

一般論文

台車振動と試験振動における蓄積疲労の比較 確率密度分布が蓄積疲労に与える影響

細山 亮*、中嶋 隆勝*

Comparative Study of Accumulated Fatigues Caused by Vibrations of a Cart and a Testing Machine -Effect of a Probability Density Function on Accumulated Fatigue-

Akira HOSOYAMA* and Takamasa NAKAJIMA*

振動試験の精度向上を目的とし、ランダム振動加速度の確率密度分布が疲労に与える影響を明らかにするために数値解析による検討を行った。また、実際の輸送と振動試験で蓄積する疲労の違いを比較するために走行実験も行った。その結果、数値解析からは、PSD が等しくても尖度が大きくなるにつれ最大発生加速度も大きくなり、蓄積疲労が大きくなることがわかった。また、走行実験からは、現在の振動試験の加速度は常にガウス分布となるが、実際の輸送で得られる加速度は必ずしもガウス分布とならないことが確認できた。さらに、振動試験に対して実際の輸送では、数値解析結果と同様、蓄積疲労が大きく異なることも示した。これらのことから、現状の振動試験は実際の輸送に対して必ずしも等価な試験にはならず、精度の高い振動試験を行うためには、輸送データの PSD だけでなく、確率密度分布にも着目しなければならないことがわかった。

In order to improve the accuracy of vibration tests, an investigation by a numerical simulation was performed so that the effect of a probability density function of random vibration on accumulated fatigue would become clear. In addition, an experiment to run a cart was performed to confirm the difference between accumulated fatigues of transportation and vibration tests. From the result of a numerical simulation, it was shown that when kurtosis was larger, the maximum of acceleration became larger. Consequently, it was indicated that accumulated fatigue became larger in spite of using the same PSD. Moreover, from the running experiment, it was confirmed that vibration tests always had a gaussian distribution, but transportation didn't always have a gaussian distribution. Furthermore, it was shown that there was a large difference between accumulated fatigues of transportation and vibration tests as well as the result of a numerical simulation. These results show that vibration tests are not always the same as transportation, and in order to perform an accurate vibration testing, we need to consider a probability density function as well as PSD of transportation acceleration.

キーワード: 包装、輸送、製品損傷、振動試験、加速度、非ガウス分布

Keywords : Packaging, Transportation, Product Damage, Vibration Test, Acceleration, Non-Gaussian Distribution

*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. 緒言

振動試験は、貨物輸送時の振動に対して、包装貨物が損傷するか否かを事前に確認するために実施される。製品出荷前における振動試験で不具合が生じた場合、製品強度を向上させる、または緩衝材を厚くするといった対策が講じられる。しかし、対策を講じてもお包装貨物が損傷する場合があります、現在の試験規格では実輸送での損傷を再現できているとは言い難い。その原因の一つとして、振動試験機で発生する加速度と実輸送で発生する加速度の確率密度分布が異なることが挙げられる。

実輸送で発生する加速度はガウス分布となるとは限らないが、現在の JIS¹⁾では、与えられた加速度 PSD に基づいて振動試験が行われ、発生する加速度は常にガウス分布となっている。そのため、実輸送時と振動試験では、蓄積する疲労に差が生じると考えられる。これまで、Rouillard²⁾ や Steinwolf³⁾、Van Baren⁴⁾ は実輸送と振動試験の確率密度分布を比較し、その分布形状が異なることを示している。また、Rouillard²⁾ や Winterstein⁵⁾、Steinwolf⁶⁾ は、実輸送時の振動を再現する新しい手法を提案している。しかしながら、これまでの研究では、振動波形、確率密度分布の差について述べられてはいても、確率密度分布の違いが疲労に与える影響を定量的に示している研究は見当たらない。

