

輸送車両荷台の速度変化推定方法

中井 太地*、齋藤 勝彦**

Estimation Method of Velocity Change on Truck Bed

Daichi NAKAI* and Katsuhiko SAITO**

運搬車両中の荷台で発生する繰り返し衝撃を定量的に評価し、跳ね上がり試験の適正なレベルを設定することは、包装貨物試験のさらなる高度化のために重要な課題である。先行研究で、衝撃を評価し、跳ね上がり現象を再現するには、衝撃時の速度変化が重要であると指摘されている。しかし筆者らの知る限り、運搬車両荷台で発生する速度変化を求めた例は存在しない。そこで本研究では地震工学の分野で用いられている、フーリエ変換とローカットフィルタを用いた加速度より時系列速度を求める手法を、荷台振動の解析に適用した。そして求めた時系列速度波形より荷台振動中の速度変化を求める手法を提案する。

It is the important subject of packaging test to evaluate of the repetitive shocks on truck bed during transportation and setting the appropriate level of the bounce vibration test. In previous studies, it is pointed that velocity change during impact is important for evaluating the shocks and conducting bounce vibration test. However, to our knowledge, there are no examples calculating velocity change on truck bed. In this study, the way to calculate time series velocity form acceleration by Fourier transform and low cut filter, which is used in earthquake engineering was applied to analysis of truck bed vibration. We propose the way to calculate velocity change by time series velocity.

キーワード：包装、輸送、繰り返し衝撃、振動、ローカットフィルタ

Keywords : Packaging, Transport, Repetitive Shocks, Vibration, Low Cut Filter

1. 諸言

貨物振動試験が一般的に行われている。

1.1 車両荷台で発生する衝撃について

しかしながら、現状の振動試験では運搬

運搬車両の荷台で発生する振動に対する安全性を事前に確認するため、包装

車両荷台のハザードを完全に再現できるわけではない。そのため、振動試験では

*連絡者(Corresponding author), 山九(株) (〒806-0001 福岡県北九州市八幡西区築地町 16-1 Sankyu Inc., 16-1, Tsukiji, Yahatanishi, Kitakyushu, Fukuoka 806-0001, Japan)

TEL:093-645-7262, FAX:093-645-7275, Email:d.nakai@sankyu.co.jp

**神戸大学 輸送包装研究室 (〒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)

問題がなかったにも関わらず、実輸送では問題が発生する場合が存在している。

この要因として、次のような理由が指摘されている。現状の振動試験はパワースペクトル密度(以下 PSD と称す)を元に試験条件を決定している。しかしながら PSD には時間情報が含まれていない。そのため、路面の凹凸や橋の金属ジョイント等、一時的に大きな衝撃が含まれていたとしても考慮することができない¹⁾。

この問題を解決するために、振動試験中に強い衝撃的な振動部分と弱い振動部分を作り出す方法が提案されている。しかしながら、これらの研究は、例えば実輸送全体を表す統計量である尖度や歪度の値を元としており²⁾、個々の衝撃状態を抜き出して解析しているわけではない。そのため他の時間に比べてはるかに大きな衝撃が発生したとしても、長時間の輸送の記録の場合には平均化され、その衝撃が考慮されなくなる可能性は未だ存在する。

また包装貨物が運搬車両に固定されていない状態を再現するために行われている跳ね上がり試験ではランダム振動が用いられるが、破壊モードは衝撃的と指摘されており、適切な試験レベルの設定が問題とされている³⁾。

一方、衝撃の理論として、北澤らは繰り返し衝撃による蓄積損傷として最大加速度 a_{max} と速度変化 Δv 、衝撃回数 N を考慮した損傷限界曲線を求めることが可

能であることを示した⁴⁾。北澤らは主にハンドリングの際の落下衝撃を対象としているが、運搬車両の荷台上で発生する衝撃に対しても応用が可能であると考えられる。

また飯田は現場で起こりうる跳ね上がり現象について、入力条件として Δv を与えることにより室内試験で再現する方法を提案している⁵⁾。

以上より、輸送中に発生しうる衝撃を定量的に評価し、はね上がり量をコントロールするためには、運搬車両の荷台上で衝撃が発生した際の Δv を求める必要があると考えられる。

1.2 速度変化の計算方法について

衝撃時の Δv を求める方法として、時系列加速度波形を用いた 1/10 ピーク法が考えられる。Fig. 1 に 1/10 ピーク法の模式図を示す。これは加速度の極大値を基準として、その極大値の大きさの 1/10 以上の加速度を記録した範囲の面積を Δv とみなす方法である。また Fig. 2 のように加速度波形の正と負が逆転した時刻を基準とする方法も考えられる(ゼロクロス面積)。このように加速度波形を基準にすると、 Δv を求める範囲を決定する方法が 2 通り存在する。

