

振動試験における群遅延時間を用いた 非ガウス型ランダム振動生成法

Method of Generating Non-Gaussian Random Vibration Using Group Delay Time for Vibration Test

細山 亮* 中嶋 隆勝*
Akira Hosoyama Takamasa Nakajima

(2011年6月21日 受理)

Vibration test systems in use today generate Gaussian acceleration time histories using road data PSD (Traditional method). Nevertheless, it often happens that field-measured vibrations have non-Gaussian time histories. Consequently, a difference exists between the acceleration time history of road data and that generated using the traditional method. Therefore, the accuracy of current vibration test systems is not sufficiently high. For this research, we proposed and evaluated a method of generating non-Gaussian random vibration based on an earthquake vibration generation method. We demonstrated the validity of the proposed method through comparison with acceleration time histories obtained from road data, the proposed method, and the traditional method. The proposed method is expected to eliminate damage during transport and to reduce excessive packaging.

Key Words: packaging, transport, vibration test, acceleration, non-gaussian distribution, kurtosis

1. はじめに

包装貨物振動試験は、包装貨物の安全性を事前に確認するための試験である。この振動試験は、振動試験機の性能向上とともに、正弦波一定振動試験、正弦波掃引振動試験、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、振動波形を実輸送時の波形と比較すると、両者の波形には差異が見られることが多い。すなわち、ランダム振動試験で発生する加速度はガウス分布に従うのに対し、実輸送時に発生する加速度は非ガウス分布になる場合がある¹⁾ため、両者の波形には違いが生じている。

このような違いに着目し、実輸送時の振動をより精度良く振動試験で再現することを目的として、非ガウス型ランダム振動を生成するための研究がこれまで行われてきた。Rouillard²⁾は、様々な加速度実効値と継続時間を持つガウス型ランダム振動をつなぎ合

わせることで非ガウス型ランダム振動を生成している。Smallwood³⁾は、非ガウス性を表す指標である尖度と歪度を用いて非ガウス分布を定量化し、目標の尖度と歪度を持つ非ガウス型ランダム振動を得るためにZMNL(Zero-memory nonlinear)関数を用いてガウス型ランダム振動を非ガウス型に変換している。また、Steinwolf⁴⁾は、ランダム振動を生成するときに設定する位相に着目し、生成した振動が目標の尖度と歪度を持つような位相を探索する方法を提案している。このように、非ガウス型ランダム振動を生成する方法がいくつか提案され、振動試験の精度向上に大きく寄与してきた。

しかしこれらの方法には、(1)生成した振動の確率密度分布が目標の確率密度分布と合致しない場合がある、(2)ガウス型から非ガウス型へランダム振動を変換する処理の前後でパワースペクトル密度(以下、PSDと略す)が変化する、(3)データ処理に時間がかかる、という問題があり、決定的な方法は未だ確立されていないのが現状である。

* 情報電子部 信頼性・生活科学系

そこで本研究では、上記の問題点を改善した新しい振動生成法を提案する。具体的には、設定値通りの尖度を持つ振動が生成可能であり、PSDが原理的に変化せず、そして、短時間で振動が生成できる方法を示す。さらに、提案した方法により、実測振動のPSDに基づいて非ガウス型ランダム振動を生成し、提案法と実測振動の確率密度分布について再現性の検証を行う。

2. 非ガウス型ランダム振動生成法

2.1 非ガウス分布の定量化

本研究では、尖度を用いて非ガウス分布の定量化を行う。尖度は次式によって求めることができる⁵⁾。

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

ここで、 N はデータ数、 x_i は加速度、 m は加速度の平均値を表す。加速度がガウス分布に従うときに尖度の値は3となり、ガウス分布に従わないときは3以外の値となる。また、尖度の値が3より大きい値を持つとき、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。

2.2 従来のランダム振動生成法

ランダム振動の時刻歴データは、次式により生成される⁵⁾。

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

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

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PSDを表す。ここで、与えなければならないパラメータは、PSDと位相である。いま、各種試験規格^{6,7)}を見ると、ランダム振動試験の試験条件としてPSDが一般的に与えられている。しかし、もうひとつのパラメータである位相に関する情報については記述されていない。そのため、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ている。そして、発生する加速度は常にガウス分布となっている。

2.3 地震動再現手法

これまで、地震動を再現する方法の一つとして、位相に着目した研究が行われてきた⁸⁾。その中で、位相を周波数で微分したものである群遅延時間が振動波

形の包絡形状と密接な関係にあることが示されている⁹⁾。いま、群遅延時間が $N(m, \sigma^2)$ (平均値 m 、標準偏差 σ の正規分布)に従うとすると、生成される振動の包絡形状は、 m と σ の2つのパラメータによって決定される。

