

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 —実験による検討—

細山 亮*、斎藤 勝彦**、中嶋 隆勝*

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

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

これまでに筆者らは、従来の振動試験の精度向上を目指して、非ガウス型ランダム振動試験を提案してきた。振動台における振動波形を比較すると、提案法は従来法に比べて実輸送に近い波形を再現できるため、振動試験の精度向上が見込まれる。一方、実際の包装貨物では包装内容品の周囲に緩衝材が配置されることが多い。その場合、振動は緩衝材を通じて包装内容品に伝達するが、振動の非ガウス性が包装内容品に影響を及ぼすのかについて実験的な検討はされておらず、提案法と従来法では包装内容品の応答に違いが生じるのか明らかではない。そこで本研究では、ダミー包装品を振動台に載せ、実輸送、提案法および従来法により生成した加速度時刻歴データにより振動台を加振し、包装内容品の応答加速度を測定した。その結果、振動台の非ガウス性は包装内容品の応答にも影響を与え、振動台の尖度によって包装内容品の蓄積疲労が異なることが実験的に明らかになった。

We have proposed a new method for non-Gaussian random vibration testing to improve the currently used random vibration test. The comparison of waveforms on the vibration table shows that the proposed method is expected to ensure a more appropriate vibration test because it can generate vibrations closer to those produced during actual transportation when compared to the traditional method. On the other hand, the contents of a package are surrounded by cushioning material, and therefore, vibration is transmitted to the contents through cushioning material. However, the influence of the non-Gaussianity of the vibration table on the contents of a package has not been examined experimentally; thus, the difference in the response acceleration of the contents between the proposed and the traditional methods is not clear. In this paper, a dummy package on the vibration table is vibrated by actual transportation and using both the traditional and the proposed methods, and the response acceleration of the contents of a package is measured. The result shows that the non-Gaussianity of the acceleration of the vibration table influences the response acceleration of the contents of a package, and the accumulated fatigue of the contents changes depending on the kurtosis of the vibration table.

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
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. 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、現在、ランダム振動試験が一般的に行われている。しかし、その振動波形を実輸送時のものと比較すると、両者の波形には差異が見られることが多く、従来のランダム振動試験では、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^{1)~3)}。

これまでに筆者らは、実輸送時の振動特性を従来よりも精度よく再現するために、実輸送と振動試験における加速度瞬時値（任意の時刻における加速度の値）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⁴⁾（以下、提案法と呼ぶ）。また、包装内容品の振動疲労を定量的に評価するために作製したモデルに対して、実輸送、提案法および従来法による振動を与えることでモデルに蓄積する疲労を求め、提案法は従来法より精度の高い試験ができる可能性を示した⁵⁾。

上記のように、実験モデルに直接、振動が加わる場合には、提案法は従来よりも精度の高い試験を行うことができると推測される。しかし、実際の包装貨物は包装内容品の周囲に緩衝材が配置されることが多く、振動は緩衝材を通じて包装内容品に伝達する。そのため、提案法と従来法では包装内容品の応答加速度に違いが生じるのか明らかではなく、提案法である非ガウス型ランダム振動試験を行う意義が必ずしも明確ではなかった。

そこで既報⁶⁾では、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求めた。その結果、入力加速度の非ガウス性は緩衝材を通過しても消失することなく包装内容品に伝わり、その応答加速度に影響を及ぼすことが明らかとなった。しかし、実験による確認は行われておらず、検証が十分であるとは言えない。

本研究では、ダミー包装品を振動台に載せ、実輸送、提案法および従来法により生成した加速度時刻歴データにより振動台を加振し、包装内容品の応答加速度を測定する。応答加速度から包装内容品に蓄積する疲労を求め、非ガウス型ランダム振動が包装内容品に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

2. 非ガウス分布を表す統計量

非ガウス分布を定量化するために尖度（Kurtosis）および歪度（Skewness）と呼ばれる指標を用いる。尖度は分布の裾野の広がり、歪度は分布の非対称性の度合いを示し、それぞれ非ガウス分布の特徴を表す高次の統計量である。尖度 K 、歪度 S はそれぞれ以下の式で表すことができる⁷⁾。