そこで、本研究では、振動試験の精度向上を目的とし、確率密度分布の違いがどの程度

蓄積疲労に影響を与えるのかを明らかにする。すなわち、数値計算により、共通の PSD を用いてガウス型および非ガウス型ランダム振動を生成し、両者に蓄積する疲労の違いを明らかにする。さらに、実輸送で発生する振動の一例として、台車の荷台に発生する加速度を測定する。そして、その測定データから算出した PSD を用いて試験機を動作させ加速度を測定し、台車振動と試験振動とでは同じ PSD であるにもかかわらず蓄積疲労が異なることを示す。

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

非ガウス分布を定量化するために尖度 (Kurtosis)、歪度 (Skewness) と呼ばれる指標を用いる。尖度は分布の裾野の広さを、歪度は分布の左右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。今、 N 個のデータ x_1, x_2, \dots, x_N を考えると、尖度 K 、歪度 S はそれぞれ次式で表される³⁾。

$$K = \frac{M_4}{\sigma^4}, \quad S = \frac{M_3}{\sigma^3} \quad (1)$$

$$M_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^n$$

ここで、 M_n は n 次のモーメント、 σ は標準偏差、 m は平均である。この尖度と歪度を用いることで非ガウス分布を定量的に表すことが可能となる。

2.2 ガウス分布から非ガウス分布への変換

非ガウス型ランダム振動生成法に関する研究はこれまで数多くなされてきた。Winterstein⁵⁾は、多項式を用いて確率密度分布をガウス型から非ガウス型へ変換することにより、非ガウス型ランダム振動を生成している。また、Steinwolf⁶⁾は、フーリエ変換後に得られる振幅成分と位相成分のうち、位相成分を適切に設定することにより、非ガウス型ランダム振動を生成している。しかしながら、Wintersteinの方法は確率密度分布をガウス型から非ガウス型へ変換したときに PSD が変化する場合がありますため制御が困難であり、また Steinwolfの方法は適切な位相成分を探索することが困難であるという問題がある。このような問題点があるものの、Wintersteinの方法では、簡便に非ガウス型ランダム振動が得られるため、本研究では Wintersteinの方法を用いる。

以下、非ガウス型ランダム振動の生成法について説明する。まず、ガウス型ランダム振動を生成する。次に、生成したガウス型ランダム振動をエルミート多項式を用いて非ガウス型ランダム振動に変換する。エルミート多項式によるガウス型から非ガウス型への変換式を示す⁵⁾。

$$y(x) = \left[\sqrt{\xi^2(x) + c} + \xi(x) \right]^{1/3} - \left[\sqrt{\xi^2(x) + c} - \xi(x) \right]^{1/3} - a$$

$$\xi(x) = 1.5b \left(a + \frac{x}{\kappa} \right) - a^3, \quad a = \frac{\hat{h}_3}{3\hat{h}_4}, \quad b = \frac{1}{3\hat{h}_4}, \quad c = (b - 1 - a^2)^3$$

$$\hat{h}_3 = \frac{S}{4 + \sqrt{1 + 1.5(K - 3)}}, \quad \hat{h}_4 = \frac{\sqrt{1 + 1.5(K - 3)} - 1}{18}, \quad \kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\hat{h}_3^2 + 6\hat{h}_4^2}}$$

(2)

ここで、 x は非ガウス型ランダム振動、 $y(x)$ はガウス型ランダム振動を、 K は尖度、 S は歪度を表す。式(2)の K 、 S に尖度、歪度の値を設定することによって、所望の非ガウス型ランダム振動を生成することができる。

3. 蓄積疲労算出方法

3.1 蓄積疲労による損傷度評価

構造物に作用する応力は、一定振幅の繰り返しではなく、不規則に変動することが多い。疲労寿命の推定では、変動応力に対する寿命推定方法として、線形累積損傷則 (Palmgren-Miner 則) がよく用いられる。線形累積損傷則とは、各応力レベルについて、それぞれ損傷度を加算し、その和が 1 になったときに破壊すると考えるものである。すなわち、ある応力 S_i に対する寿命が N_i 回であるとき、応力 S_i が n_i 回繰り返し返されたときの損傷度は n_i/N_i で与えられ、次式が成立すれば破壊するという考え方である。