一方、加速度波形を元に Δv を求めるのではなく、時系列速度波形 v から直接 Δv を求めることにより、 Δv の値の正確性が向上すると考えられる。これは Fig. 3

のように、速度の正負が逆転した時刻を境界とし、速度の極大値及び極小値を求め(ゼロクロスピーク)、その後、極小値から次の極大値の速度の差を、 Δv として計算する方法である。

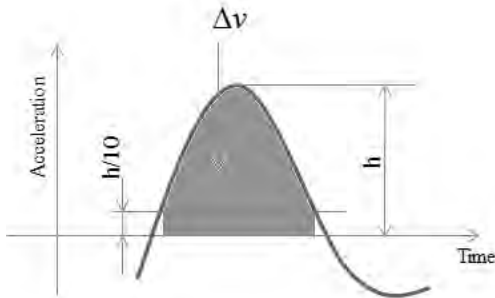


Fig. 1 Schematic diagram of one-tenth peak value method.

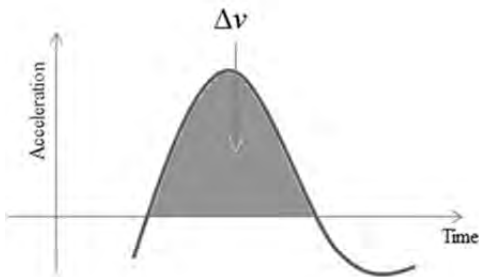


Fig. 2 Schematic diagram of zero cross acceleration area method.

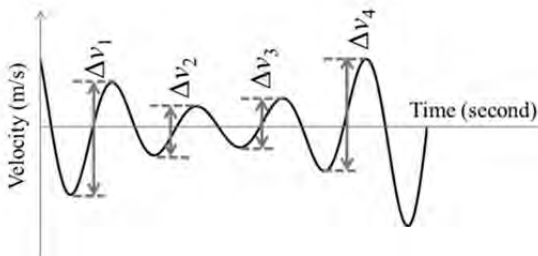


Fig. 3 Schematic diagram of velocity zero cross peak method.

しかしながら、筆者らが知る限り運搬車両の荷台上で衝撃が発生した際の v を求めた例は存在しない。そこで本研究では、一般に使用されている加速度計を用いて v を求め、そこからゼロクロスピーク法より Δv を推定した。

2. 理論

2.1 時系列積分法の問題点

一般に加速度 a から速度 v を計算する場合、加速度を時間軸上で積分する方法が考えられ、

$$v(t) = \int_{-\infty}^t a(\tau) d\tau \quad (1)$$

となる。

加速度が離散値で与えられた場合、台形則による積分により、速度 v_i は

$$v_{t+\Delta t} = v_t + (a_t + a_{t+\Delta t}) \frac{\Delta t}{2} \quad (2)$$

で計算することができる。ただし a_i は時刻 t で記録された加速度、 Δt はサンプリング周期である。

しかしながら式(2)による計算では、現実の振動とは異なるトレンド(ドリフト)が生じることが知られている^{6), 7)}。これは加速度計から得られる値にはノイズが含まれており、積分することにより低周波数ノイズが相対的に強調されてしまうことが原因とされている。そのため式(2)では十分な精度で速度を計算することができない。

2.2 ローカットフィルタを用いた積分手法

地震工学などで用いられているフーリエ変換とローカットフィルタを用いた速度推定手法⁷⁾は以下の通りである。

まず加速度にフーリエ変換を行うと

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)e^{-2i\pi ft} dt \quad (3)$$

となる。 $A(f)$ より速度のフーリエ変換 $V(f)$ を求めるために、周波数領域で積分すると

$$V(f) = \frac{A(f)}{2i\pi f} \quad (4)$$

となる。さらにドリフトの原因となる低周波振動を除去するために、 $V(f)$ にローカットフィルタ $H(f)$ による補正を行い、

$$V'(f) = H(f)V(f) \quad (5)$$

とする。今回 $H(f)$ は地震振動で使用されている3次のバターワースフィルタを用いた。3次のローカットバターワースフィルタのラプラス伝達関数 $H(s)$ は

$$H(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^3}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^3 + 2\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + 2\frac{s}{\omega_c} + 1} \quad (6)$$

となる⁸⁾。ただし ω_c はカットオフ角周波数である。ラプラス伝達関数 $H(s)$ をフーリエ伝達関数 $H(f)$ に書き直す。式(6)の右辺に $s = 2i\pi f$ 、 $\omega_c = 2\pi f_c$ を代入して整理すると $H(f)$ は

$$H(f) = \frac{1}{1 - 2i\left(\frac{f_c}{f}\right) - 2\left(\frac{f_c}{f}\right)^2 + i\left(\frac{f_c}{f}\right)^3} \quad (7)$$