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - m)^4)}{(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - m)^2))^2} \quad (1)$$

$$S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - m)^3)}{(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - m)^2))^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

ここで、 N はデータ数、 x_i は i 番目の加速度データ、 $\bar{m}$ は加速度の平均を表す。確率密度分布がガウス分布に従うとき、尖度および歪度の値はそれぞれ 3 および 0 となる。尖度の値が 3 より大きい場合、ガウス分布の場合と比べてより高い加速度が発生するようになる。また、歪度の値が 0 より大きい場合には、正の方向に高い加速度が発生するようになり、0 より小さい場合には負の方向に高い加速度が発生するようになる。

3. 実験

3.1 ダミー包装品

ダミー包装品として、Fig.1 のようにアクリル製ボックスの角に発泡ポリエチレン製コーナーパッド（旭化成ケミカルズ株式会社製

メフ®：30 倍発泡）を配置し、それらを段ボール箱で包装したものを作製した。本研究では、入力加速度の非ガウス性が緩衝材を通過しても消失することなく包装内容品に伝わるかどうかを実験で確認することを目的としているため、前報と同様、包装内容品を剛体とみなし、包装内容品の模型としてアクリル製ボックスを用いた。加速度センサはアクリル製ボックスの中央部に設置した。なお、実験で用いたアクリル製ボックスの質量は 11.4kg である。ここでは、落下高さが 60cm、製品許容加速度が 300 m/s^2 になる場合を想定して緩衝設計を行い、コーナーパッドの厚みが最小となるように寸法を設定した。Fig.2、Fig.3 および Fig.4 に、コーナーパッド、アクリル製ボックスおよび段ボール箱の寸法を記載した図

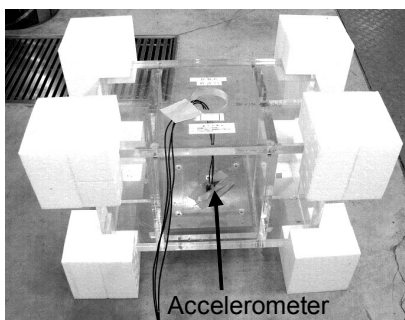


Fig.1 Arrangement of cushioning material

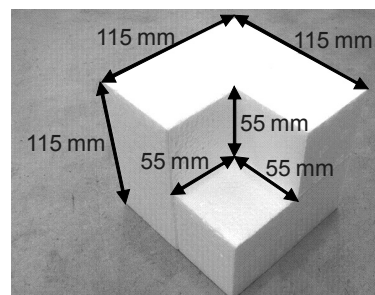


Fig.2 Dimension of cushioning material

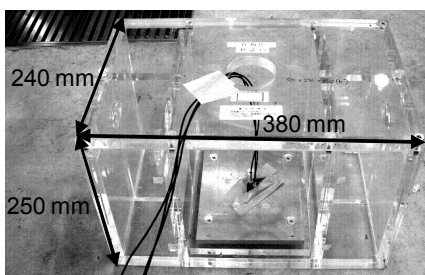


Fig.3 Dimension of acrylic box

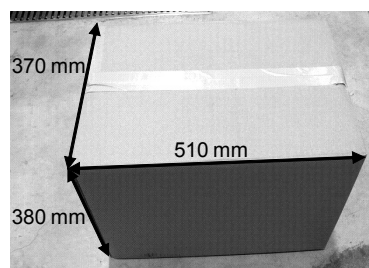


Fig.4 Dimension of corrugated box

をそれぞれ示す。

3.2 実験方法

本研究では既報⁵⁾で測定した実輸送データに基づいて実験を行う。一般に実輸送時の振動は6自由度の複合振動であり単軸方向のみではないが、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明らかにすることを目的としているため、その影響を明確に判断できる単軸振動で比較を行うことにする。実験の流れを以下に示す。まず台車を走行させたときに発生する加速度を、計測時間 600s、サンプリング周波数 1280Hz の条件で計測し、計測されたデータから鉛直成分を取り出す。Fig.5 に計測データから得られたパワースペクトル密度（以下、PSD と略す）を示す。ここでは、解析対象とする周波数範囲 3~300Hz について十分な精度が得られるように、サンプリング周波数を 1280Hz とし、1 フレーム当たりのデータ点数を 1024 点とした。また、計測時間は 600s (750 フレーム) とした。この実輸送データをもとに提案法および従来法により時刻歴データを生成する。