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \tag{3}$$

金属材料は繰り返し応力が加わると、一定回数繰り返しを受けたときに破断する。繰り返し応力 S を縦軸に、破断するまでの回数 N を横軸にプロットし、両対数グラフで描いたものが $S - N$ 曲線と呼ばれる。Fig.1 に $S - N$ 曲線を示す。 $S - N$ 曲線を用いることで、一定の繰り返し応力に対する寿命を推定することができる。この曲線の関係式は式(4)で表される。

$$N_i S_i^\alpha = \beta \tag{4}$$

ここで、 β は材料固有の値であり、一般に β は加速係数と呼ばれている。いま、応力 S_i が n_i 回繰り返されたときの疲労を

$$\beta_i = n_i |S_i|^\alpha \quad (5)$$

と定め、これを蓄積疲労⁷⁾と呼ぶと、式(3)は式(4)、式(5)を用いて次式に置き換えることができる。

$$\sum \beta_i = \beta \quad (6)$$

以上の金属疲労の考えを振動耐久試験に適用すると、応力に代わって振動加速度を用いることで、振動が作用したときの製品が破損するまでの時間を推定することができる。

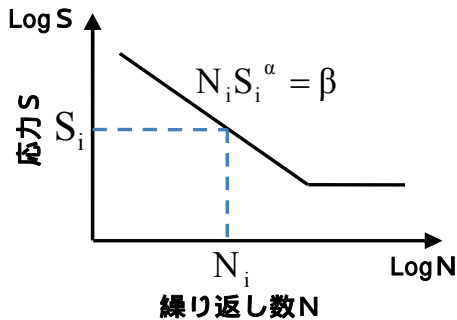


Fig.1 S-N Curve

3.2 加速度波形のカウント方法

実輸送時に製品に生じる振動は、ランダム振動であり、ランダム振動に対する疲労強度を調べるためには、どのような加速度が何回生じたかカウントする必要がある。ここでは、加速度レベルをカウントするために、ピークカウント法⁸⁾を用いる。ピークカウント法とは、加速度の極大・極小値を全てカウントしていく方法である。Fig.2 に加速度波形の例を

示す。ピークカウント法では、図中の P1、P2、P3、P4、P5 の全てを加速度のピーク値としてカウントする。カウントされた加速度ピーク値とその回数を式(5)の S_i 、 n_i に代入することにより、蓄積疲労 β_i を算出することができる。

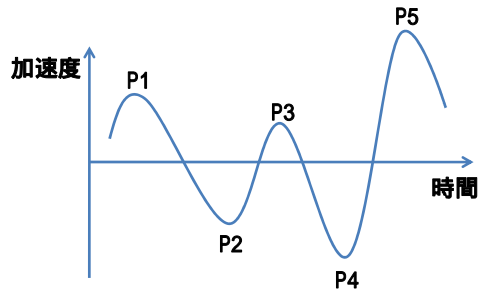


Fig.2 Acceleration waveform

4. 数値解析方法および実験方法

4.1 数値解析方法

確率密度分布の違いが疲労に与える影響を調べるために、Fig.3 に示す PSD を用いて、(i)尖度 $K=3$ 、歪度 $S=0$ 、(ii)尖度 $K=5$ 、歪度 $S=0$ 、(iii)尖度 $K=7$ 、歪度 $S=0$ に設定した場合についてランダム振動を生成した。蓄積疲労の算出にあたっては、加速係数 β を一般的に電機部品に使用される値として $\beta=4$ と設定した⁹⁾。なお、尖度の違いによる蓄積疲労の比較に際しては、(i)尖度 $K=3$ 、歪度 $S=0$ に設定したときの蓄積疲労を 1 として、(ii)尖度 $K=5$ 、歪度 $S=0$ 、(iii)尖度 $K=7$ 、歪度 $S=0$ の蓄積疲労を求めた。