となる。ただし f_c はカットオフ周波数である。

式(5)で求めた $V'(f)$ に対して逆フーリエ変換を行うと、

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V'(f)e^{2i\pi ft} dt \quad (8)$$

となり、 v を算出することができる。比較のため、ローカットフィルタを用いなかった速度波形

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V(f)e^{2i\pi ft} dt \quad (9)$$

も計算した。

またローカットフィルタの加速度波形に対する影響を調べることを目的として、 $A(f)$ に $H(f)$ を適用して

$$a_L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)A(f)e^{2i\pi ft} dt \quad (10)$$

とした。

3. 実験

3.1 目的

式(4)のカットオフ周波数 f_c の影響を検証することを目的として、振動試験を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 振動試験

Fig. 4に実験の模式図を示す。加速度計 DER-1000(神栄テストマシナリー)を、振動試験装置 i210(IMV)の上に固定し、上

下 1 軸方向に加振した。DER-1000 のサンプリングの周期は 0.25 ms で振動を計測した。振動は 4 種の異なる周波数に設定したランダム振動とした。

目標とした加速度 PSD の条件を Fig.5(a) に示す。Test1 の振動条件は JIS Z0232:2004、附属書 A の加速度 PSD を目標値に設定した。また Test2 は Test1 の PSD を 1 Hz、Test3 は Test1 の PSD より 2 Hz、Test4 は Test1 の PSD より 3 Hz、高周波になるようにそれぞれ設定した。また各 Test の目標の PSD の値が $1.15 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ となる卓越周波数の最小値を、それぞれ $f_{L1} \sim f_{L4}$ と称す。

得られた加速度は、式 (2) 及び 2.2 のローカットフィルタを用いた積分手法で速度を計算した。なお式(7)の f_c は 0.1 ~ 9.9 Hz の間で 0.1 Hz 刻みで設定し、それぞれ速度を計算した。

3.2.2 カメラによる速度の取得方法

基準となる速度を計算することを目的とし、ビデオカメラ(JVC GZ-E355-T)の動画から、振動台の速度を計算した。Fig. 4 のように加速度計の側面に 1.5 cm × 1.5 cm の正方形の赤い目印を設置し、振動試験中の目印の上下方向の動きをビデオカメラで撮影した。動画のサンプリング周期は 6.67 ms とした。撮影した動画は画像処理を行い、目印に相当する赤色の部分のみを抽出した。抽出した目印の上下方向の重心位置を算出し、加速度計の変

位 x とした。なお、動画解析には画像処理ライブラリー OpenCV 3.1 及び Scikit-image 0.11 を用いた。

x より速度 v は

$$v_t = \frac{x_{t+\Delta t} - x_{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (8)$$

で計算した。

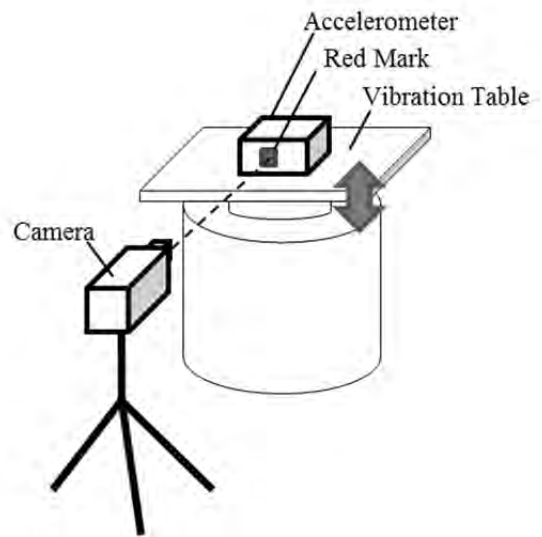


Fig. 4 Schematic diagram of vibration test.

3.2.3 評価方法

加速度計の速度の正確性は、カメラの速度との一致度で評価を行った。

速度を計算後、全試験時間内の速度の相対度数分布を計算した。なお度数分布の階級幅は 0.01 m/s 刻みで設定した。

また評価値 E は

$$E = \sum_k |P_k - Q_k| \quad (9)$$

で定義した。この E が小さいほどカメ

ラの速度と加速度計の速度波形の差が少なく、加速度計の速度が正確と考えられる。ただし P_k は加速度計の速度の相対度数、 Q_k はカメラの速度の相対度数である。