提案法および従来法では、一般に次式により時刻歴データが生成される⁸⁾。

$$x(t) = \sum_{k=1}^L A_k \cos(2\pi k \Delta f t + \phi_k) \quad (3)$$

$$A_k = \sqrt{2\Delta f S(k\Delta f)}$$

ここで、 L はデータ数、 A_k は k 次成分の振幅、 Δf は周波数分解能、 ϕ_k は k 次成分の位相、 S は PSD を表す。時刻歴データを生成するため

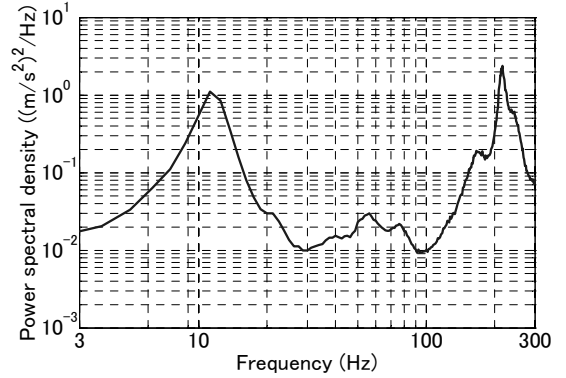


Fig.5 Acceleration PSD of 'actual transportation'

に与えるべきパラメータは PSD と位相であり、PSD については提案法および従来法ともに Fig.5 により設定される。一方、位相については両者では設定方法が異なり、従来法では位相は 0 から 2π までの値が一様乱数で与えられるのに対し、提案法では以下の式で与えられる。

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

ここで、 t_{gr} は群遅延時間を示す。いま、 t_{gr} が標準偏差 σ の正規分布に従う確率変数として与えられるとき、 σ 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。すなわち、 σ 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。

次に、実輸送データ、提案法および従来法により生成した時刻歴データを振動試験機に入力して振動台を加振する。ここでは実輸送に基づく振動台の加振を‘実輸送’と呼ぶ。

Fig.6 のように、包装品を振動台に固定した場合および固定しない場合に分けて加振し、それぞれの場合について、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、歪度および包装内容品に蓄積する疲労を求める。得られた結果から、振動台の非ガウス性が包装内容品の応答に与える影響を検討する。また、包装品の固定の有無による影響も検討する。なお、蓄積疲労は次式を用いて算出する。

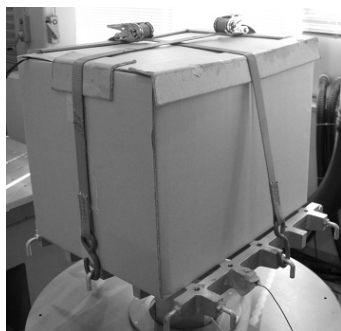
$$\beta = \sum nx^{\alpha} \quad (5)$$

ここで、 β は蓄積疲労、 x は加速度、 n は加速度の発生頻度、 α は加速係数を表す。加速係数 α は、JIS E 4031を参考に4と設定する⁹⁾。発生頻度 n と加速度 x の算出にはピークカウンタ法¹⁰⁾およびレンジペア法¹⁰⁾を用い、それぞれの方法で蓄積疲労を求める。蓄積疲労は、‘実輸送’の値を1として、提案法および従来法の値を算出する。

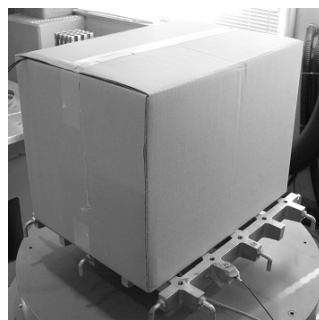
4. 結果と考察

Fig.7 および Fig.8 に包装品を振動台に固定した場合と固定しない場合について、‘実輸送’、提案法および従来法により振動台を加振したときに生じた、振動台および包装内容品

