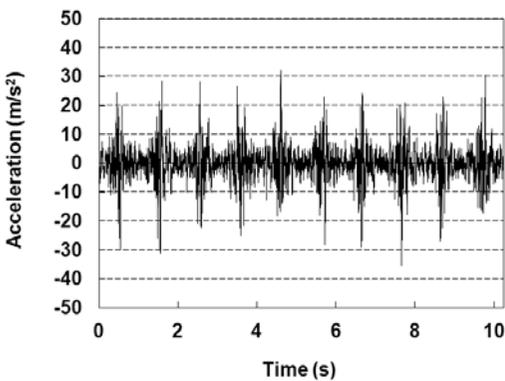


(a) Input vibration  
(Kurtosis=5.0, Acceleration RMS=5.8m/s<sup>2</sup>)

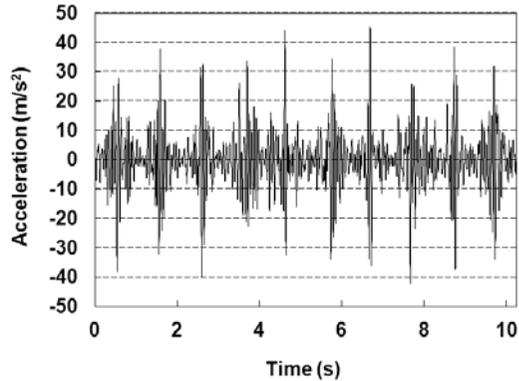


(b) Response vibration  
(Kurtosis=4.7, Acceleration RMS=9.5m/s<sup>2</sup>)

Fig.5 Time series of input & response vibration (Input kurtosis=5)



(a) Input vibration  
(Kurtosis=7.0, Acceleration RMS=5.8m/s<sup>2</sup>)



(b) Response vibration  
(Kurtosis=6.5, Acceleration RMS=9.5m/s<sup>2</sup>)

Fig.6 Time series of input & response vibration (Input kurtosis=7)

Table1 Comparison of acceleration RMS and kurtosis between input and response vibrations

Input vibration				Response vibration			
RMS (m/s <sup>2</sup> )		Kurtosis		RMS (m/s <sup>2</sup> )		Kurtosis	
Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
5.8	0.0	3.0	0.0	9.4	0.1	2.9	0.2
5.8	0.0	5.0	0.0	9.5	0.0	4.7	0.3
5.8	0.0	7.0	0.0	9.5	0.0	6.5	0.4

加速度の波形を比較すると、応答波形は入力波形と類似した形状をしており入力波形の影響を受けていることが見てとれる。

Table1 に、各尖度に対して得られた 10 種類の入力加速度および包装内容品の応答加速度から、RMS および尖度について平均値と標準偏差を算出した結果を示す。応答加速度の RMS をみると、入力加速度の尖度の違いにかかわらず、ほぼ同じ値になっており、入力加速度の非ガウス性の影響を受けていないことがわかる。一方、応答加速度の尖度は入力加速度の非ガウス性の影響を受けていることが、応答加速度の尖度の値から見てとれる。

Fig.7 に、包装内容品に蓄積する疲労を、入力加速度の尖度の違いによって比較した結果を示す。図のエラーバー（I 印）は 10 種類の数値計算結果における「平均±標準偏差」の範囲を表している。図を

みると、入力加速度の尖度が大きくなるほど、包装内容品に蓄積する疲労が大きくなっていることがわかる。その理由として、包装内容品は入力加速度の非ガウス性の影響を受けるため、入力加速度の尖度が大きくなるほど応答加速度の尖度も大きくなり、その結果、包装内容品に生じる高い加速度の発生頻度が増加することが考えられる。

以上のことから、包装内容品の蓄積疲労を RMS だけで評価するのは難しく、その確率密度分布も考慮する必要があることがわかる。また、本研究で設定した緩衝材の場合には、入力加速度の非ガウス性は応答加速度にも影響する。したがって、入力加速度がガウス分布に従わないことが明らかな場合には、ガウス型ランダム振動試験では過小評価になる恐れがあるため、非ガウス型ランダム振動試験を実施する必要があることが示唆される。

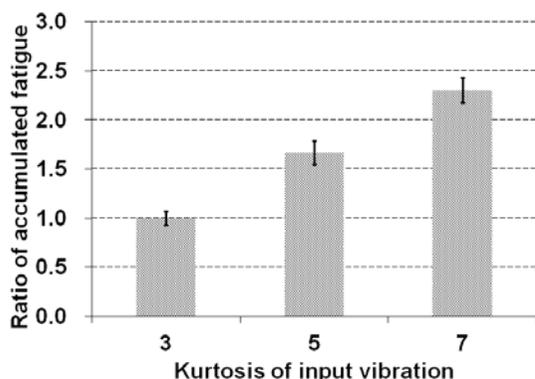


Fig.7 Relationship between kurtosis of input vibration and accumulated fatigue (Error bars indicate one standard deviation)

## 5. 結論

本研究では、非ガウス型ランダム振動が包装内容品に及ぼす影響を数値計算により検討した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 応答加速度の RMS は、入力加速度の尖度の違いによらず一定であり、入力加速度瞬時値の非ガウス性の影響を受けない。
- (2) 入力加速度の尖度の値が大きくなるほど、包装内容品に蓄積する疲労は大きくなる。
- (3) 加速度瞬時値の非ガウス性を考慮しないランダム振動試験では、現場再現という観点から過少評価となる恐れがある。

本論文では包装内容品に及ぼす影響を数

値計算により検討したが、実際の貨物を用いた実験による検証はされていない。今後、実際の貨物を用いた実験を行い、包装内容品に及ぼす影響を明らかにしていきたい。

## <参考文献>

- 1) 細山亮、中嶋隆勝、日本包装学会誌、19(2)、113-121(2010)
- 2) A. Steinwolf and WH. Connon III, Sound and Vibration, February, 12-17(2005)
- 3) V. Rouillard and M. A. Sek, Packaging Technology and Science, 23(8), 423-439(2010)
- 4) 細山亮、中嶋隆勝、日本包装学会誌、20(1)、27-34(2011)
- 5) 細山亮、斎藤勝彦、中嶋隆勝、日本包装学会誌、21(2)、107-114(2012)
- 6) 川口和晃、斎藤勝彦、日本航海学会論文集、116、255-260(2007)
- 7) 由木俊、日本包装技術協会別冊 No7、58-84(1988)
- 8) 松永敬二、日本包装技術協会別冊 No7、85-95(1988)
- 9) MapleSim User's Guide (MapleSim 4.5), Waterloo Maple Inc.
- 10) C. Zhong, K. Saito and K. Kawaguchi, Journal of Applied Packaging Research, 5(4), 197-214(2011)
- 11) C. Zhong, K. Saito and K. Kawaguchi, Packaging Technology

and Science, Published online:20

JUN 2012 DOI:10.1002/pts.1961

- 12) たとえば、日本材料学会編、“材料強度学”、日本材料学会、p.117(2001)
- 13) JIS E 4031:2008、鉄道車両用品—振動及び衝撃試験方法

(原稿受付 2012年7月25日)

(審査受理 2012年9月24日)

