

非ガウス型ランダム振動試験の 有効性に関する実験的検証

細山 亮*、斎藤 勝彦**、中嶋 隆勝*

Experimental Verification on the Effectiveness of Non-Gaussian Random Vibration Test

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

振動試験は、包装された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る。しかし、振動試験を実施したにもかかわらず、実際に輸送すると内容品に想定された以上の損傷が見られる場合があるため、振動試験の高精度化が求められている。これまでに我々は、振動試験の高精度化を目指して非ガウス型ランダム振動生成法を提案してきた。提案法では、実輸送に近い振動を再現できるため試験精度向上が見込まれるが、その有効性が十分に検証されているとは言えない。本研究では、提案法の有効性を検証するために、実輸送、従来のランダム振動試験および提案している非ガウス型ランダム振動試験において評価モデルに与える疲労の比較実験を行った。その結果、非ガウス型ランダム振動試験は従来のランダム振動試験に比べて実輸送に近い疲労が得られることが示された。

Vibration test is carried out to confirm safety of packages in advance. However, in spite of carrying out vibration test, it often happens that products are damaged. Therefore, it is required to improve test accuracy. We have ever proposed the method of generating non-Gaussian random vibration for the purpose of improving test accuracy, but the effectiveness of the method is not sufficiently verified. In this paper, we verify the effectiveness of the proposed method through comparison with fatigues caused by the real transportation, the proposed vibration test, and the traditional vibration test. The result shows that non-Gaussian random vibration test is more accurate than the traditional vibration test.

キーワード：包装、輸送、振動試験、非ガウス分布、尖度

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

*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

振動試験は、包装された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る。しかし、振動試験を実施し包装内容品に問題がないことを確認したにもかかわらず、実際に輸送すると内容品に想定された以上の損傷が見られる場合があるため、振動試験の高精度化が求められている。

これまでに我々は、実輸送と振動試験の蓄積疲労を比較し、両者で振動特性が異なるため蓄積疲労に違いが生じることを示した¹⁾。また、現状の振動試験で発生する加速度瞬時値の出現確率はガウス分布に従うが、実輸送では非ガウス分布に従う場合があることを明らかにした¹⁾。さらに、実輸送と振動試験における確率密度分布の違いに着目し、実輸送時の振動特性をより忠実に再現するために、非ガウス型ランダム振動生成法を提案してきた²⁾（以下、提案法と呼ぶ）。この非ガウス型ランダム振動試験は実輸送に近い振動を再現できるため、振動試験の精度向上が見込まれる。しかし、非ガウス型ランダム振動試験の有効性が実験的に検証されたことはなく、試験精度の向上が十分に検証されているとは言い難い。

そこで本研究では、包装内容品の振動疲労を定量的に評価するための実験モデルを作製し、そのモデルを用いて非ガウス型ランダム振動試験の有効性を実験的に検証する。具体的には、実輸送、従来法および提案法が実験モデルに対して与える疲労を比較し、非ガウ

ス型ランダム振動試験の試験精度について検証を行う。

2. 振動疲労評価実験モデル

振動による包装内容品の壊れやすさは一般に蓄積疲労損傷³⁾の概念でとらえられる。この概念にもとづき包装内容品の損傷を実験モデルで一般化するために、Shires⁴⁾はボルトとナットを用いたモデルを提案している。本研究ではこの報告にもとづきボルトとナットを用いたモデルを作製した。

Fig.1 に作製した実験モデルを示す。このモデルでは、上下の鉄板に M16 のボルトがネジ止めされ、そのボルトにナットがフリーの状態を通してある。そのため、土台の鉄板に振動が加わると、ナットが上下に振動し回転が生じるようになっている。ここでは、Fig.1 において左端のナットをナット A、中央をナット B、右端をナット C とする。