(アクリル製ボックス)の加速度をそれぞれ示す。Table1 に、Fig.7 および Fig.8 に示した加速度時刻歴データから、尖度、歪度およびRMSを求めた結果を示す。包装内容品に生じた加速度について Fig.7 と Fig.8 を比較すると、包装品を振動台に固定した場合の加速度波形はほぼ上下対称になっているのに対し、固定しない場合の加速度波形は上下非対称になっている。これは、振動台に固定されている包装品は振動台とともに動くのに対し、固定されていない包装品は、振動台の加速度が 9.8m/s^2 を超えたときに飛び跳ねが起こるためである。Table1 において、‘実輸送’、提案法および従来法から得られた包装内容品の尖度および歪度を、包装品の固定の有無で比較すると、尖度については包装品の固定の有無によらず、ほぼ同じ値となる。一方、包装内容品の歪度は包装品の固定の有無で値が異なり、固定した場合ほぼ0となるのに対し、固定しない場合0より大きい値となる。これは、包装品を固定しない場合は包装品の飛び跳ねが起こるためである。したがって、包装品の

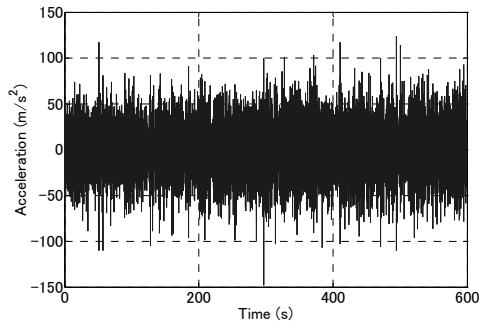


(a) A package fastened to the vibration table with a lashing belt

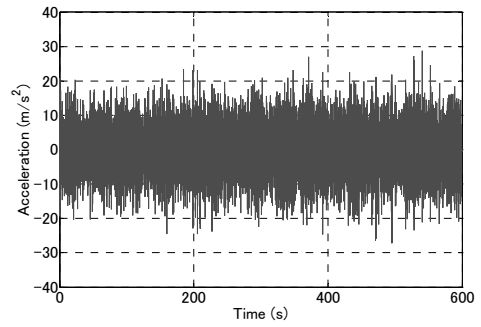


(b) A package unfastened to the vibration table

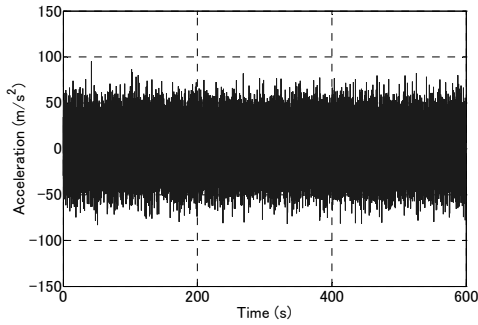
Fig.6 Vibration experiment



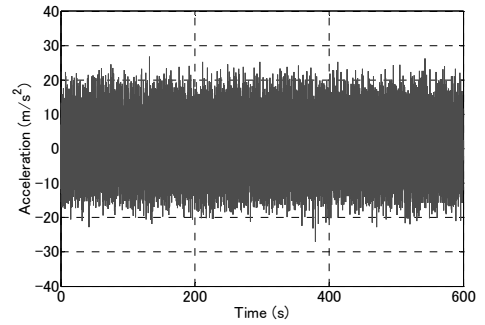
(a) Vibration table
(‘Actual transportation’)



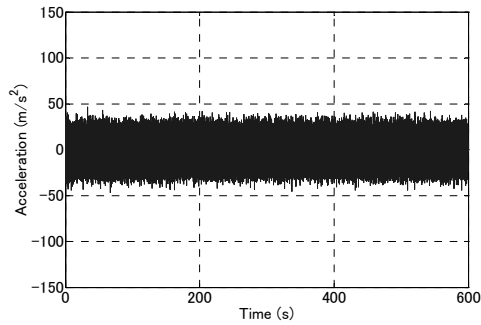
(b) Acrylic box
(‘Actual transportation’)



