

ノート~~~~~

間欠計測による ランダム振動統計値の信頼性

進村 竜也*, 斎藤 勝彦**, 秋田 直也***, 奥山 俊博****

Reliability of Random Vibration Statistics by Intermittent Measurement

Tatsuya SHINMURA*, Katsuhiko SAITO**, Naoya AKITA*** and Toshihiro OKUYAMA****

輸送中に発生する振動は製品を損傷させる危険性があるため、事前に高性能衝撃記録計を使用した輸送環境調査の実施が推奨される。しかし、このような精密な計測が難しい場合は、簡易型計測器を用いて調査を行うが、計測した不規則振動統計値（加速度実効値・尖度・歪度）の信頼性に疑問がある。本研究では、間欠計測による不規則振動統計値の信頼性を明らかにしている。その結果、ほぼ一定の速度で整備された道路を走行している場合は、間欠計測によっても荷台振動の加速度実効値や尖度は実用上十分な精度を有していることを明らかにしている。

The vibration intensity in transit becomes the damage on the packaging product. Therefore it is necessary to measure vibration precisely and must use the apparatus which we can measure with high precision. However, sometimes we may not use the high-spec measuring equipment. How is the precision by the simple measuring equipment? We measure the vehicle vibration by the intermittent measurement, in this study, we confirm whether the statistical properly of the analyzed result is enough precision. As a result, the stat of vibration data was enough precision even if we use the intermittent measuring equipment when a vehicle ran a maintained road at approximately consist speed.

キーワード：輸送環境記録計、間欠振動計測、計測間隔、加速度データ

Keywords: Transport Environment Recorder, Intermittent Measurement, Sampling Rate, Acceleration Data

1. はじめに

物流過程で製品は輸送中の振動・衝撃などの外力によって損傷することがある。このような事態を未然に防ぐため、事前に使用する物流ルートに対して、輸送環境調査を行うことは非常に重要であり、輸送ルートの加速

度を精密に計測解析することで得られた適切なランダム振動波形をもとに包装貨物振動試験が行われる。一般に加速度計測の際は、高性能輸送環境記録計（例えば DER-1000:神栄テクノロジー(株)）を使用することが推奨される。しかし、このような精密な計測が

* 神戸大学大学院海事科学研究科博士前期課程

** 連絡者 (Corresponding author) 神戸大学輸送包装研究室 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1) 5-1-1

Fukaeminami, Higashi-nada, Kobe, 658-0022 Japan TEL: 078-431-6341, Email: ksaito@maritime.kobe-u.ac.jp

*** 神戸大学国際海事研究センター

**** 東京海上日動調査サービス (株)

難しい場合は、簡易型計測器を用いて輸送環境調査を行うが、計測した不規則振動統計値（加速度実効値 G_{rms} ・尖度・歪度）の信頼性に疑問がある。ここではまず、DER-1000を用いたトラック走行試験により、計測された加速度データについて5種類の間隔（1ms, 5ms, 10ms, 50ms, 100ms）で解析処理し、それぞれの G_{rms} ・尖度・歪度を算出・比較することで、解析間隔によって、どの程度統計量に影響するのかについて明らかにする。

2. 実験概要

2.1 加速度計測機器のスペック

輸送中に使用される高性能輸送環境記録計（例えば、DER-1000）は Fig. 1(a) のような特徴・スペックを有している。一方、簡易型計測機器として Fig. 1(b) のスマートフォンが挙げられる。この2つの機器の決定的な違いはサンプリングレート（計測間隔）である。DER-1000では通常1ms程度毎に加速度データが取得されるが、スマートフォンでは計測間隔が非常に大きいため、振動の高周波成分を解析することが不可能である。