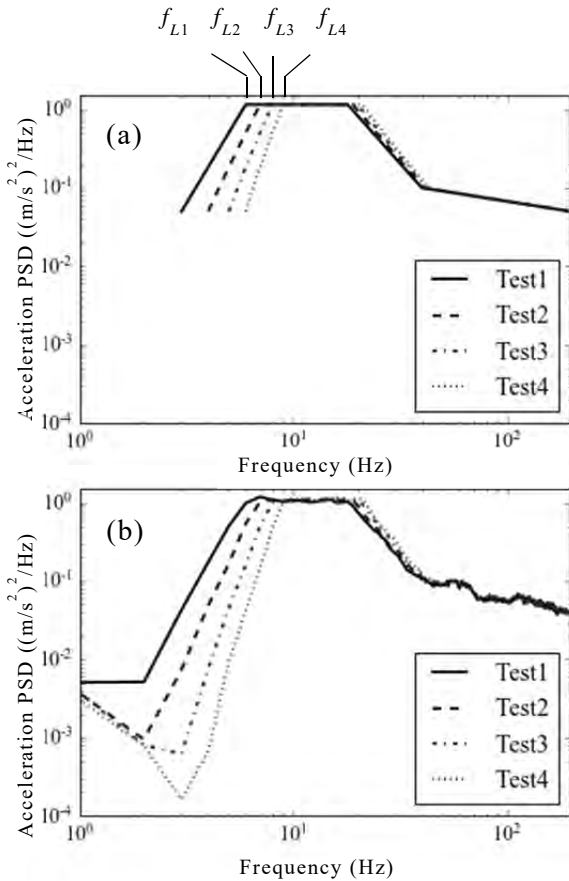


Fig.5 Acceleration PSD
(a)Target PSD (b) Measured PSD.

3.2.4 速度変化の計算方法

Δv は得られた速度波形と Fig. 3 で示したゼロクロスピーク法より計算した。今回は Δv として極小値から極大値の差を採用し、極大値から極小値の変化は採

用していない。また比較のため、加速度波形より Fig. 2 のゼロクロス面積法でも Δv を計算した。今回はゼロクロスピーク法と整合性を取るため、加速度の値が正を記録した面積のみを Δv として計算した。

3.3 結果と考察

Fig. 5(b) に実測の PSD 形状を示す。実測の PSD は目標の PSD とほぼ同様の傾向の PSD 形状が得られていることが分かる。また実測の PSD では、目標の PSD より低周波数領域でも振動成分が存在しているが、目標周波数で定義された周波数領域の PSD と比較して小さな値であるため、これらの低周波数領域の振動はほとんど存在していなかったと推測される。

Fig. 6 に実測の加速度波形を示す。この加速度波形を式(2)の台形則で計算した結果を Fig. 7 に、ローカットフィルタを用いた積分手法($f_c=1.0$ Hz)で計算した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 7 より台形則で計算した速度波形は、大きく蛇行しており、ドリフト現象が発生していることが分かる。振動台の性質より、例えば(b)の 20 ~ 120 s の間のように 1 分以上にわたって上昇トレンドが続くことは考え難い。すなわち台形則では速度波形を正しく計算できないと推察される。それに対して Fig. 8 のローカットフィルタを用いた積分手法では、どの振動でもドリフト

現象は発生していないことが分かる。

式(9)で計算した速度波形を **Fig. 9** に示す。この速度波形は台形則で計算した **Fig. 7(a)**の速度波形とよく似たドリフト現象が発生した。このことより、ローカットフィルタの導入により、ドリフト現象が抑制されたと推察される。

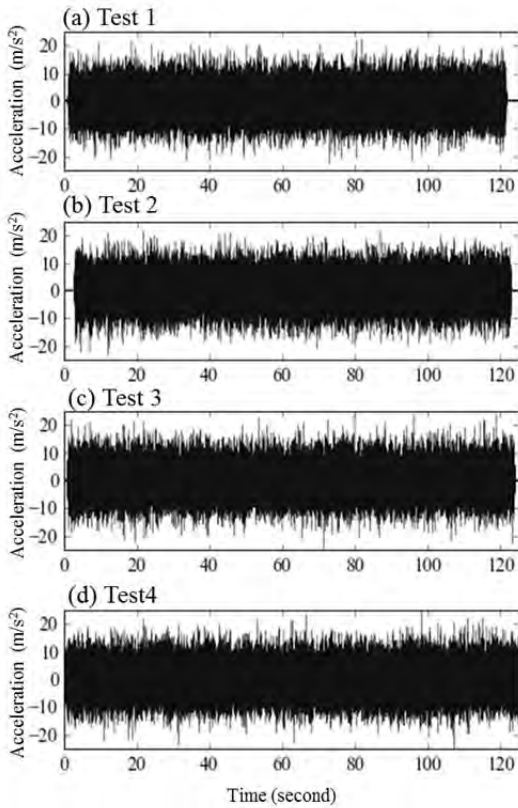


Fig. 6 Acceleration time history.