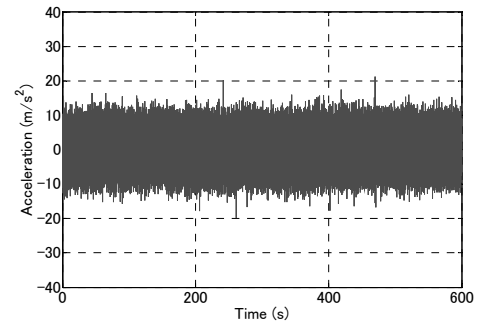
(c) Vibration table
(Proposed method)



(d) Acrylic box
(Proposed method)

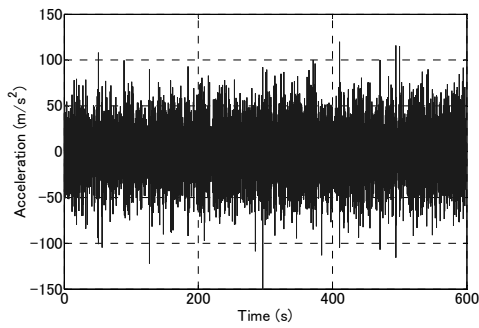


(e) Vibration table
(Traditional method)

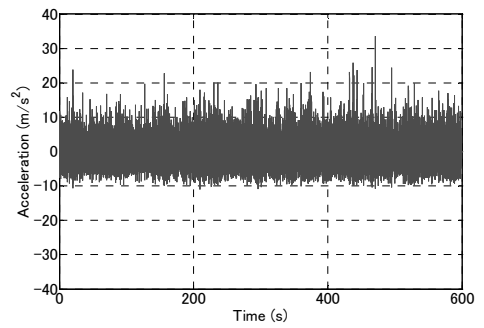


(f) Acrylic box
(Traditional method)

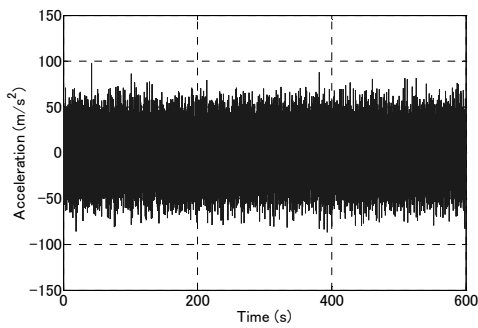
Fig.7 Acceleration time series of a vibration table and an acrylic box generated by ‘actual transportation’, the proposed method and the traditional method
(A package fastened to the vibration table with a lashing belt)



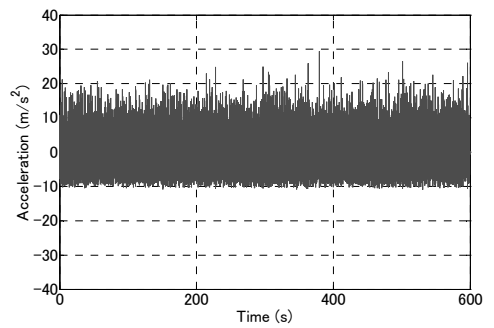
(a) Vibration table
(‘Actual transportation’)



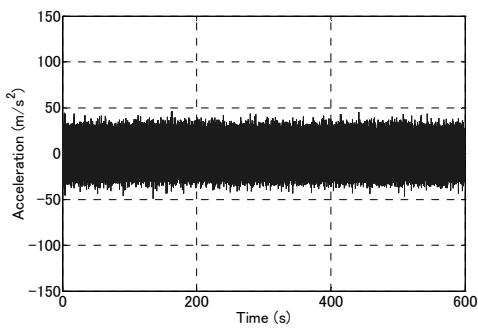
(b) Acrylic box
(‘Actual transportation’)



