

輸送環境における 3 軸振動成分の相関解析

細山 亮*、津田 和城*

Correlation Analysis of Three-Axis Vehicle Vibration in Transport Environment

Akira HOSOYAMA* and Kazuki TSUDA*

3 軸同時振動試験は、単軸振動試験に比べて実輸送に近い振動を再現できるため、より現実に即した振動試験を実施することができる。一方で、3 軸同時振動試験は、加速度の各軸間の相関といった単軸振動試験にはない特性を考慮する必要があるため、3 軸同時振動試験の試験理論を構築するためには、実輸送中に 3 軸間の振動にどのような相関があるのか解明することが求められる。本研究では、3 軸同時振動試験の試験理論構築のための基盤となる知見を得るために、トラック（最大積載量 3550kg）の荷台振動を計測し、鉛直、進行および左右方向の各軸間の相関を解析した。相関解析の結果から、上下方向振動の尖度が高くなる区間では、衝撃的な加速度が同期して発生する傾向が認められた。本研究で明らかになった各軸間の振動加速度波形の相関は、3 軸同時振動試験の試験理論を構築するための基礎的知見として利用できるものと期待できる。

Three-axis simultaneous vibration testing can replicate real-world vibration more accurately than single-axis vibration testing. On the other hand, three-axis simultaneous vibration testing requires consideration of its unique characteristic such as a correlation between three axes, which does not need to be considered in single-axis vibration testing. Therefore, in order to develop a theory for performing three-axis simultaneous vibration testing, it is required to clarify a correlation between three axes during real transportation. This study aims to gain underlying knowledge for three-axis simultaneous vibration testing, and analyzes a correlation between vertical, lateral, and longitudinal acceleration measured on a truck bed (Maximum load capacity: 3550kg). From the results of correlation analysis, it was made clear that impulsive acceleration tended to be in sync between three axes in the range where a kurtosis value of vertical acceleration is high. The correlation gained from this study is expected to be utilized as underlying data for developing a three-axis simultaneous random vibration testing method.

キーワード：輸送環境、3 軸同時振動試験、相関解析、尖度、加速度

Keywords : Transport Environment, Three-Axis Simultaneous Vibration Testing, Correlation Analysis, Kurtosis, Acceleration

* 地方独立行政法人 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

包装貨物振動試験は、振動に対する包装内容品の保護性を事前に確認する試験であり、現在、ランダム振動試験が一般的に実施されている。しかし、振動試験を実施した場合でも、過剰包装となったり、逆に包装内容品が破損するといった問題が発生する場合があります、振動試験の精度向上が求められている。このような問題が発生する原因の一つとして、現状のランダム振動試験は単軸試験であるのに対し、実輸送では3軸同時に振動が発生することが挙げられる。そこで、3軸同時振動試験を実施することで、振動試験の精度が飛躍的に向上すると考えられており、先行研究^{1)~5)}では、様々な地域においてトラックの荷台振動が計測され、鉛直方向、進行方向および左右方向の加速度に対してパワースペクトル密度が調査されている。また、Bernadら⁶⁾は、実輸送で生じる振動は厳密には並進運動と回転運動が複合した6自由度の運動となるため、鉛直方向、進行方向および左右方向の加速度だけでなく、ピッチング、ヨーイングおよびローリングについてスペクトル解析を行っている。一方で、3軸同時振動試験では3軸同時に加振するため、単軸振動試験には必要とされない各軸間の相関を考慮した試験理論が必要になると考えられる。しかしながら、実輸送中にどのような相関があるのかについては明らかにされておらず、3軸同時振動試験の試験理論構築に向けた研究は進んでいない。

これまでに、路面の劣化状況を把握する研

究において、道路の凹凸を検出するために、車両走行中に発生する3軸の加速度の相関を利用した方法が提案されている^{7), 8)}。具体的には、車両が段差を乗り越えた際に、衝撃的な加速度が鉛直および進行方向に同時に生じることが明らかにされている。この鉛直および進行方向の加速度の同期性を利用して道路の凹凸が検出されている。逆に言えば、道路の凹凸による影響によって、3軸加速度の各軸間に何らかの相関が生じることが推測できる。しかしながら、通常の輸送環境では、段差が絶えず続くような悪路を走行することは少なく、散発的に凹凸がある箇所を走行する 경우가ほとんどであるため、輸送環境全体としてみた場合、3軸加速度の各軸間にどのような相関がみられるか明らかではない。

本研究では、まずは回転運動が無視できるほど小さいと仮定して並進運動のみを対象として扱い、トラックの荷台に生じる3軸加速度を計測する。鉛直方向、進行方向および左右方向の加速度から各軸間の相関を解析し、輸送中における相関を解明する。本研究で得られた知見は、3軸同時振動試験の試験理論を構築するための基礎的知見として利用できると考える。

2. 台車による事前実験

トラックの輸送環境解析を行う前に、まず、道路の凹凸が3軸加速度に及ぼす影響を大まかに把握するために、段差がない路面および段差がある路面で台車走行実験を行った。ここでは、段差がない路面は、砂利の混ざっ

たランダムな路面とし、段差がある路面は、Fig.1 に示す直径 6mm のワイヤーを平らなコンクリートの床に設置した路面とした。

Fig.2 および Fig.3 に、段差がない路面および段差がある路面での実験の様子をそれぞれ示す。実験では、車輪の直径が約 125mm、トレッドが約 400mm、ホイールベースが約 600mm の台車 (350KN、TRUSCO) を用い、この台車の荷台の中央部に、Fig.4 のように輸送環境記録計 (IMV 株式会社製 “タフロガー