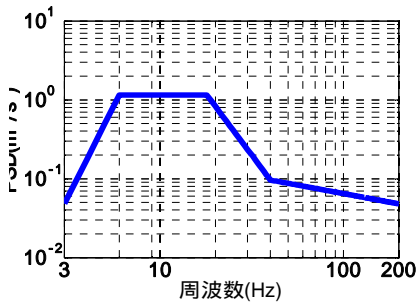


Fig.3 Acceleration PSD

4.2 実験方法

Fig.4 に示すように加速度センサを台車の荷台の中央部に設置し、台車走行させたときに鉛直方向に生じる加速度を測定した。次に、台車の加速度測定で得られたデータから PSD を算出し、その PSD を用いて振動試験機でランダム振動を再現させ、振動台の加速度測定を行った。計測条件は台車、振動台ともに計測時間 80sec、サンプリング時間 0.5msec と設定し、蓄積疲労の算出においては、加速係数 を数値解析の設定値と同様に、 $\alpha=4$ と設定した。蓄積疲労の比較に際しては、試験機の蓄積疲労を 1 として、台車の蓄積疲労を算出し比較を行った。



Fig.4 Position of acceleration sensor

5. 結果と考察

5.1 非ガウス性が蓄積疲労に与える影響

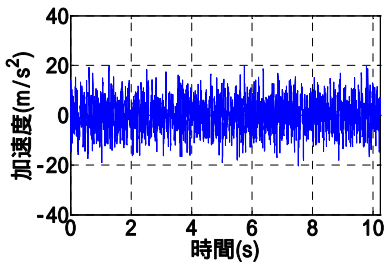
Table1 に数値計算で得られたランダム振動の尖度、歪度の値を示す。Table1 より、ほぼ設定値通りの尖度、歪度が得られていることがわかる。また、Fig.5、Fig.6、Fig.7 に加速度波形、PSD、確率密度分布を示す。

Fig.5 の加速度波形を見ると、尖度が大きくなるにつれ、最大加速度が大きくなっている。また、Fig.7 の確率密度分布を見ると、尖度が大きくなるにつれて、確率密度分布の裾野が広がっており、大きな加速度の発生確率が大きくなっている。このように尖度が大きくなるにつれて、発生する最大加速度も大きくなるのがわかる。

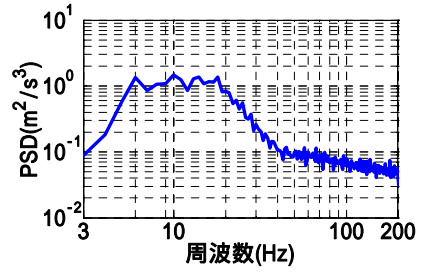
Fig.8 に、(i)尖度 $K=3$ 、歪度 $S=0$ 、(ii)尖度 $K=5$ 、歪度 $S=0$ 、(iii)尖度 $K=7$ 、歪度 $S=0$ に設定した場合の蓄積疲労を示す。Fig.8 を見ると、PSD が等しくても尖度が大きくなるにつれ蓄積疲労が大きくなっており、尖度すなわち確率密度分布が蓄積疲労に非常に大きな影響を与えていることがわかる。このことから、確率密度分布は、振動試験を実施する際に着目しなければならない重要なファクターであると言える。

Table1 Kurtosis and skewness obtained by numerical simulation

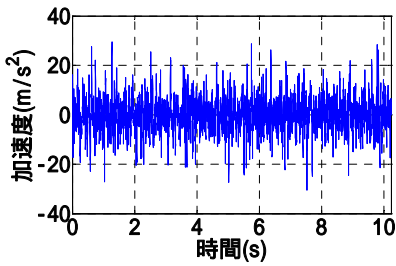
設定値		数値計算結果の値	
尖度	歪度	尖度	歪度
3	0	2.97	-0.01
5	0	4.76	0
7	0	6.63	0.01