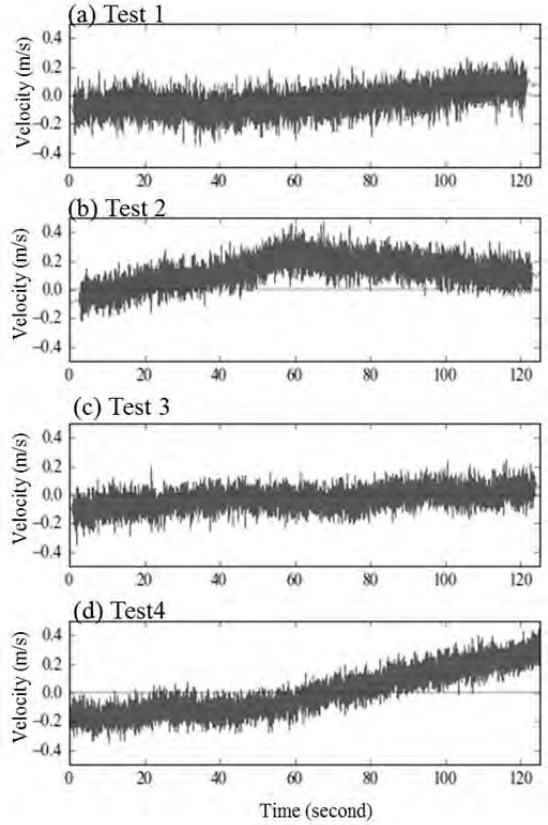


Fig. 7 Velocity time history calculated by trapezoidal rule.

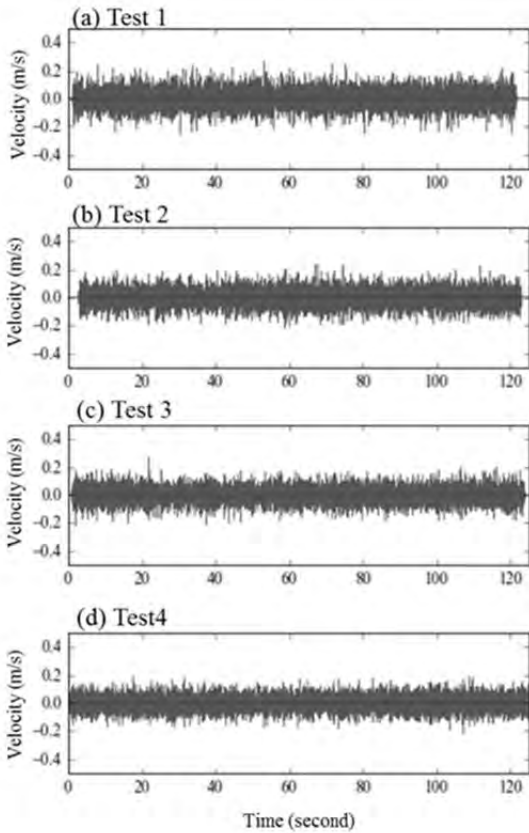


Fig. 8 Velocity time history calculated by flourier transform and integration method ($f_c = 1.0$ Hz).

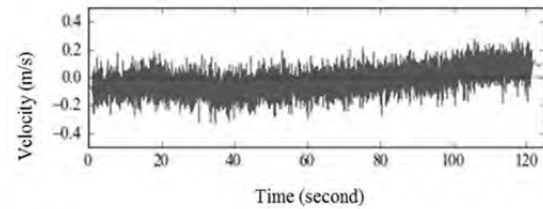


Fig. 9 Velocity time history of Test1 calculated by flourier transform and integration method without low cut filter.

Fig. 10 に Test1 の加速度よりローカットフィルタを用いた積分で計算した速度波形とカメラの変位より計算した速度波

形のうち、振動開始から 10 秒間の波形を示す。また Test 1 の目標 PSD である JIS Z0232:付属書 A のランダム振動試験は実行に必要な速度の片側振幅は 0.21 m/s とされており、この片側振幅を図中に点線で示した。 f_c が 0.1 Hz の Fig. 10 (a) 及び 1 Hz の (b) の速度波形は、カメラから得られた速度波形 (d) と似た形状をしており、片側振幅で 0.21 m/s に達している。それに対して、Fig. 10 (c) の f_c が卓越周波数の最小値 f_{L1} と等しい 6.0 Hz の速度波形では、カメラの速度波形に比べて明らかに振幅の大きさが小さくなっていることが分かる。