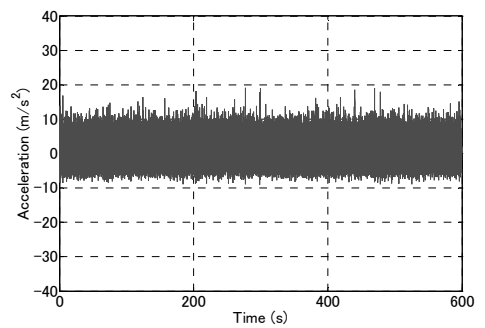
(c) Vibration table
(Proposed method)



(d) Acrylic box
(Proposed method)



(e) Vibration table
(Traditional method)



(f) Acrylic box
(Traditional method)

Fig.8 Acceleration time series of a vibration table and an acrylic box generated by ‘actual transportation’, the proposed method and the traditional method
(A package unfastened to the vibration table)

Table1 Comparison of kurtosis, skewness and RMS between acceleration time series of a vibration table and an acrylic box generated by ‘actual transportation’, the proposed method and the traditional method

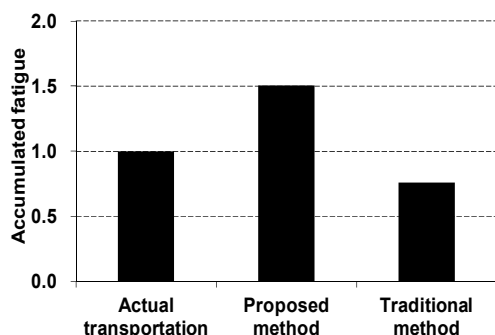
Input acceleration	Vibration table			Acrylic box		
	Kurtosis	Skewness	RMS (m/s ²)	Kurtosis	Skewness	RMS (m/s ²)
‘Actual transportation’ (With a lashing belt)	9.0	0.0	10.1	4.5	−0.1	3.9
Proposed method (With a lashing belt)	8.5	0.0	10.1	6.2	0.1	3.9
Traditional method (With a lashing belt)	3.0	0.0	10.2	2.9	0.0	4.0
‘Actual transportation’ (Without a lashing belt)	9.0	0.0	10.1	4.3	0.4	3.2
Proposed method (Without a lashing belt)	8.5	0.0	10.1	6.2	0.6	3.3
Traditional method (Without a lashing belt)	3.0	0.0	10.1	2.9	0.2	3.3

固定の有無は、尖度にはほとんど影響を与えないのに対し、歪度には影響を与えることがわかる。

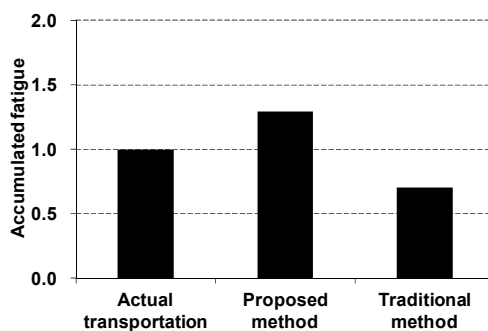
次に、振動台の尖度が包装内容品の加速度に与える影響について検討する。Table1において包装内容品の RMS をみると、包装品の固定の有無で値が異なるものの、包装品を固定した場合および固定しない場合ともに、振動台の尖度にかかわらずほぼ同じ値になっており、包装内容品の RMS は振動台の尖度の影響を受けていないことが見てとれる。一方、振動台と包装内容品の尖度をみると、振動台の尖度が 3 のとき包装内容品の尖度はほぼ 3 になるのに対し、振動台の尖度が 3 以外のとき包装内容品の尖度は 3 以外の値となり、包装内容品は振動台の尖度の影響を受けること

がわかる。また、実輸送と提案方法では、振動台の尖度はほぼ同じ値であるにもかかわらず、包装内容品の尖度は異なる値となっているが、これは、同じ尖度を有する振動でも非ガウス性の伝達のしやすさは異なり、包装内容品に非ガウス性を伝達しやすい振動と伝達しにくい振動があることを示唆している。