このうち、標準偏差は時刻歴波形の広がりを示すパラメータである。標準偏差の値が大きいとき波形の包絡形状はなだらかな山型を示し、標準偏差の値が小さいときは尖った山型を示す。すなわち、標準偏差の値が小さくなるほど、高い加速度が発生するようになる。標準偏差と振動波形には上記の関係があるため、標準偏差を変化させることによって、発生加速度の確率密度分布を変えることができ、尖度を制御することが可能となる。

もう一つのパラメータである平均値は、振動波形が尖った山型の包絡形状を持つとき、山形の頂点における時刻位置、すなわち最大加速度が発生するときの時刻位置を示す。そのため、平均値を変えることによって、最大加速度が生じる時間を変化させることができるが、波形の包絡形状には影響を与えないため尖度にはほとんど影響しない。従って、尖度を制御するためには、標準偏差のみをパラメータとして変化させればよいことがわかる。

いま、群遅延時間を t_{gr} 、振動数を f 、位相を ϕ とおくと、群遅延時間は次式で表される⁹⁾。

$$t_{gr}(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df} \quad (3)$$

ここで、式(3)を離散化すると次式のように表すことができる。

$$t_{gr}(k\Delta f) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\Delta f} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\phi$ は位相差を表すため、

$$\Delta\phi = \phi_k - \phi_{k-1} \quad (5)$$

と書け、上式を式(4)に代入し整理すると、 k 次成分の位相は以下ようになる。

$$\phi_k = \phi_{k-1} + t_{gr}(k\Delta f) 2\pi \Delta f \quad (6)$$

従来のランダム振動生成法では、位相を単に0から 2π までの一様乱数で与えていたが、地震動再現手法では式(6)によって位相を与える。このように、両者の違いは、位相の設定方法のみとなるため、原理的にPSDに歪みが生じることはない。また、従来法と地震動再現手法は、時刻歴データを生成する速度も従来法

と同程度である。なお、式 (6) における初期位相 ϕ_0 は 0 から 2π までの一様乱数で与えられる。

2.4 群遅延時間を用いた非ガウス型ランダム振動生成法

このように群遅延時間が正規乱数で与えられるとき、そ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生成できることを示した。しかし、目標の尖度を持つランダム振動を生成するためには、尖度とその制御パラメータである標準偏差の関係が必要となる。そこで本節では、目標の尖度を持つランダム振動を生成することを目的として、尖度と標準偏差の関係について調べた。

ここでは、標準偏差の値を 110 から 400 まで変化させ、それぞれの標準偏差に対してランダム振動を生成し尖度を求めた。Fig. 1 に振動を生成する際に用いた PSD を示す。また、1 フレームあたりのデータ数は 1024 点とし、波形を制御するもう一つのパラメータである平均値については、フレームの中央に波形の最大値が来るように 512 と設定した。尖度の値を求めるとき、データ点数が少ないとばらつきが非常に大き

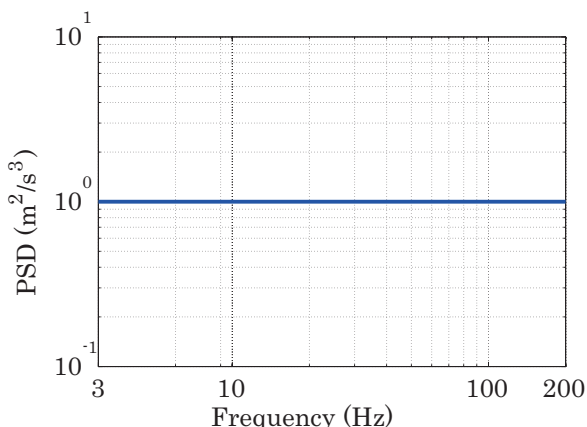


Fig. 1 Flat PSD in the frequency range 3-200 Hz.

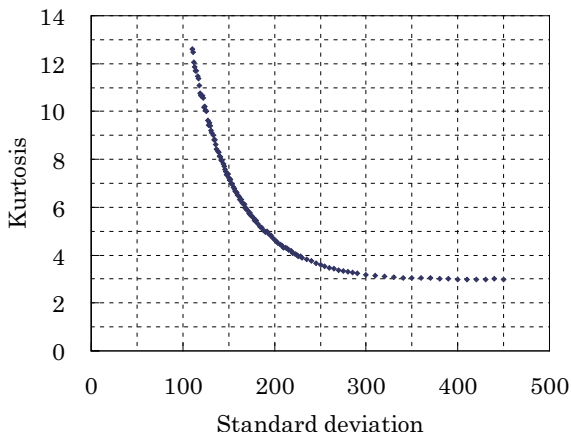


Fig. 2 Relationship between kurtosis and standard deviation.