Fig. 1 Spec of Each Measuring Instrument

2.2 走行試験

本研究では実輸送に近い状況での加速度計測を行うため、40km/h 速度走行試験と20km/h 減速帯（長さ2m、高さ50mm、幅300mm、1本）走行試験の2種類の走行試験を実施した（Fig. 2）。当試験で使用する高性能輸送環境記録計（DER-1000）をトラック（エアサス4トン空車）最後部車線側壁面付近の荷台に両面テープにより固定し、計測間隔1msで加速度計測を行う（Fig. 3：それぞれ両面テープで荷台に固定されたスマートフォンや他の機器でも計測しているが、ここでの解析対象データはDER-1000のみ）。計測後、解析対象となる5秒間を抽出し、加速度実効値（ G_{rms} ）・尖度K・歪度Sの3つの統計値を算出し、5種類の解析間隔毎に比較する。

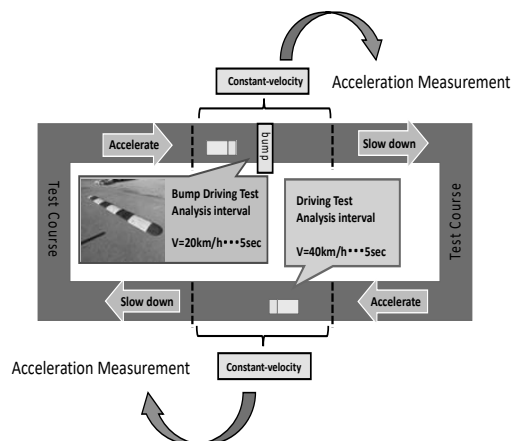


Fig2. Overview of the Driving Test

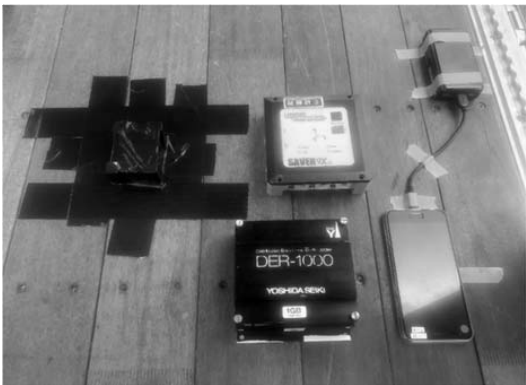


Fig.3 Installation of Measuring Equipment

2. 3 計測条件

各走行試験において、DER-1000 の計測条件は、以下の通り設定した。

- ・ ベタどり
- ・ 計測間隔：1ms
- ・ フレーム長：1024
- ・ 計測時間：5 sec
- ・ データ個数：5120 個

上記の設定で 40km/h 走行試験は 10set、20km/h 減速帯走行試験は 5set 行った。

1ms 計測した 5120 個のデータを各計測間隔に合わせて中抜きしたもの、つまり計測間隔とデータ個数の関係が Table1 である。

Table1 Relationship between Sampling Rate and Number of Data

Sampling Rate	Number of Data
1ms	5,120
5ms	1,024
10ms	512
50ms	102
100ms	51

また、計測された加速度データはゼロ点補正（加速度瞬時値の平均値を 0 にする操作）を行い、補正後の加速度 G ファクター $x(t)$ を生データとして数値解析する。

一般に、高性能輸送環境記録計を用いて計測された荷台振動は、FFT 処理によって得られた PSD チャートの周波数積分値の平方根を計算することによって不規則振動のレベルである G_{rms} を求めることが多い。しかしながら、間隔が十分に細かく計測できない場合、高周波数成分の PSD を求めることができない。

一方、ランダム振動 $x(t)$ の加速度実効値である G_{rms} は以下のように定義される。

$$Grms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

(T : 計測サンプリングされた時間)

さらに、加速度瞬時値 $x(t)$ の平均値 x_{mean} まわりのばらつきを表す量を分散 σ^2 と呼び、次式で与えられる。

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (x - x_{mean})^2 dt$$

なお、分散の平方根のうち、正のものを標準偏差という。

よって、加速度瞬時値の平均値が 0 のランダム振動 $x(t)$ の標準偏差は加速度実効値 G_{rms} と等しくなり、ゼロ点補正されたランダム振動の標準偏差を計算することによって、 G_{rms} を求めることができる。