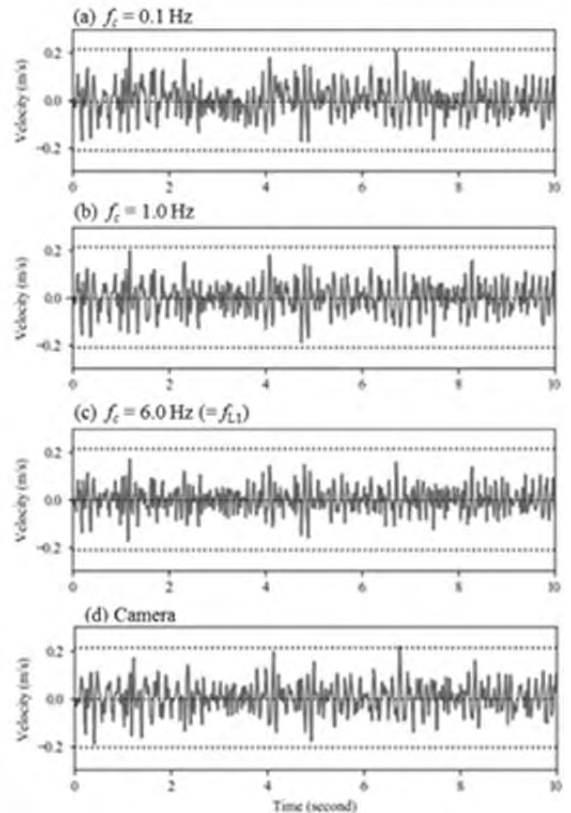


Fig. 10 Velocity time history of Test1.

Fig. 11 に Test1 の速度の相対度数分布 P_k 及び Q_k を示す。 f_c が 0.1 Hz の Fig. 11 (a) と 1.0 Hz の (b) では、加速度計の度数分布 P_k とカメラの度数分布 Q_k で大きな傾向の違いは存在しない。それに対して f_c が 6.0 Hz の (c) では、相対度数分布 P_k で高い速度の瞬時値を記録した割合が Q_k と比較して大きく減っていることが分かる。

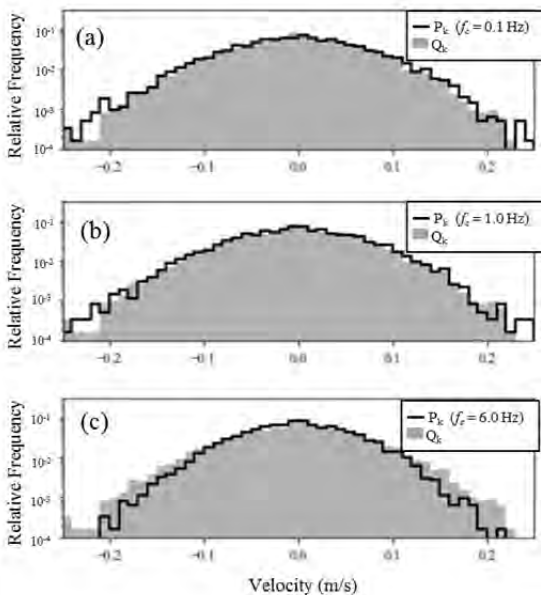


Fig. 11 Relative frequency distribution of velocity of Test1.

Fig. 12 に f_c を変化させた時の評価値 E の影響を示す。 f_c が増加して、卓越周波数の最小値に近づくにつれ、評価値 E が上昇して、カメラの速度と加速度計の速度の一致度が減少していることが分かる。これは f_c が卓越周波数に近づくとき、必要

な振動情報までカットしてしまったことに起因する。卓越周波数に f_c が到達する前に、評価値 E が上昇を始めるのは、今回の試験条件では卓越周波数より低周波数側でも振動成分が多く含まれていたためと推測される。

また、 f_c が低周波数になると、評価値 E が上昇し、カメラの速度と加速度計の速度の一致度が減少していることが分かる。これは、 f_c が低下するにつれて、低周波数ノイズの含まれる割合が増加したためと推測される。

以上より f_c は、PSD の成分が十分に小さくなった値以下で設定する必要がある一方で、あまりにも小さな f_c を設定するとドリフト成分の影響が大きくなる傾向があるため、低周波数側に設定しすぎるのも良くないことが判明した。

Fig. 13(a) に Test1 の記録した加速度波形、(b) に f_c が 1 Hz の時の加速度波形を示す。(a) と (b) を比較すると、加速度波形はほとんど一致していることが分かる。

Fig. 14 に Test1 へ式 (10) のローカットフィルタを適用した加速度波形 a_L の自乗平均平方根(RMS)と f_c の関係を示す。 f_c の値が小さい時には、RMS の値はほぼ一定である。一方 f_c の値が大きくなると、RMS の値が低下し始めることがわかる。これは Fig. 12 の評価値 E が上昇を始めるよりも小さな f_c であった。