いものとなる。そこで、十分な長さのデータ数として、100 フレーム分のデータ数 102400 点を用いて尖度を計算した。そして、この操作を 10 回繰り返して得られた尖度のデータ 10 個に対して平均値を求め、最終的な尖度の値とした。

Fig. 2 に尖度と標準偏差の関係を示す。この関係図を用いることで、目標の尖度を得るために設定すべき標準偏差の値を求めることができる。目標の尖度を持つ非ガウス型ランダム振動を生成するための具体的な手順は以下の通りである。

- (A) 実測データから PSD と尖度を求める。
- (B) Fig.2 から、(A) で求めた尖度に対応する標準偏差を求める。
- (C) (B) で求めた標準偏差を用いて正規乱数を生成する。
- (D) 正規乱数を式 (6) の群遅延時間に代入し、位相の設定を行う。
- (E) (A) で求めた PSD と (D) で求めた位相を式 (2) に代入し、時刻歴データを生成する。

3. 確率密度分布の比較による有効性の検証

3.1 実験

ここでは、実際の輸送振動から求めた PSD に基づいて、従来法と提案法により時刻歴データを生成し、提案法の有効性について検証を行った。

まず、実際の輸送振動として、台車走行時の加速度を計測した。加速度センサを、Fig. 3 に示すように台車の荷台中央部に設置し、鉛直方向の加速度を計測した。また、計測時間を 80 sec、サンプリング時間を 0.5 msec と設定し、合計 160000 点の時刻歴データを採取した。

次に、台車振動から得られた PSD を用いて、提案

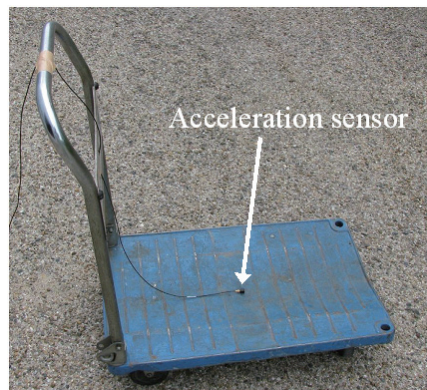


Fig. 3 Position of acceleration sensor.

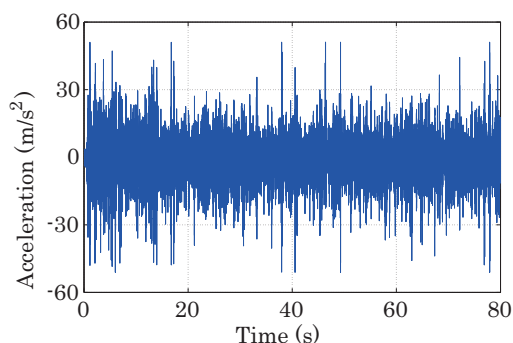


Fig. 4 Acceleration time history of cart vibration.

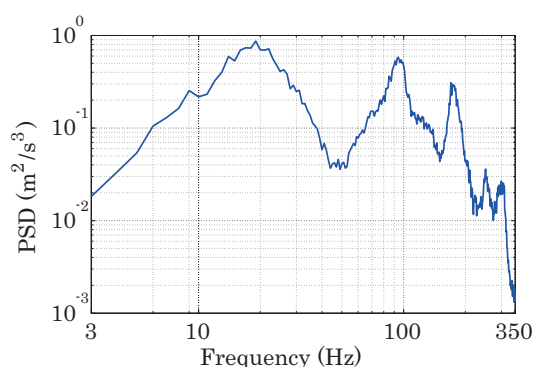


Fig. 5 PSD of cart vibration.

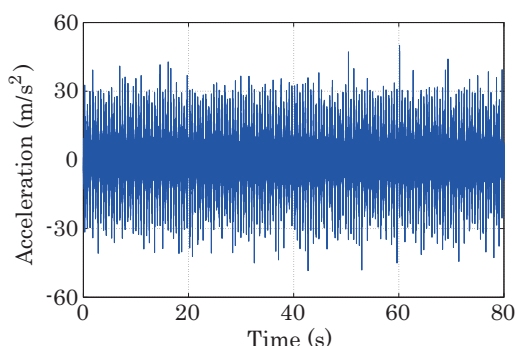


Fig. 6 Acceleration time history of non-gaussian simulation by proposed method.