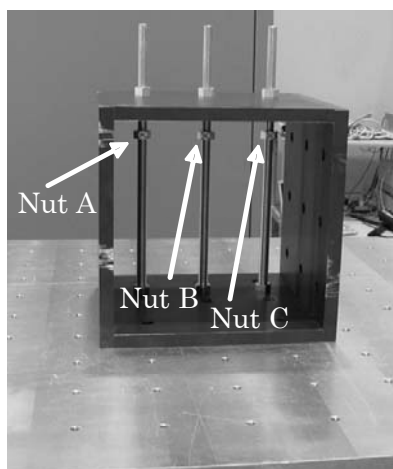


Fig.1 Experimental model for evaluating vibration fatigues

3. 非ガウス型ランダム振動試験の有効性

3.1 実験方法

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。しかし、本研究では非ガウス型ランダム振動試験の有効性を検証することを目的としているため、従来法と提案法の確率密度分布の違いがナットの回転数に及ぼす影響を明確に判断できる単軸振動で比較する。

まず、Fig.2に示すような台車を通常の歩行速度で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。なお、このとき走行した路面はカラーアスファルト舗装されたものである。この鉛直成分データを振動試験機に入力して振動させることを‘実輸送’と呼ぶ。

次に、台車の計測データをもとに従来法で振動を再現する。従来法では、一般に次式によって振動が生成される⁵⁾。

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

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

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、 $S(k\Delta f)$ はパワースペクトル密度(以下、PSDと略す)を表す。ここで、与えるべきパラメータは、PSDと位相である。PSDについては台車の計測データから算出され、位相については振動試験機の制御システムで、0から 2π までの値が一様乱数で与えられる。

最後に、台車の計測データをもとに提案法で振動を再現する。提案法においても、式(1)によって振動が生成され、PSDは台車の計測データから算出される。また、提案法では尖度(非ガウス性を表す統計量)も考慮しているため、位相の与え方が従来法と異なり、以下の式により与えられる²⁾。

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

ここで、 t_{gr} は群遅延時間と呼ばれる値である。いま、群遅延時間 t_{gr} が正規分布に従う乱数(以下、正規乱数と呼ぶ)で与えられるとき、正規分布の標準偏差を制御することで、非ガウス型ランダム振動が得られることが知られている⁶⁾。本研究では、これまでに著者が調べてきた尖度と標準偏差の関係²⁾を用いて、台車の計測データから算出した尖度に対応する標準偏差を求め、式(2)により位相を与える。

このように、‘実輸送’、従来法および提案法による振動を、試験機により実験モデルに



Fig.2 Cart experiment

与えナットの回転数を測定し比較する。また、実験結果の再現性を確認するために同じ条件で実験を5回行い、得られる結果に再現性があるかどうか検討する。なお実験は、ナットが滑らかに回転し安定した回転数が得られることを確認した後に開始し、ナットの回転数の測定については、1回転未満のものは0回転とみなした。

3.2 実験モデルの特性

ここでは振動実験を行い、作製したモデルの疲労特性（ナットが1回転するのに要する振動回数と加速度の関係）を調べた。いま、台車走行実験で測定した加速度データの周波数特性を求めると、216.25Hzの振動成分が最も高い値となったため、この周波数でモデルの疲労特性を求めることにする。

Table1 にモデルに与えた振動条件を示す。この振動条件に対して、最大 15000 回の振動を与えナットの回転数を測定した。また、ナットの回転が1回転未満のものは0回転とみなした。

Fig.3 にナットが1回転するのに要する振動回数と加速度の関係を示す。本実験では、ナットの移動方向は全て下向きであった。図より、加速度が低くなるほどナットが1回転するのに要する振動回数が増加する傾向にあることがわかる。ここで、“ナットが1回転する”

ことを“製品が破損する”こととみなすと、加速度が低くなるほど製品破損までの振動回数が増加する右肩下がりのグラフとなり、金属や樹脂などの包装内容品の疲労特性とよく一致する。

3.3 結果と考察

Fig.4 に‘実輸送’により加振させたときの、振動台の加速度時刻歴データとその PSD および加速度瞬時値の確率密度分布を示す。また Fig.5 および Fig.6 に、従来法および提案法により加振させたときの、振動台の加速度時刻歴データとその PSD および加速度瞬時値の確率密度分布を示す。なお、ここでは1回目の実験結果を示している。