以上より速度波形の一致度と加速度データの一貫性を考慮すると、RMS の値が

減少をし始めるよりも小さく、かつなるべく大きな値に f_c を設定する必要があると考えられる。

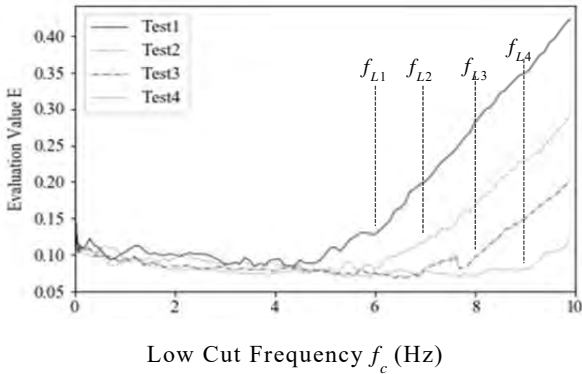


Fig. 12 The effect of low cut frequency f_c on the evaluation Value E .

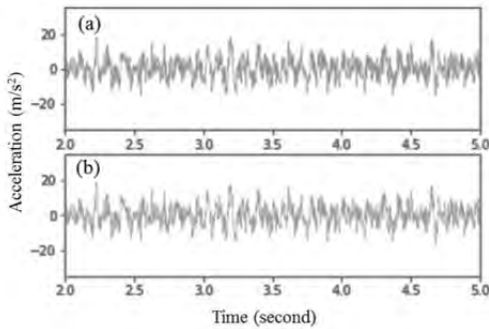


Fig. 13 Acceleration time history of Test1
(a) measured (b) low cut filter ($f_c = 1.0$ Hz).

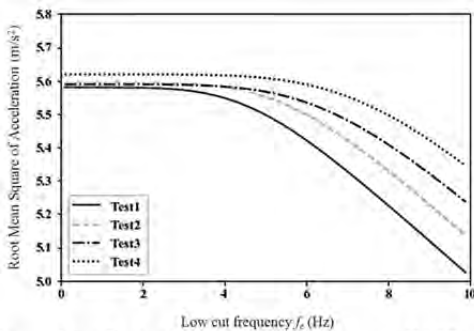


Fig. 14 Relationship between RMS of acceleration and low cut frequency f_c .

Test1 より計算した Δv のヒストグラムを **Fig. 15** に示す。ただしゼロクロスピーク法に使用した v は、 f_c が 1.0 Hz のローカットフィルタを用いた積分手法で計算したものである。計算した Δv の値は、ほとんど 0.42 m/s 以内であることが分かる。これは JIS Z0232:附属書 A のランダム振動試験に必要な両側振幅が 0.42 m/s であることから、適当な値であると推察される。また速度のゼロクロスピークと比較すると加速度のゼロクロス面積法の Δv は、小さい値を多く記録していることが分かる。

この原因について考察するため、**Fig. 16** に Test1 の v ($f_c=1.0$ Hz) と加速度データの内、10 s 付近から 0.2 s 間のみ抜き出した。**Fig. 16(a)** の v では、速度の正負が入れ替わっている場所(ゼロクロス)は 5 ヶ所存在することが分かる。一方で、**Fig. 16(b)** の加速度波形は高周波の波の影響で **Fig. 16(a)** と比較して多くのゼロクロスが存在している。この高周波数の波により、**Fig. 16(a)** の速度波形には大きな影響がないにも関わらず、短時間だけ加速度の正負が入れ替わる現象が発生している。すると加速度のゼロクロス面積法では、本来であれば一つの衝撃として評価すべきものを別々のものとしてカウントしてしまう。そのため、加速度のゼロクロス面積法では Δv を過少評価すると推察される。また **Fig. 1** の 1/10 ピーク法で計算される Δv は、ゼロクロス面積法と

比較して小さな値となるので、さらに Δv を過小評価すると推察される。

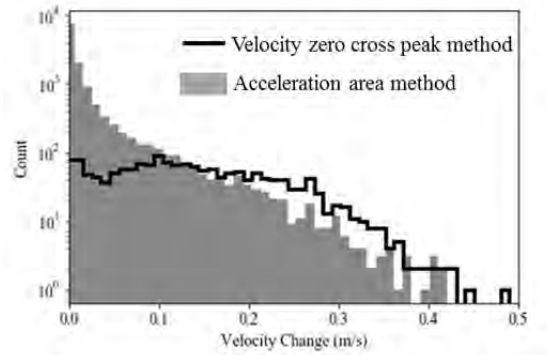


Fig. 15 Histogram of velocity change during test1.