TR-1000”) を設置した。この状態でおおよそ 1.5km/h で約 8m 走行した際に生じる 3 軸加速度を 1280Hz のサンプリング周波数で測定した。なお、本研究では以後、進行方向を x 軸、横方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とする。

Fig.5 および Fig.6 に、段差のない路面および段差がある路面を走行した際に得られた加速度波形をそれぞれ示す。Fig.5 から、段差の特徴を有する波形、すなわち衝撃的な加速度波形は生じず、衝撃的な加速度に関する各軸

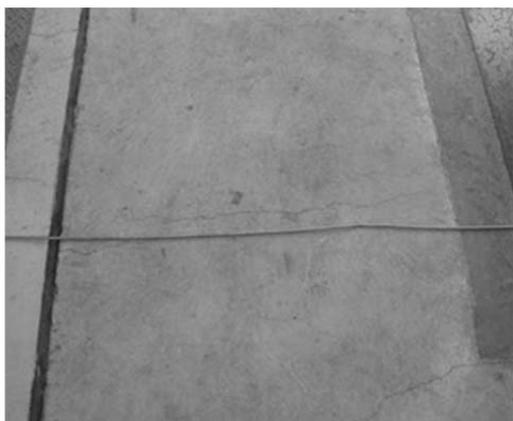


Fig. 1 A metal wire used to generate a bump



Fig. 3 A condition of an experiment on a road surface with a bump.



Fig. 2 A condition of an experiment on a random road surface.

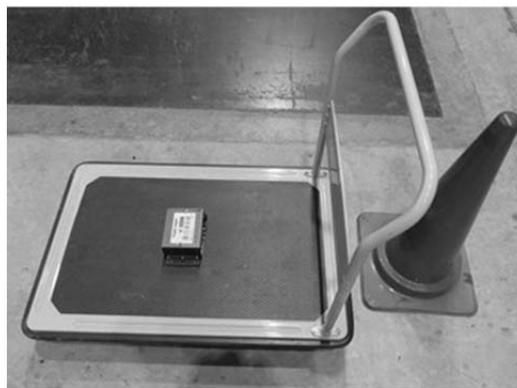


Fig. 4 Measurement equipment mounted on a hand cart.

波形は生じず、衝撃的な加速度に関する各軸間の相関はみられない。それに対し、Fig.6から、段差がある路面を走行した場合には、衝撃的な加速度波形が3軸同時に2回生じていることがわかる。具体的には、1つ目の衝撃的な加速度波形が12.3s付近（Fig.6の①）で生じ、2つ目の衝撃的な加速度波形が13.7s付近（Fig.6の②）で生じている。1つ目と2

つ目の衝撃的な加速度波形の発生時刻には、1.4sほどの時間のずれがあるが、これを距離に換算すると約625mm（ $=1.5\text{km/h} \times 1.4\text{s}$ ）となる。この値は台車のホイールベース600mmに近い値であるため、1つ目の衝撃的な加速度波形（Fig.6の①）は、台車の前輪が段差を乗り越える際に生じたもので、2つ目の衝撃的な加速度波形（Fig.6の②）は台車の後輪が

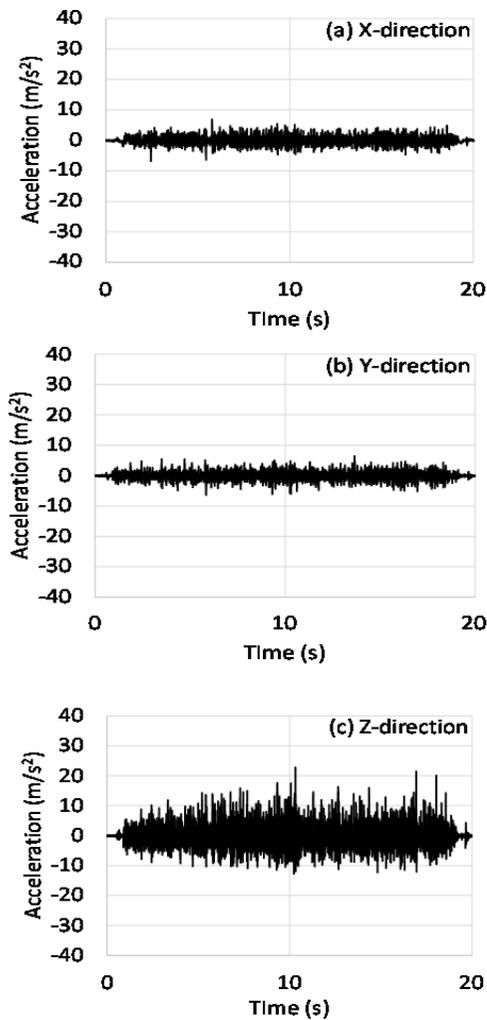


Fig. 5 Acceleration time history data on a random road surface: (a) x-direction, (b) y-direction, (c) z-direction.