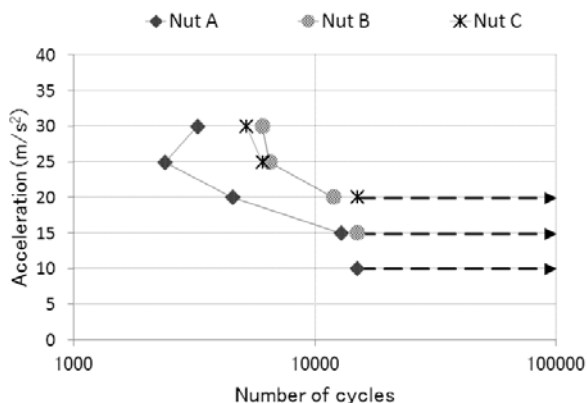
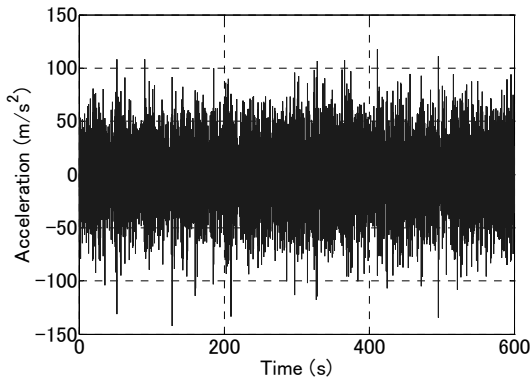


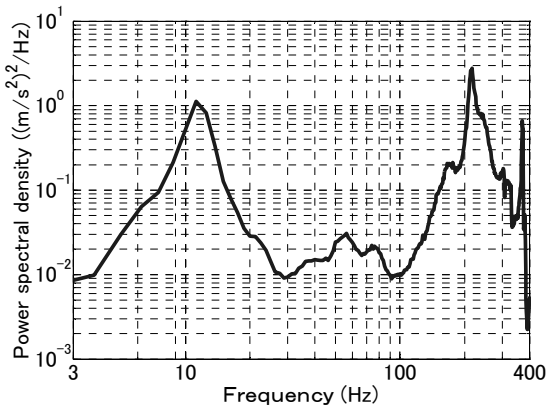
Fig.3 Relationship between acceleration and number of cycles taken for one rotation (Vibration frequency: 216.25Hz)

Table1 Vibration condition given to the experimental model

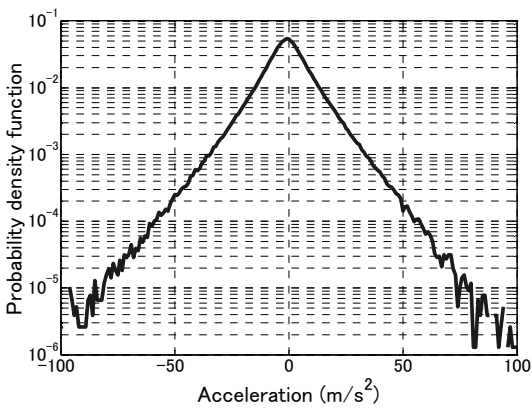
Frequency (Hz)	216.25
Acceleration (m/s ²)	30, 25, 20, 15, 10, 5
Vibration direction	Vertical