3. 実験結果

3.1 40km/h 速度走行試験の結果

Table2 は計測間隔 1ms で計測した 1～10set の各 G_{rms} ・尖度・歪度を表している。 G_{rms} (Integral) は計測・解析した 5 秒間の加速度 PSD チャート (Fig. 4: 5set 目の PSD チャート) を周波数積分した値の平方根であり、 G_{rms} (Standard Deviation) は計測した 5120 個の加速度瞬時値データから得た標準偏差である。 G_{rms} の積分値と標準偏差値の差はそれぞれ 10set 分の平均値で比較すると 0.01G であり、ばらつきも小さい結果となった。また、3～20Hz の周波数帯が卓越しており、他の set でも同様の周波数特性を示しており、計測間隔が 50ms 以上では的確な周波数特性を把握することはできない。

**Table2 40km/h Driving Test
1ms Measured Data(1-10set)**

set	Grms(Integral)	Grms(Standard Deviation)	Kurtosis	Skewness
1set	0.16	0.19	2.99	0.12
2set	0.19	0.20	4.51	0.05
3set	0.16	0.18	3.66	0.09
4set	0.18	0.20	3.97	0.09
5set	0.19	0.19	3.56	-0.08
6set	0.20	0.20	3.46	0.09
7set	0.18	0.21	3.46	0.13
8set	0.17	0.18	4.07	-0.16
9set	0.17	0.19	3.83	0.04
10set	0.17	0.18	3.60	0.13
Av.	0.18	0.19	3.71	0.09
±S.D	0.01	0.01	0.39	0.03

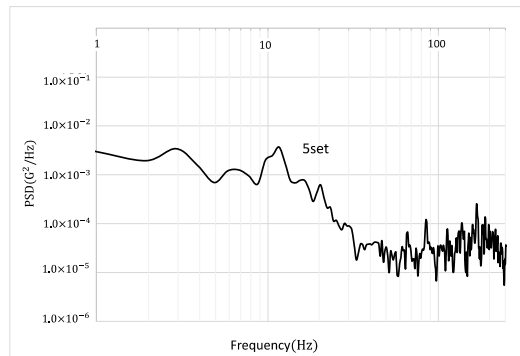


Fig.4 PSD Waveform

走行試験で得られた加速度データから各計測間隔の G_{rms} ・尖度・歪度を解析するにあたり、どの加速度データを解析対象とするかによって、これらの統計値が変化する。例えば、計測間隔 5ms の加速度データを解析する場合、全部で 5120 個のデータから、5 個目のデータ、10 個目のデータ、15 個目のデータ・・・などのように、5 の倍数毎のデータを解析対象とする他に、1 個目のデータ、6 個目のデータ、11 個目のデータ・・・または 3 個目のデータ、8 個目のデータ、13 個目のデータ・・・など計 5 種類の解析対象データを採用することが可能である。つまり、計測間隔が大きければ大きいほど、解析対象となる加速度データの組み合わせが多くなる。

今回、検証する計測間隔 1ms, 5ms, 10ms, 50ms, 100ms の 5 種類は以下のようにしてそれぞれ 5 つずつ解析対象データを選び、それぞれの解析対象データでの統計値を算出し、比較した。

計測間隔 5ms の場合 (解析データ番号)

0dev. = (0, 5, 10・・・5115, 5120)

1dev. = (1, 6, 11・・・5111, 5116)

2dev. = (2, 7, 12・・・5112, 5117)

3dev.=(3, 8, 13・・・5113, 5118)

4dev.=(4, 9, 14・・・5114, 5119)

計測間隔 10ms の場合(解析データ番号)

0dev.=(0, 10, 20・・・5110, 5120)

1dev.=(2, 12, 22・・・5102, 5112)

2dev.=(4, 14, 24・・・5104, 5114)