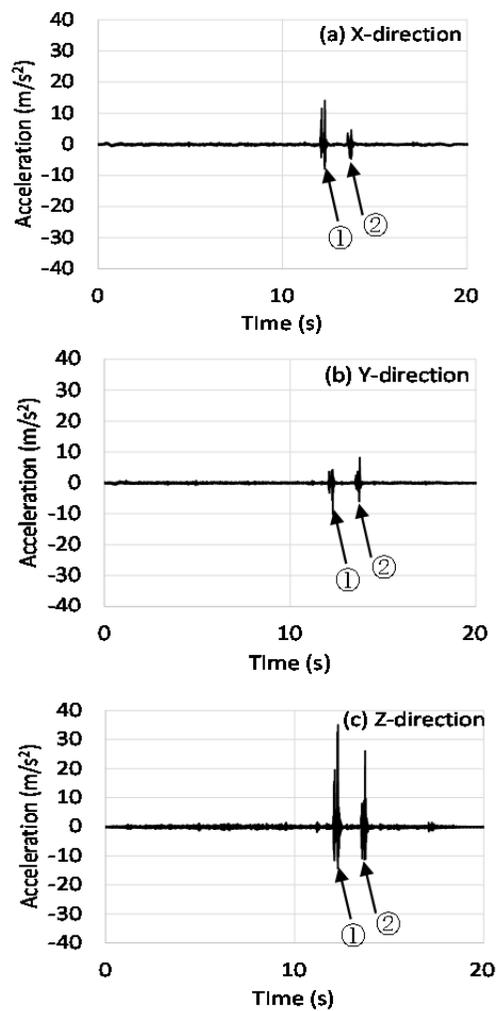


Fig. 6 Acceleration time history data on a road surface with a bump: (a) x-direction, (b) y-direction, (c) z-direction.



Fig. 7 Truck used in this study.

段差を乗り越える際に生じたものであると考えられる。

ここで、1つ目の衝撃的な加速度波形 (Fig.6 の①) に着目すると、x 軸、y 軸、および z 軸について加速度の絶対値が最大となる時刻は、それぞれ 12.292s、12.297s、12.292s であり、最大でも時間差は 0.005s である。また、2つ目の衝撃的な加速度波形 (Fig.6 の②) に着目すると、x 軸、y 軸、および z 軸について加速度の絶対値が最大となる時刻は、それぞれ 13.718s、13.755s、13.727s であり、最大でも時間差は 0.037s である。以上のことから、x 軸、y 軸、および z 軸について加速度の絶対値が最大となる時刻には、時間差があるものの、その値は小さく、衝撃的な加速度がほぼ同時に発生するものと考えられる。

次節では、このような衝撃加速度の発生時刻に関する相関がトラック輸送時にも同様にみられるかどうか明らかにするために、トラックの荷台振動を計測し、x 軸、y 軸および z 軸の各軸間の相関を解析する。

3. トラックを用いた荷台振動計測



Fig. 8 Measurement equipment mounted on a truck bed.

台車による実験結果では、段差を乗り越える際に、衝撃的な加速度が同時に生じる傾向があることがわかった。一方、実際のトラック輸送環境では、道路の凹凸に起因するものだけではなく、急加速や急減速、急ハンドルなどによって衝撃的な加速度が生じることが考えられる。そのため、台車の実験でみられたような相関が、トラック輸送においても同様にみられるのか明らかではない。そこで、トラックの輸送環境を調査し、衝撃的な加速度の発生時刻について各軸間の相関を解析する。輸送環境調査では、Fig.7 に示すトラック (三菱ふそうトラック・バス株式会社 “ファイター”) を使用した。このトラックは、車両総重量 4230kg (最大積載量 3550kg)、リーフサスペンション、トレッド (前) 1790mm、トレッド (後) 1665mm、ホイールベース 2910mm である。

このトラックの荷台に、Fig.8 のように輸送環境記録計 (IMV 株式会社製 “タフロガーTR-1000”) を両面テープで固定し、走行中に生

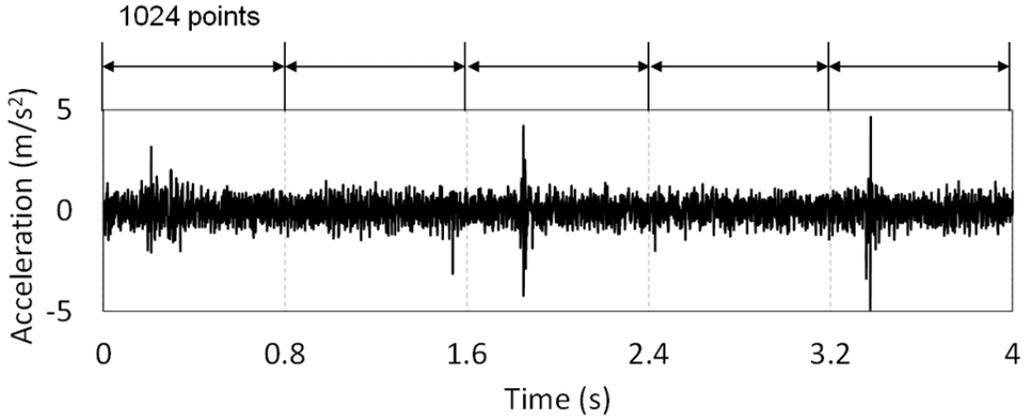


Fig. 9 Excerpt from acceleration time history data.

じる 3 軸加速度をサンプリング周波数 1280Hz の条件で計測した。走行ルートは、兵庫県尼崎市から岡山県加賀郡吉備中央町で、解析対象は山陽姫路西 IC～賀陽 IC の高速道路区間（約 100km）とした。

上記の条件で得られた 3 軸の加速度時刻歴データを、Fig.9 のように 1024 点（0.8s）ごとに分割した。それぞれの区間において絶対値が最大となる加速度（以下、ピーク加速度と呼ぶ）を探索していき、x 軸、y 軸および z 軸に対してピーク加速度が区間内のどこで発生するのか、具体的には 1024 点のデータの中の何番目に発生するのかそれぞれ求める。このように、分割した区間毎に求めた x 軸、y 軸および z 軸の値を、x 軸と y 軸、x 軸と z 軸および y 軸と z 軸の 2 次元の散布図にプロットする。具体的には、x 軸と y 軸の散布図を描く場合、縦軸および横軸に y 軸および x 軸のピーク加速度の発生時刻をそれぞれとり、各区間のデータをプロットしていく。例えば、

x 軸が m ($1 \leq m \leq 1024$) 番目、y 軸が n ($1 \leq n \leq 1024$) 番目でピーク加速度をとる場合、座標 (m,n) の位置をプロットする。x 軸と z 軸および y 軸と z 軸の散布図を描く場合についても同様の操作を行う。こうして求めたデータから、x 軸と y 軸、x 軸と z 軸、および y 軸と z 軸の発生時刻について相関係数を求める。