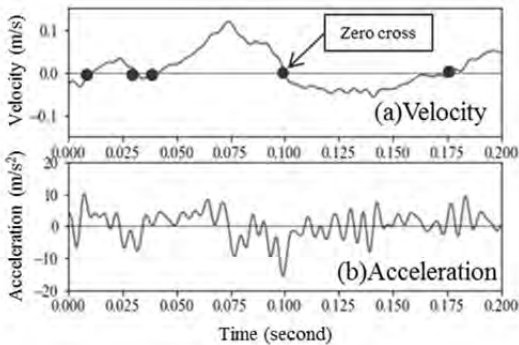


Fig. 16 Velocity and acceleration time history of Test1.

4. 考察

本研究ではローカットフィルタを導入することにより、低周波数ノイズに起因するドリフト現象を抑えることに成功した。一方でローカットフィルタを導入することにより、実輸送の情報も一部欠損することが考えられる。ローカットフィ

ルタで欠損する情報について考察する。

運搬車両荷台で発生する上下方向の振動は、道路路面の上下方向の形状と運搬車両のサスペンション等の応答で発生するとされている⁹⁾。そのため、荷台振動の周波数 f は、道路路面の空間周期 T と対応して考えることができる。輸送車両の走行速度を v_r とすると

$$T = \frac{v_r}{f} \quad (11)$$

となる。例えば、 v_r が 20 m/s (=時速 72 km/h)の荷台振動 0.5 Hz に対応する路面の空間周期は 40 m となる。すなわち 0.5 Hz のローカットフィルタで欠損する情報は、周期が 40 m 以上の路面形状が主となると推察される。このような長周期の路面形状は、登坂、下り坂等に相当すると考えられ、包装貨物に大きな影響があるとは考えにくい。そのためローカットフィルタで処理しても、荷に影響を及ぼす速度変化情報は欠損せずに残すことが可能であると推察される。

5. 結論

本研究により以下のことが判明した。

- (1) 台形則による時系列積分を行うと、低周波数成分に起因するドリフト現象が発生して、正確な速度波形を得ることができなかった。
- (2) ローカットフィルタを用いた速度推定手法によりドリフト現象を抑制し、

カメラから計算した速度波形と近い速度波形を得ることができた。

- (3) ローカットフィルタのカットオフ周波数の値を大きくし過ぎると、必要な振動情報までカットしてしまう。そのため、カットオフ周波数は、振動が多く含まれている周波数領域以下に設定する必要がある。
- (4) 速度波形からゼロクロスピーク法で速度変化を求めた場合と比較して、加速度波形からゼロクロス面積法で求めた場合は、高周波の影響で速度変化の大きさを過小評価する傾向があると推察される。

今後の課題としては、本研究手法を用いて実輸送で得られる速度波形に関する解析と、跳ね上がり衝撃試験の精度の向上があげられる。

<参考文献>

- 1) Julien Lepine, Vincent Rouillard, Michael Sek, Review Paper on Road Vehicle Vibration Simulation for Packaging Testing Purposes, Packag. Technol. Sci., **28(5)**, p672 (2015).
- 2) 細山亮,中嶋隆勝,尖度を考慮した非ガウス型ランダム振動生成法,日本包装学会誌, **20(1)**, p.27 (2011).
- 3) JIS Z200 包装貨物-性能試験方法一般通則 解説 (2013).
- 4) 北澤裕明,佐藤達雄,長谷川奈緒子,李艶傑,石川豊,蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築(第1報),日本包装学会誌, **21(2)**, p.125 (2012).
- 5) 飯田恭平,振動試験機による包装貨物の跳ね上がり再現,日本包装学会 第25回年次大会研究発表会予稿集, p.86 (2016).
- 6) 関屋秀彦,木村健太郎,丸山収,三木千壽,橋梁の活荷重応答計測に必要なS/N比に関する研究,構造工学論文集, **62A**, p174 (2016).
- 7) 後藤尚男,亀田弘行,杉戸真太,今西直人,デジタルフィルターによるSMAC-B2加速度計記録の補正について,土木学会論文報告集, **277**, p57 (1978).
- 8) 柿下毅,笹川巖,小林正志,永井章,浜田信生,気象庁87型電磁式強震計記録を用いた気象庁マグニチュード決定式の評価,地震 第2輯, **45(3)**, p263 (1992).
- 9) Vincent Rouillard, Generating Road Vibration Test Schedules from Pavement Profiles for Packaging Optimization, Packag. Technol. Sci., **21(8)**, p501 (2008).

(原稿受付 2018年8月3日)

(審査受理 2018年10月30日)