Fig.9 に包装品を振動台に固定した場合および Fig.10 に固定しない場合について、Fig.7 および Fig.8 の包装内容品の加速度時刻歴データから、ピークカウント法¹⁰⁾およびレンジ法¹⁰⁾により蓄積疲労を算出した結果をそれぞれ示す。Fig.9 および Fig.10 の両図から、提案法で蓄積する疲労は実輸送より大きくなるのに対し、従来法のそれは実輸送より小さくな

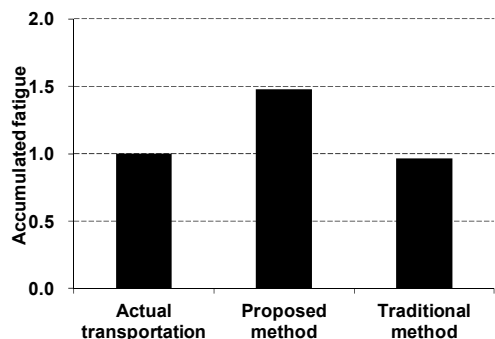


(a) The accumulated fatigue obtained by the peak method

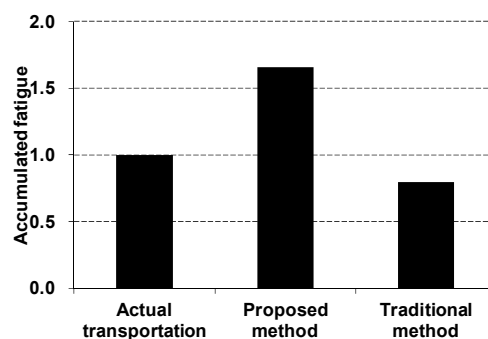


(b) The accumulated fatigue obtained by the range method

Fig.9 Comparison of the accumulated fatigue among 'actual transportation', the proposed and the traditional methods in the case that a package is fastened to the vibration table with a lashing belt



(a) The accumulated fatigue obtained by the peak method



(b) The accumulated fatigue obtained by the range method

Fig.10 Comparison of the accumulated fatigue among 'actual transportation', the proposed and the traditional methods in the case that a package is unfastened to the vibration table

るのが見てとれる。すなわち、提案法は蓄積疲労を安全側に評価し、従来法は危険側に評価しているのがわかる。これは、Table1 からわかるように、提案法によって得られた包装内容品の尖度が実輸送に比べて大きく、また従来法によって得られた尖度が実輸送に比べて小さくなるためである。すなわち、尖度の値が大きくなるにつれ蓄積疲労も大きくなる傾向にあるため、結果として、包装内容品の

尖度が大きくなる提案法が実輸送よりも大きい疲労を与え、包装内容品の尖度が小さくなる従来法が実輸送よりも小さい疲労を与えている。したがって、従来の振動試験では、実輸送で加わる疲労を過小評価する恐れがあるため、安全側に評価するためには、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わかる。

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実験により検討した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 包装品の固定の有無は、包装内容品の尖度にはほとんど影響を与えないが、歪度には影響を与える。
- (2) 包装内容品の加速度は、振動台の非ガウス性の影響を受ける。
- (3) 従来の振動試験では、実輸送で加わる疲労を過小評価する恐れがあるため、安全側に評価するためには、非ガウス型ランダム振動試験を実施する必要がある。

なお、本研究では、提案法と従来法における、包装コストと貨物事故の発生による損害コストのトレードオフの関係については言及していない。また、包装内容品において提案法と実輸送の尖度に差が生じている原因、および従来法の尖度は振動台と包装内容品でほぼ同じ値となる原因についても言及していない。今後の課題として、これらのことを明らかにしていくことが求められる。

- 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) 細山亮、斎藤勝彦、中嶋隆勝、日本包装学会誌、21(6)、471-478(2012)
- 7) A. Steinwolf, Sound and Vibration, September, 12-21(2006)
- 8) A. Steinwolf, Probabilistic Engineering Mechanics, 14, 289-299(1999)
- 9) JIS E 4031:2008、鉄道車両用品—振動及び衝撃試験方法
- 10) 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)

(原稿受付 2013 年 2 月 7 日)

(審査受理 2013 年 5 月 27 日)

<引用文献>

- 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)