(a) Acceleration time history

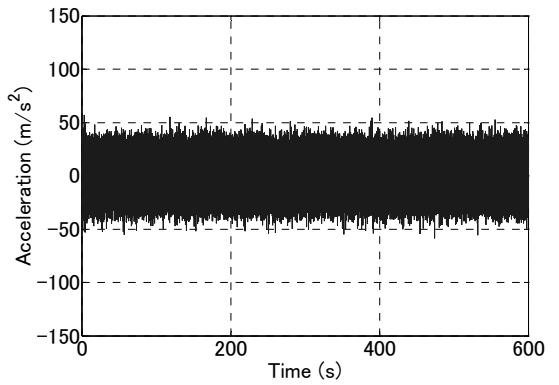


(b) Power spectral density

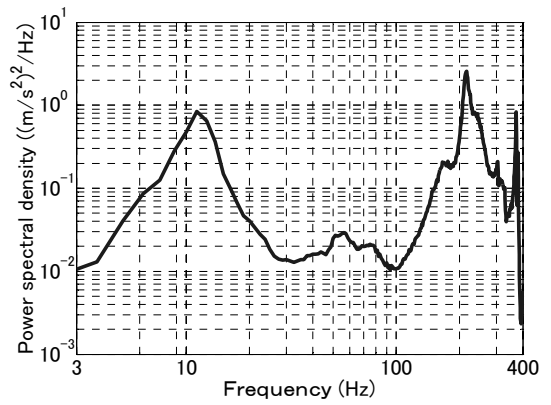


(c) Probability density function

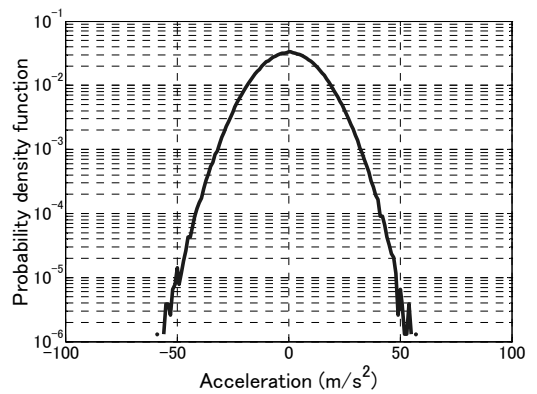
Fig.4 'Real condition'



(a) Acceleration time history

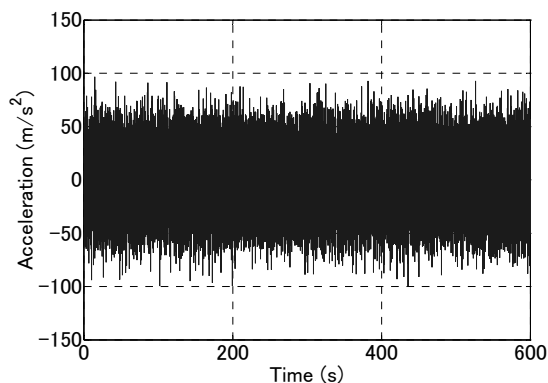


(b) Power spectral density

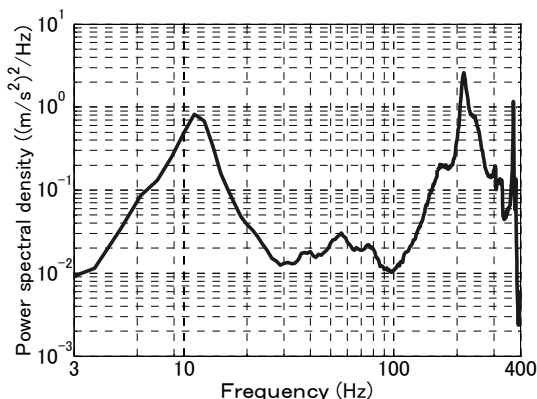


(c) Probability density function

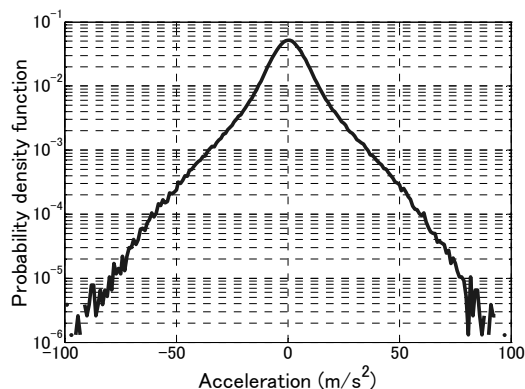
Fig.5 Traditional method



(a) Acceleration time history



(b) Power spectral density



(c) Probability density function

Fig.6 Proposed method

Table2 Comparison of RMS and kurtosis

	RMS (m/s ²)	Kurtosis
'Real condition'	11.9	7.5
Traditional method	12.2	3.0
Proposed method	12.0	7.7

Fig.4(a)と Fig.5(a)を比較すると、従来法で再現した加速度波形は、'実輸送'と違いがあることがわかる。一方、Fig.4(a)と Fig.6(a)を比較すると、提案法では発生する加速度範囲が従来法より広く、'実輸送'に近い波形が再