ここで、相関係数を求める際、ピーク加速度の発生時刻は 1 番目から 1024 番目の間で一律な確率で発生し、正規分布に従わないと考えられるため、データの分布に依存しないノンパラメトリックな指標である Spearman の順位相関係数を用いることにする。Spearman の順位相関係数とは、2 変数間の順序尺度を表す値で、1 または -1 に近いほど相関が強く、0 に近いほど相関が弱いことを示す。2 組のデータ列 $\{x_i\}(i = 1, 2, \dots, n)$ 、 $\{y_i\}(i = 1, 2, \dots, n)$ が与えられるとき、Spearman の順位相関係数は式(1)によって求めることができる。

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n ((\text{rank}(x_i) - \overline{\text{rank}(x)}) (\text{rank}(y_i) - \overline{\text{rank}(y)}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{rank}(x_i) - \overline{\text{rank}(x)})^2 \sum_{i=1}^n (\text{rank}(y_i) - \overline{\text{rank}(y)})^2}} \quad (1)$$

ここで、 r_s は Spearman の順位相関係数、 $rank(x_i)$ および $rank(y_i)$ はデータ x_i および y_i の順位であり、 $\overline{rank(x)}$ および $\overline{rank(y)}$ はそれぞれ式(2)および式(3)で表される。

$$\overline{rank(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n rank(x_i)}{n} \quad (2)$$

$$\overline{rank(y)} = \frac{\sum_{i=1}^n rank(y_i)}{n} \quad (3)$$

4. 結果と考察

4.1 ピーク加速度に関する各軸間の相関

Fig.10(a)、(b)および(c)に、ピーク加速度の発生時刻についての、x 軸と y 軸、x 軸と z 軸および y 軸と z 軸の 2 軸間の関係をそれぞれ示す。Table 1 に、それらの相関係数を示す。Table 1 をみると、x 軸と y 軸、x 軸と z 軸、および y 軸と z 軸の 2 軸間の相関係数はそれぞれ 0.27、0.24 および 0.26 と小さく、ピーク加速度の発生時刻に関してほとんど相関がないように見える。一方、Fig.10 をみると、ピーク加速度の発生時刻は、全体的にまばらに分布しているものの、図の左下から右上にかけて線形の関係が浮き出てみえることが確認できる。これは、複数の属性のデータが混在しており、相関のあるデータと相関のないデータの両方の特性が現れているためであると考えられる。

そこで、どのような属性の場合に相関が強くみられるのか明らかにするために、解析対象を絞りこみ、相関解析を行うこととした。解析対象の絞り込みに際して、道路の凹凸が相関の強さに関する大きな要因となり得る^{7), 8)}

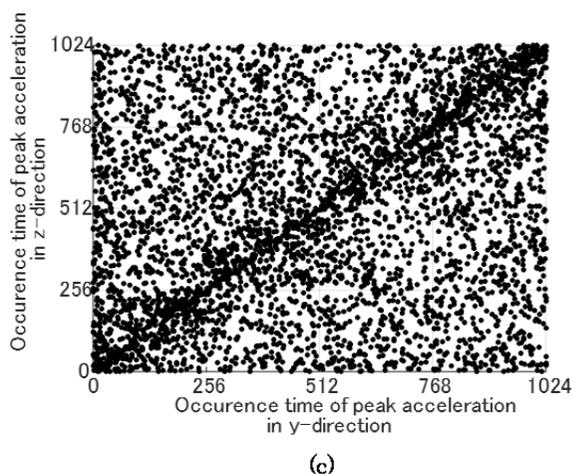
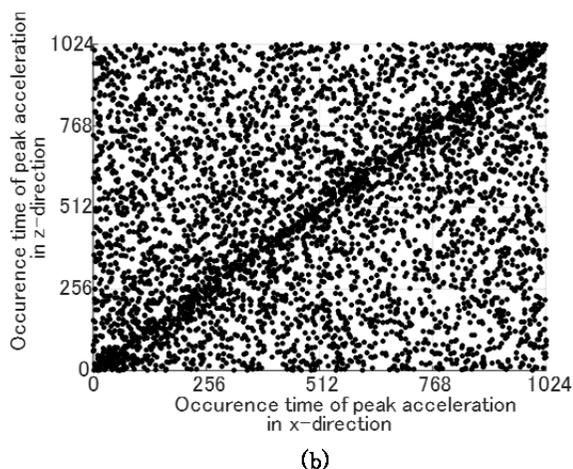
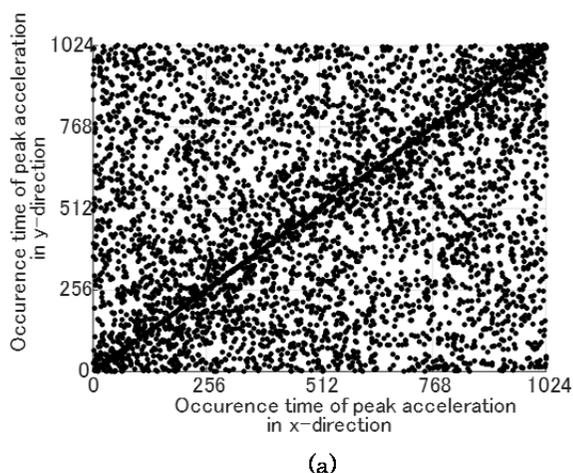


Fig. 10 Relationship between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions: (a) x-versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.