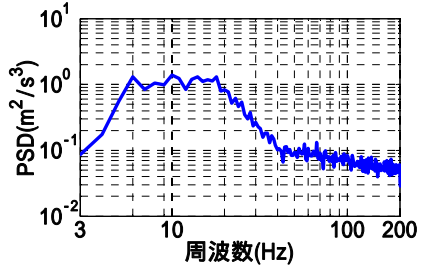
(a) K=2.97



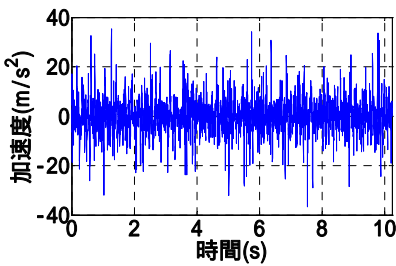
(a) K=2.97



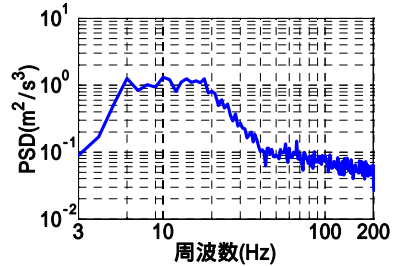
(b) K=4.76



(b) K=4.76



(c) K=6.63



(c) K=6.63

Fig.5 Acceleration waveform obtained by numerical simulation

Fig.6 Acceleration PSD obtained by numerical simulation

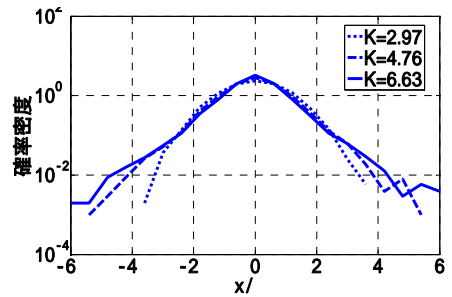


Fig.7 Relation between probability density function and kurtosis
(x: acceleration, σ : standard deviation)

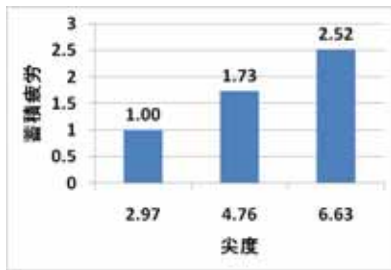


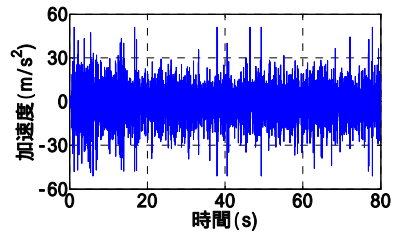
Fig.8 Relation between accumulated fatigue and kurtosis

5.2 試験機および台車の振動

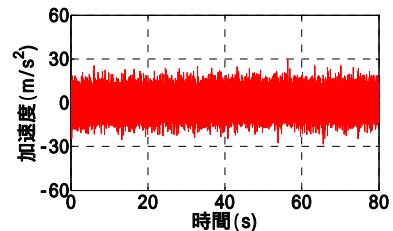
Fig.9、Fig.10、Fig.11 に台車および試験機の加速度波形、PSD、確率密度分布を示す。Fig.9、Fig.10 を見ると、PSD が等しくても、加速度波形は異なったものになっている。これは、現在の試験規格では、確率密度分布をガウス分布として扱っているが、実輸送は必ずしもガウス分布とならないことを示している。また、Fig.11 より、台車と試験機の実験確率密度分布を比較すると、両者の確率密度分布は大きく異なり、特に加速度が標準偏差の3倍を超えたあたりから、差が生じていることがわかる。

Fig.12 に台車および試験機の蓄積疲労を示す。Fig.12 より、台車と試験機で蓄積疲労を比較すると、台車は試験機の3.5倍の疲労を受けている。これは PSD が等しくても、確率密度分布の違いによって、疲労が大きく異なることを示している。