3dev.=(6, 16, 26・・・5106, 5116)

4dev.=(8, 18, 28・・・5108, 5118)

計測間隔 50ms の場合(解析データ番号)

0dev.=(0, 50, 100・・・5050, 5100)

1dev.=(10, 60, 110・・・5060, 5110)

2dev.=(20, 70, 120・・・5070, 5120)

3dev.=(30, 80, 130・・・5030, 5080)

4dev.=(40, 90, 140・・・5040, 5090)

計測間隔 100ms の場合(解析データ番号)

0dev.=(0, 100, 200・・・5000, 5100)

1dev.=(20, 120, 220・・・5020, 5120)

2dev.=(40, 140, 240・・・4940, 5040)

3dev.=(60, 160, 260・・・4960, 5060)

4dev.=(80, 180, 280・・・4980, 5080)

Table3 は 40km/h 走行試験における、各計測間隔に対する解析対象データの

G_{rms} (SD; Standard Deviation)である。

(Table2 の 1set 目のデータ)

Table3 40km/h Driving Test

Comparison of G_{rms} (SD)

Grms	1ms(G)	5ms(G)	10ms(G)	50ms(G)	100ms(G)
0dev.	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19
1dev.	0.19	0.19	0.20	0.19	0.17
2dev.	0.19	0.19	0.19	0.18	0.21
3dev.	0.19	0.20	0.20	0.18	0.17
4dev.	0.19	0.19	0.20	0.20	0.19
Av.	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19
±S.D	—	—	—	0.01	0.01

各計測間隔の G_{rms} (SD) 平均値をみると計測間隔が粗く (大きく) なるにつれて、1ms 計測の G_{rms} (SD) から離れていくものの、計測間隔 100ms の 0dev. ～4dev. の 5 つの解析値のばらつきを示す標準偏差 (±S.D) が ±0.01G であることから、40km/h 走行試験の G_{rms} (SD) は計測間隔の違いによって大きく異なることはなく、計測間隔が 100ms 程度の間欠計測結果からも G_{rms} (SD) は精度よく求めることができる。また、尖度・歪度に関しても同様の処理を行った結果を Table4 に示す。

Table4 40km/h Driving Test

Comparison of Kurtosis and Skewness

Kurtosis	1ms	5ms	10ms	50ms	100ms
0dev.	2.99	2.84	2.60	2.54	2.72
1dev.	2.99	2.88	3.08	2.60	2.32
2dev.	2.99	3.02	3.22	2.67	2.76
3dev.	2.99	3.17	2.98	2.74	2.98
4dev.	2.99	3.05	3.12	2.61	2.84
Av.	2.99	2.99	3.00	2.63	2.72
±S.D	—	0.13	0.24	0.08	0.25
Skewness	1ms	5ms	10ms	50ms	100ms
0dev.	0.12	0.12	0.11	0.08	0.15
1dev.	0.12	0.04	0.19	0.01	-0.15
2dev.	0.12	0.16	0.16	0.05	0.39
3dev.	0.12	0.09	0.05	0.05	-0.09
4dev.	0.12	0.19	0.19	0.19	0.25
Av.	0.12	0.12	0.14	0.08	0.11
±S.D	—	0.06	0.06	0.07	0.20

Table4 より、尖度・歪度についても、 G_{rms} (SD) と同様に計測間隔の違いによって大きく異なることはなかった。以上のように、40km/h 走行試験において、計測間隔の違いによって G_{rms} (SD) ・尖度・歪度が大きく異なることがなかったのは、等速走行による加速度計測の際、大きい加速度、小さい加速度がバランスよく出現するためであると考えられ、100ms 間隔 (50 データ) 程度でも間欠計測データの統計的信頼性には問題ないと評価できる。

なお Fig. 3 に示すように、ここでは DER-1000 の直近にスマートフォンを設置し、計測間隔 100ms で計測しており、結果としてスマートフォン計測値から解析した $G_{rms}(SD)$ ・尖度・歪度の値と、Table2 の平均値には大きな差がなかったことを確認している。