Table 1 Spearman's rank correlation coefficient between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions

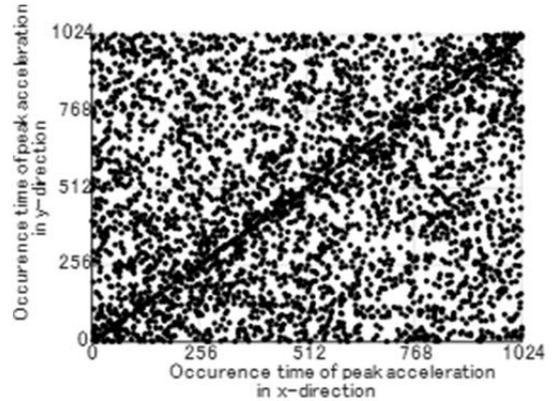
	x	y	z
x	1		
y	0.27	1	
z	0.24	0.26	1

ことから、道路の凹凸の程度を基準とすることとした。具体的には、道路の凹凸が大きくなるほど衝撃的な加速度が発生することになることから、道路の凹凸の程度をz軸の加速度の尖度で定量化した。ここで、尖度とは非ガウス分布の特徴を表す高次の統計量で、尖度が高くなるほど裾の広がりや厚い分布となり、値の大きなデータが発生することになる。いま、データ列 $\{x_i\}(i = 1, 2, \dots, n)$ が与えられるとき、尖度は以下の式で求めることができる。

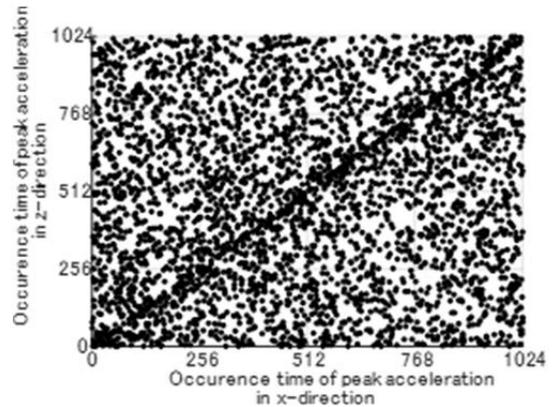
$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \quad (4)$$

ここで、 K は尖度、 \bar{x} はデータ列 $\{x_i\}$ の平均を表す。

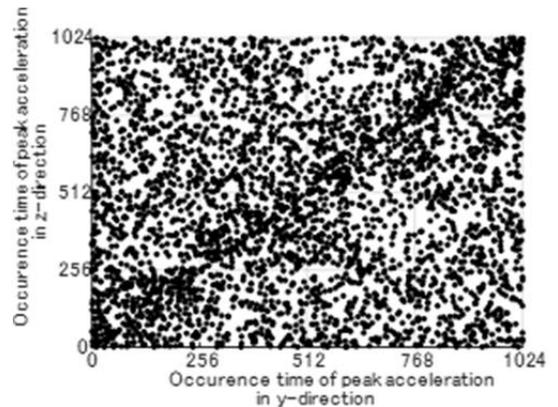
まず、衝撃的な加速度が発生しない区間における相関を明らかにするために、尖度が3より小さい区間、すなわち平らな路面と考えられる区間のデータを抽出して相関解析を行った。このときに得られた、x軸とy軸、x軸とz軸、およびy軸とz軸の関係と相関係数をFig.11およびTable2に示す。Table2の相関係数をみると、相関係数は全て0.2より小さい値となっており、Table1の全体のデータ



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Relationship between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is less than 3: (a) x- versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.

Table 2 Spearman's rank correlation coefficient between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is less than 3

	x	y	z
x	1		
y	0.19	1	
z	0.13	0.14	1

から得られた相関係数よりも小さい。したがって、衝撃的な加速度が発生しない区間では、ピーク加速度の発生時刻に関して各軸間の相関はほとんどないといえる。

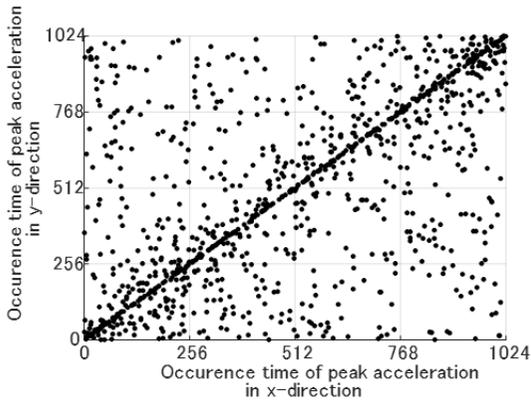
次に、衝撃的な加速度が発生する区間における相関を明らかにするために、尖度が3、4、5および6以上となる区間、すなわち凹凸のある路面と考えられる区間のデータを抽出して相関解析を行った。なお、高速道路区間全体でのx軸、y軸、およびz軸の尖度はそれぞれ47.9、7.6、10.8である。

Fig.12 から Fig.15 に、z軸の加速度の尖度が3、4、5および6以上となる区間を解析対象とした場合に得られた、x軸とy軸、x軸とz軸、およびy軸とz軸の関係をそれぞれ示す。Table 3 から Table 6 に、それらの相関係数をそれぞれ示す。Fig.12 から Fig.15 をみると、絞り込みの基準となる尖度の値が大きくなるにつれ解析対象となるデータは少なくなるが、(0, 0) と (1024, 1024) を結ぶ直線から外れた点は減少し、直線の関係が際立つようになっていくことがわかる。また、Table 3 から Table 6 をみると、解析対象を絞り込むほど相