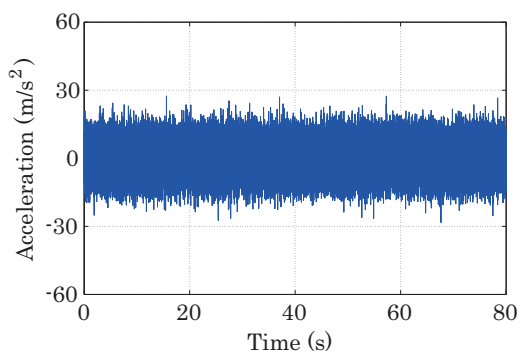


Fig. 7 Acceleration time history of gaussian simulation by traditional method.

法と従来法により時刻歴データを生成した。提案法では、台車加速度の尖度を考慮するため、台車振動のPSDに基づき2.4節と同様の方法で尖度と標準偏差の関係を調べ、台車の尖度に対応する標準偏差の値を読み取り、標準偏差の値を設定した。

3.2 結果と考察

Fig. 4に台車の時刻歴データを、Fig. 5に計測データから求めたPSDを示す。また、Fig. 4の計測データから尖度を求めると尖度は7.8となった。Fig. 6, Fig. 7に、提案法および従来法により生成された時刻歴データを示す。

Fig. 6の時刻歴データから尖度を求めると8.0であった。実測振動の尖度は7.8であるため、提案法では概ね目標値どおりの尖度が得られていることがわかる。一方、従来法によって生成した時刻歴データの尖度を求めると3.0となった。この結果から、従来法で生成した時刻歴データはガウス分布に従うことが確認できる。

Fig. 8に、確率密度分布に関する実測データ、従来法、および提案法の比較を示す。図より、提案法により生成された加速度と台車加速度は、比較的近い確率密度分布を持っていることがわかる。それに対し、従来法で生成した加速度はガウス分布となっているため、台車加速度とは異なった分布となっている。特に高い加速度において従来法と提案法の差が顕著に現れ、従来法では高い加速度がほとんど再現できていないが、提案法では高い加速度も上手く再現できていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、包装貨物振動試験の高度化を目的として、非ガウス型ランダム振動生成法を提案し、さらに

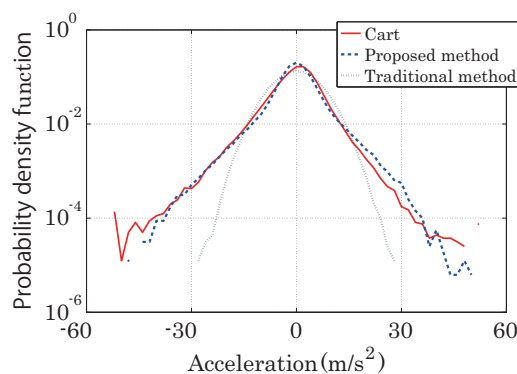


Fig. 8 Probability density functions of acceleration time histories generated by cart vibration, proposed method, and traditional method.

提案法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) 地震動再現手法に基づいた非ガウス型ランダム振動生成法を提案した。
- (2) 尖度と、振動波形を制御するパラメータである標準偏差の関係を示した。
- (3) 実測振動から求めた PSD に基づいて、従来法と提案法により時刻歴データを生成し、提案法は従来法よりも精度良く実測振動を再現できることを示した。

本提案法は、従来法では再現できなかった振動を再現できるため、包装貨物振動試験の試験精度向上が見込まれる。その結果、過剰包装や破損事故の減少が期待される。

参考文献

- 1) 細山 亮, 中嶋隆勝: 日本包装学会誌, **19**, 2 (2010) 113.
- 2) V. Rouillard and M. A. Sek: Packaging Technology and Science, **23**, 8 (2010) 423.
- 3) D. O. Smallwood: Sound and Vibration, October (2005) 18.
- 4) A. Steinwolf and R. A. Ibrahim: Probabilistic Engineering Mechanics, **14**, 4 (1999) 289.
- 5) A. Steinwolf: Sound and Vibration, September (2006) 12.
- 6) JIS Z 0232 (2004): 包装貨物—振動試験方法
- 7) ASTM Standard, D4169-08 (2008).
- 8) 和泉正哲, 渡辺孝英, 佐藤俊明, 池浦友則, 木村正彦, 石田 寛, 勝倉 裕, 飛田 潤, 大野 晋: 地震動その合成と波形処理, 理論地震動研究会編, 鹿島出版会 (1997) 131.
- 9) 和泉正哲, 勝倉 裕: 日本建築学会論文報告集, **327** (1983) 20.