3.2 20km/h 減速帯走行試験の結果

Fig. 5 は 20km/h 減速帯走行試験で得た加速度時系列データであり、解析対象の 5 sec 内に減速帯を乗り越えた際の大きな加速度のピークがみられる。

Table5 は 20km/h 減速帯走行試験の計測間隔 1ms で計測した 1~5set の各 G_{rms} ・尖度・歪度を表している。 $G_{rms}(\text{Integral})$ と $G_{rms}(\text{Standard Deviation})$ の差はそれぞれ 5set 分の平均値で 0.05G であり、尖度のばらつきが大きいことが分かった。

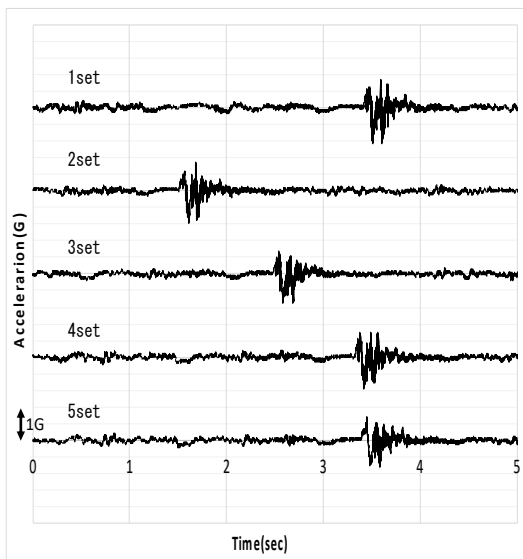


Fig. 5 20km/h Bump Driving Test
Acceleration Time Series Data

Table5 20km/h Bump Driving Test
1ms Measured Data(1~5set)

set	Grns(Integral)	Grms(Standard Deviation)	Kurtosis	Skewness
1set	0.27	0.21	24.54	-1.78
2set	0.24	0.19	26.25	-2.14
3set	0.25	0.19	19.55	-1.52
4set	0.25	0.21	22.31	-1.67
5set	0.25	0.19	18.48	-1.49
Av.	0.25	0.20	22.23	-1.72
±S.D	0.01	0.01	3.27	0.26

20km/h 減速帯走行試験も 40km/h 走行試験と同様に、 $G_{rms}(SD)$ ・尖度・歪度を各計測間隔で比較する (Table. 6 : Table5 の 1 セット目のデータ)。

Table6 20km/h Driving Test

Comparison of $G_{rms}(SD)$, Kurtosis, and Skewness

Grms	1ms(G)	5ms(G)	10ms(G)	50ms(G)	100ms(G)
0dev.	0.21	0.21	0.22	0.17	0.18
1dev.	0.21	0.22	0.23	0.25	0.23
2dev.	0.21	0.22	0.21	0.22	0.18
3dev.	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21
4dev.	0.21	0.20	0.19	0.22	0.15
Av.	0.21	0.21	0.21	0.21	0.19
±S.D	—	0.01	0.01	0.03	0.03

Kurtosis	1ms	5ms	10ms	50ms	100ms
0dev.	24.54	21.59	22.98	11.32	14.39
1dev.	24.54	27.01	28.86	21.15	17.21
2dev.	24.54	30.59	20.44	19.40	8.65
3dev.	24.54	20.29	27.50	15.09	21.17
4dev.	24.54	19.38	17.37	33.60	7.11
Av.	24.54	23.77	23.43	20.11	13.71
±S.D	—	4.83	4.79	8.46	5.86
Skewness	1ms	5ms	10ms	50ms	100ms
0dev.	-1.78	-0.15	-0.03	-1.52	-2.74
1dev.	-1.78	-2.58	-2.73	-1.71	-3.14
2dev.	-1.78	-3.20	-1.78	-0.36	1.53
3dev.	-1.78	-1.56	-2.87	-1.48	3.38
4dev.	-1.78	-1.04	-1.16	4.41	1.02
Av.	-1.78	-1.71	-1.71	-0.13	0.05
±S.D	—	1.08	1.05	2.32	2.54