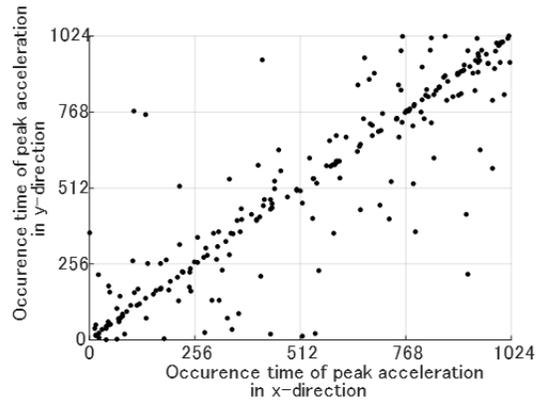
関係数が大きくなっており、ピーク加速度がx軸、y軸およびz軸に対して同時に発生するようになっていくことがわかる。

ここで、z軸の加速度の尖度が高い区間というのは、一般的に道路の凹凸が顕著にみられる区間である。したがって、道路の凹凸がある区間では3軸同時に衝撃的な加速度が発生する傾向があることがわかる。一方、z軸の加速度の尖度が低い区間というのは一般的に平坦な路面である。したがって、平坦な路面では衝撃的な加速度の3軸の同期性はほとんどみられないことがわかる。また、全データを解析対象とした場合は、凹凸のある路面と平らな路面の両方が解析対象となるため、ピーク加速度の発生時刻について相関が高いデータと低いデータが混在することになり、その結果、ピーク加速度の相関が低くなったものと考えられる。

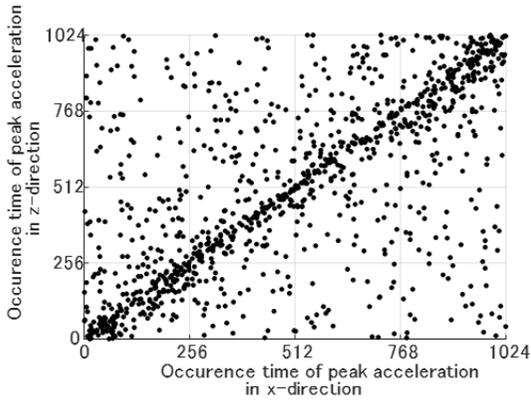
以上のことから、z軸の加速度の尖度が小さい値となる3軸同時ランダム振動試験、すなわちガウス型の3軸同時ランダム振動試験を実施する場合には、ピーク加速度の発生時刻について各軸間の相関を考慮する必要性は低いと考えられる。一方、z軸の加速度の尖度が高い値となる非ガウス型の3軸同時ランダム振動試験を実施する場合には、3軸加速度の各軸間の相関を考慮する必要があるといえる。



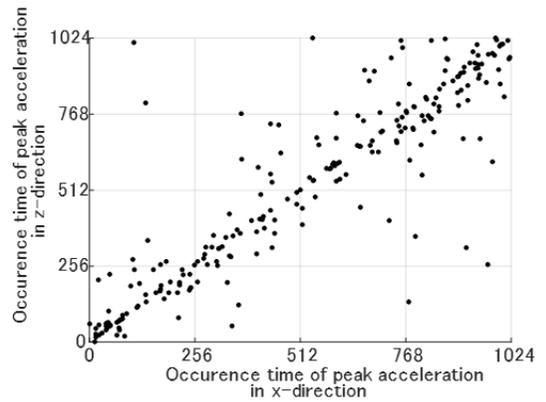
(a)



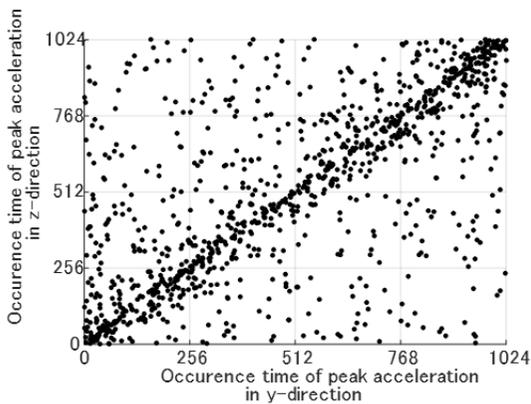
(a)



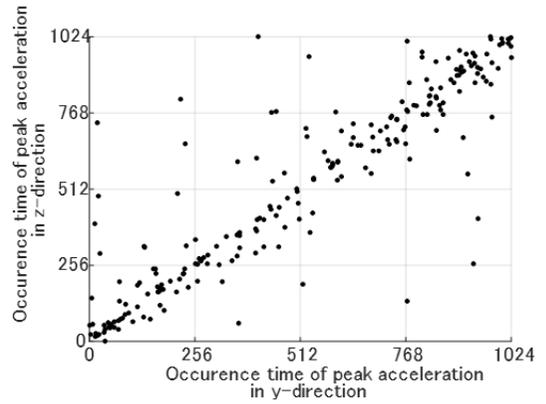
(b)



(b)



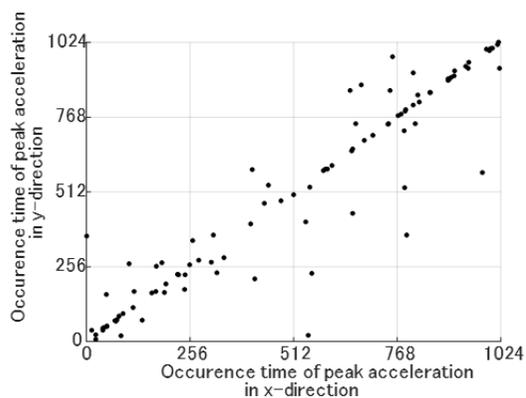
(c)