以上のことから、精度の高い振動試験を行うためには、PSD の情報だけでなく、確率密度分布についても十分に考慮する必要があることがわかる。

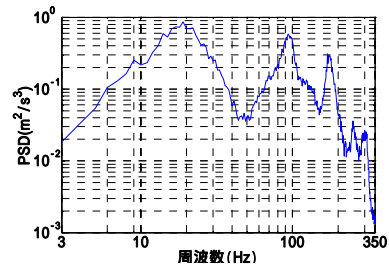


(a) A cart

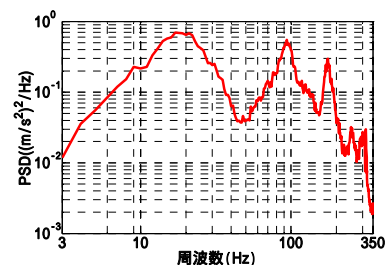


(b) Vibration testing machine

Fig.9 Acceleration waveform of a cart and vibration testing machine



(a) A cart



(b) Vibration testing machine

Fig.10 Acceleration PSD of a cart and vibration testing machine

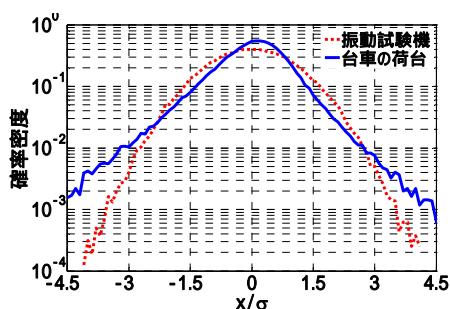


Fig.11 Probability density function of a cart and vibration testing machine
(x: acceleration, σ : standard deviation)

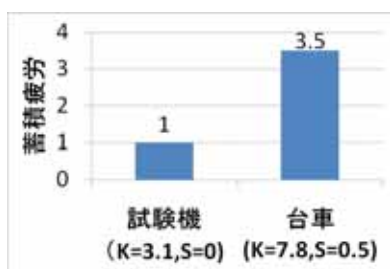


Fig.12 Accumulated fatigue of a cart and vibration testing machine

6. 結論

本研究では、数値計算により確率密度分布の違いが蓄積疲労に与える影響について明らかにした。また、走行実験により、振動試験と実輸送における蓄積疲労の比較を行った。以下、得られた結果を示す。

- (1) 数値計算により、尖度が大きくなれば、発生最大加速度も大きくなり、その結果、蓄積疲労も大きくなることを示した。
- (2) 台車の走行実験により、現在の振動試験は常にガウス分布となるが、実輸送

は必ずしもガウス分布とならないことを確認した。

- (3) 台車の走行実験により、試験振動と台車振動では、蓄積疲労が大きく異なることを示した。
- (4) 現在の振動試験は常にガウス分布となるため、実輸送時と振動試験では必ずしも等価な試験にはならず、精度の高い振動試験を行うためには、輸送データの PSD だけでなく、確率密度分布にも着目しなければならないことを明らかにした。

今後は、振動試験のさらなる精度向上のために、現在よりも精度良く蓄積疲労を評価する方法について研究を進めていく予定である。

7. 謝辞

本研究は、JST 地域イノベーション創出総合支援事業、平成 20 年度シーズ発掘試験「振動破損事故の防止に役立つ非ガウス型ランダム振動試験機の開発」の援助のもとに実施した。本援助に深く謝意を表する。

<参考文献>

- 1) JIS Z 0232 : 2004 包装貨物 - 振動試験方法
- 2) V.Rouillard and M.A.SEK, Packaging Technology and Science, 13, 149-156 (2000)
- 3) A.Steinwolf, Sound and Vibration, September,12-21(2006)

- 4) Philip Van Baren, Sound and Vibration,
October, 2-7(2005)
- 5) S.R.Winterstein, Journal of Engineering
Mechanics, ASCE, 114(10), 1772 -1790
(1988)
- 6) A.Steinwolf, R.A.Ibrahim, Probabilistic
Engineering Mechanics, 14,
289-299(1999)
- 7) たとえば、中嶋隆勝、津田和城、川田
浩二、山内佳門、日本包装学会誌、
Vol.16、No.1、41-52(2007)
- 8) 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)
- 9) 振動試験仕様開発方法、セミナー資料、
IMV(株)、(2003)

(原稿受付 2010年1月14日)

(審査受理 2010年3月4日)