各計測間隔における $G_{rms}(SD)$ 平均値を比較すると計測間隔が粗く (大きく) なるにつれて、1ms 計測の $G_{rms}(SD)$ から離れる傾向があり、計測間隔 10ms を境に $G_{rms}(SD)$ が大きく離れている。また、計測間隔が大きくな

るにつれて加速度時系列のピーク値を十分にとらえることができず、尖度は小さくなる傾向がみられ、歪度は正の値と負の値が混在し、解析結果としての信頼性がなくなっていく。

このように、計測間隔を粗くすると、パンプに乗り上げた瞬間のピーク加速度を局所的に計測できない場合があるため 1ms 計測データでの解析結果と差が出てしまう。以上より、20km/h 減速帯走行試験における計測解析結果から、100ms 間隔 (50 データ) 程度では間欠計測データから得られる統計解析値の信頼性は十分とは言えない。

4. おわりに

前章までの検討により、間欠計測された加速度瞬時値を数秒間の区間で統計処理することによって、段差乗り越えなど衝撃的な加速度が計測されず、尖度が 3 程度となる安定走行中の荷台振動の G_{rms} や尖度は実用上十分な精度を有していることが分かった。そこで、間欠計測により得られた加速度データをランダム振動試験に活用する方法として、統計解析から得られた G_{rms} (SD) のみを利用した PSD 形状が考えられる。

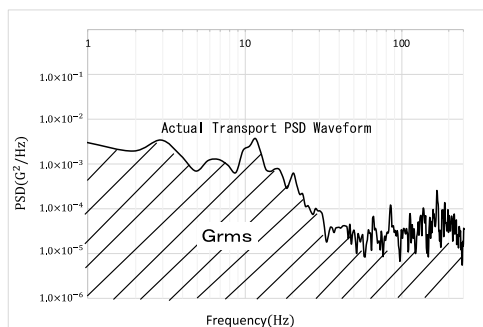


Fig. 6 Relation between the Area of PSD Waveform and G_{rms}

高性能輸送環境記録計を用いる場合、Fig. 6 のような PSD をもとにして振動試験に反映させることができるが、間欠計測では PSD 形状は不明である。そこで、間欠計測によって得られた尖度が 3 程度である場合、そのときの G_{rms} (SD) になるように予め設定した PSD 形状 (例えばホワイトノイズや JIS 型など) のレベルを調整 (G_{rms} フィッティング) した PSD (Fig. 7) を振動試験条件とする。

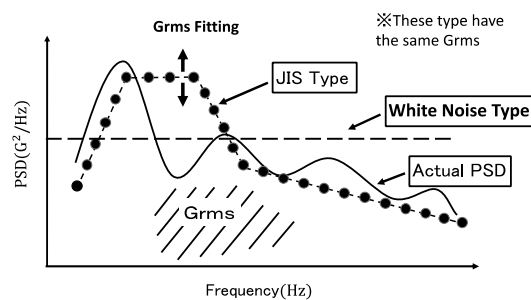


Fig. 7 G_{rms} Fitting

包装貨物振動試験を実施する場合の多くは、今日でも JIS で推奨されている輸送条件ごとの加速度時系列 (高性能輸送環境記録計により計測) から得たオリジナル PSD ではなく、Fig. 7 に示すような、いわゆる JIS 型 PSD で行われていることを鑑みれば、間欠振動計測によって得た G_{rms} (SD) をもとにすることも今後検討していく価値はある。

なお本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業 (課題番号 18K04608) による研究 プロジェクトの一環として実施しており、トラック走行試験では (株) 日立物流の多大なるご協力をいただいている。

(原稿受付 2020 年 6 月 19 日)

(審査受理 2020 年 8 月 18 日)