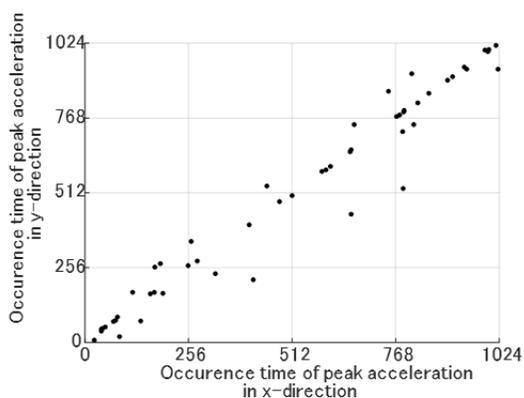
(c)

Fig. 12 Relationship between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 3: (a) x- versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.

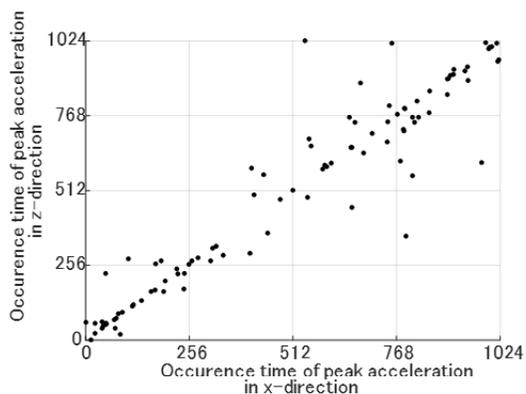
Fig. 13 Relationship between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 4: (a) x- versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.



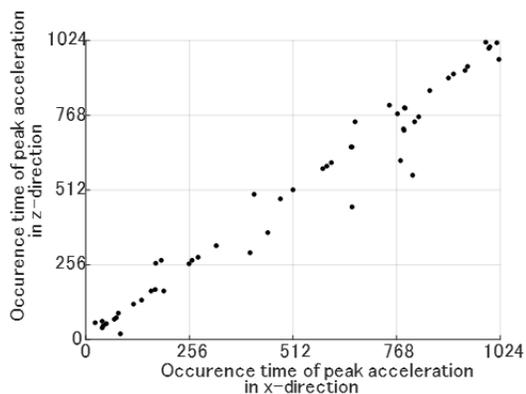
(a)



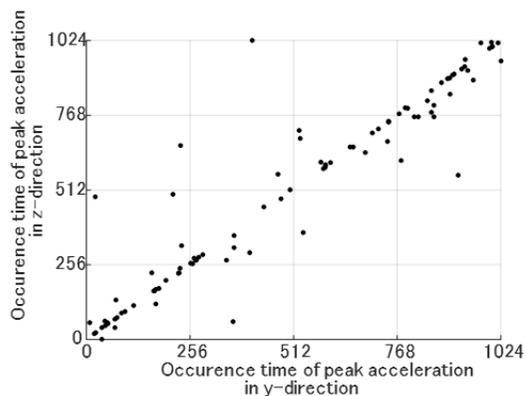
(a)



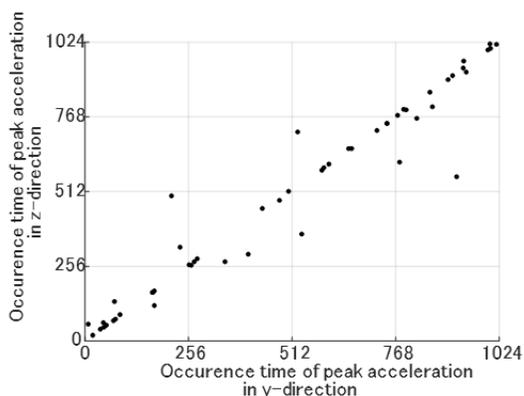
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 14 Relationship between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 5: (a) x- versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.

Fig. 15 Relationship between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 6: (a) x- versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.

Table 3 Spearman's rank correlation coefficient between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 3

	x	y	z
x	1		
y	0.56	1	
z	0.61	0.65	1

Table 4 Spearman's rank correlation coefficient between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 4

	x	y	z
x	1		
y	0.88	1	
z	0.88	0.89	1

Table 5 Spearman's rank correlation coefficient between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 5

	x	y	z
x	1		
y	0.93	1	
z	0.93	0.93	1

Table 6 Spearman's rank correlation coefficient between occurrence time of peak acceleration in x, y, and z directions in the case where kurtosis of z-direction is over 6

	x	y	z
x	1		
y	0.97	1	
z	0.97	0.97	1

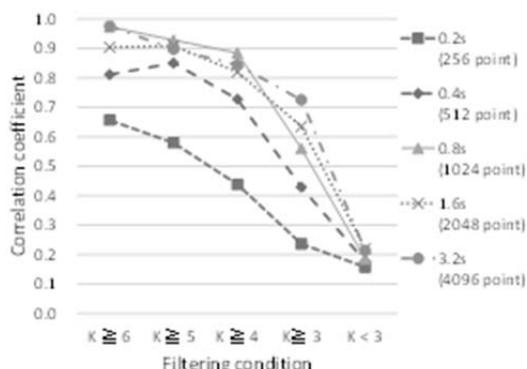
なお、本研究では高速道路区間で得られたデータを解析しているため、走行速度はほぼ一定速度（時速 80km/h 前後）である。したがって、速度の増減の影響については考慮していないため、速度の増減が各軸間の相関にどのような影響を与えるのか今後検討していく必要がある。