現できていることが見てとれる。

次に、Fig.4(b)、Fig.5(b)および Fig.6(b)を比較すると、従来法、提案法ともに'実輸送'に近い PSD が得られている。一方、Fig.4(c)、Fig.5(c)および Fig.6(c)を比較すると、従来法で

は‘実輸送’の確率密度分布を再現できていないが、提案法では‘実輸送’に近い確率密度分布を精度良く再現できている。これは、提案法では PSD だけでなく尖度も制御対象としているので、‘実輸送’の非ガウス性を考慮することができるためである。

Table2 に、‘実輸送’、従来法および提案法について、加速度の RMS(Root Mean Square) と尖度を比較した結果を示す。提案法では‘実輸送’の尖度に近い値が得られており、目標の尖度を有するランダム振動が生成できていると言える。

Fig.7 に、実験モデルに対して、‘実輸送’、従来法および提案法により振動を与え、ナットに生じた回転数を比較した結果を示す。本研究では同じ実験を 5 回繰り返し行ったため、図には 5 回の平均回転数を掲載している。また、図のエラーバーは 5 回の実験結果における「平均±標準偏差」の範囲を表している。図を見ると、ナット A、ナット B およびナット C は、それぞれ生じる回転数が異なるものの、どのナットにおいても提案法は従来法に比べて‘実輸送’に近い値が得られていることが見てとれる。

現状の振動試験では PSD のみを制御対象とし、ランダム振動はガウス分布に従うものとして扱ってきた。しかし、実際に生じるすべての振動がガウス分布に従うとは限らない。また、本実験結果を見ると、PSD が等しくても確率密度分布が異なれば、蓄積する疲労に違いが生じることが推測される。提案法では、PSD だけでなく尖度も制御対象としているた

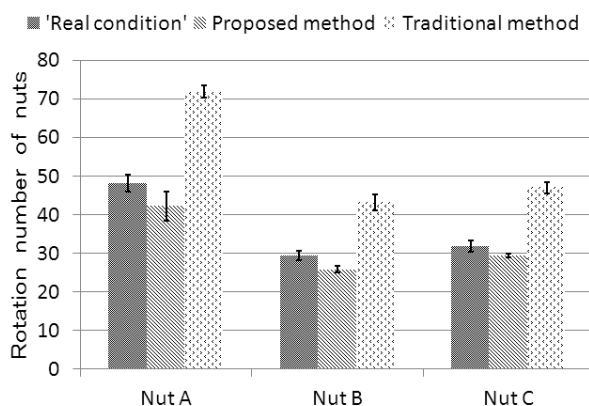


Fig.7 Comparison of rotation numbers
(Error bars indicate one standard deviation)

め、ガウス分布以外の確率密度分布も再現できる。そのため、提案法である非ガウス型ランダム振動試験を行うことで振動試験の試験精度が向上するものと考えられる。

4. 結論

本研究では、非ガウス型ランダム振動試験の有効性について検証を行った。以下に得られた結果を示す。

- (1) ボルトとナットを用いた振動疲労評価実験モデルを作製し、非ガウス型ランダム振動試験の試験精度について検証実験を行った。その結果、提案法は従来法に比べ実輸送に近い疲労を与えることがわかった。
- (2) 実験結果の再現性を確認するために、同じ条件で実験を 5 回繰り返し行った。その結果、どのナットにおいても提案法は従来法に比べ実輸送に近い値が

得られることが確認された。

- (3) 非ガウス型ランダム振動試験は、現状のランダム振動試験と比べて試験精度向上が見込まれることが実験的に示唆された。

<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) 細山亮、中嶋隆勝、日本包装学会誌、20(1)、27-34(2011)
- 3) たとえば、日本材料学会編、”機械材料学”、日本材料学会、p.118(2000)
- 4) David Shires: Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging, 2010
- 5) A.Steinwolf, Probabilistic Engineering Mechanics, 14, 289-299 (1999)
- 6) 和泉正哲、勝倉裕、日本建築学会論文報告集、第 327 号、20-27(1983)

(原稿受付 2011 年 12 月 2 日)

(審査受理 2012 年 2 月 6 日)