4.2 分割区間が相関係数に及ぼす影響

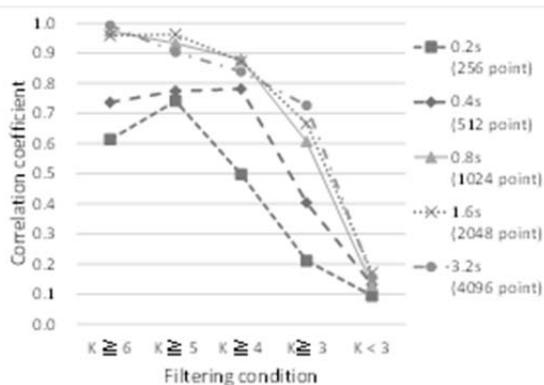
前節では、分割区間を 0.8s（1024 点）として解析を行った。本節では、分割区間が相関係数に与える影響を明らかにするために、分割区間を 0.8s（1024 点）以外に、0.2s（256 点）、0.4s（512 点）、1.6s（2048 点）、3.2s（4096 点）に区切り、尖度が 3、4、5 および 6 以上

を抽出し相関解析を行った。

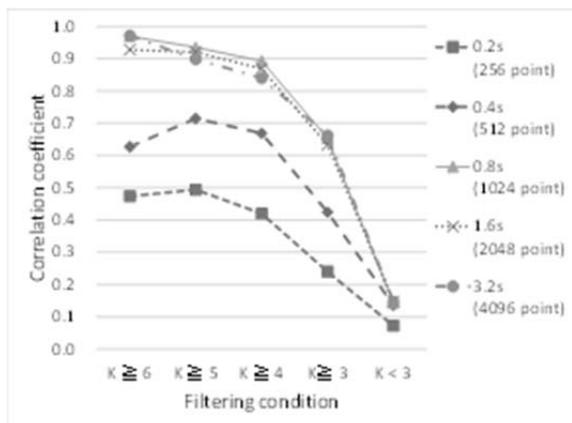
このときに得られた、x 軸と y 軸、x 軸と z 軸、および y 軸と z 軸についての相関係数を Fig.16 に示す。図の縦軸は相関係数、横軸はデータを抽出した尖度 K の条件を表している。Fig.16 から、データを抽出した尖度の条件ごとに相関係数を比較すると、分割区間が 0.8s、1.6s、3.2s の場合には、どの抽出条件においてもおおよそ同じ値が得られていることがわかる。その一方で、分割区間が 0.4s、0.2s と短くなっていくと、分割区間が 0.8s、1.6s、3.2s の場合と比べて相関係数が低くなっていくことがわかる。この理由としては、相関解析を行う分割区間が短くなるほど、各軸間の衝撃加速度の発生時刻のずれが相関係数に与



(a)



(b)



(c)

Fig. 16 Effectiveness of divided interval on Spearman's rank correlation coefficient: (a) x- versus y-direction, (b) x- versus z-direction, (c) y- versus z-direction.

える影響が大きくなるためであると考えられる。

以上のことから、分割区間をある程度長く、具体的には 0.8s 以上となるようにすれば、分割区間が相関係数に与える影響は小さくなり、ほぼ同じ相関係数が得られると考えられる。

5.結論

本研究では、実輸送中のトラックの荷台に発生する 3 軸の加速度を計測し、ピーク加速度の発生時刻に関して、軸間の相関を調べた。以下に得られた結果を示す。

- (1) 輸送経路の全データをもとに解析を行うと、ガウス型と非ガウス型のランダム振動が混在したデータとなるため、結果として、ピーク加速度の発生時刻に関する各軸間の相関は低くなる。
- (2) 鉛直方向の加速度の尖度が高い区間を解析対象とした場合、ピーク加速度の発生時刻に関する各軸間の相関は高くなる。
- (3) 非ガウス型の 3 軸同時ランダム振動試験を実施する場合には、ピーク加速度の発生時刻について各軸間の相関を考慮する必要がある。

なお、本研究の結果は 1 回の測定結果から得られたものであるため、複数回の測定を行い同様の相関があるのか今後検討が必要である。また、トラックの種類や積荷の重さ、速度、高速道路と一般道路の違い、ピーク値の大きさが相関に及ぼす影響を明らかにするこ

とも今後の課題である。

<引用文献>

- 1) S. P. Singh, J. Antle and G. Burgess、
Packaging Technology and Science, 5(2),
71-75(1992)
- 2) S. P. Singh, A. P. S. Sandhu, J. Singh and
E. Joneson, Packaging Technology and
Science, 20(6), 381-392(2007)
- 3) G. O. Rissi, S. P. Singh, G. Burgess and J.
Singh, Packaging Technology and Science,
21(4), 231-246(2008)
- 4) V. Chonhenchob, S. P. Singh, J. Singh, S.
Sittipod, D. Swasdee and S.
Pratheepthinthong, Packaging Technology
and Science, 23(2), 101-109(2010)
- 5) V. Chonhenchob, S. P. Singh, J. Singh, J.
Stallings and G. Grewal, Packaging
Technology and Science, 25(1),
31-38(2012)
- 6) C. Bernad, A. Laspalas, D. González, J. L.
Núñez and F. Buil、Packaging
Technology and Science, 24(1),
1-14(2011)
- 7) 八木浩一、第9回 ITS シンポジウム
2010、pp. 394-399
- 8) K. Yagi, Proceedings of 17th ITS World
Congress, Busan, 2010

(原稿受付 2016年2月15日)

(審査受理 2016年8月8日)